

بهره‌گیری نیروگاه‌های بادی از قراردادهای مالی به منظور افزایش سود و کاهش ریسک

نوید یکتای^۱، فاطمه دبوری فریمانی^۲، مهتاب کفاش^۳، صالح فضائلی^۴ و محمد حسین جاویدی دشت بیاض^۵
^۱آزمایشگاه تجدیدساختار، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، yektay.navid@stu.um.ac.ir
^۲آزمایشگاه تجدیدساختار، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، fateme.daburifarimani@stu.um.ac.ir
^۳آزمایشگاه تجدیدساختار، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، mahtab.kaffash@stu.mail.um.ac.ir
^۴دانشکده‌ی برق، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، saleh.fazaeli@gmail.com
^۵دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، h-javidi@um.ac.ir

$\rho_{c.o.}$	قیمت اجرا در قرارداد اختیار خرید $(\frac{\$}{MWh})$
$Pr_{p.o.}$	بهای اختیار در قرارداد اختیار فروش $(\frac{\$}{MWh})$
$Pr_{c.o.}$	بهای اختیار در قرارداد اختیار خرید $(\frac{\$}{MWh})$
$E\{B\}$	امید ریاضی سود مزرعه‌ی بادی (\$)
$Std\{B\}$	انحراف معیار سود مزرعه‌ی بادی (\$)
a	ضریب هزینه‌ی عدم تعادل مثبت
b	ضریب هزینه‌ی عدم تعادل منفی

۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه‌ی مقاله

با توسعه‌ی تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی در سال‌های اخیر، هزینه‌ی احداث مزارع بادی بزرگ مرتباً کاهش یافته و در نتیجه، بر تعداد سایت‌هایی که استحصال انرژی باد در آن‌ها از نظر اقتصادی توجیه دارد، افزوده شده است. با کاهش هزینه‌ی احداث، قانون‌گذاران به تدریج حمایت‌های خود را از مزارع بادی کم کرده و اجازه می‌دهند این نیروگاه‌ها به عنوان بازیگران مستقل بازارهای برق، به رقابت پایاپای با دیگران پردازند. تولید مزارع بادی به دلیل خطای نسبتاً زیاد در پیش‌بینی سرعت باد، دارای عدم قطعیت شدیدی است [۱] که این امر مشکلاتی را در بهره‌برداری از سیستم قدرت به وجود می‌آورد. تا جایی که سهم تولید نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر منابع سیستم اندک باشد و در نتیجه، تأثیر عدم قطعیت تولید مزارع بادی در مقایسه با عدم قطعیت ناشی از بخش‌های دیگر زیاد نباشد؛ می‌توان از هزینه‌ی اضافی تحمیل شده به بهره‌بردار، ناشی از عدم قطعیت تولید بادی، صرف نظر کرد. با بالا رفتن سهم تولید نیروگاه‌های

چکیده- اخیراً در بسیاری از بازارهای برق، هزینه‌های ناشی از عدم تعادل تولید مزارع بادی به نحوی از مالک نیروگاه دریافت می‌شود. در نتیجه، سود مالک مزرعه‌ی بادی مورد تهدید قرار می‌گیرد. در این مقاله، فرض می‌شود که جهت مقابله با کاهش سود ناشی از اعمال هزینه‌ی عدم تعادل، مالک مزرعه‌ی بادی به استفاده از قراردادهای سلف، اختیار خرید و اختیار فروش روی می‌آورد. هدف وی، تعیین حجم بهینه‌ی هر یک از این قراردادها جهت افزایش سود انتظاری و کاهش ریسک است. در واقع، پیشنهاد کردن امید ریاضی سود در کنار کمینه کردن انحراف معیار آن به عنوان دو تابع هدف موازی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مالک نیروگاه بادی با استفاده از قراردادهای مالی می‌تواند به صورت چشم‌گیری در کنار افزایش سود انتظاری، ریسک خود را کاهش دهد.

کلمات کلیدی- عدم تعادل تولید، نیروگاه بادی، بازار لحظه‌ای، قرارداد اختیار، مدیریت ریسک.

P_{Max}	ظرفیت اسمی مزرعه‌ی بادی (MW)
E_G	انرژی تولیدی نیروگاه در بازه‌ی برنامه‌ریزی (MWh)
E_F	انرژی پیش‌فروش شده در قرارداد سلف (MWh)
$E_{p.o.}$	حجم قرارداد اختیار فروش (MWh)
$E_{c.o.}$	حجم قرارداد اختیار خرید (MWh)
E_o	حجم دو قرارداد اختیار خرید و اختیار فروش (MWh)
ρ_S	قیمت بازار لحظه‌ای $(\frac{\$}{MWh})$
ρ_F	قیمت انرژی پیش‌فروش شده در قرارداد سلف $(\frac{\$}{MWh})$
$\rho_{p.o.}$	قیمت اجرا در قرارداد اختیار فروش $(\frac{\$}{MWh})$

