

استراتژی بهینه پیشنهاددهی تولیدکننده شامل ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده در بازارهای انرژی و ذخیره با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی

ابراهیم اکبری^۱، رحمت‌الله هوشمند^{۲*}، مهدی قلی‌پور^۳، معین پرستگاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

e.akbari@eng.ui.ac.ir

^۲ استاد گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

^۴ استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

parastegari@eng.ui.ac.ir

چکیده: با تجدید ساختار صنعت برق و همچنین گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت‌های موجود در سیستم افزایش یافته‌اند. این امر سبب افزایش توجه به روش‌های برنامه‌ریزی توسط تولیدکنندگان شده است. در این مقاله، روشی جدید برای برنامه‌ریزی مبتنی بر سود یک شرکت تولیدکننده (GenCo) متشکل از ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده (CAES) به همراه نیروگاه‌های بادی و حرارتی ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت قیمت‌های انرژی و ذخیره چرخان، مقدار ذخیره فراخوانی شده، هزینه عدم توازن و توان تولیدی واحد بادی، از بهینه‌سازی تصادفی استفاده شده است. این برنامه‌ریزی برای شرکت تولیدکننده در بازارهای روز-پیش انرژی و ذخیره چرخان ارائه شده است. روش پیشنهادی ابتدا روی یک سیستم نمونه از مقاله دیگری اعمال شده که مقایسه نتایج آن با نتایج روش قبلی، بیانگر قابلیت روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی واحدهای CAES است. در نهایت از اطلاعات یک سیستم قدرت واقعی برای ارائه نتایج تکمیلی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: پیشنهاددهی بهینه، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، بهینه‌سازی تصادفی.

۱. مقدمه

(CAES)^۴ یکی از معدود روش‌های ذخیره‌سازی قابل پیاده‌سازی و بهره‌برداری در ابعاد بزرگ است. این ذخیره‌ساز، مقدار زیادی انرژی الکتریکی را در قالب هوای با فشار بالا در مخازن زیرزمینی (مانند غارهای نمکی) یا مخازن سطح زمین (مخازن تحت فشار) ذخیره می‌کند تا در هنگام نیاز، از آن برای چرخاندن توربین و تولید برق استفاده کند. این فناوری می‌تواند توان در مقیاس شبکه به میزان صدها مگاوات را برای چندین ساعت تأمین کند [۱۶]. CAES چرخه فشرده‌سازی و انبساط یک توربین گازی معمولی را به دو فرایند مجزا تقسیم، و انرژی را به شکل انرژی پتانسیل کشسانی هوای فشرده ذخیره می‌کند [۱۷]. به‌رغم اینکه تنها دو نمونه عملی بزرگ‌مقیاس از آن در حال بهره‌برداری می‌باشد، مطالعه برای ساخت واحدهای جدید و همچنین برنامه‌ریزی آن در شرایط بازار در سالیان اخیر بسیار مورد توجه بوده است. استراتژی پیشنهاددهی^۵ مقید به ریسک مبتنی بر IGDT برای CAES تجاری در [۱۵] ارائه شده است. مرجع [۱۸] نیز از روش IGDT برای برنامه‌ریزی مقید به ریسک CAES مبتنی بر نیروگاه خورشیدی استفاده کرده و بازیابی گرمای تلف‌شده و بازار انرژی گرمایی را نیز در نظر گرفته است. مسئله برنامه‌ریزی CAES در مرجع [۱۳] با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم حل شده است. همچنین در مرجع [۱۲]، استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم به‌منظور برنامه‌ریزی بهینه یک GenCo دارای نیروگاه‌های حرارتی و CAES قیمت‌پذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت بازار انرژی روز-پیش و با هدف ماکزیم کردن سود، پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹] نیز استفاده از یک روش برنامه‌ریزی مقاوم تطبیقی برای نیروگاه‌های بادی و CAES پیشنهاد شده که درجه مقاوم بودن آن توسط کاربر قابل کنترل است. برنامه‌ریزی حضور CAES در بازارهای انرژی و ذخیره‌های چرخان و غیرچرخان با در نظر گرفتن قیود ترمودینامیکی CAES و عدم قطعیت قیمت در مرجع [۱۰] انجام شده است. در مرجع [۲۰] یک روش برای برنامه‌ریزی CAES به‌منظور حضور همزمان در بازارهای انرژی، ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها ارائه شده است. بهینه یک ریزشبهه دارای CAES در مرجع [۲۱] انجام شده است. برنامه‌ریزی بهینه واحدهای بادی، فتولتائیک و CAES در مرجع [۲۲] مورد بررسی قرار گرفته است. بهره‌برداری بهینه واحدهای گازی، بادی و CAES بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها، در مرجع [۲۳] مطالعه شده است. در مرجع [۱۱] برنامه‌ریزی همزمان یک تولیدکننده دارای واحدهای بادی، حرارتی و CAES در بازار انرژی روز-پیش و با در نظر گرفتن پاسخ تقاضا انجام شده است. این روش روی بازار انرژی و

پس از تجدید ساختار صنعت برق، هر نیروگاه موظف به تعیین میزان توان تولیدی خود در هر ساعت شده است و باید این امر را به‌گونه‌ای انجام دهد تا سود آن ماکزیمم گردد. در این شرایط، اگر نیروگاهی توان تعهدشده را تأمین نکند، ملزم به پرداخت جریمه خواهد شد. این امر باعث شده است تولیدکننده‌ها در برنامه‌ریزی نیروگاه‌های خود برای شرکت در بازار برق با هدف ماکزیمم کردن سود، توجه بیشتری معطوف کنند.

برنامه‌ریزی مشارکت واحدها تحت تأثیر عدم قطعیت‌های مختلفی مانند عدم قطعیت قیمت انرژی، توان تولیدی واحد بادی، میزان آب جاری و تابش خورشید قرار دارد [۸-۱]. با توجه به ماهیت متغیر و غیرقطعی انرژی باد، توان تولیدشده واحدهای بادی نوسان زیادی داشته و یا در شرایطی همانند وزش شدید یا حتی خیلی ملایم باد، تولید توان الکتریکی توسط توربین متوقف می‌شود [۹]. با توجه به وجود جریمه عدم تأمین توان در شرایط بهره‌برداری بازار، سود نیروگاه‌های بادی از شرکت در بازار برق، در اثر عدم قطعیت توان بادی، به شدت کاهش می‌یابد [۸-۱]. اگر نیروگاه‌های بادی با سایر نیروگاه‌ها هماهنگ شوند، می‌توان سود مجموعه را از طریق کاهش جریمه عدم تأمین توان و همچنین دادوستد انرژی افزایش داد. برای مثال، هماهنگی واحدهای بادی با واحدهای تولیدی دیگر در مراجع [۳-۵ و ۷] بررسی شده است. همچنین با روش‌های برنامه‌ریزی در حضور عدم قطعیت، می‌توان سود واحدهای بادی را در این شرایط افزایش داد. روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی مشارکت مبتنی بر سود در حضور عدم قطعیت پارامترها پیشنهاد شده است؛ برنامه‌ریزی تصادفی یکی از پرکاربردترین آن‌هاست که از طریق تولید سناریوهای مختلف برای پارامترهای غیرقطعی، برنامه‌ریزی را به‌گونه‌ای انجام می‌دهد که امید ریاضی سود برای همه سناریوها ماکزیمم شود [۱-۶، ۸، ۱۰ و ۱۱]. بهینه‌سازی مقاوم^۱ [۱۲] و [۱۳]، بهینه‌سازی بازه‌ای^۲ [۱۴] و نظریه تصمیم شکاف اطلاعاتی (IGDT)^۳ [۱۵] از دیگر روش‌هایی هستند که برای برنامه‌ریزی مشارکت مبتنی بر سود در حضور عدم قطعیت پارامترها به کار رفته‌اند.

علاوه بر این موارد، در صورتی که امکان ذخیره‌سازی انرژی بادی در ساعت‌های وجود مازاد توان بادی و تولید انرژی توسط ذخیره‌سازها در ساعت‌های کمبود توان بادی مهیا باشد، می‌توان از وقوع جریمه‌های سنگین برای واحدهای بادی پیشگیری کرد [۱ و ۸]. از میان روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

شرکت قیمت پیشنهادی خود را صفر یا اندکی منفی در نظر می‌گیرد که از پذیرش پیشنهاد خود مطمئن باشد و پس از آن به اندازه قیمت تسویه شده بازار پرداخت به آن صورت گیرد [۸].

۲.۲. توصیف عدم قطعیت^۵

۱.۲.۲. متغیرهای غیرقطعی

پارامترهای غیرقطعی پارامترهایی هستند که پیش از وقوع نمی‌توان به طور حتم از مقدار آن‌ها اطلاع داشت. در اینجا پارامترهای غیرقطعی عبارتند از: قیمت DAM، قیمت عدم توازن مثبت و منفی در BM، قیمت ظرفیت و انرژی در RM، میزان تولید واحد بادی و میزان ذخیره چرخان فراخوانی شده. مقادیر این متغیرها می‌توانند به صورت فرایند تصادفی^۶ توصیف شده و از طریق سناریوها مدل‌سازی شوند.

