برنامه‌ریزی احتمالاتی واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای در بازار برق با در نظر داشتن قابلیت‌اطمینان

یوسف پرزیوند [۱]، وحید وحیدی نسب [۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۳/۵

چکیده:

یکی از موانع اصلی استحصال انرژی الکتریکی از باد، طبیعت منقطع و متغیر آن است که موجب شده پیش‌بینی توان خروجی تولیدی واحدهای بادی حتی برای چند ساعت امری دشوار باشد. برای حل این مشکل، از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به عنوان مکملی خوب برای مزرعه بادی استفاده می‌شود و این امر به دلیل توانایی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در ذخیره انرژی در حجم قابل توجه و پاسخ‌دهی سریع آن می‌باشد. در این مقاله مدل برنامه‌ریزی مذکور به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر سناریوی دو مرحله‌ای با سه پارامتر تصادفی قیمت بازار، تولید باد و دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای و بادی، به منظور بررسی اثر آن بر قابلیت اطمینان تأمین انرژی ارائه شده است. برای نمایش کارایی مدل ارائه شده در کاهش هزینه‌ها و افزایش سود، ساختارهای بهره‌برداری جدا از هم و نیز هم‌زمان نیروگاه‌های بادی و تلمبه ذخیره‌ای پیشنهاد و مقایسه شده است.

کلمات کلیدی:

مزرعه بادی، نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، قابلیت‌اطمینان، بهینه‌سازی تصادفی

۱) کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی
yosefparzivand@yahoo.com
۲) استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول)،
v_vahidinasab@sbu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

مقدمه

به‌دلیل نگرانی از کاهش منابع سوخت فسیلی و همچنین گرانی روزافزون این منابع، متخصصین صنعت برق به فکر استفاده از منابع تجدیدپذیر و رایگان موجود در طبیعت افتادند. از طرف دیگر، بحران‌های زیست‌محیطی تفکر استفاده از انرژی‌های نو را گسترش داده است. از میان منابع پاک جایگزین سوخت‌های فسیلی، انرژی باد دارای بیشترین پتانسیل برای تولید الکتریسیته می‌باشد. لذا کشورهای صنعتی به فکر گسترش تولید انرژی الکتریکی از طریق ایجاد مزارع بادی افتاده‌اند. یکی از مشکلات بهره‌برداری در هنگام استفاده از انرژی، عدم‌قطعیت تولید ژنراتورهای بادی می‌باشد. بنابراین، برای مطالعه اثر نوسان توان نیروگاه‌های بادی بر روی سیستم قدرت مطالعات زیادی صورت گرفته است.

در مرجع [۷] به مطالعه بهره‌برداری بهینه نیروگاه‌های بادی در حضور نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای پرداخته شده است به نحوی که بدترین سناریوهای تولید واحد بادی در نظر گرفته شود. در این مرجع، قابلیت اطمینان در نظر گرفته نشده است. مرجع [۵] به مطالعه هماهنگی بین نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای در بازار انرژی الکتریکی پرداخته است به طوری که مسئله بهینه‌سازی به صورت برنامه‌ریزی تصادفی فرمول‌بندی شده است ولی قابلیت اطمینان واحدها در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۹] به ارزیابی قابلیت‌اطمینان نیروگاه بادی در هماهنگی با نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در سیستم قدرت پرداخته شده است. در این مرجع برای ایجاد هماهنگی بین مزرعه بادی و نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای از روش شبیه‌سازی مونت–کارلو استفاده شده است و هدف محاسبه شاخص‌های کفایت برای یک دوره یک‌ساله می‌باشد. مرجع [۸] به مدل‌سازی نیروگاه بادی برای مطالعه ارزیابی قابلیت‌اطمینان پرداخته است. در این مرجع از شبیه‌سازی مونت–کارلوی ترتیبی و روش چندحالتی برای نمایش مزرعه بادی استفاده شده است. در مرجع [۴] به تحلیل قابلیت‌اطمینان سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه‌های آبی ذخیره‌ای بزرگ در بازارهای برق پرداخته شده است. هدف بررسی اثر قوانین جدید بازار بر قابلیت‌اطمینان سیستم با حضور واحدهای آبی تلمبه ذخیره‌ای می‌باشد.

در مقاله حاضر، موضوع هماهنگی بین مزرعه بادی با نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به منظور تعیین راهبرد بهینه حضور در بازار برق مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارائه رویکردی جامع‌نگر در برنامه‌ریزی مورد بحث، عدم‌قطعیت‌های ناشی از تولید توان واحدهای بادی، قیمت بازار روز–بعد و نیز دسترس‌پذیری واحدهای تولید در قالب یک بهینه‌سازی تصادفی دوسطحی مدل گردیده است. به این ترتیب، تأثیر احتمال دسترس ناپذیری واحدها بر مطالعه قابلیت اطمینان از منظر کفایت تأمین انرژی الکتریکی مدل شده و برنامه‌ریزی مبتنی بر قابلیت اطمینان واحدها ارائه شده است.

در ادامه این مقاله، ابتدا به مدل‌سازی مسئله هماهنگی واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای پرداخته‌شده و ضمن تشریح چگونگی مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های مسئله، به ارائه مدل ریاضی بهره‌برداری جدا از هم و نیز بهره‌برداری هم‌زمان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای پرداخته خواهد شد. در نهایت، ضمن ارائه نتایج شبیه‌سازی مدل‌های ارائه‌شده و تشریح نتایج حاصل از آن، نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

مدل‌سازی مسئله

در این قسمت، در ابتدا نحوه مدل‌سازی بازار برق در نظر گرفته‌شده تشریح خواهد شد، سپس مدل‌های در نظر گرفته شده برای مزرعه بادی، نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، دسترس‌پذیری واحدها و نحوه در نظر گرفتن آن در مسئله بهینه‌سازی تصادفی تشریح خواهد شد.

