

استراتژی نوین پیشنهاددهی واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای بر مبنای روش بهینه‌سازی مقاوم

یوسف پریوند، کارشناسی ارشد، وحید وحیدی‌نسب*، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران

*v_vahidinasab@sbu.ac.ir

چکیده: این مقاله، روشی نوین برای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک یک نیروگاه تجدیدپذیر بادی و تلمبه ذخیره‌ای را ارائه می‌نماید. تولیدکننده مذکور از نوع قیمت‌پذیر بوده و در بازار انرژی از نوع حوضچه توان شرکت می‌نماید. مدل ارائه شده قادر است تا به طور هم‌زمان سه عدم قطعیت تأثیرگذار بر پیشنهاددهی، یعنی عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت برق، توان تولیدی واحدهای بادی و نیز دسترس‌پذیری واحدها را در نظر بگیرد. ویژگی بارز مدل ارائه شده این است که در این روش دیگر نیازی به پیش‌بینی متغیرها و پارامترهای دارای عدم قطعیت نمی‌باشد؛ بلکه به جای آن برای پارامترهای نامعین یک بازه موسوم به «بازه مطمئن» تعریف می‌شود. سپس، این بازه‌ها به طور متوالی به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند، به طوری که امکان تعریف و نیز حل ساده‌تر مجموعه‌ای از مسائل برنامه‌ریزی مقاوم عدد صحیح فراهم گردد. ویژگی دیگر روش بهینه‌سازی مقاوم به دست آوردن جواب‌های ممکن و بهینه به ازای رخداد بدترین حالت ممکن برای پارامترهای دارای عدم قطعیت در بازه عدم قطعیت تعریف شده برای آن‌ها می‌باشد. مدل ارائه شده در این مقاله به گونه‌ای است که با حل آن، به طور مستقیم اطلاعات کافی برای ساختن منحنی‌های پیشنهاددهی ساعتی واحدها ایجاد می‌شود. به منظور آزمایش مدل پیشنهادی، از یک شبکه نمونه استفاده شده و نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مزرعه بادی، واحد آبی تلمبه ذخیره‌ای، بهینه‌سازی مقاوم، منحنی پیشنهاد تولید، بازار برق.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۰۴/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر وحید وحیدی‌نسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران- تهرانپارس - دانشگاه شهید بهشتی - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

متغیر باینری برای عدم قطعیت ساعتی توان بادی.	S_h	فهرست علائم و اختصارات
متغیر باینری کمکی	$liny_h$	(الف) شاخص‌ها
متغیر باینری برای عدم قطعیت واحدهای پمپی.	SS_h	H شاخص شمارنده ساعت در افق برنامه‌ریزی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل به استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، ارزان و بزرگ مقیاس به سرعت در حال گسترش است. اما افزایش نفوذ نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت، با توجه به ماهیت نوسانی توان خروجی این نیروگاه‌ها امر بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از شبکه‌های قدرت را با مشکل روبه‌رو کرده است. از این رو، تلاش‌های بسیاری از سوی محققان برای پیدا کردن راه‌کاری به منظور کاهش اثر نوسان توان نیروگاه‌های بادی بر روی سیستم قدرت صورت گرفته است. در این راستا، راه‌کارهایی مانند افزایش دقت پیش‌بینی توان تولیدی واحدهای بادی، استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و حتی تغییر رژیم بهره‌برداری سیستم قدرت در حضور مولدهای بادی پیشنهاد شده است.

به طور معمول، مرسوم است که مالکین نیروگاه‌های بادی از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به دلیل سرعت پاسخ‌گویی مناسب و نیز به عنوان یک ذخیره‌ساز مقیاس بزرگ، برای جبران نوسان تولید توان مزرعه بادی و در واقع به جهت کاهش خطرپذیری مالی خود استفاده نمایند. در واقع، مالک مجموعه اشاره شده باید برای فروش انرژی تولیدی خود در بازار برق حاضر شود، که حضور تلفیقی این دو مجموعه، کمک خواهد کرد تا بتواند استراتژی مناسبی برای جبران هزینه‌های ناشی از عدم تعادل ناشی از تغییر تولید واحدهای بادی اتخاذ نماید و به این ترتیب حاشیه سود مطلوبی را برای خود تأمین نماید.

در کنار ماهیت نوسانی تولید واحدهای بادی که نوعی از عدم قطعیت در تصمیم‌گیری را ایجاد می‌کند، عدم اطلاع از قیمت بازار روز بعد و نیز خروج‌های اضطراری و بدون برنامه واحدها نیز از منابع دیگر عدم قطعیت در تصمیم‌گیری به حساب می‌آیند که بر میزان سود مالک مجموعه نیروگاهی بادی-تلمبه ذخیره‌ای تأثیر دارند. لذا توجه ویژه به این عدم قطعیت‌ها در تدوین استراتژی بهینه سرمایه‌گذار حائز اهمیت اساسی می‌باشد [۱].

در ادامه مقاله و در بخش دوم، به مرور منابع و مراجع مرتبط با حوزه مطالعه پرداخته خواهد شد. در بخش سوم، مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک به همراه مدل پیشنهادی این مقاله آورده شده است. شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و ارائه و تحلیل نتایج حاصل از آن موضوع بخش چهارم این مقاله بوده و نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- مروری بر منابع و مراجع

در مرجع [۲]، با استفاده از روش تصادفی سناریو-محور به مطالعه هماهنگی بین نیروگاه‌های بادی و تلمبه ذخیره‌ای در بازار انرژی

K	شاخص شمارنده گام‌های جاروب بازه قیمت.
pp	شاخص شمارنده گام‌های جاروب بازه توان بادی.
ff	شاخص گام‌های جاروب دسترس‌پذیری واحدها.
(ب) پارامترها	
π_h	قیمت بازار لحظه‌ای در ساعت h [\\$].
w	ضریب جریمه عدم تعادل تولید.
η	بازده نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.
$\underline{v}^u, \bar{v}^u$	حداکثر و حداقل ظرفیت منبع بالادستی [MW].
$\underline{v}^l, \bar{v}^l$	حداکثر و حداقل ظرفیت منبع پایین‌دستی [MW].
v_f^l, v_f^u	میزان انرژی در منبع بالادستی و پایین‌دستی در پایان افق برنامه‌ریزی [MWh].
$\underline{d}^p, \bar{d}^p$	حداقل و حداکثر مصرف واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی [MW].
c^{sd}, c^{su}	هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحدهای آبی [\\$].
g^p	حداکثر تولید واحدها در حالت ژنراتوری [MW].
N	تعداد واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای.
A_h	تعداد واحدهای در دسترس نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.
d_h	پله‌های تغییر قیمت در بازه نامعینی [\\$].
Δ_h	پله‌های تغییر توان بادی در بازه نامعینی [MW].
$\Gamma_2, \Gamma_1, \Gamma_0$	به ترتیب بودجه عدم قطعیت قیمت، توان باد و دسترس‌پذیری واحدها.
J_2, J_1, J_0	مجموعه شامل ساعات عدم قطعیت قیمت، توان بادی و دسترس‌پذیری واحدها.

(پ) متغیرها

g_h^w	تولید مزرعه بادی در ساعت h [MW].
x_h^w	پیشنهاد تولید مزرعه بادی به در ساعت h [MW].
g_h^p	تولید تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MW].
d_h^p	مصرف تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MW].
y_h	تعداد واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای روشن شده ساعت h .
z_h	تعداد واحدهای خاموش شده در ساعت h .
x_h^p	پیشنهاد تولید تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MWh].
x_h^{wp}	پیشنهاد تولید هم‌زمان دو نیروگاه [MW].
v_h^l, v_h^u	انرژی منبع بالا و پایین‌دستی در ساعت h [MWh].
u_h	تعداد واحدهای روشن در ساعت h .
t_h	متغیر باینری برای تعیین حالت‌کاری تلمبه‌ذخیره‌ای.