فرض می‌شود که مقادیر تحقق پارامترهای قیمت‌های DAM و ظرفیت ذخیره چرخان پس از بسته شدن بازار DA به صورت کامل برای ۲۴ ساعت روز بعد مشخص شود. اما مقادیر تحقق سایر پارامترهای غیرقطعی مربوط به هر ساعت، تنها در ابتدای همان ساعت مشخص خواهند شد.

۲.۲.۲. برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای

برنامه‌ریزی تصادفی (SP) با مسائل مربوط به تصمیم‌گیری‌های بهینه تحت عدم قطعیت سروکار دارد. در اینجا از روش برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر تشکیل سناریو استفاده می‌شود. بدین صورت که با فرض مشخص بودن تعدادی تحقق سناریوی محتمل برای پارامترهای غیرقطعی، تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای انجام می‌شود که همه قیود به‌ازای تمام سناریوها برقرار بوده و مقدار میانگین سود همه سناریوها ماکزیمم شود. پرکاربردترین مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی شامل دو مرحله‌اند که در آن‌ها دو گروه از تصمیمات باید اتخاذ شوند [۴]:

- تصمیم‌های مرحله اول: در خصوص متغیرهای تصمیم مرحله اول باید پیش از تحقق متغیرهای تصادفی تصمیم‌گیری شود؛ از این رو به آن‌ها متغیرهای «اینجا و اکنون»^۷ می‌گویند.
 - تصمیم‌های مرحله دوم: متغیرهای تصمیم مرحله دوم به تحقق سناریوها وابسته بوده و از تصمیمات مرحله اول تأثیر می‌پذیرند. بنابراین به این متغیرها «صبر کن و ببین»^۸ می‌گویند.
- شایان ذکر است که با توجه به توضیحات ارائه شده، در برنامه‌ریزی

با هدف حداقل نمودن هزینه لازم برای تأمین بار صورت گرفته و بازار توازن مدنظر نبوده است. همچنین مکانیزم جریمه‌ای برای انحراف از توان مورد تعهد در نظر گرفته نشده است. در نهایت، ترکیب روش‌های بهینه‌سازی مقاوم و برنامه‌ریزی تصادفی در مراجع [۲۴ و ۲۵] برای حل مسئله برنامه‌ریزی CAES مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله، روش جدیدی برای برنامه‌ریزی همزمان ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده (CAES) به همراه نیروگاه‌های بادی و حرارتی، به منظور کسب ماکزیمم سود با استفاده از بهینه‌سازی تصادفی ارائه شده است. در این برنامه‌ریزی، مشارکت شرکت تولیدکننده در بازارهای انرژی روز-پیش، ذخیره چرخان و توازن مدل‌سازی شده است. عدم قطعیت قیمت انرژی روز-پیش، قیمت‌های عدم توازن انرژی مثبت و منفی، قیمت‌های ظرفیت و انرژی تولیدی واقعی ذخیره چرخان، مقدار ذخیره فراخوانی شده و میزان توان تولیدی واحد بادی در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است.

۲. توصیف مسئله

۱.۲. مدل بازار

یک بازار مشترک انرژی و ذخیره چرخان در اینجا در نظر گرفته شده است. مدل بازار انرژی دوتسویه‌ای^۱ شامل بازارهای روز-پیش (DAM) و توازن (BM) می‌باشد. بازار روز-پیش، یک بازار حوضچه است که اپراتور بازار عمل تسویه را انجام داده، پیشنهادهای پذیرفته شده را مشخص کرده و به هر تولیدکننده به اندازه تولید واقعی آن ضربدر قیمت حاشیه‌ای منتجه پرداخت می‌کند. بازار توازن^۲ نیز به صورت دو قیمت^۳ می‌باشد که انحراف از توان برنامه‌ریزی شده در آن با جریمه همراه است. به عبارت دیگر، تولید کمتر از توان برنامه‌ریزی شده با قیمتی بیشتر از قیمت DAM و تولید بیشتر از توان برنامه‌ریزی شده با قیمتی کمتر از قیمت DAM جریمه می‌شوند [۲۶].

در بازار ذخیره چرخان (RM) به عوامل^۴ برنده برای ظرفیت ذخیره پذیرفته شده‌شان به قیمت تسویه RM پرداخت انجام می‌شود. همچنین برای تولید واقعی ذخیره (در صورت فراخوانی) به آن‌ها پرداخت انجام می‌شود. گفتنی است که بازارهای انرژی و ظرفیت ذخیره چرخان DA به صورت همزمان اجرا و تسویه می‌شوند. علاوه بر این، فرض می‌شود که شرکت تولیدکننده در نظر گرفته شده به اندازه‌ای کوچک است که تصمیمات آن تأثیری بر قیمت بازار نداشته و قیمت‌پذیر است. بنابراین،

5. Uncertainty characterization
6. Stochastic process
7. Here-and-now
8. Wait-and-see

1. Two-Settlement
2. Real-time
3. Dual-pricing
4. Agents

۱.۳. تابع هدف

همان‌طور که بیان شد، هدف برنامه‌ریزی پیشنهادی، ماکزیم کردن سود است. لذا تابع هدف، حداکثر کردن مقدار مورد انتظار (امید ریاضی) سود در همه سناریوها ($ExpProf$) می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$ExpProf = \sum_{s,t} [prob(s) * \pi^{TS}(s,t)] \quad (1)$$

که s اندیس سناریوها، t اندیس دوره‌های زمانی، $prob(s)$ احتمال رخداد سناریو s و $\pi^{TS}(s,t)$ سود در دوره زمانی t در سناریو s می‌باشد.

مقدار سود حاصل شده در سناریو s و زمان t نیز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \pi^{TS}(s,t) = & pr^{En}(s,t) * bp(t) * dt + \\ & \left(pr^{SRC}(s,t) + \right. \\ & \left. k(s,t) * pr^{SRE}(s,t) \right) * bsr(t) * dt + \\ & pr^{pimb}(s,t) * pimb(s,t) - \\ & pr^{nimb}(s,t) * nimb(s,t) - \\ & Cost_{CAES}(s,t) - Cost_{thermal}(s,t) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن، $bp(t)$ پیشنهادات تولید انرژی در بازار روز-پیش، $bsr(t)$ پیشنهادات تأمین ظرفیت ذخیره چرخان، $pimb(s,t)$ عدم توازن مثبت فروخته‌شده در بازار توازن، $nimb(s,t)$ عدم توازن‌های منفی خریداری‌شده از بازار توازن، $Cost_{CAES}(s,t)$ هزینه واحدهای CAES، $Cost_{thermal}(s,t)$ هزینه واحدهای حرارتی، $pr^{En}(s,t)$ قیمت انرژی در بازار انرژی روز-پیش، $pr^{SRC}(s,t)$ قیمت ظرفیت ذخیره چرخان، $pr^{SRE}(s,t)$ قیمت انرژی تأمین‌شده برای ذخیره چرخان، $pr^{pimb}(s,t)$ قیمت عدم توازن مثبت، $pr^{nimb}(s,t)$ قیمت عدم توازن منفی، $k(s,t)$ درصد ظرفیت ذخیره چرخان برنامه‌ریزی‌شده که برای تولید فراخوانی می‌شود و dt طول هر دوره زمانی (۱ ساعت) است.

سمت راست این رابطه از شش عبارت تشکیل شده است. قسمت اول در ارتباط با درآمد حاصل از فروش انرژی (یا هزینه ناشی از خرید انرژی) در DAM می‌باشد. دومین جمله، مجموع درآمدهای تأمین ظرفیت ذخیره در RM و انرژی تولیدشده برای مقدار ذخیره فراخوانی شده می‌باشد. دو جمله بعدی، درآمد ناشی از فروش توان مازاد در بازار توازن مثبت و هزینه ناشی از خرید کمبود توان از بازار BM منفی را لحاظ می‌کنند. در نهایت، دو جمله آخر، هزینه واحدهای حرارتی و هزینه واحدهای CAES هستند که به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$Cost_{CAES}(s,t) = \sum_{cu} \left(\left[\frac{P^D(cu,s,t) \times (HR_d(cu) * pr^{NG} + VOM^{exp}(cu))}{VOM^{exp}(cu)} \right] + \left[\frac{P^C(cu,s,t) \times (pr^{En}(s,t) + VOM^c(cu))}{VOM^c(cu)} \right] \right) \quad (3)$$

تصادفی دومرحله‌ای، عبارت «دومرحله‌ای» به مراحل حل مسئله بهینه‌سازی اشاره نداشته و به وابستگی یا عدم وابستگی متغیرهای بهینه‌سازی به تحقق سناریوهای تصادفی اشاره دارد.