بازار برق در نظر گرفته‌شده

در این مقاله، فرض شده است که بازار برق از نوع تک‌گرهی می‌باشد و ساختار قیمت‌های حدی محلی[1] برای قیمت‌گذاری در نظر گرفته شده است. تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به ترتیب پیشنهادهای تولید و مصرف خود برای هر ساعت روز آینده به بازار انرژی الکتریکی از نوع روز- بعد[2] ارائه می‌کنند. بهره‌بردار بازار پس از دریافت پیشنهادهای ارائه‌شده به بازار، الگوریتم تسویه بازار را اجرا کند و بدین ترتیب، پیشنهادهای تولید و مصرف پذیرفته‌شده و یا پذیرفته نشده در بازار مشخص می‌شوند و قیمت حدی سیستم در هر ساعت نیز مشخص می‌گردد. فرایند تسویه بازار نیز بدین گونه است که به هر تولیدکننده برنده شده در بازار در هر ساعت، به اندازه میزان تولید ساعتی پذیرفته شده در بازار ضربدر قیمت حدی سیستم در آن ساعت هزینه پرداخت می‌شود و در صورتی که نتواند به اندازه پیشنهاد تولید ساعتی که در بازار پذیرفته شده است، تولید نماید باید هزینه عدم تعادل را پرداخت نماید. هزینه عدم تعادل در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت درصدی از قیمت حدی سیستم ضربدر قدر مطلق میزان نامتعادلی ایجاد شده (اختلاف بین تولید واقعی و مقدار پیشنهاد پذیرفته در بازار در آن ساعت) توسط آن تولیدکننده در نظر گرفته شده است. البته هر نوع الگوریتم دیگر نیز قابل اعمال به مدل برنامه‌ریزی تصادفی در نظر گرفته شده در این مقاله می‌باشد.

مدل‌سازی عدم‌قطعیت توان بادی

روش‌های سری زمانی ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های پیش‌بینی سرعت باد می‌باشند. بنابراین، در اکثر مراجع، از این روش‌ها برای مدل‌سازی سرعت باد استفاده می‌شود. در ادامه، روش سری زمانی ARMA[3] که در بیشتر مقالات برای مدل‌سازی باد به‌کار برده شده است، آمده است. الگوریتم این روش از لحاظ مفهوم خیلی ساده است، به این صورت که سرعت باد در هر ساعت بستگی به سرعت باد در ساعت قبل دارد. در این روش، تولید سرعت باد با استفاده از یک عدد

1) Locational Marginal Price (LMP)
2) Day-ahead market
3) Auto Regressive Moving Average (ARMA)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

تصادفی صورت می‌گیرد (به دلیل تصادفی بودن شرایط آب و هوایی). این روش با استفاده از مفاهیم آماری سرعت باد را پیش‌بینی می‌کند و به روش ARMA مشهور می‌باشد [۶]. سرعت باد در ساعت t می‌تواند توسط سری زمانی با پارامترهای y_t سرعت باد در ساعت t (تصادفی)، w_t مقدار متوسط سرعت باد در ساعت t و δ_t انحراف استاندارد محاسبه شود. یادآوری می‌شود که در این روش پارامترهای w_t و δ_t جزو اطلاعات ورودی می‌باشند. این پارامترها از طریق مفاهیم آماری و سرعت باد اندازه‌گیری شده در هر ساعت، برای یک مدت زمان طولانی در محل مورد نظر به دست می‌آیند. برای مشابه‌سازی سرعت باد در این مقاله، از اطلاعات سرعت باد یک ناحیه جغرافیای خاص که برای چند سال گذشته در دسترس بود، استفاده شده است. مدل ARMA سرعت باد منطقه مورد نظر به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

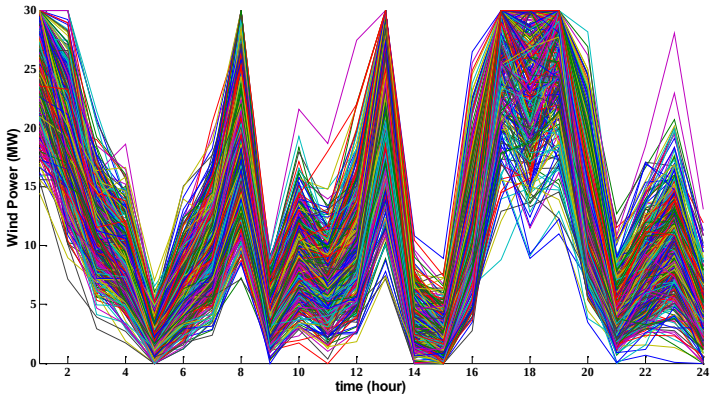
$$y_t = ۰/\ ۸۷۸۲ y_{t-۱} - ۰/\ ۰۰۶۶ y_{t-۲} + ۰/\ .۲۶۵ y_{t-۳} + \alpha_t - ۰/\ ۲۱۶۲ \alpha_{t-۱} + ۰/\ ۰۰۹۱ \alpha_{t-۲} \qquad (۱)$$

$$\alpha_t \in NID\left(۰\ , ۰/\ ۵۵۷۹۲^{۲}\right) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) α_t نویز در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی سرعت باد با استفاده از روش ARMA می‌باشد. در نهایت، با استفاده از رابطه (۳) می‌توان مدل سرعت باد ساعتی را در هر سناریو و ساعت محاسبه کرد:

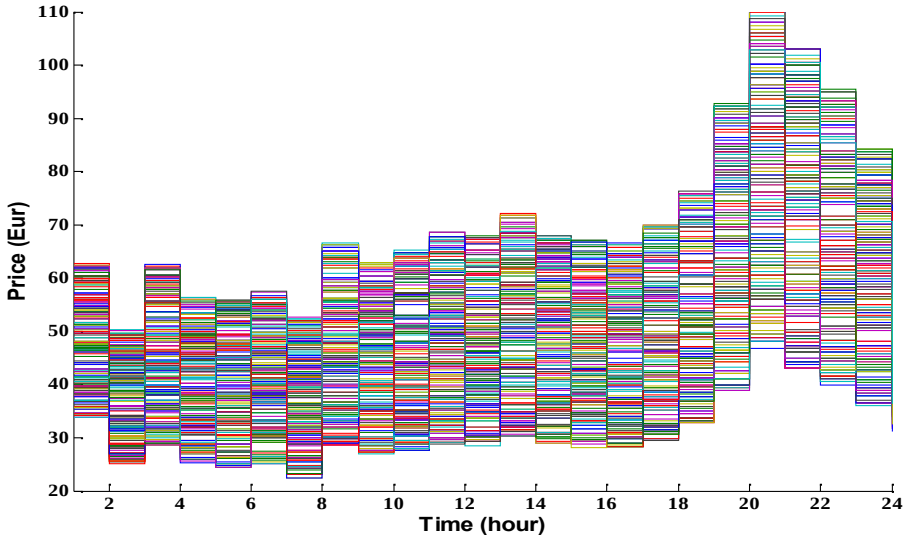
$$SW_t = \mu_t + \sigma_t \cdot y_t \qquad (۳)$$