بادی، نیاز است مکانیزم‌هایی در بازار برق طراحی شود تا هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت تولید، از عامل به وجود آورنده‌ی آن اخذ شود. در برخی از بازارها، اضافه تولید مزارع بادی نسبت به مقدار برنامه‌ریزی شده، با قیمتی کم‌تر از قیمت بازار لحظه‌ای خریداری می‌شود و همچنین، در صورتی که نیروگاه نتواند به مقداری که اعلام کرده تولید داشته باشد، موظف است کمبود تولید را از بازار و با قیمتی بالاتر از قیمت لحظه‌ای خریداری کند.^۱ در نتیجه‌ی این سازوکار، سود مالک مزرعه‌ی بادی تهدید می‌شود. در این مقاله، قراردادهای مالی به‌عنوان راهکاری برای مقابله با کاهش سود و افزایش ریسک مالک نیروگاه بادی در چنین محیط‌هایی استفاده شده‌اند.

۲-۱- مرور ادبیات و نوآوری مقاله

همان‌طور که اشاره شد، به دلیل وجود عدم قطعیت شدید در تولید مزرعه‌ی بادی، سود مالک نیروگاه تهدید می‌شود. به منظور حل این مشکل، در [۲]، سه روش جهت کاهش تأثیر عدم قطعیت تولید نیروگاه بادی بر سود پیشنهاد شده است. روش اول، استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی در کنار نیروگاه بادی است. در مقالات [۳]، [۴] و [۵]، جنبه‌های مختلف این روش مورد مطالعه قرار گرفته است. روش دیگر، استفاده از روش‌های تصادفی جهت مدل‌سازی رفتار باد است. با استفاده از این مدل‌ها، عملکرد بهینه‌ی نیروگاه بادی در بازار فیزیکی برق مشخص می‌شود [۲، ۶ و ۷].

در روش سوم، از قراردادهای مالی اختیار به منظور جبران عدم قطعیت تولید نیروگاه بادی استفاده می‌شود. استفاده از پمپ‌های ذخیره‌کننده و بهره‌گیری از قراردادهای مالی جهت حذف کامل عدم قطعیت تولید در [۸] مقایسه شده است. این مقاله بیان می‌کند که با در نظر گرفتن هزینه‌ی بالای تجهیزات ذخیره‌کننده، استفاده از قراردادهای اختیار جهت پوشش دادن عدم قطعیت تولید در نیروگاه بادی به‌صرفه‌تر است. در [۹]، سود نیروگاه بادی با در نظر گرفتن امکان شرکت وی در بازار و انعقاد قرارداد سلف محاسبه شده است. در این مقاله، عدم قطعیت قیمت بازار لحظه‌ای به‌صورت متغیری وابسته به قیمت بازار سلف و توان لحظه‌ای خروجی نیروگاه بادی در نظر گرفته شده است.

تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی کاهش اثر عدم قطعیت تولید نیروگاه‌های بادی بر سود مالک آن انجام گرفته؛ اما در هیچ یک از آن‌ها، از قراردادهای اختیار به منظور افزایش سود انتظاری در کنار پوشش ریسک در محیط‌هایی که هزینه‌ی عدم تعادل با استفاده از مکانیزم بازار از نیروگاه بادی اخذ می‌شود، استفاده نشده است.

در این مقاله، فرض می‌شود که مالک مزرعه‌ی بادی جهت مقابله با کاهش سود ناشی از اعمال هزینه‌ی عدم تعادل، به استفاده از قراردادهای

سلف، اختیار خرید و اختیار فروش روی می‌آورد. هدف، تعیین حجم بهینه‌ی هر یک از قراردادها جهت افزایش سود انتظاری و کاهش ریسک مزرعه‌ی بادی است. در واقع، بیشینه کردن امید ریاضی سود در کنار کمینه کردن انحراف معیار آن را به عنوان دو تابع هدف موازی در نظر گرفته‌ایم و سپس، با تغییر پارامترهای کنترلی مسأله، یعنی حجم هر یک از قراردادها، جبهه‌ی پرتو‌ی مربوط به این بهینه‌سازی را بدست آورده‌ایم. نکته‌ی جالب این‌که هر نقطه‌ی جبهه‌ی پرتو با یک مقدار مشخص از مجموع حجم دو قرارداد اختیار خرید و اختیار فروش (یعنی E_O از رابطه‌ی (۱)) تناظر یک به یک دارد. به عبارت دیگر، به ازای یک E_O مشخص، تنها و تنها یک نقطه در فضای متغیرهای کنترلی، یعنی فضای ایجاد شده به ازای $(E_F, E_{C.O.}, E_{P.O.})$ های مختلف، بهینه‌ی پرتو است.

$$E_{C.O.} + E_{P.O.} = E_O \quad (1)$$

اگر E_O برابر هر یک از اعداد متعلق به مجموعه‌ی صفر تا ظرفیت تولید مزرعه‌ی بادی در نظر گرفته شود، می‌توان با حداکثرسازی سود انتظاری و یا حداقل‌سازی انحراف معیار سود، هنگامی که رابطه‌ی (۱) به عنوان قید بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، به تمام جبهه‌ی پرتو دست یافت. با افزایش E_O ، امید ریاضی و ریسک سود افزایش می‌یابد. بنابراین، با بهره‌گیری از قراردادهای اختیار، سود انتظاری در قبال پذیرفتن سطح بالاتری از ریسک افزایش می‌یابد. این انگیزه جهت انعقاد قرارداد اختیار، یعنی افزایش امید ریاضی سود در کنار پذیرش ریسک بیش‌تر، درست بر خلاف انگیزه‌های رایج در انعقاد قرارداد اختیار است که هدف اصلی در آن کاهش ریسک در ازای سود انتظاری کم‌تر است.