در برنامه‌ریزی مورد توجه در این مقاله، دو مجموعه تصمیم‌گیری وجود دارد: دسته اول باید پیش از تحقق پارامترهای تصادفی اتخاذ شده (مانند تصمیم درباره میزان پیشنهادات ساعتی انرژی و ذخیره چرخان) و دسته دوم با توجه به تحقق پارامترهای تصادفی اتخاذ خواهند شد (مانند میزان تولید یا مصرف هر واحد در هر ساعت). بنابراین برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای حل این مسئله مناسب است.

در این برنامه‌ریزی، میزان پیشنهادات ساعتی انرژی و ذخیره چرخان، متغیرهای تصمیم «اینجا و اکنون» بوده و بقیه متغیرهای تصمیم که وابسته به تحقق سناریوها هستند، متغیرهای تصمیم «صبر کن و ببین» می‌باشند.

۳.۲.۲. تولید و کاهش سناریو

تولید سناریو برای متغیرهای غیرقطعی با استفاده از روش چرخ گردان^۱ انجام شده و از روش کاهش پسرو همزمان^۲ برای کاهش سناریوها استفاده می‌شود [۱].

۳.۲. ارزیابی هر تحقق دلخواه متغیرهای غیرقطعی

پس از پایان برنامه‌ریزی و به دست آمدن متغیرهای «اینجا و اکنون» بهینه (شامل پیشنهادات بهینه در بازارهای انرژی روز-پیش و ظرفیت ذخیره چرخان)، امید ریاضی سود به ازای سناریوهای در نظر گرفته شده به دست می‌آید. همچنین می‌توان سود را به ازای تحقق هر سناریوی دلخواه به دست آورد. به این منظور، مقادیر متغیرهای «اینجا و اکنون» روی مقادیر بهینه به دست آمده، ثابت در نظر گرفته شده و در هر ساعت با تحقق پارامترهای غیرقطعی مربوط به آن ساعت (مطابق بخش ۳.۲)، برنامه‌ریزی مجدداً اجرا شده و مقادیر متغیرهای «صبر کن و ببین» با توجه به پارامترهای تحقق یافته تعیین می‌شود. بدین صورت این فرایند در همه ۲۴ ساعت اجرا شده و در نهایت سود حاصل از تحقق سناریوی دلخواه به دست می‌آید.

۳. فرمول‌بندی پیشنهادی مسئله

مسئله پیشنهاددهی شرکت تولیدکننده به صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی مخلوط با اعداد صحیح مدل شده است. در این مدل، عدم قطعیت پارامترها از طریق برنامه‌ریزی تصادفی در نظر گرفته می‌شود.

1. Roulette Wheel
2. Simultaneous backward reduction

$$\sum_u [p(u, s, t) + sr(u, s, t)] * dt = [bp(t) + k(s) * bsr(t)] * dt + pimbs(s, t) - nimbs(s, t) \quad (5)$$

$$pimbs(s, t), nimbs(s, t), bsr(t), sr(u, s, t) \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{du} sr(du, s, t) = k(s, t) * bsr(t) \quad (7)$$

$$pimbs(s, t) \leq va(s, t) * M \quad (8)$$

$$\sum_{du} sr(du, s, t) \leq va(s, t) * M \quad (9)$$

$$nimbs(s, t) \leq (1 - va(s, t)) * M \quad (10)$$

$$va(s, t) \in \{0, 1\} \quad (11)$$

که در این روابط، u اندیس همه واحدهای شرکت تولیدکننده، du اندیس واحدهای کنترل پذیر، M یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ و $va(s, t)$ متغیر باینری کمکی است.

رابطه (۵) بیانگر توازن انرژی بوده و بیان می کند که مجموع انرژی های فروخته و خریده شده باید با جمع انرژی های تولید شده مصرف شده برابر باشند؛ و در صورت اختلاف آن ها عدم توازن انرژی مثبت/منفی به صورت مناسب تعریف خواهد شد. رابطه (۶) مشخص می کند که پیشنهاد ذخیره چرخان، انرژی تولیدی برای ذخیره و عدم توازن های مثبت و منفی فقط می توانند مقادیر نامنفی بگیرند. رابطه (۷) نیز بیان می کند که مقدار فراخوانی شده ذخیره باید توسط واحدهای کنترل پذیر^۱ تأمین شود. روابط (۸) تا (۱۱) بیان می کنند که تولیدکننده همزمان نباید هم عدم توازن مثبت و/یا تأمین انرژی برای ذخیره چرخان و هم عدم توازن منفی داشته باشند.

۲.۲.۳. قیود مربوط به واحدهای CAES

به منظور مشخص کردن حالت کاری CAES، مقدار توان تولیدی یا مصرفی CAES در هریک از حالت های کاری و تغییرات انرژی ذخیره شده در مخزن و همچنین برای در نظر گرفتن حدود توان ها و ظرفیت مخزن CAES، از روابط (۱۲) تا (۲۱) استفاده می شود.

$$IC(cu, s, t) + ID(cu, s, t) \leq 1 \quad (12)$$

$$IC(cu, s, t), ID(cu, s, t) \in \{0, 1\} \quad (13)$$

$$IC(cu, s, t) * PCC_{min}(cu) \leq P^C(cu, s, t) \leq IC(cu, s, t) * PCC_{max}(cu) \quad (14)$$

$$ID(cu, s, t) * PCD_{min}(cu) \leq P^D(cu, s, t) \leq ID(cu, s, t) * PCD_{max}(cu) \quad (15)$$

$$p(cu, s, t) + sr(cu, s, t) = P^D(cu, s, t) - P^C(cu, s, t) \quad (16)$$

$$E(cu, s, t = 1) = E_{ini}(cu) \quad (17)$$

$$E(cu, s, t + 1) = E(cu, s, t) + P^C(cu, s, t) * \alpha_i(cu) - P^D(cu, s, t) / \alpha_p(cu) \quad \forall t < 24 \quad (18)$$

$$Cost_{thermal}(s, t) = \sum_{tu} [a(tu) * (p(tu, s, t) + sr(tu, s, t))^2 + b(tu) * (p(tu, s, t) + sr(tu, s, t)) + c(tu) * I(tu, s, t) + SUC(tu) * su(tu, s, t) + SDC(tu) * sd(tu, s, t)] \quad (4)$$

که در این روابط، متغیرها عبارت اند از:

cu : اندیس واحدهای CAES.

tu : اندیس واحدهای حرارتی.

$P^C(cu, s, t)$: توان مصرفی CAES در مد شارژ.

$P^D(cu, s, t)$: توان تولیدی CAES در مد تخلیه.

$VOM^c(cu)$: هزینه متغیر تعمیر، نگهداری و بهره برداری از کمپرسور.

$VOM^{exp}(cu)$: هزینه متغیر نگهداری و بهره برداری از اکسپندر.

$HR_u(cu)$: نرخ حرارتی CAES در مد تخلیه.

pr^{NG} : قیمت گاز طبیعی.

$p(tu, s, t)$: توان خروجی واحد حرارتی tu .

$sr(tu, s, t)$: انرژی تولید شده واقعی برای خدمات ذخیره چرخان بالا.

$I(tu, s, t)$: متغیر باینری که بیانگر وضعیت مشارکت واحد حرارتی

است (۱، اگر واحد روشن باشد).

$su(tu, s, t)$: متغیر باینری که بیانگر وضعیت راه اندازی واحد حرارتی

در ابتدای دوره زمانی t می باشد (۱، اگر واحد راه اندازی شده باشد).

$sd(tu, s, t)$: متغیر باینری که بیانگر وضعیت خاموش شدن واحد

حرارتی در ابتدای دوره زمانی t می باشد (۱، اگر واحد خاموش شده

باشد).

$a(tu)$, $b(tu)$, $c(tu)$: ضرایب هزینه واحدهای حرارتی.

$SUC(tu)$: هزینه روشن کردن واحدهای حرارتی.

$SDC(tu)$: هزینه خاموش کردن واحدهای حرارتی.

در رابطه (۳)، هزینه واحدهای CAES محاسبه شده در مد تخلیه،

هزینه گاز طبیعی مصرف شده و هزینه بهره برداری و نگهداری از

اکسپندر و در مد شارژ، هزینه بهره برداری و نگهداری از کمپرسور در

نظر گرفته شده اند. قابل ذکر است در صورتی که CAES در مد شارژ

کار کند و انرژی الکتریکی مصرف نماید، هزینه خرید انرژی الکتریکی

برای کمپرسور در رابطه (۲) لحاظ شده و نباید در رابطه (۳) تکرار شود.