از آنجا که در مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی مزرعه بادی نیاز به سناریوهای توان پیش‌بینی شده باد می‌باشد، از منحنی توان–سرعت توربین‌های بادی نوعی که در مرجع [۶] آورده شده است، استفاده می‌شود. از آنجا که مشخصه خروجی توان–سرعت این توربین‌ها غیرخطی است، از توابع ریاضی غیرخطی چندضابطه برای بیان آن استفاده می‌شود، به طوری که ضرایب این روابط به مشخصات توربین از جمله حداقل سرعت مجاز، سرعت نامی و حداکثر سرعت مجاز بستگی دارد. شکل (۱) توان خروجی مزرعه بادی را برای ۲۰۰۰ سناریوی ۲۴ ساعته نشان می‌دهد.



شکل ۱) سناریوهای توان بادی تولید شده (۲۰۰۰ سناریو)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل ۲) سناریوهای قیمت تولید شده (۲۰۰۰ سناریو)

مدل‌سازی عدم‌قطعیت قیمت انرژی الکتریکی

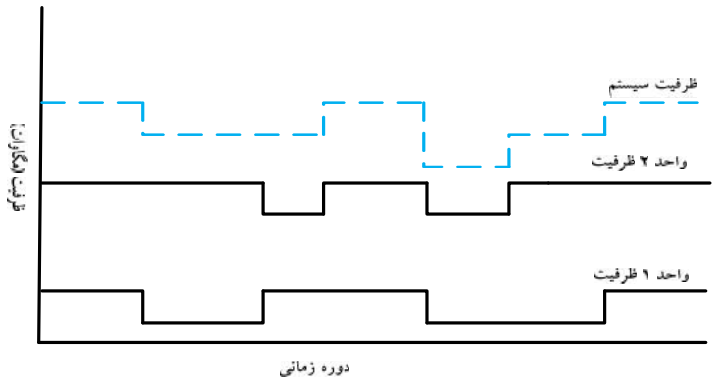
روش‌های گوناگونی برای تولید سناریوی قیمت در مراجع مختلف معرفی شده است. در این مقاله، از روش انتخاب از یک بازه مشخص استفاده شده است. در روش تولید سناریو با استفاده از انتخاب از یک بازه مشخص، مقادیر میانگین قیمت در مدت یک ماه برای هر ساعت از یکی از بازارهای برق جهان به عنوان اطلاعات در دسترس در نظر گرفته شده است [۲]. سپس ۱/۱۵ برابر مقدار میانگین هر ساعت به عنوان کران بالای بازه و ۰/۸۵ برابر مقدار میانگین هر ساعت به عنوان کران پایین بازه انتخاب شده است. در نهایت، برای هر ساعت به اندازه تعداد سناریوها (۲۰۰۰ سناریو) عدد تصادفی با توزیع یکنواخت از این بازه انتخاب می‌شود و این روند برای تمام ساعت‌ها (در اینجا ۲۴ ساعت) تکرار می‌شود. شکل (۲) سناریوهای قیمت تولید شده با استفاده از روش تشریح شده را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدها

موضوع مهم این است که در فضای تجدید ساختار شده، مسئله قابلیت‌اطمینان و دسترس‌پذیری واحدها چه تأثیری برروی رفتار مالکان نیروگاه دارد. به هر حال، در چنین فضایی، قابلیت‌اطمینان کل سیستم شاید موضوع نگرانی مالکان بخش خصوصی نیروگاه‌ها نباشد و شاید بتوان گفت که دغدغه اصلی این مالکان نیروگاه در چنین فضایی حداکثر سازی سود خود می‌باشد. بنابراین، در چنین فضایی مالک نیروگاه بیشتر به این نکته باید توجه کند که دسترس‌پذیری واحدها چه تأثیری برروی پیشنهاد تولید ارائه شده به بازار و در نهایت بر میزان سود خواهد گذاشت. با توجه به اینکه برنامه‌ریزی دو

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

نیروگاه مبتنی بر روش سناریو- محور است، در ادامه روشی برای تولید سناریوی دسترس‌پذیری واحدها ارائه خواهد شد. در این مقاله، از مدل دوحالته مارکوف برای نمایش حالت عملکردی واحدهای نیروگاه‌ها استفاده شده است.



شکل ۳) عملکرد واحدهای تولیدی مختلف و ظرفیت در دسترس سیستم

از آنجا که عملکرد هر واحد بادی یا تلمبه‌ذخیره‌ای در هر ساعت وابسته به عملکرد سیستم در ساعات قبل است، برای تولید سناریوی دسترس‌پذیری واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای از روش مونت-کارلو برای مشابه‌سازی عملکرد هر واحد استفاده شده است. بنابراین، برای تولید سناریوی دسترس‌پذیری هر یک از واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای، در هر ساعت و برای هر واحد به تعداد سناریوها (در اینجا ۱۰۰ سناریو برای هر واحد) عدد تصادفی با توزیع یکنواخت از بازه [۰،۱] تولید می‌شود. سپس هر یک از این اعداد تصادفی با مقدار نرخ خروج اجباری (FOR)[1] واحد مورد نظر مقایسه می‌شود. اگر عدد تصادفی مورد نظر از مقدار FOR بزرگ‌تر باشد، واحد در آن سناریو و ساعت در دسترس می‌باشد. در غیر این صورت، واحد به تعداد ساعت لازم برای تعمیر واحد (MTTR)[2] در آن سناریو در دسترس نیست. این امر به آن دلیل است که اگر واحدی در ساعتی به دلیل خرابی از مدار خارج شود، در بقیه ساعات نیز تا تعمیر کامل در دسترس نخواهد بود [۱]. پس از مشخص شدن وضعیت در دسترس بودن یا نبودن هر یک از واحدها در هر سناریو و ساعت، ظرفیت در دسترس هر یک از نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای از تجمیع ظرفیت در دسترس تک‌تک واحدها مطابق شکل (۳) حاصل می‌شود.

