

## استراتژی پیشنهاد میزان خرید و فروش همزمان برق و گاز برای

### بهره‌برداری از یک ریزشبه‌چندحاملی در بازار انرژی

شاپور حدادی پور<sup>۱</sup>، وحید امیر<sup>۲\*</sup>، سعید جوادی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

S.Haddadipour@iaukashan.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

v.amir@iaukashan.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

s.javadi@iaukashan.ac.ir

**چکیده:** در یک شبکه توزیع هوشمند، ریزشبه‌ها می‌توانند با ارائه پیشنهاد خرید و فروش، هزینه خود را در بازار روز - قبل کاهش دهند. مسئله پیشنهاد خرید و فروش به علت عدم قطعیت‌های مختلف چالش برانگیز است. این مقاله یک استراتژی دو مرحله‌ای پیشنهاد میزان بهینه خرید و فروش برق را با وجود وابستگی قیمت برق و گاز در بازار روز - قبل و زمان - واقعی برای یک ریزشبه چندحاملی ارائه می‌دهد. در این مدل، رفتار ریزشبه روی میزان خرید/فروش انرژی برق و گاز، تأثیر همزمان قیمت برق و گاز، وابستگی حامل‌های انرژی به همدیگر بررسی شده است. در شبکه پیشنهادی خرید و فروش انرژی در یک ریزشبه چندحاملی به صورت یک مدل دو مرحله‌ای ارائه شده است. در مرحله اول، ریزشبه پیشنهادت خرید و فروش انرژی ساعتی را به بهره‌بردار سیستم توزیع، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه می‌دهد. سپس در مرحله دوم با در نظر گرفتن پیشنهادت روز - قبل تأییدشده، بهره‌بردار ریزشبه در بازار لحظه‌ای به منظور متعادل کردن بار اقدام می‌کنند. این مسئله به صورت یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته با نرم‌افزار GAMS و روش کاهش سناریو حل شده است. نتایج عددی، سودمندی مدل پیشنهادی را با مقایسه سناریوها در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبه چندحاملی نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** بازار انرژی، بهره‌برداری، ریزشبه چندحاملی، مدل دو مرحله‌ای، کاهش سناریو، عدم قطعیت

#### ۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت در نظر گرفته می‌شوند [۱]. ریزشبه می‌تواند یک شبکه توزیع ولتاژ پایین متشکل از منابع تولید پراکنده، دستگاه‌های ذخیره‌ساز، نیروگاه‌های تجدیدپذیر و بارهای پاسخگو باشد که می‌توانند در حالت‌های متصل به شبکه و جدا از شبکه (جزیره‌ای) عمل کنند [۲]. از نظر شبکه، یک ریزشبه می‌تواند یک عنصر کنترل‌پذیر در نظر گرفته شود که به نقطه مشترک شبکه توزیع متصل می‌شود. ممکن است انرژی از طریق واردات یا صادرات تحت تعرفه‌های مختلف بازار و

امروزه ریزشبه‌ها راه‌حل مناسب برای افزایش نفوذ

\* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶

نام نویسنده مسئول: وحید امیر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - دانشگاه آزاد اسلامی

واحد کاشان - دانشکده برق

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

باشند. در این مطالعات، تفاوت‌های اصلی را می‌توان در نوع مدل‌های عدم قطعیت و استراتژی حل مسئله خلاصه کرد. علاوه بر این، ریزشبه‌ها نیز به مبادله برق با روز - قبل و بازارهای زمان - واقعی در حالت متصل به شبکه قادرند. همان‌طور که بازار زمان - واقعی فقط چند دقیقه قبل از هر ساعت تسویه می‌شود [۱۰]، مشارکت در این بازار فرصت خوبی برای ریزشبه‌ها برای پوشش دادن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش هزینه‌های کلی و تعادل عرضه و تقاضا در بهره‌برداری نزدیک به زمان - واقعی است. همچنین برای قیمت بازار در زمان - واقعی عدم قطعیت وجود دارد و مبادله برق با این بازار خطرناک است؛ بنابراین، مهم است یک مدل بهینه‌سازی روزمره کارآمد ایجاد شود که برای بهره‌بردار واقعی در زمان - واقعی و عدم قطعیت به دلیل نیروگاه تجدیدپذیر و قیمت بازار باشد [۱۱]. در بازار مصرف‌کنندگان با هدف کمینه‌سازی قیمت تسویه بازار و تولیدکنندگان با هدف حداکثرسازی سود در رسیدن به نقطه تعادل با یکدیگر همکاری می‌کنند. این کار با مدیریت در بهره‌برداری محلی از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای پاسخگو و در ارتباط با شبکه بالادست صورت می‌گیرد [۱۲]. ارائه سیستم‌های مدیریت انرژی با در نظر گرفتن عملکرد بهینه منابع موجود در ریزشبه‌ها، کنترل تبادل توان با شبکه و نیز مابین ریزشبه‌ها حائز اهمیت است [۱۳].