مدل سازی و حل شده است. در این شبکه، برای کاهش اثر نوسان توان از واحدهای آبی برای هماهنگی با مزرعه بادی استفاده شده است. مرجع [۸] از روش مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای تصمیم گیری بهینه در زمینه مشارکت واحدها از دید بهره بردار سیستم استفاده کرده و در این راستا، عدم قطعیت تولید مزارع بادی و نیز تغییرات کشسانی تقاضا نسبت به قیمت بازار نیز مور توجه قرار گرفته است. مرجع [۹] نیز یکی دیگر از مقالاتی است که از روش بهینه سازی مقاوم برای حداقل سازی میزان پشیمانی ناشی از برآورده نشدن انتظارات حاصل از مشارکت واحدها در حضور واحدهای بادی استفاده نموده است. به طور مشابه، مراجع [۱۰]-[۱۵] نیز کاربردهای دیگری از روش بهینه سازی مقاوم در حل مسئله برنامه ریزی مشارکت واحدها را در شرایط حضور و یا عدم حضور واحدهای بادی را گزارش نموده اند. عدم قطعیت در نظر گرفته شده در این مراجع عموماً شامل عدم قطعیت قیمت، بار الکتریکی و توان خروجی مزرعه بادی بوده است.

مطابق با مطالعه صورت گرفته در این حوزه و بر اساس مراجع بررسی شده، مهم ترین نوآوری این مقاله نسبت به سایر مراجع مرتبط در این زمینه، مدل سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک مالک یک نیروگاه تلفیقی بادی و تلمبه ذخیره ای به صورت بهره برداری هم زمان و در قالب یک مسئله بهینه سازی مقاوم می باشد. ویژگی جدید و بارز دیگر مدل ارائه شده، امکان در نظر گرفتن توأم سه عدم قطعیت تأثیرگذار بر پیشنهاددهی یعنی عدم قطعیت های مربوط به قیمت برق، تولید توان واحدهای بادی و نیز قابلیت اطمینان واحدها از منظر دسترس پذیری در یک مدل واحد است.

۳- مدل سازی مسئله

امروزه، عدم قطعیت جزء جدایی ناپذیر و تأثیرگذار بسیاری از مسائل و تصمیم گیری های انجام شده در سیستم های واقعی است. این عدم قطعیت ها عمدتاً به دلایلی از جمله خطای پیش بینی مقادیر آینده یک پارامتر و یا به دلیل خطای ناشی از اندازه گیری حاصل می شوند. از جمله روش های کلاسیک مرسوم برای مواجهه با عدم قطعیت ها، تحلیل حساسیت^۱ و بهینه سازی تصادفی^۲ می باشند. در روش اول، اثر عدم قطعیت در مدل نادیده گرفته شده و پس از آن، تحلیل حساسیت برای رسیدن به جواب اجرا می شود. روش تحلیل حساسیت فقط شاخصی برای آزمایش خوب بودن جواب است و لذا برای تولید جواب هایی که نسبت به تغییرات پارامتر مقاوم هستند، مفید نیست. همچنین، تحلیل حساسیت در مدل های با تعداد پارامتر غیرقطعی زیاد غیرممکن است.

اما در روش بهینه سازی تصادفی، برای بیان ممکن بودن جواب از قیود احتمالاتی استفاده می کنیم. در این دسته از مدل ها فرض می شود که توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی در اختیار است. اگرچه این مدل، مدل نسبتاً کاملی است ولی چند مشکل اساسی دارد [۱۶]: (الف) به ندرت می توان توزیع احتمالی دقیق پارامتر غیرقطعی را

پرداخته شده است. مدل سناریو-محور ارائه شده به گونه ای است که نیاز به تخمین تابع توزیع متغیر دارای عدم قطعیت می باشد. ضمناً در این مرجع قابلیت اطمینان واحدها در مدل ارائه شده در نظر گرفته نشده است. مراجع [۱] و [۳] به تدوین استراتژی بهینه واحدهای حرارتی مرسوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت بازار پرداخته و براساس یک مدل چندهدفه، به دنبال حصول مصالحه ای بین خطرپذیری و سود بوده اند. مسئله بهینه سازی معرفی شده در این مراجع نیز به صورت برنامه ریزی تصادفی سناریو-محور بوده که از جمله مشکلات این روش زمان بر بودن حل مسئله می باشد. در مراجع [۴] و [۵] نیز به ارزیابی خطرپذیری واحدهای تولیدی در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته پرداخته شده است. ابزارهای معرفی شده برای اندازه گیری خطرپذیری $CVaR$ و Var می باشد. روش های مورد اشاره برای مدل سازی خطرپذیری و تدوین استراتژی پیشنهاد بهینه، از جمله روش های سناریو-محور بوده که علاوه بر نیاز به تخمین توزیع عدم قطعیت ها، از لحاظ اجرای مسئله نیز بسیار زمان بر هستند.

به منظور مواجهه با اشکال یاد شده، مرجع [۶] از جمله اولین مقالاتی است که کاربرد روش بهینه سازی مقاوم، به عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل سازی تحت شرایط وجود عدم قطعیت، را در حوزه مطالعات بهره برداری سیستم های قدرت را مورد توجه قرار داده است. دلیل برتری روش بهینه سازی مقاوم در مقابل سایر روش های بهینه سازی در شرایط وجود عدم قطعیت، مدل سازی آسان، عدم نیاز به دانستن توزیع احتمالی عدم قطعیت ها و همچنین زمان بسیار کم برای حل مسئله می باشد.

در مرجع [۶]، از روش بهینه سازی مقاوم برای مدل سازی مسئله پیشنهاددهی آن هم برای واحدهای حرارتی استفاده شده است. مدل پیشنهاددهی تولید در بازار روز بعد معرفی شده در این مرجع برای واحدهای حرارتی کوچک قیمت پذیر مناسب بوده و برای مواجهه با منابع دارای تولید متغیر و نوسانی مانند منابع انرژی تجدیدپذیری همچون واحدهای بادی و تلمبه ذخیره ای مناسب نمی باشد. نویسندگان این مرجع تنها عدم قطعیت قیمت برق را در نظر گرفته و به سایر عدم قطعیت های تأثیرگذار اشاره نکرده اند. این در حالیست که عمده مقالات ارائه شده در حوزه کاربرد بهینه سازی مقاوم در سیستم های متشکل از واحدهای بادی و تلمبه ذخیره ای، این موضوع را از دید بهره بردار سیستم قدرت و برای برنامه ریزی در مدار قرار گرفتن سیستم های متشکل از این واحدها بررسی نموده اند [۶]-[۱۵].

از جمله، مرجع [۷] روشی مبتنی بر بهینه سازی مقاوم را برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی از منظر بهره بردار سیستم و با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید واحدهای بادی پیشنهاد می دهد. در این مقاله، تابع هدف مسئله به صورت حداقل سازی هزینه کل سیستم بود و مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به توان خروجی واحدهای حاضر در مزرعه بادی مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله حاصل با استفاده از اصول مربوط به بهینه سازی مقاوم

$$\text{Maximize } C^T x \quad (2)$$

subject to:

$$\sum_j a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} y_j \leq b_i, \quad \forall i \quad (3)$$

$$y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$y_j \geq 0 \quad (5)$$

اگر فرض شود x^* جواب بهینه روابط بالا باشد، در بهینگی

جواب، $x_j^* = |x_j^*|$ خواهد بود، بنابراین داریم:

$$\sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} |x_j^*| \leq b_i, \quad \forall i \quad (6)$$

بنابراین، برای هر مقدار داده غیرقطعی \dot{a}_{ij} ، جواب مسئله ممکن و

دست‌یافتنی خواهد ماند، که این جواب مقاوم می‌باشد؛ طوری که رابطه (۷) ممکن و دست‌یافتنی بودن جواب را برای هر رخداد پارامتر غیرقطعی نشان می‌دهد:

$$\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* = \sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \dot{a}_{ij} x_j^* \leq \quad (7)$$

$$\leq \sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} |x_j^*| \leq b_i \quad \forall i$$

مدل‌سازی فوق برای بهینه‌سازی مقاوم، به روش سویستر معروف است. ایراد اصلی این روش عدم امکان کنترل تعداد ضرایب نامعین است.

۳-۱-۲- روش بن-تال^۵ و نیمیرفسکی^۶

مدل بهینه‌سازی مقاوم پیشنهادی بن-تال و نیمیرفسکی، مدلی خطی می‌باشد و ضمن فراهم‌سازی امکان کنترل تعداد ضرایب نامعین، برای بهینه‌سازی مقاوم مسائل دارای متغیر گسسته نیز مناسب می‌باشد.