برای مدل‌سازی هر یک از سه پارامتر دارای عدم‌قطعیت توان باد، قیمت انرژی الکتریکی و دسترس‌پذیری واحدها تعداد بسیار زیادی سناریو تولید شد. اما با افزایش تعداد سناریوها، حل مسئله برنامه‌ریزی تصادفی مشکل و بسیار زمان‌بر خواهد بود. برای حل این مشکل در این مقاله با استفاده از الگوریتم پیش‌رو سریع با استفاده از حل‌کننده SCENRED2 از حل‌کننده‌های نرم‌افزار GAMS تعداد سناریوها به تعداد مناسب کاهش یافته است. این الگوریتم محتمل‌ترین سناریوها را انتخاب می‌کند و سپس به هر یک از این سناریوها متناسب با احتمال رخدادشان، احتمال رخداد داده می‌شود [۳]، به-

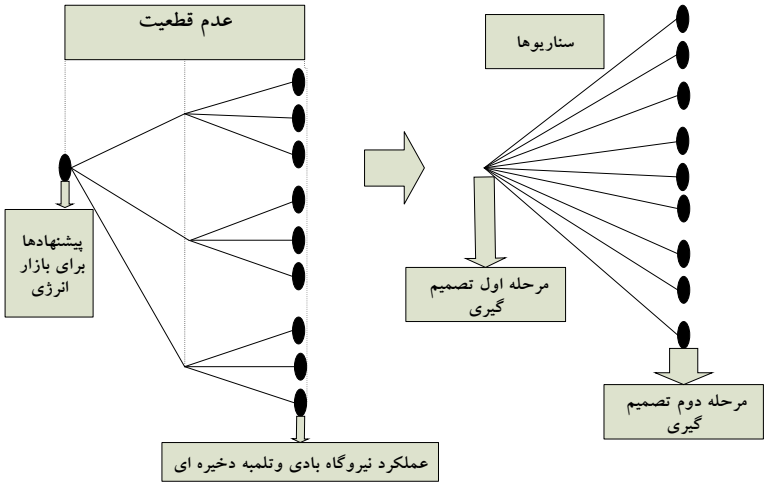
1) Force Outage Rate (FOR)
2) Mean Time To Failure (MTTR)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

طوری که تعداد سناریوها برای هر حالت به ۵ سناریو کاهش یافته است. در نهایت، برای در نظر گرفتن کلیه حالت‌ها از درخت سناریو استفاده شده است [۲]. به‌طور مثال، در حالت بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه با در نظر گرفتن قابلیت-اطمینان برای در نظر گرفتن کلیه حالت‌ها نیاز است که تعداد ۶۲۵ سناریو متناسب با درخت سناریو در نظر گرفته شود. این مفهوم در شکل (۴) نشان داده شده است.

مدل ریاضی مسئله

در این مقاله دو ساختار مختلف مطالعه می‌شود؛ ساختار اول حالتی است که نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و مزرعه بادی به صورت جداگانه بهره‌برداری می‌شوند و در ساختار دوم، دو نیروگاه در کنار هم و به عنوان مکمل هم عمل می‌نمایند. در این بخش، روابط ریاضی توصیف کننده مسئله برای هر یک از ساختارهای مطرح آورده شده است. بعلاوه، در این مقاله در رابطه تابع هدف از تابع قدر مطلق استفاده شده است، زیرا این تابع به سادگی قابل خطی‌سازی می‌باشد و بدین ترتیب، حل مسئله با روش‌های خطی امکان پذیر خواهد بود. این شیوه بیان مسئله این امکان را می‌دهد ضرایب جریمه برای حالت‌های مختلف نامتعادلی در جهت‌های مثبت و منفی تعریف گردد. در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی دو نیروگاه در دو حالت بهره‌برداری هم‌زمان و بهره‌برداری مستقل از هم بدون در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان ارائه خواهد شد و در نهایت، مدل ریاضی کامل مسئله با در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان ارائه خواهد شد. در نهایت باید گفت که مدل بهینه‌سازی مسئله از نوع برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای می‌باشد. برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با دسته‌ای از مسائل سروکار دارد که در آن تصمیمات بهینه تحت شرایط نامعینی گرفته می‌شود که این عدم‌قطعیت را می‌توان در هر تکرار طبق فرایند تصادفی چندمتغیره با درخت سناریو تقریب زد [۵].



شکل ٤) نمایش عدم‌قطعیت و مدل دو مرحله‌ای [۵]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

برنامه‌ریزی خطی دو مرحله‌ای از جمله روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای می‌باشد که بسیار پرکاربرد می‌باشد. این نوع برنامه‌ریزی با مسائلی که باید تصمیماتی در دو مرحله زمانی مختلف گرفته شود، سروکار دارد [۱۲]. این مدل شامل مجموعه‌ای از تصمیمات است که به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شود: مرحله اول تصمیم‌گیری باید قبل از آنکه متغیرهای تصادفی معلوم شود، گرفته شوند. مرحله دوم تصمیم‌گیری باید بعد از آنکه متغیرهای تصادفی اتفاق افتادند، گرفته شود که البته تحت تأثیر تصمیمات مرحله اول می‌باشد. برای در نظر گرفتن دو منبع عدم‌قطعیت از نمایش گسسته برای ساختن درخت تصادفی مطابق شکل (۴) استفاده کرده‌ایم به‌طوری که در اینجا مرحله اول تصمیم مربوط به پیشنهاد تولید ارائه شده به بازار می‌باشد که مستقل از هرگونه تحقق فرایند تصادفی می‌باشد و مرحله دوم تصمیم‌گیری مربوط به نحوه بهره‌برداری از نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای به ازای هر تحقق فرایند تصادفی می‌باشد.