در این مقاله، به‌منظور دستیابی به عملکرد بهینه‌ی نیروگاه، از روش جستجوی کامل فضا بر روی متغیرهای کنترلی استفاده می‌کنیم. با مشخص بودن حجم هر یک از قراردادها و مقادیر پارامترهای تصادفی، یعنی تولید نیروگاه بادی و قیمت لحظه‌ای، سود نیروگاه مشخص خواهد شد. می‌توان با استفاده از روش مونت کارلو، تابع چگالی احتمال سود را در هر نقطه از فضای متغیرهای کنترلی تعیین نمود و سپس، امید ریاضی و انحراف معیار سود را در آن نقطه مشخص کرد. این روش، با توجه به ابعاد مسئله، کافی بوده و نیاز نیست از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو بهره گرفت.

۳-۱- ساختار مقاله

در بخش دوم مقاله، قراردادهای سلف، اختیار خرید و اختیار فروش بررسی می‌شوند. سپس در بخش سوم، مفهوم عدم تعادل و روش‌های اختصاص هزینه‌های ناشی از آن به مزارع بادی شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، مسأله‌ی بهره‌گیری از قراردادهای مالی به منظور

^۱ روش‌های اختصاص هزینه‌ی عدم تعادل به شکل مختصر در بخش ۳ معرفی خواهد شد.

افزایش سود و کاهش ریسک تعریف شده و در بخش پنجم، شبیه‌سازی‌های مربوطه مورد بررسی قرار می‌گیرند. نهایتاً، در بخش ششم نتایج مقاله جمع‌بندی می‌گردد.

۲- معرفی قراردادهای مالی

در این بخش، سعی کرده‌ایم به شکل شفاف، منظور خود را از سه نوع قرارداد سلف، اختیار خرید و اختیار فروش بیان کنیم.

در قراردادهای سلف، خریدار و فروشنده متعهد می‌شوند مقدار مشخصی کالا را در یک قیمت معین در تاریخ مشخصی در آینده (تاریخ تحویل^۳) معامله کنند [۱۰]. قرارداد سلف یک قرارداد قطعی محسوب می‌شود؛ یعنی تحویل کالا بدون قید و شرط است و چنانچه فروشنده نتواند حجم توافق شده از کالا را در تاریخ تحویل ارائه کند، باید کمبود کالای خود را از طریق بازار لحظه‌ای جبران کند. همچنین، اگر خریدار نتواند تمام کالای ذکر شده در قرارداد را دریافت کند، باید مازاد آن را در بازار لحظه‌ای به فروش برساند. به بیان دیگر، بازار لحظه‌ای عدم تعادل‌ها را جبران می‌کند.

نوع دیگری از قراردادها، قراردادهای مشروط هستند که با افزودن اختیار به قراردادهای سلف ایجاد می‌شوند. این قراردادها در دو شکل کلی اختیار خرید و اختیار فروش تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۱].

در قراردادهای اختیار خرید، دارنده‌ی اختیار این امکان را دارد که میزان مشخصی کالا را در یک قیمت معین که آن را قیمت اجرا^۴ می‌نامند، بخرد. به شکل مشابه، دارنده‌ی قرارداد اختیار فروش قادر است میزان مشخصی کالا را با قیمت اجرا بفروشد. با توجه به قیمت بازار لحظه‌ای، مالک قرارداد تصمیم می‌گیرد که حقوق قراردادی خود را به اجرا بگذارد یا خیر. در هر دو نوع قرارداد اختیار، دارنده‌ی اختیار، مبلغ غیرقابل برگشتی به نام بهای اختیار^۵ را به فروشنده‌ی اختیار پرداخت می‌کند. با این عمل، دارنده‌ی اختیار ریسک خود را در مقابل خرید کالا با قیمت بالاتر از بازار لحظه‌ای و یا فروش کالا با قیمت پایین‌تر به بازار لحظه‌ای کاهش می‌دهد [۱۱].