برای آن که مدل بهینه‌سازی مقاوم را بر اساس این روش پیاده‌سازی کنیم، لازم است پارامتر Γ_1 را به عنوان بودجه عدم‌قطعیت تعریف کنیم. این پارامتر تعداد پارامترهایی که عدم‌قطعیت دارند را مشخص می‌کند. به طور مثال، مسئله بهینه‌سازی خطی رابطه (۱)، فرض این است که عناصر ماتریس C دارای عدم‌قطعیت باشند، لذا در اینجا بودجه عدم‌قطعیت تعداد عناصر دارای عدم‌قطعیت ماتریس C است و مقداری را از بازه $[0, |J_1|]$ برمی‌گزیند که $J_1 = \{j \mid d_j > 0\}$. بودجه عدم‌قطعیت در واقع سطح مقاوم بودن مسئله را کنترل می‌کند. اگر $\Gamma_1 = 0$ باشد، تأثیر عدم‌قطعیت پارامترهای نامعین مسئله در نظر گرفته نمی‌شود. اگر $\Gamma_1 = |J_1|$ باشد، در این صورت تأثیر عدم‌قطعیت تمامی پارامترهای نامعین مسئله در نظر گرفته می‌شود. حال می‌توان مسئله بهینه‌سازی مقاوم را به صورت زیر تعریف کرد [۱۸]:

$$\text{Maximize } \sum_j c_j x_j - z_1 \Gamma_1 - \sum_{j \in J_1} q_j \quad (8)$$

subject to:

$$z_1 + q_j \geq d_j y_j \quad \forall j \in J_1 \quad (9)$$

به‌دست آورد؛ (ب) حتی اگر توزیع احتمالی پارامتر موردنظر نیز در اختیار باشد، از نظر حجم محاسبات و زمان حل قیود احتمالاتی چالشی بزرگ وجود دارد؛ (ج) قیود احتمالاتی تحذب مسئله را از بین می‌برند و طبیعی است که باعث پیچیده‌تر شدن مسئله می‌شوند.

اما از جمله راه‌کارهای نوین برای رفع موانع و مشکلات یاد شده در روش‌های کلاسیک حل مسائل دارای پارامتر غیرقطعی، روش بهینه‌سازی مقاوم^۳ می‌باشد [۱۶] که در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱-۱- بهینه‌سازی مقاوم

بهینه‌سازی مقاوم روش متفاوتی را برای حل مسائل شامل پارامترهای غیرقطعی ارائه می‌کند. چنان‌که توضیح داده شد، در مسئله بهینه‌سازی مقاوم دیگر نیازی به دانستن تابع توزیع پارامترهای غیرقطعی نبوده و تنها کافی‌ست محدوده تغییرات این پارامترها را داشته باشیم. در طراحی این روش دو ضابطه مهم در نظر گرفته شده است:

الف) امکان‌پذیری محاسبات: از نقطه نظر تئوری، مطلوب است اگر مسئله اصلی در زمانی معقول و ممکن قابل حل باشد، مسئله مقاوم نظیر آن هم این ویژگی را داشته باشد.

ب) کران‌های احتمالاتی: از نظر احتمالی، هنگامی که پارامترهای غیرقطعی از توزیع‌های احتمالی عمومی پیروی می‌کنند، بتوان تضمین کرد که جواب مسئله ممکن و دست‌یافتنی است.

به طور معمول، ساختار کلی مسائل بهینه‌سازی خطی به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$\text{Maximize } C^T x \quad (1)$$

subject to:

$$a_i x \leq b_i, \quad \forall i \in I, \forall a_i \in A, \forall b_i \in B.$$

در رابطه (۱)، فرض بر این است که فقط عناصر ماتریس A دارای عدم‌قطعیت هستند. بدون از دست دادن جامعیت مسئله، فرض بر این است که بردار ضرایب تابع هدف، یعنی بردار C ، عدم‌قطعیت ندارد. اگرچه با وجود عدم‌قطعیت در ضرایب تابع هدف نیز می‌توان از جایگزینی تابع هدف با بهینه‌سازی یک متغیر کمکی مانند Z استفاده نموده و در عوض قید $Z - C^T x \leq 0$ را به مسئله اضافه کرد.

حال، سطر i از ماتریس ضرایب A را در نظر بگیرید و فرض کنید مجموعه J_i شامل ضرایب سطر i باشد که در معرض عدم‌قطعیت قرار دارند. هر عنصر (المان) مثل a_{ij} که در آن z از مجموعه J_i انتخاب شده به صورت یک متغیر متقارن و کران‌دار تصادفی \tilde{a}_{ij} مدل می‌شود. این متغیر مقداری عددی در بازه $[a_{ij} - \dot{a}_{ij}, a_{ij} + \dot{a}_{ij}]$ را اختیار می‌کند.

۳-۱-۱- روش سویستر^۴

برای مسئله بهینه‌سازی دارای عدم‌قطعیت تعریف شده در رابطه (۱)، بیان ریاضی روش سویستر به صورت زیر است [۱۶]:

$$\sum_{h \in H} s_h \leq \Gamma_1 \quad (23)$$

$$0 \leq s_h \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (24)$$

در اینجا، پارامتر Γ_0 بودجه عدم قطعیت قیمت و یا به عبارتی ساده تر تعداد ساعت هایی که قیمت عدم قطعیت دارد را نشان می دهد. پارامتر d_h نیز در ادامه در الگوریتم تشریح و نحوه مقداردهی آن مشخص می شود. در روابط اخیر، قیدهای (۱۷) تا (۲۱) مربوط به مدل سازی عدم قطعیت قیمت و متناظر با مسئله بهینه سازی مقاوم می باشد. قیدهای (۲۲) تا (۲۴) نیز متناظر با مدل سازی عدم قطعیت در توان باد و مسئله بهینه سازی مقاوم متناظر با آن می باشد.

همچنین در این روابط، Γ_1 بودجه عدم قطعیت توان تولیدی واحد بادی بوده و به عبارت بهتر، تعداد ساعت هایی که تولید واحد بادی عدم قطعیت دارد را نشان می دهد. همچنین، $g_h^{w \min}$ حداقل توان باد را در هر ساعت نشان می دهد و از جمله اطلاعات ورودی می باشد. متغیر باینری s_h ساعتی که توان باد عدم قطعیت دارد را نشان می دهد. این متغیر باینری با استفاده از قید (۲۵) خطی می شود و می توان آن را به صورت یک متغیر پیوسته تعریف کرد. قید (۲۴) بیانگر این است که تعداد ساعت هایی که توان بادی عدم قطعیت دارد باید همواره کوچک تر یا مساوی بودجه عدم قطعیت نظیر آن باشد.

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، هدف مسئله بهینه سازی مقاوم به دست آوردن جواب های ممکن و بهینه به ازای رخداد بدترین حالت ممکن برای پارامتر نامعین در بازه نامعینی تعریف شده برای آن می باشد. اما در عالم واقعی ممکن است برای آن پارامتر نامعین هر مقداری از بازه تعریف شده رخ دهد. بنابراین، برای آن که بتوان متناسب با رخداد مقادیر مختلف در بازه تعریف شده برای پارامتر دارای عدم قطعیت پیشنهاد تولید بهینه نیروگاه را به دست آورد، الگوریتم تدوین پیشنهاد استراتژیک ذیل استفاده شده که در ادامه تشریح خواهد شد.

نحوه عملکرد الگوریتم به این صورت است که بازه نامعینی پارامتر نامعین در هر تکرار به بازه کوچک تر تقسیم می شود و سپس دوباره مسئله بهینه سازی مقاوم بار دیگر حل می شود. این روند تا هنگامی که نقطه ابتدای بازه برسد، ادامه می یابد. برای آن که بتوان منحنی پیشنهاد قیمت ساعتی را متناسب با عدم قطعیت های موجود در مسئله تشکیل داد، الگوریتم زیر پیشنهاد می شود:

- **گام اول:** مقدار قیمت ها را $\pi_h = \pi_h^{Max}$ و $\Gamma_0 = N_T$ قرار دهید. همچنین، مقدار حداقل توان تولیدی بادی در پارامتر $g_h^{w \min}$ ، $\Gamma_1 = N_T$ و $G^k = 0$ قرار داده شود.
- **گام دوم:** قرار دهید $d_h^k = G^k \cdot (\pi_h^{max} - \pi_h^{min})$. که در این رابطه G^k ضریبی است که مقدار افزایشی از ۰ تا ۱ می گیرد. ضمناً، k شمارنده پله های افزایش G^k می باشد. اکنون، مقدار $b^{pp} = 0$ را در نظر بگیرید.

$$x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$q_1 \geq 0 \quad \forall j \in J_1 \quad (11)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \quad (12)$$

$$z_1 > 0 \quad (13)$$

$$a_i x \leq b_i \quad \forall i \in I \quad (14)$$

قیدهای اضافه شده به مدل بالا با استفاده از تئوری دوگان و نیز با خطی سازی به دست آمده است. در مدل بهینه سازی مقاوم بالا فرض شده که پارامتر c_j دارای عدم قطعیت است و این پارامترها مقداری از بازه $[c_j, c_j + d_j]$ اختیار می کند. متغیرهای q_1 و y_j به ترتیب متغیرهای دوگان و کمکی هستند تا پارامتر دارای نامعینی، بدترین مقدارها را برگزینند.