مدل مزرعه بادی

توان باد تابعی از مکعب سرعت باد می‌باشد. با وجود این حقیقت در مسائل مربوط به پیش‌بینی سرعت باد، سرعت آن را در نظر می‌گیرند. اما در این مقاله مستقیما توان مزرعه بادی به عنوان سناریوی پیش‌بینی توان مزرعه بادی در مسئله برنامه‌ریزی جهت شرکت در بازار لحظه‌ای در نظر گرفته شده است. بنابراین، توان حقیقی تولید شده توسط مزرعه بادی در هر سناریو باید به این مقدار پیش‌بینی شده محدود باشد. با توجه به آنچه تاکنون گفته شد، مدل ریاضی مزرعه بادی در حالت بهره‌برداری به صورت مجزا از نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای به صورت زیر خواهد بود [۵, ۱۰]:

$$max \sum_{s \in S} \rho_s \sum_{h \in H} \left[\pi_{sh} . g_{sh}^{w} - w . \pi_{sh} . \left| g_{sh}^{w} - x_h^{w} \right| \right] \quad (۴)$$

$$subject\ to \quad 0 \le g_{sh}^{w} \le W_{sh} \quad \forall s \in S, \quad (۵)$$

$$0 \le x_h^{w} \le \bar{g}^{w} \quad , \quad \forall h \in \quad (۶)$$

پارامتر ρ_s احتمال رخداد سناریو، π_{sh} قیمت برق در هر سناریو و ساعت ، w ضریب جریمه و مقداری برابر ۱/۳۶ دارد. متغیر g_{sh}^{w} تولید مزرعه بادی در هر سناریو و ساعت و جزو متغیرهای مرحله دوم تصمیم‌گیری می‌باشد، x_h^{w} همان پیشنهاد تولید مزرعه بادی در هر ساعت می‌باشد و این متغیر مقداری مستقل از سناریو دارد و جزو متغیرهای مرحله اول تصمیم‌گیری می‌باشد. W_{sh} توان بادی پیش‌بینی‌شده می‌باشد. همان‌طورکه در معادله (۴) مشاهده می‌شود، تابع هدف شامل دو جمله می‌باشد به‌طوری که جمله اول درآمد حاصل از فروش انرژی را نشان می‌دهد و جمله دوم هزینه ناشی از عدم‌تعادلی را نشان می‌دهد که به صورت ضریبی از قیمت لحظه‌ای بازار مدل‌سازی شده است. معادلات (۵) و (۶) به ترتیب دو قید مربوط به تولید باد می‌باشند که باید در هر سناریو و ساعت توان حقیقی تولید شده توسط مزرعه بادی از مقدار پیش‌بینی شده کمتر باشد و قید دوم بیانگر این است که پیشنهاد تولید مزرعه بادی به بازار برای هر ساعت از میزان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

ظرفیت مزرعه بادی کوچک‌تر باشد.

مدل نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای

نیروگاه آبی تلمبه‌ذخیره‌ای در نظر گرفته شده از دو منبع بالادستی و پایین‌دستی با پمپ- توربین‌های برگشت‌پذیر تشکیل شده است که می‌توانند در هر دو حالت ژنراتوری و یا موتوری کار کنند. نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در زمان‌های اوج مصرف شبکه با مصرف توان، آب را به منبع بالادستی پمپاژ می‌کند و در زمان‌های اوج مصرف با تولید انرژی الکتریکی آب از منبع بالادستی به منبع پایین‌دستی منتقل می‌شود. در این حالت، توربین آبی در حالت ژنراتوری عمل می‌کند. این چرخه از نظر اقتصادی با صرفه می‌باشد زیرا در زمان‌های غیر اوج مصرف قیمت برق پایین و در زمان‌های اوج مصرف قیمت برق بالا می‌باشد، به‌طوری که درآمد حاصل از فروش انرژی هزینه ناشی از خرید انرژی و تلفات سیستم را جبران می‌نماید. حجم آب پشت منابع بالادستی و پایین‌دستی به صورت انرژی در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حالت بهره‌برداری به صورت مجزا از مزرعه بادی به صورت زیر خواهد بود:

$$\max \sum_{s\in S}\rho_s \sum_{h\in H}\left[\pi_{sh}.(g^{p}_{sh}-d^{p}_{sh})-c^{su}.y_{sh}-c^{sd}.z_{sh}-w.\pi_{sh}.\left|g^{p}_{sh}-d^{p}_{sh}-x^{p}_{h}\right|\right] \quad (۷)$$

$$subject\ to \quad v^{u}_{sh} = v^{u}_{sh-1}+\eta d^{p}_{sh}-g^{p}_{sh}, \quad \forall s\in S, \forall h\in H \quad (۸)$$

$$v^{l}_{sh} = v^{l}_{sh-1}+g^{p}_{sh}-\eta d^{p}_{sh}, \quad \forall s\in S, \forall h\in H \quad (۹)$$

$$\underline{v}^{u} \le v^{u}_{sh} \le \bar{v}^{u}, \quad \forall \in \ \forall \in s \quad (۱۰)$$

$$\underline{v}^{l} \le v^{l}_{sh} \le \bar{v}^{l}, \quad \forall \in \ \forall \in s \quad (۱۱)$$

$$v^{u}_{sh} = vf^{u}, \quad {}^{l}_{sh}v = vf, \quad \forall \in \ \forall s = S\varepsilon, \quad (۱۲)$$

$$u_{sh+1} = u_{sh} + y_{sh} - z_{sh}, \quad \forall \in \ s\forall \ S\in, \quad (۱۳)$$

$$\underline{d}^{p}.u_{sh} \le d^{p}_{sh} \le \bar{d}^{p}.u_{sh}, \quad \forall \in \ s\forall \ S\in, \quad (۱۴)$$

$$t_{sh} \in \{۰,۱\} \quad (۱۵)$$

$$t_{sh} \le ۱-\frac{۱}{N}.u_{sh}, \quad \forall \in \ \forall \in s \quad (۱۶)$$

$$-\underline{d}^{p}.N \le x^{p}_{h} \le \bar{g}^{p}.N, \quad \forall \in \quad (۱۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

$$u_{sh},\ y_{sh},\ z_{sh} \in \{0,1,2,\ldots,N\} \qquad (۱۸)$$

$$0 \le g_{sh}^{p} \le t_{sh}.\bar{g}^{p}.N \quad , \quad \forall s \in S \ \forall h \in H \qquad (۱۹)$$