۳- عدم تعادل

همان‌طور که گفته شد، تولید مزارع بادی چندان قابل پیش‌بینی نیست. خطای پیش‌بینی تولید در این نیروگاه‌ها برای بازه‌های زمانی زیر ۸ ساعت معمولاً کم‌تر از ۱۰ درصد است [۱۲] درحالی‌که با افزایش زمان پیش‌بینی، خطا به شدت افزایش می‌یابد. پیش‌بینی غیردقیق تولید مزارع بادی موجب عدم تعادل بین تولید و مصرف خواهد شد که این امر هزینه‌های بهره‌برداری را به دلیل نیاز به رزرو بیش‌تر افزایش می‌دهد. در بسیاری از کشورها، این هزینه‌ها از طریق اعمال جریمه بر واحدهای به وجود آورنده‌ی عدم تعادل

جبران می‌شود. در کشورهایی که ظرفیت نصب شده‌ی نیروگاه‌های بادی در آن‌ها بالاست، عدم تعادل تولید همواره به عنوان یک مشکل اساسی برای بهره‌برداران شبکه مطرح است. در چنین محیط‌هایی، نیروگاه‌های بادی به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از عدم تعادل و کسب درآمد بیش‌تر، همواره به دنبال دست‌یابی به ابزارهای کارآمدتر در پیش‌بینی تولید هستند [۱۳-۱۴].

۳-۱- هزینه‌ی عدم تعادل

عدم تعادل موجب بروز ناپایداری در سیستم قدرت شده و در صورت تداوم آن، شرایط شبکه تا قطع بار و ورود سیستم به وضعیت اضطرار پیش می‌رود. از این‌رو، بهره‌برداران ناگزیر هستند همواره مقداری رزرو تنظیم‌کننده‌ی توان برای سیستم در نظر بگیرند. با توجه به عدم قطعیت شدید تولید در نیروگاه‌های بادی، حجم رزرو مورد نیاز در سیستم‌هایی که ضریب نفوذ تولید بادی در آن‌ها چشم‌گیر است، افزایش می‌یابد که موجب شده روش‌های ویژه‌ای جهت اختصاص هزینه‌ی عدم تعادل به مزارع بادی در بازارهای برق پیشنهاد شود.

۳-۲- قیمت‌گذاری سرویس عدم تعادل

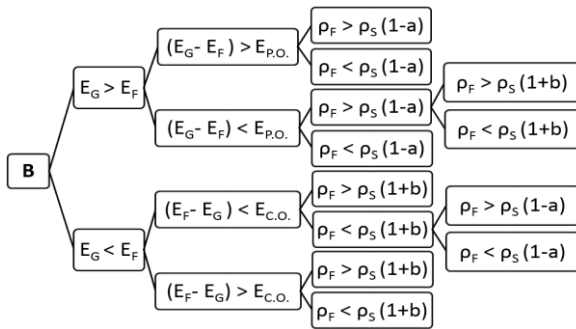
هنوز هم در بسیاری از سیستم‌های قدرت رزرو جزو خدمات جانبی به حساب می‌آید و هزینه‌ی آن از مصرف‌کننده دریافت می‌شود. با افزایش سهم تولید مزارع بادی در سیستم‌های قدرت، قیمت‌گذاری سرویس جبران عدم تعادل، به روش‌های دیگری انجام می‌شود. به عنوان نمونه، در جدول ۱ نحوه‌ی قیمت‌گذاری هزینه‌ی ایجاد عدم تعادل در بلژیک شرح داده شده است. در این جدول، منظور از عدم تعادل مثبت/منفی شرایطی است که تولید بیش‌تر/کم‌تر از مقدار برنامه‌ریزی شده باشد.

جدول ۱: قیمت‌گذاری عدم تعادل در بلژیک برای مزارع بادی دور از ساحل [۱۵]

	عدم تعادل کم‌تر از ۳۰٪	عدم تعادل بیش‌تر از ۳۰٪	
		عدم تعادل سیستم مثبت باشد	عدم تعادل سیستم منفی باشد
عدم تعادل مثبت	انرژی تولید شده‌ی اضافی با ۰/۹ قیمت بازار خریداری می‌شود.	انرژی تولید شده‌ی اضافی با قیمتی کم‌تر از ۰/۹ قیمت بازار خریداری می‌شود.	انرژی تولید شده‌ی اضافی با ۰/۹۲ قیمت بازار خریداری می‌شود.
عدم تعادل منفی	مسئول عدم تعادل کمبود انرژی تولیدی را با ۱/۱ قیمت بازار خریداری می‌کند.	مسئول عدم تعادل کمبود انرژی تولیدی را با ۱/۰۸ قیمت بازار خریداری می‌کند.	مسئول عدم تعادل کمبود انرژی تولیدی را با قیمتی بیش‌تر از ۱/۰۸ قیمت بازار خریداری می‌کند.