۳-۲- مدل مبتنی بر بهینه سازی مقاوم مزرعه بادی

با توجه به مدل های ارائه شده در بخش (۳-۱)، اکنون می توان مدل تعیین استراتژی پیشنهاددهی نیروگاه های بادی و تلمبه ذخیره ای با رویکرد مبتنی بر بهینه سازی مقاوم را تعریف کرد. در این راستا، در این بخش و بخش بعد، مدل بهینه سازی مقاوم مسئله مذکور برای هر یک از نیروگاه های بادی و تلمبه ذخیره ای در دو حالت بهره برداری مجزا و بهره برداری هم زمان اشاره شده در مرجع [۱۹] ارائه خواهد شد.

همان طور که در بخش های قبل اشاره شد، مسئله تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک مزرعه بادی در بازار روز بعد، با عدم قطعیت های قیمت انرژی (ناشی از خطای پیش بینی)، توان تولیدی نیروگاه بادی (ناشی از عدم قطعیت سرعت باد و به دنبال آن خطای پیش بینی) و نیز دسترس پذیری واحدهای بادی مواجه است. وجود این عدم قطعیت ها، استراتژی پیشنهاددهی را تحت تأثیر قرار خواهد داد و لذا برای مواجهه با آن، در ادامه مدل مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برنامه ریزی واحدهای بادی ارائه خواهد شد. در این جا باید اشاره شود که در این مقاله در مسئله برنامه ریزی مزرعه بادی از توان خروجی به جای سرعت باد استفاده شده است. مدل ریاضی مسئله به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & \sum_{h \in H} \left[\pi_h g_h^w - w \pi_h \left(g_h^w - x_h^w \right) \right] - \\ & - z_0 \Gamma_0 - \sum_{h \in J_0} q_{0h} \end{aligned} \quad (15)$$

subject to :

$$0 \leq x_h^w \leq \bar{g}^w, \quad \forall h \in H \quad (16)$$

$$z_0 + q_{0h} \geq d_h \cdot y_{auh}, \quad \forall h \in J_0 \quad (17)$$

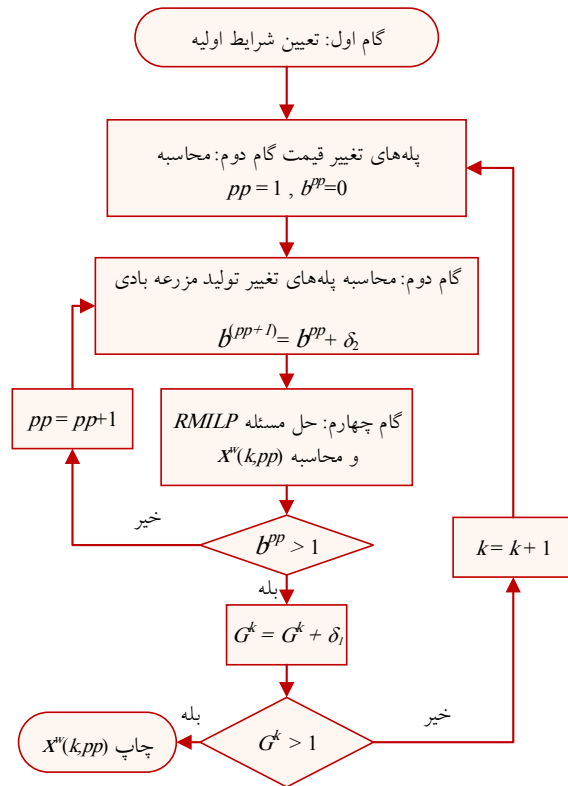
$$q_{0h} \geq 0, \quad \forall h \in J_0 \quad (18)$$

$$z_0 \geq 0 \quad (19)$$

$$y_{auh} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (20)$$

$$g_h^w - w \cdot \left| g_h^w - x_h^w \right| \leq y_{auh}, \quad \forall h \in H \quad (21)$$

$$0 \leq g_h^w \leq \bar{g}_h^{w \max} - s_h \cdot \Delta_h, \quad \forall h \in J_1 \quad (22)$$



شکل (۱) روندنمای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مزرعه بادی.

- گام سوم: قرار دهید $\nabla_h^{pp} = b^{pp} \cdot (\bar{g}_h^{w \max} - \bar{g}_h^{w \min})$ که در این رابطه b^{pp} ضریبی است که مقدار افزایشی از ۰ تا ۱ می‌گیرد. در اینجا، pp نیز شمارنده پله‌های افزایش b^{pp} می‌باشد.
- گام چهارم: مسئله بهینه‌سازی مقاوم ارائه شده در روابط (۱۵) تا (۲۴) حل شود تا تولید ساعتی در تکرار (k, pp) حاصل شود.
- گام پنجم: گام سوم و چهارم با شمارنده pp تکرار شود تا زمانی که کل b^{pp} پوشانده شود. ضمناً، b^{pp} با گام δ_2 افزایش می‌یابد.
- گام ششم: مقدار G^k با گام δ_1 به‌روز شود. اگر $G^k > 1$ بود به گام هفتم و در غیر این صورت به گام دوم بر می‌گردید.
- گام هفتم: حل مسئله به پایان رسیده است.

به منظور نمایش بهتر الگوریتم ذکر شده، شکل (۱) روندنمای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این مقاله فرض شده است که تغییرات قیمت در هر ساعت در بازه $[\pi^{min}, \pi^{max}]$ و تغییرات توان نیروگاه بادی در بازه $[gw^{min}, gw^{max}]$ می‌باشد. با توجه به شکل (۱) مشخص است که با هر پله تغییر قیمت، توان بادی در ساعت‌هایی که عدم‌قطعیت دارد کل بازه در نظر گرفته شده خود را جاروب می‌کند.

۳-۳- مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

پیشنهاددهی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در بازارهای انرژی تحت تأثیر عدم‌قطعیت‌های قیمت و دسترس‌پذیری واحدهای آن است. برای مواجهه با این عدم‌قطعیت‌ها، در این قسمت مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای پیشنهاد شده است.

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در نظر گرفته شده از دو منبع بالادستی و پایین‌دستی با توربین‌های آبی برگشت‌پذیر که امکان کار در هر دو حالت ژنراتوری و یا موتوری را دارند، تشکیل شده است. نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در زمان‌های غیرپیک شبکه با مصرف توان، انرژی را به منبع بالادستی پمپاژ کرده و در زمان‌های پیک (اوج مصرف) با عملکرد ژنراتوری توربین آبی تولید انرژی الکتریکی انجام شده و آب از منبع بالادستی به منبع پایین‌دستی منتقل می‌شود.

این چرخه از نظر اقتصادی با صرفه می‌باشد زیرا در زمان‌های غیرپیک قیمت برق پایین و در زمان‌های پیک، قیمت برق بالا می‌باشد، به‌طوری که درآمد حاصل از فروش انرژی، هزینه ناشی از خرید انرژی و تلفات سیستم را جبران می‌نماید.

در این مقاله جریان آب ورودی به منبع بالادستی در نظر گرفته نشده و حجم آب منابع بالادستی و پایین‌دستی به صورت انرژی در نظر گرفته شده است. از طرفی، حجم انرژی هر یک از منابع به یک مقدار حداقل و یا حداکثر محدود شده است [۴].

مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حالت بهره‌برداری به صورت مستقل از مزرعه بادی به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{maximize } \sum_{h \in H} \left[\pi_h (g_h^p - d_h^p) - c^{su} y_h - c^{sd} z_h \right] - \left[-w \pi_h |g_h^p - d_h^p - x_h^p| \right] \quad (25)$$

$$- z_o \Gamma_o - \sum_{h \in J_o} q_{oh}$$

subject to:

$$v_h^u = v_{h-1}^u + \eta d_h^p - g_h^p, \quad \forall h \in H \quad (26)$$

$$v_h^l = v_{h-1}^l + g_h^p - \eta d_h^p, \quad \forall h \in H \quad (27)$$

$$\underline{v}^u \leq v_h^u \leq \bar{v}^u, \quad \forall h \in H \quad (28)$$

$$\underline{v}^l \leq v_h^l \leq \bar{v}^l, \quad \forall h \in H \quad (29)$$

$$v_h^u = v f^u, \quad v_h^l = v f^l, \quad \forall h = 24 \quad (30)$$

$$u_{h+1} = u_h + y_h - z_h, \quad \forall h \in H \quad (31)$$

$$\underline{d}^p u_h \leq d_h^p \leq \bar{d}^p u_h, \quad \forall h \in H \quad (32)$$

$$0 \leq g_h^p \leq \bar{g}^p (t_h \text{ FORA}_h - U A_h \text{ liny}_h), \quad \forall h \in H \quad (33)$$

$$\text{liny}_h \leq t_h, \quad \forall h \in H \quad (34)$$

$$\text{liny}_h \leq ss_h, \quad \forall h \in H \quad (35)$$

$$\text{liny}_h \leq t_h + ss_h - 1, \quad \forall h \in H \quad (36)$$

$$t_h \leq 1 - \frac{1}{N} u_h, \quad \forall h \in H \quad (37)$$

نظر گرفته می شود)، تعداد صفر، یک و یا دو واحد از واحدهای توربین آبی خود را در اختیار نداشته باشد.

حال برای آن که بتوان منحنی های پیشنهاد تولید را تولید نمود مطابق با الگوریتم ارائه شده در روندنمای شکل (۲) مقاله عمل خواهد شد. یعنی برای مدل سازی دسترس پذیری واحدهای تلمبه ذخیره ای، در هر گام فرض می شود که تعداد مشخصی از واحدهای توربین آبی در ساعاتی دارای عدم قطعیت که برابر با بودجه عدم قطعیت می باشد، در دسترس هستند.

در این روابط $FORA_h$ تعداد واحدهای در دسترس را بدون در نظر گرفتن دسترس پذیری واحدها در هر ساعت نشان می دهد. طبیعی است که این پارامتر در هر ساعت مقدار ۲، برابر تعداد واحدهای نیروگاه تلمبه ذخیره ای اتخاذ کند. متغیر باینری ss_h ساعت هایی که در آن عدم قطعیت دسترس پذیری واحدها وجود دارد را نشان می دهد. بودجه عدم قطعیت با Γ_{ψ} نمایش داده شده است، که بیانگر تعداد ساعت هایی است که واحدها عدم قطعیت دسترس پذیری دارند. با مقایسه روابط اخیر نسبت به روابط نیروگاه بادی مشخص می شود که قید مندرج در رابطه (۳۳) تغییر کرده است. این تغییر به این دلیل می باشد که دسترس پذیری بر میزان تولید نیروگاه تلمبه ذخیره ای در حالت ژنراتوری نیز تأثیر می گذارد. اما مدل سازی مسئله بهینه سازی مقاوم در این قید مستلزم ضرب دو متغیر باینری بود که خود منجر به غیرخطی شدن مسئله می گشت. به همین جهت، برای رفع این مشکل متغیر باینری $linv_h$ و سه قید (۳۴) تا (۳۶) برای خطی سازی قید غیرخطی مذکور تعریف شده است.

در روابط اخیر، پارامتر UA_h از طریق الگوریتم تعریف شده برای تدوین استراتژی پیشنهاددهی، مقداری می شود؛ در واقع این پارامتر بازه عدم قطعیت دسترس پذیری واحدها را، در ساعاتی که عدم قطعیت وجود دارد، جاروب می کند. این پارامتر می تواند در سه گام، مقادیر ۰، ۱ و ۲ را اتخاذ کند. الگوریتم تدوین استراتژی پیشنهاددهی مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای نیروگاه تلمبه ذخیره ای بسیار مشابه الگوریتم تعریف شده برای نیروگاه بادی در بخش (۲-۳) می باشد؛ تنها گام سوم این الگوریتم باید تغییر می کند، که به صورت زیر اصلاح می شود:

• **گام سوم:** قرار دهید $UA_h = ff - 1$. در این رابطه ff عددی صحیح است که مقدار افزایشی از ۱ تا ۳ می گیرد.

۴-۳- مدل بهره برداری هم زمان دو نیروگاه با رویکرد مبتنی بر بهینه سازی مقاوم

در بهره برداری هم زمان نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره ای سه پارامتر غیرقطعی قیمت برق، توان بادی و دسترس پذیری واحدها وجود دارد که مستقیم بر مسئله پیشنهادی تولید این نیروگاهها در بازارهای انرژی تأثیر می گذارد. در این قسمت الگوریتمی برای پیشنهاد تولید این نیروگاهها در حالت بهره برداری هم زمان با رویکرد مبتنی بر بهینه سازی مقاوم ارائه خواهد شد. به طوری که هر سه پارامتر همراه با

$$-d^p N \leq x_h^p \leq \bar{g}^p N, \quad \forall h \in H \quad (38)$$

$$u_h, y_h, z_{sh} \in \{0, 1, 2, \dots, N\} \quad (39)$$

$$t_h, ss_h \in \{0, 1\} \quad (40)$$

$$q_{oh} \geq 0, \quad \forall h \in J_o \quad (41)$$

$$z_o \geq 0 \quad (42)$$

$$yau_h \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (43)$$

$$\{(g_h^w + g_h^p - d_h^p) - w \cdot |g_h^w + g_h^p - d_h^p - x_h^p|\} \leq yau_h, \quad \forall h \in H \quad (44)$$

$$u_h \leq FORA_h - ss_h UA_h, \quad \forall h \in J_{\psi} \quad (45)$$

$$\sum_{h \in H} ss_h \leq \Gamma_{\psi} \quad (46)$$

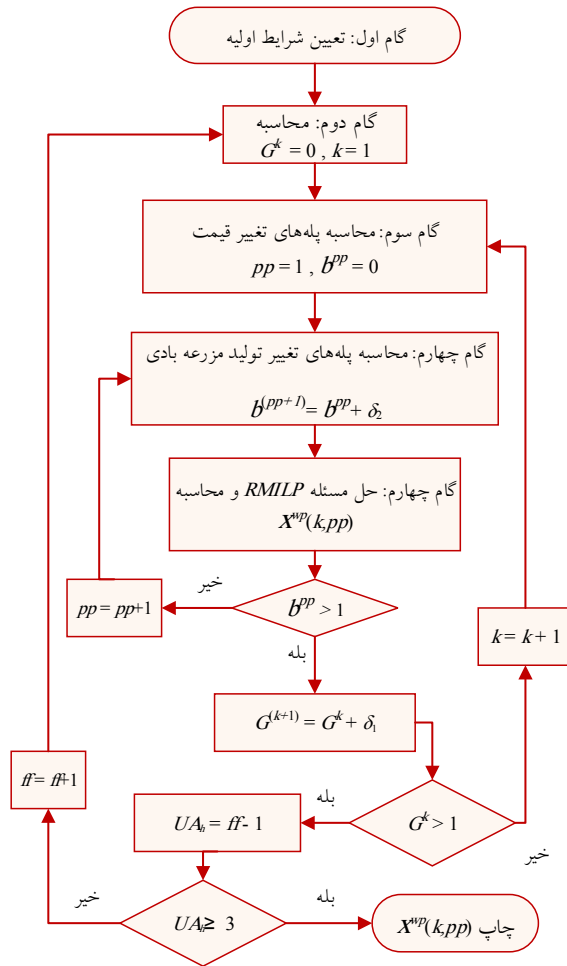
$$0 \leq ss_h \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (47)$$

در این روابط، (\bar{v}^u, \bar{v}^L) حجم حداکثر و $(\underline{v}^u, \underline{v}^L)$ حجم حداقل حوضچه های بالادستی و پایین دستی هستند؛ یعنی ظرفیت دو حوضچه برابر فرض شده است.