در این روابط، g_{sh}^{p} متغیر تولید و d_{sh}^{p} متغیر مصرف نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و y_{sh} و z_{sh} به ترتیب متغیر تعداد واحدهای روشن و خاموش شده در هر سناریو و ساعت می‌باشند. متغیر x_{h}^{p} پیشنهاد تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در هر ساعت می‌باشد. متغیرهای v حجم انرژی منبع در هر یک از منابع بالادستی و پایین‌دستی را نشان می‌دهد. حجم حداکثر ($\bar{v}^{u}, \bar{v}^{l}$) و حداقل ($\underline{v}^{u}, \underline{v}^{L}$) ظرفیت منابع به ترتیب برابر ۸۰ مگاوات و صفر مگاوات در نظرگرفته شده است، یعنی ظرفیت دو منبع برابر فرض شده است. بازده سیستم نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای (η) ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. معادله (۲۳) تابع هدف نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را نشان می‌دهد که جمله اول درآمد حاصل از فروش انرژی، جمله دوم و سوم به ترتیب هزینه تحمیلی بر نیروگاه در اثر روشن و خاموش شدن را نشان می‌دهد و جمله چهارم هزینه ناشی از عدم‌تعادل در تولید یا مصرف انرژی را نشان می‌دهد. معادله (۲۴) و (۲۵) به ترتیب مربوط به قید سطح آب منبع بالادست و پایین‌دست را نشان می‌دهند. روابط دیگر نیز به ترتیب قید مربوط به ظرفیت حوضچه‌ها و تعداد واحدهای روشن و خاموش واحدها را نشان می‌دهد. پارامترهای vf^{d} ،vf^{u} به ترتیب حجم آب منابع بالادستی و پایین‌دستی در پایان افق برنامه‌ریزی یعنی ساعت ۲۴ را نشان می‌دهد. این پارامترها به ترتیب مقدار ۱۵ و ۲۵ مگاوات‌ساعت را دارند [۵]. قید (۲۹) تعداد واحدهای روشن را در حالت پمپی در هر سناریو و ساعت نشان می‌دهد. متغیر باینری t_{sh} حالت کاری نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای یعنی از جهت ژنراتوری و یا پمپی را در هر سناریو و ساعت نشان می‌دهد.

مدل ریاضی بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه

در این حالت، دو نیروگاه به صورت هم‌زمان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، به این صورت که دو نیروگاه به‌طور هم زمان تنها یک پیشنهاد تولید به بازار ارائه خواهد نمود. قیود مسئله در این حالت، مجموعه‌ای شامل قیود دو نیروگاه در حالت بهره‌برداری مستقل از هم می‌باشد [۱۱].

$$\max \sum_{s \in S} \rho_{s} \sum_{h \in H} \left[\pi_{sh}.(g_{sh}^{w}+g_{sh}^{p}-d_{sh}^{p}) - c^{su}.y_{sh} - c^{sd}.z_{sh} - w.\pi_{sh}.\left| g_{sh}^{w}+g_{sh}^{p}-d_{sh}^{p}-x_{h}^{wp} \right| \right] \qquad (۲۰)$$

نسبت به قیود زیر:

$$0 \le g_{sh}^{w} \le W_{sh} \quad , \forall s \in S \ \forall h \in H \qquad (۲۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

$$-\underline{d}^{p}.N \le x_h^{wp} \le \left(\overline{g}^{p}.N + \overline{g}^{w}\right),\ \forall\ h \in H \qquad (۲۲)$$

به همراه قیدهای (۸) الی (۱۸) (۲۳)

مدل مزرعه بادی با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری

مدل و روابط مزرعه بادی همان مدل و روابط قبلی در بخش مدل مزرعه بادی می‌باشد و تنها سناریوهای پیش‌بینی تولید بادی و تعداد آن تغییر می‌کند.

$$P_w\ (s,h) = \frac{1}{WN} \times P_w^f\ (s,h) \times WC\ (s,h) \qquad (۲۴)$$

$P_w^f\ (s,h)$ توان بادی پیش‌بینی شده و $WC\ (s,h)$ ظرفیت در دسترس مزرعه بادی در سناریو s و ساعت h می‌باشد. در نهایت، از مقدار $P_w\ (s,h)$ در برنامه‌ریزی احتمالاتی نیروگاه بادی در کنار تلمبه‌ذخیره‌ای استفاده می‌شود که شامل ۲۵ سناریوی ۲۴ ساعته می‌باشد. بنابراین، قید (۵) مدل مزرعه بادی و قید (۲۱) مدل بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$0 \le g_{sh}^{w} \le P_w\ (s,h) \quad ,\ \forall\ \in s \quad S\forall\ \in h \qquad (۲۵)$$

مدل نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری واحدها

مدل و روابط ریاضی مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان واحدها بسیار مشابه حالت بدون در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان واحدها در بخش (۳-۲) می‌باشد و تنها یک قید به مسئله اضافه می‌شود؛ که قید (۲۶) اضافه شده بیانگر این است که تعداد واحدهای پمپی روشن نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در هر سناریو s و ساعت h، باید کوچک‌تر یا مساوی تعداد واحدهای در دسترس نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای (A_{sh}) در آن ساعت و آن سناریو باشد. این قید در زیر بیان شده است:

$$u_{sh} \le A_{sh} \quad ,\ \forall\ \in \quad \forall s \in S \qquad (۲۶)$$

و قید (۱۹) به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$0 \le g_{sh}^{p} \le t_{sh}.\overline{g}^{p}.A_{sh} \quad ,\forall\ \in s\ \ \forall S \notin\ h \qquad (۲۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

قید (۲۷)، بیان می‌کند که تعداد واحدهای روشن در حالت ژنراتوری باید کوچک‌تر یا مساوی واحدهای در دسترس باشد.