۴- تعریف مسأله

مالک یک مزرعه‌ی بادی با ظرفیت نامی P_{max} قصد دارد برای فروش انرژی تولیدی نیروگاه خود در یک بازه‌ی زمانی مشخص در آینده برنامه‌ریزی کند. فرض کنید گزینه‌های زیر در دسترس است:



شکل ۱: سناریوهای مختلف جهت محاسبه‌ی سود مزرعه‌ی بادی

۵- نتایج شبیه‌سازی

بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده در بخش قبل، عملکرد بهینه‌ی یک مزرعه‌ی بادی فرضی با $P_{max} = 100 MW$ واقع در شهرستان خواف استان خراسان رضوی، تعیین می‌شود. تولید این نیروگاه یک متغیر تصادفی است که می‌توان با استفاده از روش‌های پیش‌بینی سرعت باد، یک تابع چگالی احتمال به آن نسبت داد. تعیین این تابع چگالی احتمال از حوصله‌ی این مقاله خارج است و ما به منظور سادگی، فرض کردیم خواص آماری فرآیند تصادفی مدل‌کننده‌ی سرعت باد در طول روزهای مختلف ایستان است. با استفاده از این فرض، یک تابع چگالی احتمال بر اساس داده‌های مربوط به سرعت باد موجود در [۱۶] برای تولید مزرعه‌ی بادی مذکور نسبت داده شده است. جهت تبدیل سرعت باد به انرژی تولیدی نیروگاه، فرض شده است که ارتفاع توربین‌های نیروگاه ۴۰ متر بوده و منحنی توان تولیدی توربین بر حسب سرعت باد مطابق شکل ۲ باشند. همچنین بازه‌ی برنامه‌ریزی یک ساعت و متغیرهای a و b برابر با $1/10$ در نظر گرفته شده‌اند. امید ریاضی و انحراف معیار بازار لحظه‌ای (با فرض توزیع نرمال) به ترتیب برابر ۲۰ و ۱ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است. با فرض بازار بدون قابلیت دلالتی^۱، می‌توان به روابط (۲) و (۳) دست یافت.

$$\rho_F = \rho_{C.O.} = \rho_{P.O.} = E\{\rho_S\} = 20 \$/MWh \quad (۲)$$

$$Pr_{P.O.} = Pr_{C.O.} = 0.4 \$/MWh \quad (۳)$$

با داشتن تابع چگالی احتمال تولید مزرعه، امید ریاضی و انحراف معیار قیمت بازار لحظه‌ای، $Pr_{P.O.}$ ، $Pr_{C.O.}$ ، $\rho_{P.O.}$ ، $\rho_{C.O.}$ ، ρ_F ، می‌توان برای هر نقطه در فضای پارامترهای کنترلی؛ یعنی برای هر $(E_F, E_{C.O.}, E_{P.O.})$ مشخص، با استفاده از روش مونت کارلو یک تابع چگالی احتمال برای سود بدست آورد.

در شکل ۴ امید ریاضی و انحراف معیار سود، به ازای چند حالت در فضای متغیرهای کنترلی رسم شده است. مطابق شکل ۴-الف، اگر

الف) مالک مزرعه می‌تواند با انعقاد یک قرارداد سلف، مقدار E_F از انرژی تولیدی در بازه‌ی زمانی مورد نظر را به قیمت ρ_F پیش‌فروش کند. اگر انرژی تولیدی مزرعه (E_G) ، بیش از حجم قرارداد پیش‌فروش (E_F) باشد، مازاد انرژی تولیدی به قیمت $\rho_S * (1-a)$ در بازار لحظه‌ای به فروش می‌رسد و در صورتی که $E_F < E_G$ باشد، کمبود انرژی تولیدی یعنی $E_G - E_F$ به قیمت $\rho_S * (1+b)$ از بازار لحظه‌ای تأمین می‌شود.

ب) برای مالک مزرعه‌ی بادی، این امکان فراهم است تا با پرداخت مبلغ $Pr_{C.O.}$ ، اختیار خرید مقدار دلخواهی انرژی به قیمت $\rho_{C.O.}$ را در بازه‌ی زمانی مذکور بدست آورد. وی همچنین می‌تواند با پرداخت $Pr_{P.O.}$ ، اختیار فروش انرژی به قیمت $\rho_{P.O.}$ را از آن خود کند.

$Pr_{P.O.}$ ، $Pr_{C.O.}$ ، $\rho_{P.O.}$ ، $\rho_{C.O.}$ و ρ_F معلوم بوده و یک تابع توزیع احتمال برای انرژی تولیدی نیروگاه پیش‌بینی شده است. همچنین، امید ریاضی و واریانس قیمت بازار لحظه‌ای (ρ_S) برآورد شده است. سؤال این است که حجم بهینه‌ی قراردادهای سلف، اختیار خرید و اختیار فروش، یعنی $(E_F, E_{C.O.}, E_{P.O.})$ ، جهت حداکثر شدن سود و حداقل شدن ریسک مالک مزرعه‌ی بادی چقدر باشد؟