۲.۳. قیود مسئله

۱.۲.۳. قیود مرتبط با بازارهای مختلف

قیود مربوط به بازارهای انرژی روز-پیش، ذخیره چرخان و توازن

به صورت زیر هستند:

$$su(tu, s, t) + sd(tu, s, t) \leq 1 \quad (24)$$

$$I(tu, s, t) * P_{\min}(tu) \leq p(tu, s, t) + sr(tu, s, t) \leq I(tu, s, t) * P_{\max}(tu) \quad (25)$$

$$p(tu, s, t) + sr(tu, s, t) - [p(tu, s, t-1) + sr(tu, s, t-1)] \leq RU(tu) * I(tu, s, t-1) \quad (26)$$

$$p(tu, s, t-1) + sr(tu, s, t-1) - [p(tu, s, t) + sr(tu, s, t)] \leq RD(tu) * I(tu, s, t) \quad (27)$$

$$\sum_{t=1}^{t+MUT-1} sd(tu, s, t) \leq 1 - su(tu, s, t) \quad (28)$$

$$\sum_{t=1}^{t+MDT-1} su(tu, s, t) \leq 1 - sd(tu, s, t) \quad (29)$$

که در این روابط، $P_{\min}(tu)$ توان تولیدی مینیمم واحدهای حرارتی، $P_{\max}(tu)$ توان تولیدی ماکزیمم واحدهای حرارتی، $RD(tu)$ نرخ شیب پایین واحدهای حرارتی، $RU(tu)$ نرخ شیب بالای واحدهای حرارتی، $MDT(tu)$ حداقل زمان خاموش بودن واحدهای حرارتی (ساعت) و $MUT(tu)$ حداقل زمان روشن بودن واحدهای حرارتی (ساعت) است. روابط (۲۲) تا (۲۴) منطق حاکم بر وضعیت خاموش شدن، راه‌اندازی و وضعیت کاری واحدهای حرارتی را مدل می‌کنند. رابطه (۲۵) حدود مجاز توان تولیدی واحد حرارتی را مشخص می‌کند. روابط (۲۶) و (۲۷) به ترتیب قیود افزایش و کاهش توان نیروگاه حرارتی را مدل می‌کنند. در نهایت، قیود حداقل زمان روشن بودن و خاموش بودن نیروگاه‌های حرارتی به ترتیب در روابط (۲۸) و (۲۹) لحاظ می‌شوند.

۴.۲.۳. قید مربوط به واحدهای بادی

حداکثر توانی که یک واحد بادی در یک سناریو می‌تواند تولید کند، نباید از توان تحقق‌یافته در آن سناریو بیشتر شود:

$$0 \leq p(wu, s, t) \leq P_{Wind}^{for}(wu, s, t) \quad (30)$$

که در این رابطه، wu اندیس واحدهای بادی و $P_{Wind}^{for}(wu, s, t)$ میزان پیش‌بینی شده تولید واحد بادی می‌باشد.

۳.۳. فرمول‌بندی نهایی

فرمول‌بندی نهایی مسئله برنامه‌ریزی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } z = \text{ExpProf} \\ & \text{Subject to} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \text{General Constraints: Eq. (5)-(11)} \\ \text{Constraints of CAES Units: Eq. (12)-(21)} \\ \text{Constraints of Thermal Units: Eq. (22)-(29)} \\ \text{Constraints of Wind Units: Eq. (30)} \end{cases}$$

از میان روابط گفته‌شده، فقط رابطه هزینه واحد حرارتی (رابطه ۴) شامل جملات غیرخطی است. از آنجا که حضور جمله غیرخطی، برنامه را به حالت برنامه‌ریزی غیرخطی مخلوط با اعداد صحیح (MINLP) تبدیل می‌کند و زمان اجرای برنامه را به شدت افزایش می‌دهد، از

$$\begin{aligned} E_{final}(cu, s) = & E(cu, s, t = 24) + \\ & P^C(cu, s, t = 24) * \alpha_i(cu) - \\ & P^D(cu, s, t = 24) / \alpha_p(cu) \end{aligned} \quad (19)$$

$$E_{\min}(cu) \leq E(cu, s, t) \leq E_{\max}(cu) \quad (20)$$

$$E_{\min}(cu) \leq E_{final}(cu, s) \leq E_{\max}(cu) \quad (21)$$

که متغیرها در آن عبارت‌اند از:

$IC(cu, s, t)$: متغیر باینری بیانگر وضعیت شارژ CAES (۱، اگر واحد در حال شارژ باشد).

$ID(cu, s, t)$: متغیر باینری بیانگر وضعیت تخلیه CAES (۱، اگر واحد در حال تخلیه باشد).

$E(cu, s, t)$: مقدار انرژی ذخیره‌شده در مخزن CAES در ابتدای زمان t .

$E_{final}(cu, s)$: مقدار انرژی نهایی ذخیره‌شده در CAES.

$\alpha_i(cu)$: راندمان تزریق انرژی به CAES.

$\alpha_p(cu)$: راندمان تولید انرژی توسط CAES.

$PCC_{\min}(cu)$: مینیمم توان فشرده‌سازی کمپرسور.

$PCC_{\max}(cu)$: ماکزیمم توان فشرده‌سازی کمپرسور.

$PCD_{\min}(cu)$: مینیمم توان تولیدی اکسپندر.

$PCD_{\max}(cu)$: ماکزیمم توان تولیدی اکسپندر.

$E_{init}(cu)$: سطح اولیه ذخیره در مخزن CAES.

$E_{\min}(cu)$: مینیمم انرژی معادل ذخیره‌شده در مخزن CAES.

$E_{\max}(cu)$: ماکزیمم انرژی معادل ذخیره‌شده در مخزن CAES.

روابط (۱۲) و (۱۳) حالت کاری CAES را مشخص و اطمینان حاصل می‌کنند که در هر بازه زمانی، CAES تنها در یک حالت کار کند. حدود مجاز توان‌های شارژ و تخلیه به ترتیب با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) اعمال می‌شود. رابطه (۱۶) میزان توان تولید/مصرف‌شده توسط CAES را با توجه به توان تخلیه/شارژ آن مشخص می‌کند. همچنین، رابطه (۱۷) مقدار اولیه انرژی معادل ذخیره‌شده در مخزن را تنظیم نموده و روابط (۱۸) و (۱۹) تغییرات مقدار انرژی ذخیره‌شده در مخزن در اثر شارژ/تخلیه را مدل می‌نمایند. در نهایت، روابط (۲۰) و (۲۱) حدود انرژی معادل ذخیره‌شده در مخزن را مشخص می‌کنند.

۳.۲.۳. قیود مربوط به واحدهای حرارتی

قیود مربوط به وضعیت، حدود توان تولیدی، نرخ شیب و حداقل زمان‌های خاموش و روشن بودن واحدهای حرارتی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$su(tu, s, t) - sd(tu, s, t) \leq \quad (22)$$

$$I(tu, s, t) - I(tu, s, t-1) \quad \forall t > 1$$

$$su(tu, s, t), sd(tu, s, t), I(tu, s, t) \in \{0,1\} \quad (23)$$

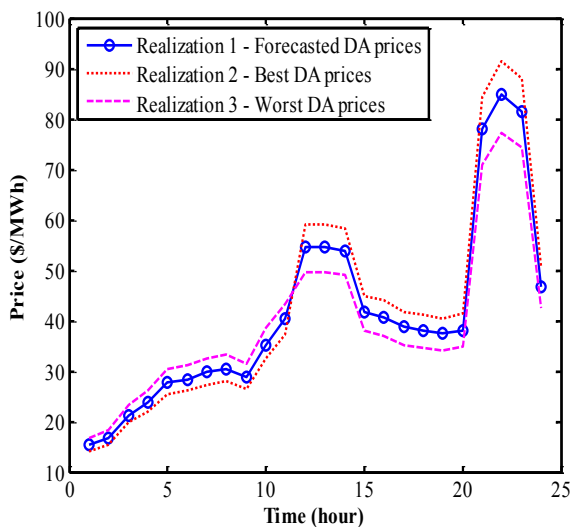
مشخص شدن متغیرهای غیرقطعی آن ساعت، اقدامات اصلاحی^۳ لازم انجام می‌گیرد و در نهایت، مقدار نهایی تابع هدف به‌ازای تحقق مربوطه به دست می‌آید.

۴. نتایج شبیه‌سازی

روش ارائه‌شده بر روی دو سیستم تست پیاده‌سازی و نتایج آن ارائه خواهد شد. اطلاعات سیستم نخست از مرجع [۱۵] استخراج شده و به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی ارائه شده است. سیستم Iberian Peninsula [۲۸] به‌عنوان دومین سیستم تست برای ارائه نتایج تکمیلی روش پیشنهادی انتخاب شده است. برای حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای خطی مخلوط با اعداد صحیح پیشنهادی از حل‌کننده CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS استفاده شده است.