مدل بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه با در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان

این حالت، ترکیبی از دو بخش قبل می‌باشد، به این صورت که برای مدل‌سازی دسترس‌پذیری واحدهای بادی از همان روش بخش مدل مزرعه بادی که دسترس‌پذیری واحدها در نظر گرفته شده بود، استفاده شده است، به طوری که دسترس‌پذیری واحدها به صورت مستقیم بر روی میزان توان پیش‌بینی شده برای نیروگاه بادی تأثیر داده شده است. یعنی از مقدار رابطه (۲۴) به عنوان توان پیش‌بینی شده باد استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی قابلیت‌اطمینان واحدهای تلمبه ذخیره‌ای از همان روش نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری واحدها استفاده شده است، به طوری که به مدل بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه در بخش قبل سه قید (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) اضافه می‌شود که تأثیر دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای و بادی را بر روی میزان تولید مدل‌سازی می‌کند.

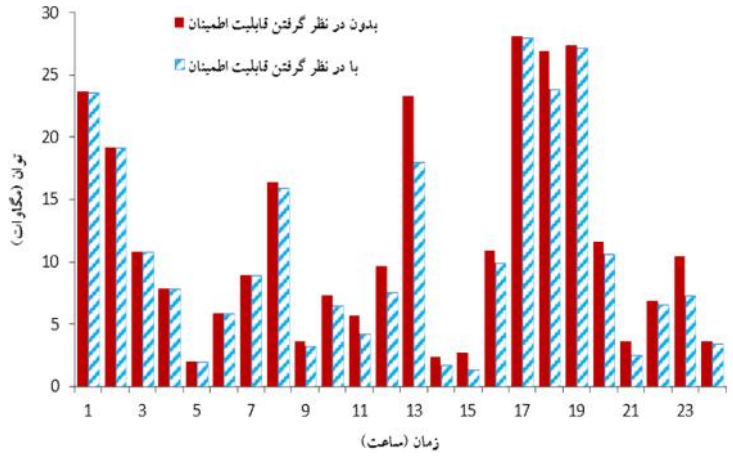
نتایج حاصل از شبیه‌سازی

ظرفیت نیروگاه بادی در نظر گرفته شده ۳۰ مگاوات و ظرفیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۱۰ مگاوات می‌باشد. اطلاعات مربوط به نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۵) پیشنهاد تولید مزرعه بادی را در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن دسترس‌پذیری نشان می‌دهد. در حالتی که دسترس‌پذیری در نظر گرفته شده در بعضی از ساعات پیشنهاد تولید انرژی از مقدار پیشنهاد تولید انرژی در حالتی که دسترس‌پذیری در نظر گرفته نشده، کمتر است. این امر سبب می‌شود درآمد مورد انتظار در حالتی که دسترس‌پذیری واحدها در نظر گرفته شده کمتر شود. از آنجا که نرخ خرابی ساعتی واحدهای بادی کم است، تأثیر کمی بر پیشنهاد تولید گذاشته است و در بیشتر ساعات، پیشنهاد تولید مزرعه بادی در دو حالت برهم منطبق هستند.

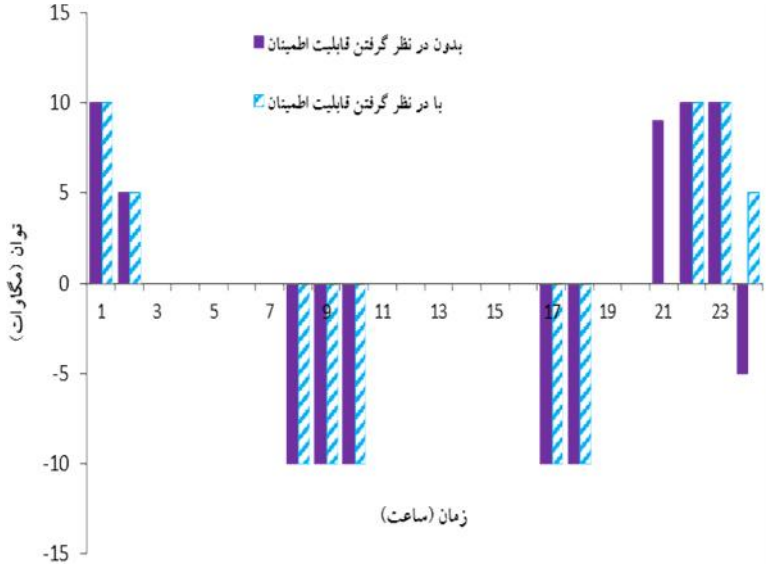
جدول ۱) اطلاعات نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای [۵]

حوضچه	$\overline{v}$ [MWh]	$\underline{v}$ [MWh]	$vo = vf$ [MWh]	$\underline{d}$ [MW]	$N \times \overline{d}$ [MW]	$N \times \overline{g}$ [MW]
بالایی	۸۰	۰	۱۵	۵	۱۰	۱۰
پائینی	۸۰	۰	۲۵			

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل ۵) پیشنهاد تولید مزرعه بادی با و بدون در نظر گرفتن دسترس‌پذیری