معادله (۲۵) تابع هدف نیروگاه تلمبه ذخیره ای است که در آن جمله اول درآمد حاصل از فروش انرژی، جمله دوم و سوم به ترتیب هزینه تحمیلی به نیروگاه در اثر روشن و خاموش شدن و جمله چهارم هزینه ناشی از عدم تعادل در تولید یا مصرف انرژی را نشان می دهند. روابط (۲۶) و (۲۷) به ترتیب نشان دهنده قید سطح آب منابع بالادست و پایین دست هستند. روابط (۲۸) تا (۳۰) قید مربوط به ظرفیت حوضچه ها و روابط (۳۱) و (۳۲) به ترتیب تعداد واحدهای روشن در حالت پمپی و محدودیت ظرفیت واحدهای تلمبه ذخیره ای در هر ساعت را مدل می کنند. سایر روابط، قیود نظیر مدل سازی عدم قطعیت در مسئله بهینه سازی مقاوم بوده که در ادامه بررسی می شوند.

مدل سازی عدم قطعیت قیمت در این حالت نیز عیناً مشابه بخش (۲-۳) بوده و برای مدل سازی عدم قطعیت ناشی از دسترس پذیری واحدها نیز از روشی که در ادامه تشریح گردیده، استفاده شده است.

برای تبیین دقیق چگونگی مدل سازی عدم قطعیت مربوط به دسترس پذیری واحدها، یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای متشکل از دو واحد توربین آبی (هیدروتوربین) در نظر گرفته می شود. در این صورت در هر ساعت از افق برنامه ریزی امکان در دسترس بودن صفر، یک و یا دو واحد از واحدهای توربین آبی نیروگاه تلمبه ذخیره ای در دسترس خواهند بود. در این مقاله، برای مدل سازی دسترس پذیری واحدهای تلمبه ذخیره ای در رویکرد مبتنی بر بهینه سازی مقاوم، روشی مشابه با روش مدل سازی عدم قطعیت تولید مزرعه بادی استفاده شده است؛ با این تفاوت که به جای بازه عددی پیوسته تعریف شده برای تولید واحدهای بادی، برای دسترس پذیری واحدهای تلمبه ذخیره ای مجموعه ای گسسته به شکل $\{0, 1, 2\}$ در نظر گرفته می شود. در نتیجه، این امکان وجود دارد که نیروگاه تلمبه ذخیره ای متناسب با مقدار بودجه عدم قطعیت تعریف شده برای مدل سازی دسترس پذیری واحدها (که در این مقاله یک عدد صحیح بین صفر تا ۲۴ ساعت در



شکل (۲) روندنمای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک دو نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره‌ای در حالت بهره‌برداری هم‌زمان.

همچنین بازدهی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. در پایان افق برنامه‌ریزی هم به ترتیب مقادیر ۱۵ و ۲۵ مگاوات‌ساعت محدودیت برای انرژی موجود در منابع بالادستی و پایین‌دستی فرض شده است. باید این نکته را نیز متذکر شد که هر واحد تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی با ظرفیت کامل وارد مدار می‌شود؛ یعنی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی ۵ تا ۱۰ مگاوات‌ساعت انرژی مصرف می‌کند.

فرض شده است مقدار میانگین قیمت و توان بادی را در هر ساعت مطابق اطلاعات جدول (۱) باشد. برای آن که مدل بهینه‌سازی مقاوم پیاده‌سازی شود، لازم است حدود تغییرات پارامترهای دارای عدم قطعیت تعیین شود. برای تعریف کران‌های بالا و پایین این پارامترها در هر ساعت از مقدار میانگین در آن ساعت به عنوان میانگین بازه استفاده می‌شود. سپس مقدار ۱/۴ برابر این مقدار میانگین به عنوان کران بالا و ۰/۶ برابر مقدار همین میانگین به عنوان کران پایین بازه در نظر گرفته شده است [۲۱، ۲۰].

عدم قطعیت در مسئله بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شوند. مدل ریاضی مسئله خطی آمیخته با عدد صحیح می‌باشد؛ زیرا تنها جمله غیرخطی موجود در مدل، تابع قدر مطلق می‌باشد که به سادگی می‌توان آن را با تعریف دو متغیر حقیقی مثبت خطی نمود. در این حالت تنها دو قید مربوط به خطی‌سازی تابع قدر مطلق به مسئله اضافه می‌شود. مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی دو نیروگاه به‌طور هم‌زمان با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Maximize } \sum_{h \in H} \left[\pi_h \cdot (g_h^w + g_h^p - d_h^p) - c^{su} \cdot y_h - c^{sd} \cdot z_h \right] - w \cdot \pi_h \cdot \left| g_h^w + g_h^p - d_h^p - x_h^{wp} \right| \quad (48)$$

$$- z_o \cdot \Gamma_o - \sum_{h \in J_o} q_{oh}$$

$$-d^p \cdot N \leq x_h^{wp} \leq (\bar{g}^p \cdot N + \bar{g}^w), \quad \forall h \in H \quad (49)$$

$$\text{قیدهای (۱۷) تا (۲۴)} \quad (50)$$

$$\text{قیدهای (۲۶) الی (۴۷) به غیر از قید (۳۸)} \quad (51)$$

یادآوری می‌شود که Γ_o بودجه عدم قطعیت قیمت، Γ_1 بودجه عدم قطعیت تولید بادی و Γ_2 بودجه عدم قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. حال برای آن که بتوان منحنی پیشنهاد قیمت در هر ساعت را متناسب با عدم قطعیت‌های موجود در مسئله بهینه‌سازی تشکیل داد، الگوریتمی مشابه بخش (۲-۳) پیشنهاد شده است. این الگوریتم مشابه الگوریتم نیروگاه بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای می‌باشد و تنها در چند گام با آن‌ها اختلاف دارد. برای پرهیز از تکرار موضوع، در ادامه فقط گام‌های تغییر یافته الگوریتم تدوین استراتژی پیشنهاددهی تشریح می‌شود.

- **گام هفتم:** مقدار G^k با گام δ_1 به‌روز شود. اگر $G^k > 1$ به گام هفتم در غیر این صورت به گام سوم برگردید.
- **گام هشتم:** مقدار UA_h به‌روز شود. اگر $UA_h \geq 3$ به گام هشتم و در غیر این صورت به گام دوم برگردید.
- **گام نهم:** حل مسئله به پایان رسیده است.

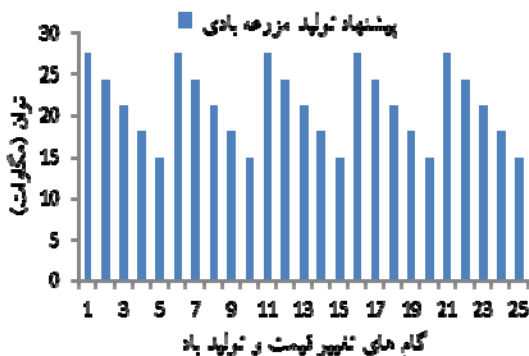
شکل (۲) روندنمای الگوریتم تولید منحنی‌های پیشنهاد تولید در حالت بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه را نشان می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

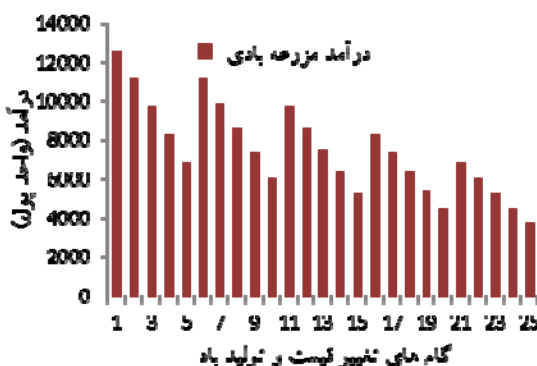
در این مقاله از سیستم آزمایش مشابه مرجع [۲] استفاده شده است. به این ترتیب، ظرفیت نیروگاه بادی ۳۰ مگاوات و ظرفیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۱۰ مگاوات (شامل دو واحد ۵ مگاواتی) است. ظرفیت حداکثر و حداقل حوضچه‌های بالادستی و پایین‌دستی به ترتیب برابر ۸۰ و صفر مگاوات در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) مقادیر میانگین قیمت انرژی و توان تولیدی واحد بادی.