۱.۴. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش دیگر

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، ابتدا این روش بر روی سیستم موجود در مرجع [۱۵] پیاده‌سازی شده که اطلاعات آن در بخش پیوست ارائه شده است. در این مقاله، تولیدکننده تنها دارای یک واحد CAES بوده و پیشنهاددهی بهینه آن با استفاده از روش IGDT به دست آمده است. همچنین این مقاله سه مجموعه تحقق قیمت شامل تحقق قیمت واقعی (تحقق ۱) و بهترین قیمت (تحقق ۲) و بدترین قیمت (تحقق ۳)، مطابق شکل (۲)، برای این بازار ارائه کرده است. با استفاده از روش چرخ گردان، ۵۰۰۰ سناریو برای قیمت‌های روز-پیش ایجاد شده است و در مرحله بعد، تعداد آن‌ها با استفاده از روش کاهش پس‌رو همزمان، به ۲۰ سناریو کاهش می‌یابد. شکل (۳)، ۲۰ سناریوی نهایی را که در برنامه‌ریزی تصادفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نمایش می‌دهد.

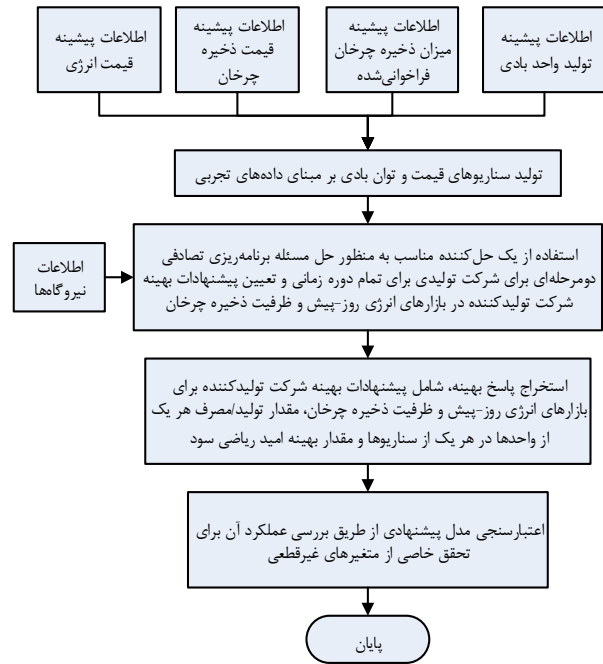


شکل (۲): تحقق‌های قیمت در نظر گرفته‌شده برای سیستم تست ۱

روش‌های متداول خطی‌سازی تکه‌ای^۱ برای رابطه (۴) استفاده می‌شود [۲۷]. شایان ذکر است که تعداد تکه‌های خطی طوری انتخاب شده‌اند که خطای محاسبه هزینه، کمتر از ۰/۰۰۱٪ باشد. بدین صورت، برنامه‌ریزی ارائه‌شده در رابطه (۳۱) به یک برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای خطی مخلوط با اعداد صحیح (SMILP)^۲ تبدیل می‌شود.

۴.۳. الگوریتم حل مسئله پیشنهاددهی بهینه

طرح‌واره روش پیشنهاددهی پیشنهادی در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): طرح‌واره روش SP پیشنهادی برای حل مسئله پیشنهاددهی بهینه

روش پیشنهادی دارای مراحل زیر است:

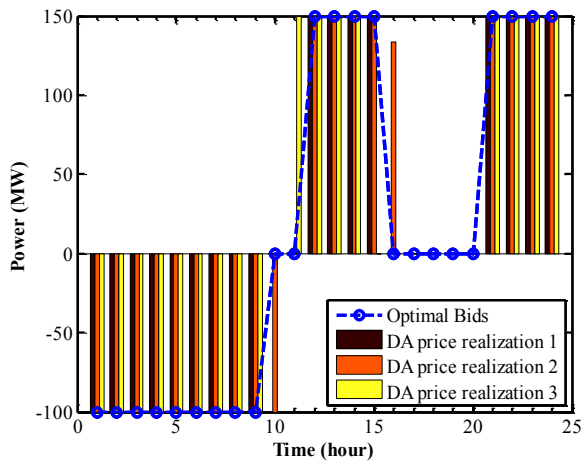
- گام ۱: با استفاده از اطلاعات پیشینه قیمت‌های انرژی در بازارهای روز پیش و توزان مثبت و منفی، قیمت‌های ظرفیت و انرژی تولیدشده ذخیره چرخان، مقدار فراخوانی ذخیره چرخان و مقدار توان تولیدی واحدهای بادی، سناریوهای مختلف تولید می‌شوند.
- گام ۲: مسئله SMILP دومرحله‌ای پیشنهادی رابطه (۳۱) با استفاده از یک حل‌کننده مناسب حل می‌شود.
- گام ۳: پاسخ بهینه، شامل پیشنهادات بهینه شرکت تولیدکننده برای بازارهای انرژی روز-پیش و ظرفیت ذخیره چرخان، مقدار تولید/مصرف هر یک از واحدها در هر یک از سناریوها و مقدار بهینه امید ریاضی سود استخراج می‌شود.
- گام ۴: به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، تحقق خاصی از متغیرهای غیرقطعی در نظر گرفته شده و در هر ساعت، با فرض

1. Piecewise Linearization Methods
2. Two-stage Stochastic Mixed-Integer Linear Programming

جدول (۱): سود GenCo در حالت‌های مختلف سیستم تست ۱

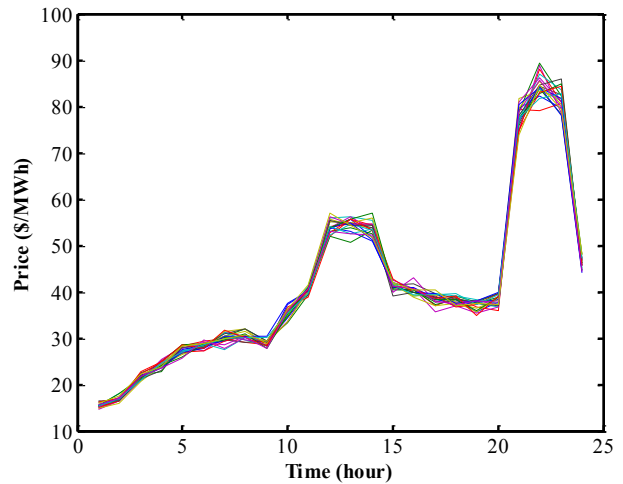
روش پیشنهادی	عدم امکان انحراف از پیشنهاد داده شده		امید ریاضی سود	سود (\$)
	روش SP با امکان انحراف از پیشنهاد داده شده	روش مرجع [۱۵]		
۳۰۴۸۹	۳۰۴۸۹	-		تحقق ۱
۳۲۷۰۰	۳۲۷۰۰	۳۱۹۰۵		تحقق ۲
۴۰۵۰۳	۴۰۴۹۰	۳۹۸۸۱		تحقق ۳
۲۴۱۹۱	۲۴۰۱۳	۲۳۹۲۹		

با مقایسه سود به دست آمده در این سه تحقق، با استفاده از SP با نتایج [۱۵]، مشخص می‌شود که روش SP پیشنهادی، به‌رغم استفاده از پیشنهاد‌های ساده به‌جای منحنی‌های عرضه، در حل این مسئله اندکی بهتر از روش IGDT در مرجع [۱۵] عمل کرده و به مقادیر سود بهتری دست یافته است.



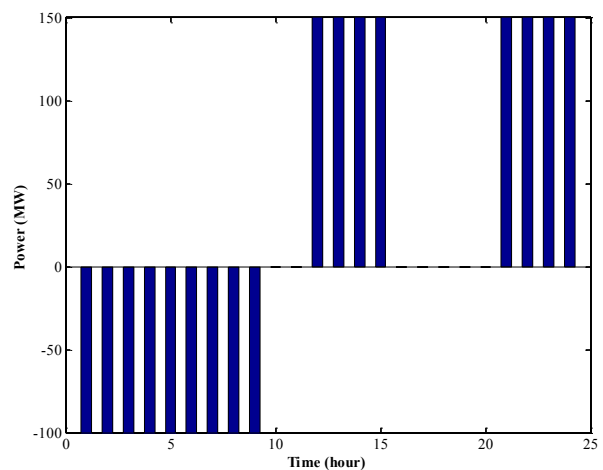
شکل (۵): پیشنهادات بهینه CAES و توان‌های خروجی نهایی برای هر تحقق توسط روش SP پیشنهادی با در نظر گرفتن امکان انحراف واحدها از پیشنهاد پذیرفته شده در سیستم تست ۱