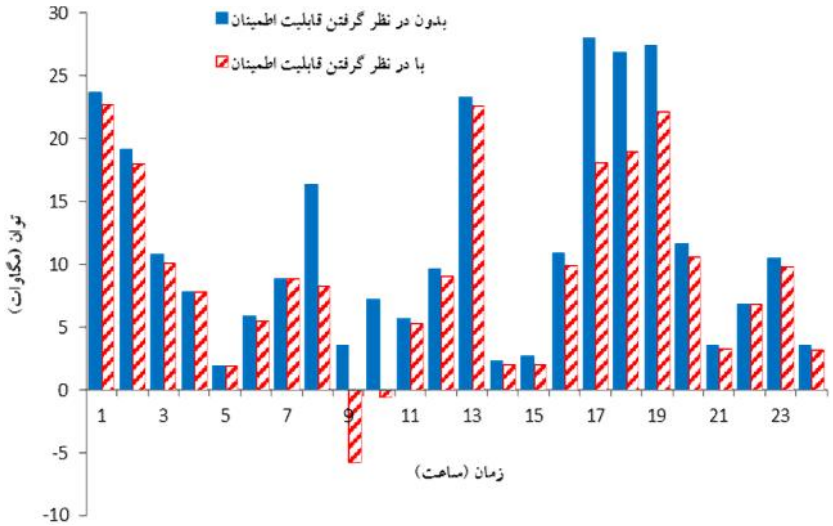


شکل ٦) پیشنهاد تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در دو حالت مختلف

شکل (۶) پیشنهاد تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را برای حالت بهره‌برداری مجزا با در نظر داشتن دسترس‌پذیری واحدها و همچنین بدون در نظر گرفتن دسترس‌پذیری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود اگر دسترس‌پذیری واحـدها در نظـر گرفتـه شود، پیشنهاد تولید نیروگاه نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان در بعضی ساعات متفاوت خواهد بود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

نتایج بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه در شکل (۷) آورده شده است، به طوری که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان، پیشنهاد تولید مقداری متفاوت با حالت بدون در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان دارد. این همان نتایج مورد انتظار است، زیرا با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری، مطمئنا در بعضی ساعات تعداد واحدهای کمتری در دسترس خواهد بود.



شکل ۷) پیشنهاد تولید دو نیروگاه به صورت هم‌زمان در دو حالت مختلف

جدول ۲) سود مورد انتظار در حالت‌های مختلف بهره‌برداری

با دسترس‌پذیری	بدون در نظرگرفتن دسترس‌پذیری واحدها		
سود مورد انتظار	سود مورد انتظار	ساختار	
۱۲۱۹۶/۲	۱۲۴۴۴/۸	مزرعه بادی	بهره‌برداری مجزا
۸۰۰/۷	۸۲۸/۸	تلمبه‌ذخیره‌ای	
۱۲۹۹۶/۹	۱۳۲۷۳/۶	جمع	
۱۳۲۱۶/۱	۱۳۳۳۶/۹	بهره‌برداری هم‌زمان	

جدول (۲) سود مورد انتظار در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان واحدهای تولیدی را نشان می‌دهد. در حالتی که دسترس‌پذیری واحدها در نظر گرفته شده است، اگر دو نیروگاه هم‌زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند، سود مورد انتظار حاصل از شرکت در بازار لحظه‌ای بیشتری را نسبت به حالتی که دو نیروگاه به صورت مجزا در بازار شرکت نمایند،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

به‌دست می‌آورند. مشاهده می‌شود که سود مورد انتظار در حالتی که دسترس‌پذیری واحدها در نظر گرفته نشده باشد، بیشتر از حالتی است که دسترس‌پذیری واحدها در نظر گرفته شده است. این شرایط برای هر نوع حالت بهره‌برداری چه به صورت مجزا و چه بهره‌برداری هم‌زمان صادق می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی احتمالاتی نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها بررسی گردید و به طور مشخص، ساختاری برای مدل‌سازی قابلیت‌اطمینان واحدها در برنامه‌ریزی احتمالاتی دو نیروگاه چه به صورت بهره‌برداری مجزا از هم و چه به صورت بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه معرفی و ارائه شد. مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان یک مدل کامل و جامع می‌باشد. زیرا پیشنهادهای تولید ایجاد شده توسط این مدل، با سطح اطمینان خوبی امکان برآورده شدن آن در زمان حقیقی تولید وجود دارد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، پیشنهاد می‌شود دو نیروگاه به صورت هم‌زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند. زیرا در این حالت، هزینه عدم‌تعادل ناشی از پیشنهاد تولید و تولید در زمان حقیقی حداقل خواهد شد و به تبع آن، سود حاصل از مشارکت در بازار بیشتر خواهد شد.

منابع

[1] Amjady N. and Vahidinasab V. 2013. "*Security-constrained self-scheduling of generation companies in day-ahead electricity markets considering financial risk*," Energy Conversion and Management, Vol. 65, pp. 164-172.

[2] Conejo A. J., Carrión M., and Morales J. M.. 2010. "*Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*," New York: Springer.

[3] T GAMS. Corporation, 2012. "*The Solver Manuals*," Washington DC, Available Online: www.GAMS.manual.com.

[4] González C., Juan J., Mira J., Prieto F. J., and Sánchez M. J. 2005. "*Reliability Analysis for Systems With Large Hydro Resources in a Deregulated Electric Power Market*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, pp. 90-95

[5] González J. G., Muela R. M. R. d. l., Santos L. M., and González A. M.. 2008. "*Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, pp. 456-461.

[6] Hu P. 2009. "*RelIability Evaluation of Electric Power Systems Including Wind Power and Energy Storage* ", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Saskatchewan Saskatchewan, Saskatoon.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

[7] Jiang R., Wang J., and Guan Y. 2011. "*Robust Unit Commitment With Wind Power and Pumped Storage Hydro*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, pp. 1-11.

[8] Karki R., Hu P., and Billinton R. 2006 "*A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, pp. 533-540.

[9] Karki R., Hu P., and Billinton R. 2010. "*Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, pp. 685-693.

[10] Matevosyan J. and Soder L. 2006. "*Minimization of Imbalance Cost Trading Wind Power on the Short-Term Power Market*," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, pp. 1396-1404.

[11] Shahidehpour M., Yamin H., and Li Z. 2002. "*Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management*," Joun Wiley.

[12] Vahidinasab V. and Jadid S. 2010. "*Stochastic Multiobjective Self-Scheduling of a Power Producer in Joint Energy and Reserves Markets*," Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 760-769

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]