توان باد	قیمت	ساعت	توان باد	قیمت	ساعت
۸/۶	۴۲	۱۳	۱۹/۶	۶۵	۱
۸/۰	۴۱	۱۴	۱۸/۶	۵۰	۲
۸/۱	۴۰	۱۵	۱۷/۴	۴۴	۳
۷/۱	۳۸	۱۶	۱۴/۹	۴۳	۴
۷/۴	۳۳	۱۷	۱۴/۲	۴۲	۵
۶/۶	۳۸	۱۸	۱۲/۹	۴۲	۶
۶/۳	۴۵	۱۹	۱۱/۶	۴۰	۷
۶/۲	۵۰	۲۰	۱۱/۱	۳۷	۸
۵/۳	۵۴	۲۱	۱۰	۳۷	۹
۶/۶	۷۴	۲۲	۹/۱	۳۷	۱۰
۵/۴	۷۴	۲۳	۹/۳	۴۲	۱۱
۵/۸	۷۹	۲۴	۸/۷	۴۰	۱۲



شکل (۳) پیشنهاد تولید بهینه مزرعه بادی در ساعت $t=1$.



شکل (۴) تغییرات درآمد مالک مزرعه بادی.

در حالت قبل فرض بر این بود که هر ۲۴ ساعت عدم قطعیت دارند و در واقع بودجه عدم قطعیت برابر ۲۴ در نظر گرفته شده بود. اکنون به منظور بررسی بهتر و صحت سنجی مدل ارائه شده در اثر تغییر در بودجه عدم قطعیت، حالت دیگری که در آن تنها چند ساعت از دوره تحت مطالعه داری عدم قطعیت است، بررسی می شود. در این حالت که با بودجه عدم قطعیتی معادل ۱۰ ساعت شبیه سازی شده، پیشنهاد تولید مزرعه بادی در ساعتی که عدم قطعیت تولید نداریم دستخوش تغییر نشده ولی در ساعاتی که عدم قطعیت وجود دارد، تغییرات در درآمد از الگوی شکل (۵) پیروی می کند. به علاوه، در مورد سود حاصل از شرکت در بازار، در این حالت می توان گفت میزان کاهش سود در ازای تغییر پارامترهای غیرقطعی در ساعت هایی که عدم قطعیت ندارند، کمتر خواهد بود؛ به عبارتی دیگر زمانی که تعداد ساعات داری عدم قطعیت کمتر باشد، میزان سود حاصل از مشارکت در بازار بیش تر خواهد بود.

البته باید به این نکته نیز توجه داشت که در این جا فرض شده که پارامترهایی که عدم قطعیت ندارند، مقداری برابر با کران بالای بازه تعریف شده خود دارند. در پایان مجدداً یادآوری می شود که نتایج اخیر، همگی برای حالتی است که نیروگاه بادی به صورت مجزا مورد بهره برداری قرار گرفته است.

الف) نتایج در حالت بهره برداری مجزای واحدهای بادی و تلمبه ذخیره ای

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی های صورت گرفته روی سیستم آزمایش ارائه می شود. در این الگوریتم پیشنهاددهی برای آن که کل بازه تغییرات قیمت و تولید واحد بادی به طور مناسبی جاروب شود، به ترتیب دو پارامتر δ_r و δ_p تعریف شدند که در این جا مقدار عددی 0.125 برای هر دو پارامتر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، با توجه به این که دو پارامتر G^k و b^{pp} مقدار افزایشی بین صفر و یک را با گام های δ_r و δ_p اختیار می کنند؛ بنابراین می توان انتظار داشت که برای جاروب کردن کامل بازه مربوط به هر یک از پارامترهای همراه با عدم قطعیت، ۵ گام لازم می باشد. پس در مجموع از آن جا که برای هر گام تغییر قیمت باید هر ۵ گام تغییر تولید بادی رخ دهد، بنابراین تعداد کل گام های مسئله پیشنهاددهی مزرعه بادی با رویکرد بهینه سازی مقاوم، ۲۵ گام خواهد بود.

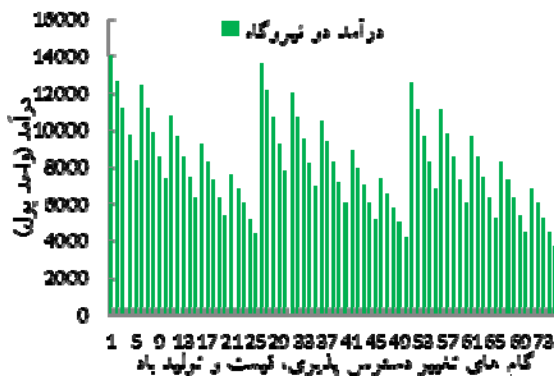
شکل (۳)، پیشنهاد تولید مزرعه بادی را در شرایطی بیان می کند که تولید بادی و قیمت بازار در هر ۲۴ ساعت دوره تحت مطالعه داری عدم قطعیت هستند. مطابق با این شکل، پیشنهاد تولید مزرعه بادی مستقل از تغییرات قیمت است و صرفاً تابع توان تولیدی واحد بادی است. این موضوع کاملاً منطبق بر واقعیت مسئله است؛ چرا که تولید توان در یک نیروگاه بادی تقریباً بدون هزینه است. این نتیجه به نوعی معتبر و صحیح بودن مدل ارائه شده در شرایط مختلف را نیز تأیید می کند. در نتیجه با وجود هر قیمتی، از فروش انرژی تولیدی نیروگاه بادی در بازار منفعت حاصل خواهد شد.

برای مطالعه دقیق تر، در شکل (۴) تغییرات درآمد مزرعه بادی به ازای تغییرات قیمت و توان تولیدی واحد بادی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۴) نیز نشان می دهد که اگرچه پیشنهاد تولید مزرعه بادی مستقل از قیمت است، اما درآمد حاصل از شرکت در بازار کاملاً به مقدار عددی قیمت وابسته است.

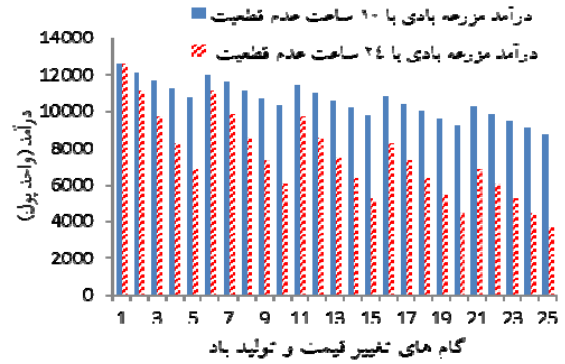
برای آن که تأثیر عدم قطعیت‌های مؤثر بر برنامه‌ریزی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای مشخص گردد، فرض شده که دسترس‌پذیری واحدها و قیمت بازار در هر ۲۴ ساعت دارای عدم قطعیت هستند و در هر ساعت مقداری عددی را از بازه‌های تعریف شده برای این پارامترهای غیرقطعی اختیار می‌کنند. طبق الگوی تعریف شده در بخش (۳)، برای آن که کل بازه غیرقطعی جاروب شود، برای عدم قطعیت قیمت و دسترس‌پذیری واحدها به ترتیب ۵ و ۳ گام تعریف شده است. با توجه به شرایط گفته شده، شکل (۷) تغییرات درآمدی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در اثر عدم قطعیت‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با تغییر نزولی قیمت و یا کاهش واحدهای در دسترس، درآمد نیروگاه نیز کاهش یافته است. به طوری که از گام یازدهم به بعد که تعداد واحدهای در دسترس صفر شده، مقدار درآمد نیز صفر گردیده است.

ب) نتایج در حالت بهره‌برداری هم‌زمان

در ادامه نتایج حاصل از بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم ارائه خواهد شد. در مدل برنامه‌ریزی هم‌زمان واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم، عدم قطعیت‌های تأثیرگذار قیمت برق در بازار روز بعد، توان تولیدی واحد بادی و دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای هستند. شکل (۸)، درآمد مجموعه دو نیروگاه بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای در حضور عدم قطعیت‌های ذکر شده را به تصویر کشیده است. مشاهده می‌شود که درآمد دو نیروگاه در حالت بهره‌برداری هم‌زمان به عدم قطعیت در هر سه پارامتر قیمت، توان باد و دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای حساس می‌باشد و رفتار منحنی مطابق با انتظارات واقعی و کاملاً معتبر است. در نهایت، شکل (۹) تفاضل میزان سود مالک نیروگاه در دو حالت بهره‌برداری هم‌زمان و مجزا را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، در بعضی از گام‌ها میزان تفاضل سود صفر و در برخی دیگر از گام‌ها مقدار عددی مثبتی است. این نتایج تأیید و تأکید می‌کند که بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه می‌تواند استراتژی مناسبی برای کسب سود بیش‌تر باشد.