در مرحله بعد، به‌منظور بررسی تأثیر امکان انحراف واحدها از پیشنهاد داده شده در حل این مسئله برای این سیستم، قیمت‌های عدم توازن مثبت و منفی‌ای به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۱/۰۵ قیمت بازار DA در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی مجدداً انجام شده است. پیشنهادات بهینه این حالت و تولید نهایی واحد و سود به‌دست آمده برای هر یک از تحقق‌های قیمت DA در شکل (۵) و جدول (۱) آمده‌اند. مطابق شکل (۵)، پیشنهاد بهینه برای این حالت مشابه حالت قبل است. همچنین در این حالت واحدها امکان اصلاح برنامه خود و انحراف از پیشنهاد پذیرفته شده خود را (با متحمل شدن هزینه عدم توازن) در پاسخ به تحقق قیمت‌های DA دارند. لذا مطابق جدول (۱)، سود این حالت، بزرگ‌تر یا مساوی سود حالت الزام واحدها به تولید پیشنهاد پذیرفته شده



شکل (۳): سناریوهای استفاده شده در روش SP پیشنهادی برای سیستم تست ۱

باید گفته شود از آنجا که هدف از شبیه‌سازی این سیستم، بررسی اعتبار مدل‌سازی انجام شده است، شرایط مرجع [۱۵] برای شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مرجع [۱۵]، در بهینه‌سازی، ذخیره چرخان در نظر گرفته نشده است. همچنین هیچ‌گونه مکانیزم جریمه‌ای در نظر گرفته نشده و واحدها لزوماً باید در هر ساعت به میزان پیشنهاد داده شده برای آن ساعت انرژی تولید کنند. بنابراین از آنجا که در این حالت، هیچ متغیر «صبر کن و ببین» در نظر گرفته نشده است، مسئله برنامه‌ریزی به یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی یک‌مرحله‌ای تقلیل می‌یابد. پیشنهاد‌های بهینه و سود به‌دست آمده در هر یک از تحقق‌های قیمت با استفاده از روش SP پیشنهادی به ترتیب در شکل (۴) و جدول (۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۴): پیشنهاد‌های بهینه CAES به وسیله روش SP پیشنهادی در حالت غیرمجاز بودن تخطی واحدها از پیشنهاد پذیرفته شده در سیستم تست ۱

حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- حالت ۱: پیشنهاددهی تولیدکننده تنها دارای CAES.
- حالت ۲: پیشنهاددهی تولیدکننده تنها دارای واحدهای بادی.
- حالت ۳: پیشنهاددهی تولیدکننده تنها دارای واحدهای حرارتی.
- حالت ۴: پیشنهاددهی تولیدکننده دارای واحدهای CAES و بادی.
- حالت ۵: پیشنهاددهی تولیدکننده دارای واحدهای CAES، بادی و حرارتی.

نتایج این حالت‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج حالت‌های ۱، ۲ و ۴ مشخص است که برنامه‌ریزی همزمان CAES و نیروگاه بادی منجر به افزایش ۱۰۷۶ دلاری (۶/۴ درصدی) امید ریاضی سود و افزایش ۳۷۰۹ دلاری (۲۱/۲ درصدی) سود تحقق‌یافته نسبت به برنامه‌ریزی مجزای این واحدها خواهد شد. این موارد ناشی از توانایی واحدهای CAES برای ذخیره انرژی بادی مازاد بر پیشنهاد پذیرفته شده از یک سو، و تولید انرژی برای جلوگیری از تخطی از پیشنهاد داده شده در ساعات کمبود انرژی بادی از سوی دیگر است.

جدول (۲): نتایج پیشنهاددهی بهینه توسط روش SP پیشنهادی برای سیستم تست ۲ با در نظر گرفتن بازارهای انرژی روز-پیش و توازن

حالت	۱	۲	۳	۴	۵
واحد(ها)	CAES	بادی	حرارتی	CAES و بادی	CAES + بادی + حرارتی
بیشترین سود (\$)	۲۰۵۵۰	۱۱۶۴۲۰	۱۱۰۹۸۰	۱۱۸۸۲۰	۱۸۷۴۳۰
کمترین سود (\$)	-۲۰۱۱	-۳۶۵۵	۲۶۳۸۹	-۲۸۳۸	۴۳۰۸۳
انحراف استاندارد سودها (\$)	۳۵۷۵	۲۹۶۹۳	۱۹۸۸۴	۳۱۶۱۱	۳۲۶۶۹
امید ریاضی سود (\$)	۱۵۴۸	۱۵۳۸۷	۷۱۸۶۲	۱۸۰۱۱	۹۱۱۹۱
سود تحقق‌یافته (\$)	۵۸۲۲	۱۱۶۹۴	۳۹۰۸۶	۲۱۲۲۵	۶۲۳۹۴
*EPI %	-	-	-	۶/۴	۲/۷
**API %	-	-	-	۲۱/۲	۱۰/۲
VSS (\$)	۸۴۲	۴۲۴	۳۰۰	۶۴۰	۲۹۰

* درصد افزایش امید ریاضی سود ناشی از برنامه‌ریزی مشترک.
** درصد افزایش سود تحقق‌یافته ناشی از برنامه‌ریزی مشترک.

۲.۲.۴. پیشنهاددهی در بازارهای انرژی و ذخیره چرخان

به منظور بررسی قابلیت روش پیشنهادی در حل مسئله پیشنهاددهی بهینه در بازارهای انرژی و ذخیره چرخان در سیستم تست ۲، چهار حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- حالت ۶: پیشنهاددهی تولیدکننده تنها دارای CAES.
- حالت ۷: پیشنهاددهی تولیدکننده تنها دارای واحدهای حرارتی.
- حالت ۸: پیشنهاددهی تولیدکننده دارای واحدهای CAES و بادی.
- حالت ۹: پیشنهاددهی تولیدکننده دارای واحدهای CAES، بادی و حرارتی.

خود خواهد بود. با توجه به شکل (۵) مشخص است که پیشنهاد داده شده برای تحقق ۱، مناسب بوده و نیازی به اصلاح برنامه‌ریزی نبوده است. اما در تحقق‌های ۲ و ۳ با اصلاح اندکی در برنامه‌ریزی CAES، امکان رسیدن به سود بیشتری فراهم شده است.

۲.۴. نتایج تکمیلی روش پیشنهادی

به منظور بررسی بیشتر قابلیت‌های روش پیشنهادی، سیستم Iberian Peninsula [۲۸] در اسپانیا به عنوان سیستم تست ۲ انتخاب شده است. همچنین، از اطلاعات وزش باد منطقه $36.18^{\circ} N$ و $5.40^{\circ} W$ در این کشور، برای محاسبه تولید واحدهای بادی استفاده شده و مشخصات واحدهای بادی برای تبدیل سرعت باد به توان بادی، مطابق [۲۹] است. در نهایت، از اطلاعات ۴۱ روز کاری سیستم Iberian Peninsula (مربوط به مارس و آوریل ۲۰۱۷) برای تولید سناریو و از اطلاعات اولین روز کاری ماه مه ۲۰۱۷ برای محاسبه سود تحقق‌یافته استفاده شده است. علاوه بر این، قیمت گاز طبیعی، سناریوهای قیمت انرژی DA و تولید واحد بادی و اطلاعات واحدهای حرارتی و CAES در نظر گرفته شده در بخش پیوست ارائه شده‌اند [۳۰]. توضیح این نکته ضروری است که با توجه به کنترل ناپذیر بودن توان خروجی واحدهای بادی، این واحدها نمی‌توانند در بازار ذخیره شرکت کنند. به منظور بررسی کمی مزیت استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیرها، از شاخص ارزش پاسخ تصادفی (VSS)^۲ استفاده شده است [۳۱]. ارزش پاسخ تصادفی (VSS) یک معیار برای تعیین کمی این است که راه حل SP چه مقدار از راه حل قطعی بهتر است و می‌تواند به شرح زیر محاسبه شود [۳۱]:

$$VSS = z^{S*} - z^{D*} \quad (32)$$

که z^{S*} مقدار تابع هدف از راه حل مسئله برنامه‌ریزی تصادفی است، و z^{D*} مقدار تابع هدف مربوط به راه حل مسئله امید ریاضی (EVP)^۳ است. در EVP، تمام پارامترهای غیرقطعی روی مقادیر امید ریاضی آنها تنظیم می‌شوند و مسئله حاصل برای تعیین متغیرهای «اینجا و اکنون» حل می‌شود. سپس متغیرهای «اینجا و اکنون» روی مقادیر قبلاً محاسبه شده تنظیم گردیده و سناریوهای پارامترهای غیرقطعی دوباره در نظر گرفته می‌شوند. z^{D*} راه حل مسئله SP اصلاح شده است.