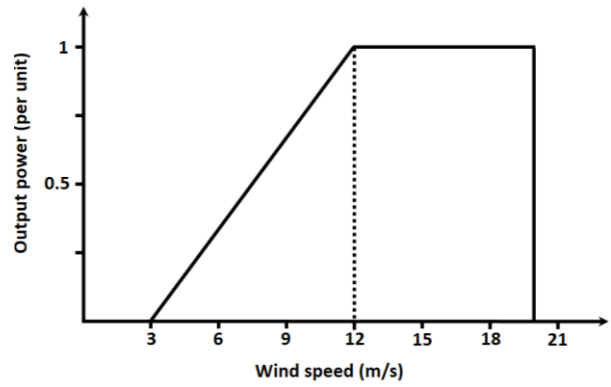
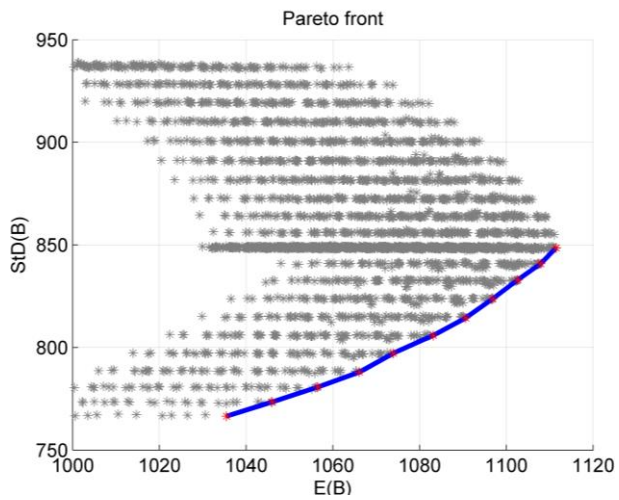
۴-۱- محاسبه‌ی سود

سود (B) حاصل تفاضل درآمد و هزینه است. در مسأله‌ی حاضر، دو نوع درآمد برای مزرعه‌ی بادی قابل تصور است:

۱- درآمد حاصل از فروش انرژی به بازار لحظه‌ای، قرارداد سلف یا قرارداد اختیار فروش.

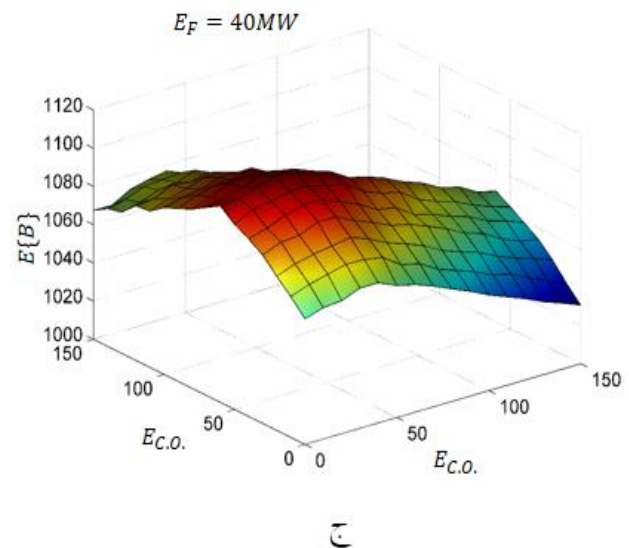
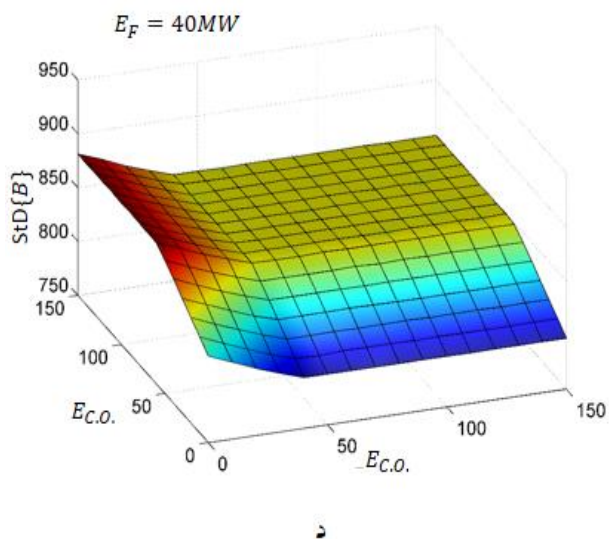
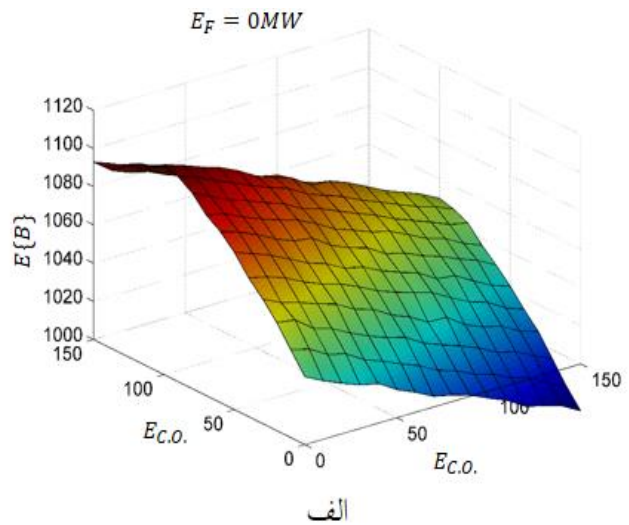
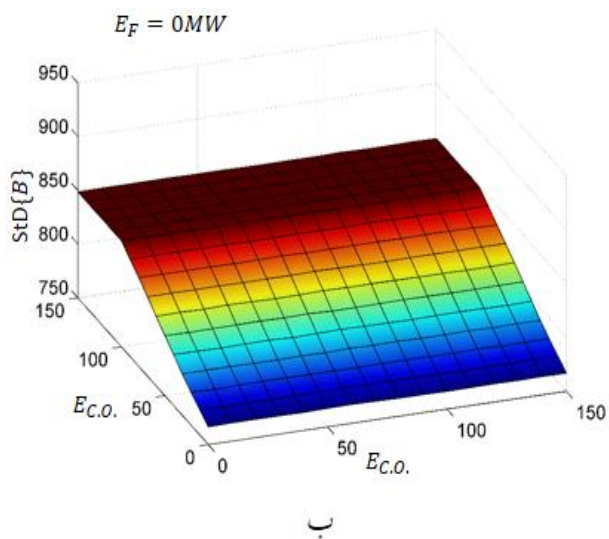
۲- اگر $\rho_{C.O.} < \rho_S$ باشد، مالک نیروگاه می‌تواند با خرید توان به قیمت $\rho_{C.O.}$ از قرارداد اختیار خرید و فروش آن به بازار لحظه‌ای درآمد کسب کند. این درآمد زمانی غیر صفر خواهد بود که مقداری از قرارداد اختیار خرید باقی مانده باشد. مالک نیروگاه بادی به شکل مشابه می‌تواند با استفاده از قرارداد اختیار فروش در حالاتی کسب درآمد کند.