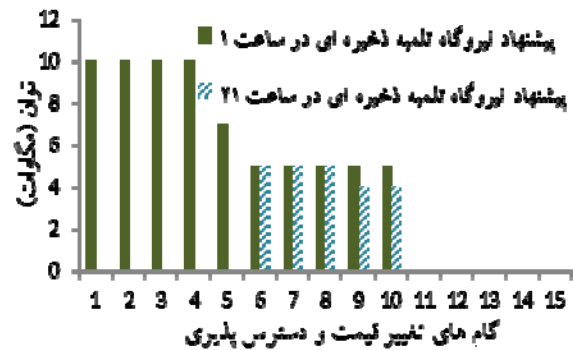
شکل (۸) تأثیر عدم قطعیت‌ها بر میزان درآمد دو نیروگاه در حالت بهره‌برداری هم‌زمان.



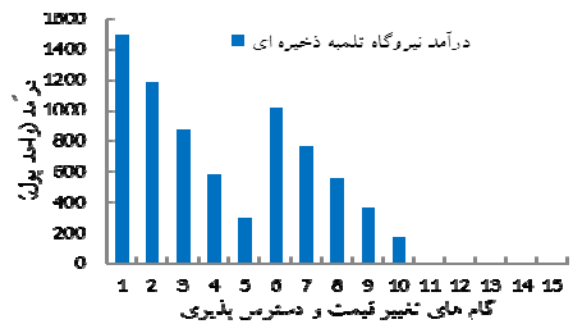
شکل (۵) مقایسه درآمد مزرعه بادی با دو بوجه عدم قطعیت مختلف.

در ادامه، به بررسی نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در حالت عملکرد مجزای نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای پرداخته می‌شود. در این‌جا نیز نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار مشابه حالت قبل بوده و برای مدل‌سازی عدم قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای، از الگوریتم بخش (۳-۳) استفاده شده است.

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که پیشنهاد نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای علاوه بر دسترس‌پذیری، به تغییرات قیمت نیز حساس است. به عنوان مثال، در ساعت یک، در گام پنجم تغییر قیمت، توان تولیدی پیشنهادی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با توجه به روند نزولی قیمت، کاهش یافته است. این نتایج با توجه به اینکه تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با هزینه همراه است، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.



شکل (۶) پیشنهاد تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در ۲ ساعت مختلف.

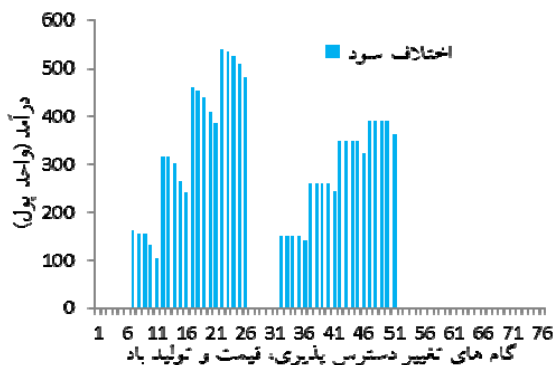


شکل (۷) تغییرات درآمد نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.

- [6] L. Baringo and A. J. Conejo, "Offering Strategy Via Robust Optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1418-1425, 2011.
- [7] J. Ruiwei, W. Jianhui, "Robust Unit Commitment with Wind Power and Pumped Storage Hydro," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 27, pp. 80-90, 2012.
- [8] Z. Chaoyue, W. Jianhui, J. P. Watson, and G. Yongpei, "Multi-Stage Robust Unit Commitment Considering Wind and Demand Response Uncertainties," *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 28, pp. 2708-2717, 2013.
- [9] J. Ruiwei, W. Jianhui, Z. Muhong, and G. Yongpei, "Two-Stage Minimax Regret Robust Unit Commitment," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 28, pp. 2271-2282, 2013.
- [10] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, Z. Jinye, and Z. Tongxin, "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 52-63, 2013.
- [11] Z. Chaoyue and G. Yongpei, "Unified Stochastic and Robust Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3353-3361, 2013.
- [12] C. Haoyong, L. Hao, Y. Rong, and L. Bo, "Robust Scheduling of Power System with Significant Wind Power Penetration," *IEEE Power syst*, 2012.
- [13] A. Soroudi, "Robust Optimization based Self-Scheduling of Hydro-Thermal GENCO in Smart Grids," *Energy*, vol. 61, pp. 262-271, 2013.
- [14] A. Street, F. Oliveira, and J. M. Arroyo, "Contingency-Constrained Unit Commitment with Security Criterion: A Robust Optimization Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1581-1590, 2011.
- [15] C. Zhi, W. Lei, and F. Yong, "Real-Time Price-Based Demand Response Management for Residential Appliances via Stochastic Optimization and Robust Optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1822-1831, 2012.
- [16] M. Sim, "Robust Optimization," PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June 2004.
- [17] R. A. Jabr, "Robust Self-Scheduling Under Price Uncertainty Using Conditional Value-at-Risk," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 20, no. 4, November 2005.
- [18] Ben-Tal and A. Nemirovski, "Robust Solutions of Linear Programming Problems Contaminated with Uncertain Data," *Mathematical Programming*, pp. 411-424, 2008.
- [19] R. Karki, P. Hu, and R. Billinton, "Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 25, pp. 685-693, May 2010.
- [20] J. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, "Short-Term Trading for a Wind Power Producer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 554-564, Feb 2010.
- [21] T. Jonsson, P. Pinson, H. A. Nielsen, H. Madsen, and T. S. Nielsen, "Forecasting Electricity Spot Prices Accounting for Wind Power Predictions," *IEEE Trans on Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 210-218, 2013.

زیر نویس ها

- ¹ Sensitivity analysis
- ² Stochastic optimization
- ³ Robust optimization
- ⁴ Soyster
- ⁵ Ben-Tal
- ⁶ Nemirovski



شکل (۹) اختلاف سود در دو حالت بهره برداری همزمان و مجزا.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، رویکردی مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای پیشنهاددهی استراتژیک مالک یک نیروگاه تجدیدپذیر تلفیقی بادی و تلمبه ذخیره ای ارائه گردید که با استفاده از آن امکان در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت های تأثیرگذار بر مسئله فراهم شده است. به طور مشخص، ساختاری برای مدل سازی برنامه ریزی دو نیروگاه چه به صورت بهره برداری مجزا و چه به صورت بهره برداری همزمان ارائه گردیده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، می توان اذعان داشت که برای حصول سود بیشتر، بهتر است دو نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره ای به طور همزمان مورد بهره برداری قرار گیرند. در این حالت اثر نوسانی توان تولیدی نیروگاه بادی بر سیستم قدرت کمتر شده و در نتیجه هزینه ناشی از عدم تعادل در تولید حقیقی و پیشنهاد تولید حداقل می گردد و به این شکل متناسب با آن درآمد حاصل از مشارکت در بازار انرژی برای دو نیروگاه حداکثر می شود. با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج حاصل از این مقاله، رویکرد آتی برای تکمیل این موضوع، می تواند تلفیق مدل مقاوم پیشنهادی با مدل های جدید ارزیابی خطرپذیری باشد.

مراجع

- [1] V. Vahidinasab and S. Jadid, "Stochastic Multiobjective Self-Scheduling of a Power Producer in Joint Energy and Reserves Markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 760-769, 2010.
- [2] J. G. González, d. I. Muela, L. M. Santos, and A. M. González, "Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 456-461, May 2008.
- [3] N. Amjady and V. Vahidinasab, "Security-Constrained Self-Scheduling of Generation Companies in Day-Ahead Electricity Markets Considering Financial Risk," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 164-172, 2013.
- [4] L. Wu, M. Shahidepour, and T. Li, "Stochastic security-constrained unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 800-811, 2007.
- [5] J. Conejo, and M. Carrión, "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets". *Springer*, June 2010.