۱.۲.۴. پیشنهاددهی در بازارهای انرژی روز-پیش و توازن

به منظور بررسی قابلیت روش پیشنهادی در حل مسئله پیشنهاددهی بهینه در بازارهای انرژی روز-پیش و توازن در سیستم تست ۲، پنج

1. Non-dispatchable
2. Value of stochastic solution
3. Expected value problem

شده و نتایج به دست آمده، معتبر بودن روش پیشنهادی را در به دست آوردن پاسخ‌های درست و بهینه نشان می‌دهد. در نهایت، با استفاده از اطلاعات بازار اسپانیا، نتایج تکمیلی روش پیشنهادی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی در دو حالت بازار انرژی و سپس بازار انرژی و ذخیره چرخان ارائه شده است. در بازار انرژی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از CAES می‌تواند مدیریت بازار انرژی را به‌منظور کم کردن هزینه‌ها و افزایش سودآوری ارتقا دهد. در حالت برنامه‌ریزی در بازارهای انرژی و ذخیره چرخان، میزان مزیت CAES با توجه به نرخ شیب بالای آن، از برنامه‌ریزی فقط در بازار انرژی بیشتر بوده و سودآوری برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. در نهایت، در نظر گرفتن دسترس ناپذیری و عدم قطعیت قیمت گاز طبیعی و آلودگی تولیدشده توسط CAES به‌عنوان موضوعاتی برای ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌گردد.

پیوست: اطلاعات سیستم‌های تست

برای سیستم تست ۱، قیمت گاز طبیعی برابر $3/5 \text{ \$/GJ}$ (برابر $12/6 \text{ \$/MWh}$) بوده و پارامترهای CAES در نظر گرفته شده در این سیستم تست نیز در جدول (۴) آورده شده است [۱۵].

جدول (۴): اطلاعات CAES سیستم تست ۱ [۱۵]

پارامتر	توضیح	واحد	مقدار
E_{init}	انرژی ذخیره‌شده اولیه	MWh	۰
E_{min}	مینیمم انرژی ذخیره‌شده	MWh	۰
E_{max}	ماکزیمم انرژی ذخیره‌شده	MWh	۳۰۰۰
PCC_{min}	مینیمم توان در حالت شارژ	MW	۰
PCC_{max}	ماکزیمم توان در حالت شارژ	MW	۱۰۰
PCD_{min}	مینیمم توان در حالت تخلیه	MW	۰
PCD_{max}	ماکزیمم توان در حالت تخلیه	MW	۱۵۰
ER	نسبت انرژی CAES	-	۰/۷۵
HR_d	نرخ حرارتی CAES در حالت تخلیه	MJ/MWh	۴۱۸۵
VOM^{exp}	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر اکسپندر	\\$/MWh	۰/۸۷
VOM^c	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر کمپرسور	\\$/MWh	۰/۸۷

همچنین برای سیستم تست ۲، قیمت گاز طبیعی برابر $\text{\$/MWh}$ ۱۲ و ظرفیت واحد بادی برابر 115 MW در نظر گرفته شده است. اطلاعات نیروگاه‌های حرارتی و CAES سیستم تست ۲ در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است. همچنین سناریوهای در نظر گرفته شده برای قیمت‌های انرژی روز-پیش و توان‌های تولیدی واحد بادی در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده‌اند.

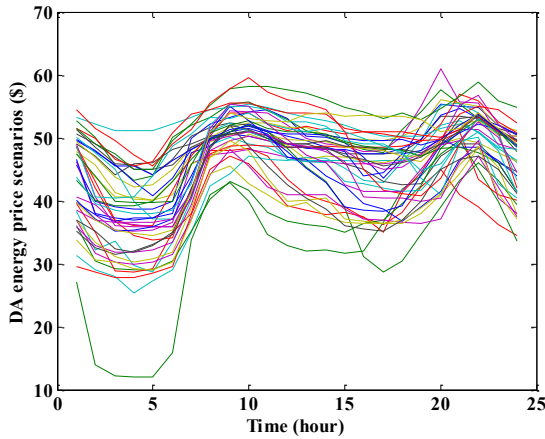
نتایج این حالت‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند. با مقایسه نتایج حالت‌های ۶ و ۷ با نتایج حالت‌های ۱ و ۳، واضح است که درصد افزایش امید ریاضی سود ناشی از حضور همزمان در بازارهای انرژی و ذخیره، در حالتی که تولیدکننده تنها دارای واحدهای حرارتی باشد، چندان زیاد نبوده است ($11/4\%$ معادل 8208 دلار)؛ در صورتی که درصد افزایش سود ناشی از حضور همزمان در بازارهای انرژی و ذخیره در حالتی که تولیدکننده تنها دارای CAES باشد، برابر $568/5\%$ (معادل 8800 دلار) است. دلیل این امر، نرخ شیب بالای واحد CAES است که آن را برای حضور در بازار ذخیره مناسب می‌سازد. در نهایت، با مقایسه نتایج حالت‌های پیشنهاددهی همزمان CAES با واحدهای دیگر (حالت‌های ۴، ۵، ۸ و ۹) با نتایج حالت‌های پیشنهاددهی مجزای هر واحد (حالت‌های ۱، ۲، ۳، ۶ و ۷)، مشخص می‌شود که برنامه‌ریزی مشترک واحدها همواره باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر سود نسبت به مجموع مقادیر سود در برنامه‌ریزی مجزای همان واحدها می‌شود. این امر را می‌توان ناشی از جبران انحراف توان در بدترین سناریوها توسط خروجی واحدهای CAES و حرارتی و همچنین انعطاف‌پذیری CAES برای عکس‌العمل به تغییرات متغیرهای غیرقطعی در این سناریوها دانست.

جدول (۳): نتایج پیشنهاددهی بهینه توسط روش SP پیشنهادی برای سیستم تست ۲ در بازارهای DAM، ذخیره چرخان و BM

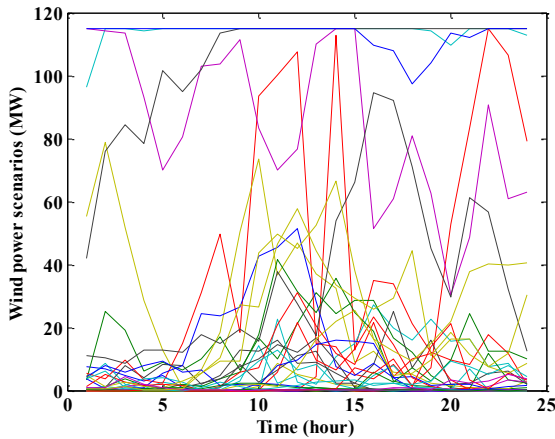
حالت	۶	۷	۸	۹
واحد(ها)	CAES	حرارتی	CAES و بادی	CAES + بادی + حرارتی
بیشترین سود (\$)	۳۳۷۴۶	۱۱۵۳۳۰	۱۳۰۷۴۰	۲۱۳۲۵۰
کمترین سود (\$)	۱۰۲۳	۳۲۵۲۶	۳۰۶۳	۶۸۶۵۰
انحراف استاندارد سودها (\$)	۶۲۸۰	۱۸۱۲۸	۳۲۱۱۲	۳۱۷۹۴
امید ریاضی سود (\$)	۱۰۳۴۸	۸۰۰۷۰	۲۶۴۲۷	۱۰۹۵۷۶
سود تحقق‌یافته (\$)	۲۷۳۱۶	۵۹۰۳۲	۴۲۲۶۴	۱۰۲۱۷۹
%EPI	-	-	۲/۷	۳/۶
%API	-	-	۸/۳	۴/۲
VSS (\$)	۱۰۳۰	۴۸۰	۸۶۰	۲۴۴۶

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای، برای حل مسئله پیشنهاددهی بهینه تولیدکننده دارای واحدهای CAES، بادی و حرارتی در بازارهای انرژی ارائه شده است. سپس روش پیشنهادی بر روی دو سیستم موجود در مقالات دیگر پیاده‌سازی



شکل (۶): سناریوهای قیمت‌های انرژی روز-پیش در سیستم تست ۲



شکل (۷): سناریوهای توان تولیدی واحد بادی در سیستم تست ۲

جدول (۵): اطلاعات نیروگاه‌های حرارتی سیستم تست ۲ [۳۰]

$P_{max,i}$	$P_{min,i}$	RD_i	RU_i	c_i	b_i	α_i	i
حداقل و حداکثر توان تولیدی واحد		نرخ‌های افزایش و کاهش توان		ضرایب هزینه واحدها			اندیس واحد
۷۰	۲۵	۳۵	۳۵	۵۸/۸۱	۲۲/۹۴	۰/۰۱	۱
۱۵۰	۳۰	۷۵	۷۵	۳۰۰	۲۰	۰/۳	۲
۱۲۰	۳۰	۶۰	۶۰	۲۵۰	۱۸/۵	۰/۲۷	۳
$SDRD_i$	$SURU_i$	SDC_i	STC_i	$hour_{init,i}$	MDT_i	MUT_i	i
نرخ‌های افزایش/کاهش توان در هنگام راه‌اندازی/خاموش کردن		هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحد		تعداد ساعات اولیه روشن بودن واحد	حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد		اندیس واحد
۳۵	۳۵	۰	۳۰۰	۴	۱	۱	۱
۷۵	۷۵	۰	۵۰۰	-۵	۳	۳	۲
۶۰	۶۰	۰	۵۰۰	۱۰	۳	۳	۳