از سوی دیگر، هزینه‌ها برابر است با بهای اختیار قراردادهای اختیار یعنی $Pr_{P.O.} * E_{P.O.} + Pr_{C.O.} * E_{C.O.}$ به علاوه‌ی هزینه‌ی احتمالی تأمین انرژی از بازار لحظه‌ای یا از قرارداد اختیار خرید. با توجه به شرایط مختلف، سناریوهای متفاوتی مطابق شکل ۱، رخ می‌دهد.



شکل ۲: منحنی توان تولیدی توربین های مزرعه‌ی بادی بر حسب سرعت باد

شکل ۳: جبهه‌ی پرتو بدست آمده ناشی از حداکثرسازی امید ریاضی و حداقل سازی انحراف معیار سود مزرعه‌ی بادی



شکل ۴: امید ریاضی و انحراف معیار سود مزرعه‌ی بادی به ازای $E_F = 40 MW$ و $E_F = 0 MW$.

۶- نتیجه‌گیری

با افزایش سهم تولید مزارع بادی در سیستم‌های قدرت، هزینه‌های ناشی از عدم تعادل تولید از مالک نیروگاه دریافت می‌شود و در نتیجه، سود وی مورد تهدید قرار می‌گیرد. به منظور مقابله با این تهدید، می‌توان از قراردادهای مالی سلف، اختیار خرید و اختیار فروش بهره گرفت. در مقاله‌ی حاضر، حجم بهینه‌ی هر یک از این قراردادها به شکل یک جبهه‌ی پرتو بدست آمده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، مشخص می‌شود که با بهره‌گیری از قراردادهای اختیار، سود انتظاری در قبال پذیرفتن سطح بالاتری از ریسک افزایش می‌یابد. این انگیزه جهت انعقاد قرارداد اختیار، یعنی افزایش امید ریاضی سود در کنار پذیرش ریسک بیشتر، درست بر خلاف انگیزه‌های رایج در انعقاد قرارداد اختیار است که هدف اصلی در آن کاهش ریسک در ازای سود انتظاری کم‌تر است.

مراجع

- [1] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J Pérez-Ruiz, "Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 900-910, 2009.
- [2] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J Pérez-Ruiz, "Short-term trading for a wind power producer," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 554-564, 2010.
- [3] E.D. Castronuovo, J. Usaola, Coordination Between Wind Farms and Storage Devices, Technical and Economic Aspects. Handbook of Wind Power Systems. Springer Berlin Heidelberg, pp. 591-622, 2013.
- [4] G. Koepfel, K. Magnus, "Improving the network infeed accuracy of non-dispatchable generators with energy storage devices," Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 12, pp. 2024-2036, 2008.
- [5] M. Korpaas, T.H. Arne, H. Ragne, "Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 25, No. 8, pp. 599-606, 2003.
- [6] A. Botterud, et al, "Wind power trading under uncertainty in LMP markets," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 894-903, 2012.
- [7] T. Dai, O. Wei, "Trading Wind Power in a Competitive Electricity Market Using Stochastic Programming and Game Theory," IEEE Trans. Sustainable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 805-815, 2013.
- [8] K. W. Hedman, B.S. Gerald, "Comparing hedging methods for wind power: Using pumped storage hydro units vs. options purchasing," Int. Conf on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS, 2006.
- [9] C.J. Dent, W.B. Janusz, F.H. Benjamin, "Opportunity cost bidding by wind generators in forward markets: Analytical results," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1600-1608, 2011.
- [10] R.A. Jarrow, S.O. George, "Forward contracts and futures contracts," Journal of Financial Economics, Vol.9, No.4 pp. 373-382, 1981.
- [11] D.S.Kirschen, and S. Goran, Fundamentals of power system economics. John Wiley & Sons, 2004.
- [12] J. Usaola, A. Jorge, "Bidding wind energy under uncertainty," Int. Conf. on Clean Electrical Power (ICCEP), 2007.
- [13] A. Abbasy, V. Reinier AC, R. A. Hakvoort, "Effect of integrating regulating power markets of northern europe on total balancing costs," Conf. on PowerTech, Bucharest, 2009.
- [14] M. Lange, F. Ulrich, "New developments in wind energy forecasting," Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [15] K.D. Vos, J. Driesen, "Balancing management mechanisms for intermittent power sources - A case study for wind power in Belgium," IEEE 6th International Conference on the European, pp. 1-6, 2009.
- [16] <http://www.sun.org.ir/fa/wind>

مزرعه‌ی بادی یک قرارداد سلف با حجم صفر منعقد نماید، امید ریاضی سود زمانی حداکثر می‌شود که در کنار آن یک قرارداد اختیار فروش به حجم ظرفیت تولید نیروگاه منعقد کند. در عمل، نسبت پارامتر a به $Pr_{P.O.}$ تعیین کننده‌ی مقدار بهینه‌ی $Pr_{P.O.}$ خواهد بود. واضح است که اگر رابطه‌ی (۴) برقرار باشد، هیچ توجیهی برای انعقاد قرارداد اختیار فروش وجود ندارد؛ زیرا هزینه‌ای که بابت قرارداد اختیار فروش پرداخت می‌شود، چه این قرارداد اجرا شود و چه نشود، از عایدی ناشی از آن، یعنی $a \times \rho_s$ ، بیش‌تر است.

$$Pr_{C.O.} > a \times \rho_s \quad (۴)$$

اگر $E_F = 0$ ، توجیهی وجود ندارد که نیروگاه قرارداد اختیار خریدی بیش از صفر مگاوات خریداری کند. دلیل این است که اگر نیروگاه قرارداد اختیار خرید با حجم $E_{C.O.} > 0$ ببندد، تنها راهی که می‌تواند از این قرارداد سود کند، این است که قیمت بازار بیش از $\rho_{C.O.} + Pr_{C.O.}$ باشد و چون بازار بدون قابلیت دلالتی فرض شده، امید ریاضی این سود صفر است. وقتی $E_F = 0$ ، مطابق شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۴-ب، $E_{C.O.}$ تأثیر چندانی بر انحراف معیار سود ندارد، در حالی که با افزایش $E_{P.O.}$ ، انحراف معیار سود تا وقتی $E_{P.O.}$ به ظرفیت نامی نیروگاه برسد به شکل تقریباً خطی افزایش می‌یابد. انعقاد قراردادهای اختیار فروش با حجم بیش‌تر از حداکثر انرژی قابل تولید توسط نیروگاه بادی، که در این جا ۱۰۰ مگاوات ساعت است، تأثیری بر انحراف معیار سود ندارد.

در شکل‌های ۴-ج و ۴-د، تأثیر افزایش E_F بر امید ریاضی و انحراف معیار سود نشان داده شده است. وقتی $P_F \neq 0$ ، جهت رسیدن به حداکثر امید ریاضی سود باید قرارداد اختیار خریدی با مقدار $E_{C.O.} = E_F$ و قرارداد اختیار فروشی با مقدار $E_{P.O.} = (100 - E_F)$ بسته شود. در یک E_F مشخص، انحراف معیار سود با افزایش $E_{P.O.}$ از صفر تا مقدار $(100 - E_F)$ به شکل خطی افزایش یافته و سپس، با توجه به تحلیلی که پیش‌تر بیان شد، ثابت می‌شود. همچنین با افزایش $E_{C.O.}$ از صفر تا E_F ، انحراف معیار سود به شکل خطی افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌شود. در شکل ۳، امید ریاضی و انحراف معیار سود به همراه جبهه‌ی مربوطه، در یک صفحه رسم شده است. با بررسی نقاط جبهه‌ی پرتو مشاهده می‌شود که در همه‌ی این نقاط $E_{C.O.} = E_F$ است؛ زیرا a به قدری بزرگ است که نیروگاه ترجیح می‌دهد به منظور دوری از ریسک خرید از بازار لحظه‌ای، به ازای پیش‌فروش هر یک مگاوات ساعت انرژی، ۱ مگاوات ساعت قرارداد اختیار خرید بیش‌تری منعقد نماید. جالب این است که در هر یک از نقاط بهینه‌ی پرتو، E_O برابر با یک مقدار منحصر به فرد است. به عبارت دیگر، نقاط بهینه‌ی پرتو از معادلات (۵) قابل استحصال هستند.

$$Max E\{B\} \quad (۵)$$

$$s. t. \quad E_O = c$$