جدول (۶): اطلاعات CAES سیستم تست ۲ [۳۰]

پارامتر	واحد	توضیح
E_{init}	MWh	انرژی ذخیره‌شده اولیه
E_{min}	MWh	مینیمم انرژی ذخیره‌شده
E_{max}	MWh	ماکزیمم انرژی ذخیره‌شده
PCC_{min}	MW	مینیمم توان در حالت شارژ
PCC_{max}	MW	ماکزیمم توان در حالت شارژ
PCD_{min}	MW	مینیمم توان در حالت تخلیه
PCD_{max}	MW	ماکزیمم توان در حالت تخلیه
α_{inj}	-	راندمان تزریق انرژی به CAES
α_p	-	راندمان تولید انرژی توسط CAES
HR_d	MJ/MWh	نرخ حرارتی CAES در حالت تخلیه
VOM^{exp}	\$/MWh	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر اکسپندر
VOM^c	\$/MWh	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر کمپرسور

مراجع

- Parastegari, M., Hooshmand, R.A., Khodabakhshian, A. and Forghani, Z., "Joint Operation of Wind Farms and Pump-Storage Units in the Electricity Markets: Modeling, Simulation and Evaluation", Simul. Model. Pract. Theory, Vol. 37, No. 1, pp. 56–69, 2013.
- Khodayar, M.E. and Shahidehpour, M., "Stochastic Price-Based Coordination of Intrahour Wind Energy and Storage in a Generation Company", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 554–562, 2013.
- Parastegari, M., Hooshmand, R.A., Khodabakhshian, A. and Zare, A.H., "Joint Operation of Wind Farm, Photovoltaic, Pump-Storage and Energy Storage Devices in Energy and Reserve Markets", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 64, No. 1, pp. 275–284, 2015.
- Al-Awami, A.T. and El-Sharkawi, M.A., "Coordinated Trading of Wind and Thermal Energy", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 2, No. 3, pp. 277–287, Jul. 2011.
- Laia, R., Pousinho, H.M.I., Melico, R. and Mendes, V.M.F., "Bidding Strategy of Wind-Thermal Energy Producers", Renew. Energy, Vol. 99, No. 1, pp. 673–681, 2016.
- Aghaei, J., Barani, M., Shafie-Khah, M., Sanchez De La Nieta, A.A. and Catalao, J.P.S., "Risk-Constrained Offering Strategy for Aggregated Hybrid Power Plant Including Wind Power Producer and Demand Response Provider", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 7, No. 2, pp. 513–525, 2016.
- Pousinho, H.M.I., Esteves, J., Mendes, V.M.F., Collares-Pereira, M. and Pereira Cabrita, C., "Bilevel Approach To Wind-CSP Day-Ahead Scheduling with Spinning Reserve Under Controllable Degree of Trust", Renew. Energy, Vol. 85, No. 1, pp. 917–927, 2016.
- Ding, H., Pinson, P., Hu, Z. and Song, Y., "Optimal Offering and Operating Strategies for Wind-Storage Systems with Linear Decision Rules", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. 6, pp. 4755–4764, 2016.
- خسروی، سام، عمارتی، محمدرضا، فدایی‌نژاد، روح‌الله، کی‌نیا، فرشید، «تخمین اقتصادی رزرو مورد نیاز مزارع بادی با به‌کارگیری شبکه»

عصبی در پیش‌بینی سرعت باد»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال هفتم، شماره ۱، صفحه ۱۳-۲، ۱۳۹۶.

- [10] Shafiee, S., Zareipour, H. and Knight, A.M., "Considering Thermodynamic Characteristics of a CAES Facility in Self-Scheduling in Energy and Reserve Markets", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3476-3485, Jul. 2018.
- [11] Ghalelou, A.N., Fakhri, A.P., Nojavan, S., Majidi, M. and Hatami, H., "a Stochastic Self-Scheduling Program for Compressed Air Energy Storage (CAES) of Renewable Energy Sources (RESs) Based on a Demand Response Mechanism", Energy Convers. Manag., Vol. 120, No. 1, pp. 388-396, 2016.
- [12] Soroudi, A., "Smart Self-Scheduling of Gencos With Thermal and Energy Storage Units Under Price Uncertainty", Int. Trans. Electr. Energy Syst., Vol. 24, No. 10, pp. 1401-1418, Oct. 2014.
- [13] Nojavan, S., Najafi-Ghalelou, A., Majidi, M., and Zare, K., "Optimal Bidding and Offering Strategies of Merchant Compressed Air Energy Storage in Deregulated Electricity Market Using Robust Optimization Approach", Energy, Vol. 142, No. 1, pp. 250-257, Jan. 2018.
- [14] Liu, Y., Jiang, C., Shen, J. and Hu, J., "Coordination of Hydro Units with Wind Power Generation Using Interval Optimization", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 443-453, Apr. 2015.
- [15] Shafiee, S., Zareipour, H., Knight, A.M., Amjady, N. and Mohammadi-Ivatloo, B., "Risk-Constrained Bidding and Offering Strategy for a Merchant Compressed Air Energy Storage Plant", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 32, No. 2, pp. 946-957, 2016.
- [16] Nyamdash, B., Denny, E. and O'Malley, M., "The Viability of Balancing Wind Generation with Large Scale Energy Storage", Energy Policy, Vol. 38, No. 11, pp. 7200-7208, 2010.
- [17] Chen, H., Zhang, X., Liu, J. and T.C., "Compressed Air Energy Storage", in Energy Storage - Technologies and Applications, InTech, 2013.
- [18] Jadidbonab, M., Mousavi-Sarabi, H. and Mohammadi-Ivatloo, B., "Risk-Constrained Scheduling of Solar-Based Three State Compressed Air Energy Storage with Waste Thermal Recovery Unit in the Thermal Energy Market Environment", IET Renew. Power Gener., Vol. 13, No. 6, pp. 920-929, Apr. 2019.
- [19] Attarha, A., Amjady, N., Dehghan, S. and Vatani, B., "Adaptive Robust Self-Scheduling for a Wind Producer with Compressed Air Energy Storage", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 9, No. 4, pp. 1659-1671, Oct. 2018.
- [20] Drury, E., Denholm, P. and Sioshansi, R., "The Value of Compressed Air Energy Storage in Energy and Reserve Markets", Energy, Vol. 36, No. 8, pp. 4959-4973, 2011.
- [21] Zhang, J. and et al., "A Bi-Level Program for the Planning of an Islanded Microgrid Including CAES", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 52, No. 4, pp. 2768-2777, Jul. 2016.
- [22] Marano, V., Rizzo, G. and Tiano, F.A., "Application of Dynamic Programming to the Optimal Management of a Hybrid Power Plant with Wind Turbines, Photovoltaic Panels and Compressed Air Energy Storage", Appl. Energy, Vol. 97, No. 1, pp. 849-859, 2012.
- [23] Abbaspour, M., Satkin, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Hoseinzadeh Lotfi, F., and Noorollahi, Y., "Optimal Operation Scheduling of Wind Power Integrated with Compressed Air Energy Storage (CAES)", Renew. Energy, Vol. 51, No. 1, pp. 53-59, 2013.
- [24] Narayan Dash, S., Krushna Padhi, R., Dora, T., Surendar, A. and Cristan, K., "A Robust Optimization Method for Bidding Strategy by Considering the Compressed Air Energy Storage", Sustain. Cities Soc., Vol. 48, No. 1, p. 101564, Jul. 2019.
- [25] Cai, W., Mohammaditab, R., Fathi, G., Wakil, K., Ebadi, A.G. and Ghadimi, N., "Optimal Bidding and Offering Strategies of Compressed Air Energy Storage: a Hybrid Robust-Stochastic Approach", Renew. Energy, Vol. 143, No. 1, pp. 1-8, Dec. 2019.
- [26] Dabbagh, S.R. and Sheikh-El-Eslami, M.K., "Risk Assessment of Virtual Power Plants Offering in Energy and Reserve Markets", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. 5, pp. 3572-3582, Sep. 2016.
- [27] Carrion, M. and Arroyo, J.M., "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 21, No. 3, pp. 1371-1378, Aug. 2006.
- [28] "Red Eléctrica De España, SA. Sistema De Información Del Operador Del Sistema", 2017. [Online]. Available: <http://www.esios.ree.es>.
- [29] "Siemens Wind Turbine SWT-2.3-108, Technical Specifications", 2017. [Online]. Available: <https://www.siemens.com>.
- [30] Daneshi, H. and Srivastava, A.K., "Security-Constrained Unit Commitment with Wind Generation and Compressed Air Energy Storage", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 6, No. 2, pp. 167-175, 2012.
- [31] Conejo, A.J., Carrión, M. and Morales, J.M., "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets", New York: Springer, 2010.