در [۱۴] یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مختلط صحیح برای مدل‌سازی یک هاب انرژی خانگی به منظور پاسخگویی به نیازهای گرمایشی، سرمایشی و الکتریکی ساختمان طراحی شده که امکان فروش برق به شبکه نیز برای آن در نظر گرفته شده است. در [۱۵] برای حل مسئله چندهدفه توزیع در ریزشبه شامل حداقل‌سازی هزینه و میزان انتشار با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا و عدم قطعیت ارائه شده است. یک چارچوب احتمالی براساس روش سناریو برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها در مدیریت بهینه انرژی ریزشبه در نظر گرفته شده است. از مفهوم هاب انرژی برای ساختن یک مدل مبتنی بر سناریو برای برنامه‌ریزی بهینه منابع الکتریکی و حرارتی در یک ریزشبه با زیرساخت‌های یکپارچه برقی و گاز طبیعی استفاده شده

شرایط عملیاتی ریزشبه به شبکه توزیع اصلی باشد. علاوه بر این، ریزشبه می‌تواند سرویس‌های جانبی مانند پشتیبانی و سرویس تنظیم ولتاژ را به شبکه اصلی توزیع ارائه دهد [۳] و [۴]. از دیدگاه مشتریان، یک ریزشبه که نه تنها می‌تواند انرژی را فراهم کند، باعث افزایش قابلیت اطمینان محلی، کاهش انتشار گازها و همچنین کاهش هزینه‌های تأمین انرژی با استفاده از منابع انرژی توزیع شده، دستگاه‌های ذخیره‌سازی و بارهای پاسخگو می‌شود. علاوه بر این، یک ریزشبه می‌تواند کیفیت توان را با حمایت از ولتاژ و کاهش ولتاژ بهبود بخشد [۵]. در [۶] عدم قطعیت قیمت، بارهای الکتریکی و دمای محیط از درخت سناریو به تصویر کشیده شده و با یک طرح بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای هزینه‌های بهره‌برداری را به حداقل رسانده است. برای کاهش زمان حل مسئله خطی‌سازی مدل انجام شده است. در [۷] مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای مدیریت منابع انرژی ریزشبه‌ها با توجه به تولیدات تجدیدپذیر، وسایل نقلیه الکتریکی و عدم قطعیت قیمت بازار پیشنهاد شده است. یک مدل دو مرحله‌ای استوار برای بهینه‌سازی هم‌زمان روز - پیش و عدم قطعیت زمان - واقعی ریزشبه‌ها با در نظر گرفتن مدل‌سازی دقیق محدودیت‌های بهره‌برداری در [۸] ارائه شده است. مسئله بهینه‌سازی روز - قبل با توجه به مقدار پیش‌بینی شده تولیدات تجدیدپذیر، در مرحله اول به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح تدوین می‌شود و در مرحله دوم بهره‌برداری زمان - واقعی غیرقطعی با مدل‌سازی استوار عدم قطعیت‌ها صورت می‌گیرد. از آنجایی که گسترش روزافزون منابع تجدیدپذیر توزیع شده انرژی، باعث ایجاد چالش‌های عمده فنی در تعادل عرضه و بار می‌شود، استفاده از خدمات جانبی فرعی محلی برای اپراتورهای شبکه از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ بنابراین، یک مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه در [۹] ارائه شده است تا توانایی ریزشبه را در ارائه خدمات جانبی به شبکه برق نشان دهد.

در بیشتر مقالات، مدیریت انرژی در ریزشبه تنها در مرحله روز - قبل مدل‌سازی شده است؛ بدون اینکه عدم قطعیت در بهره‌برداری تقریباً واقعی در زمان - واقعی و امکان مبادله برق با بازار زمان - واقعی را منظور کرده

شبکه پیشنهادی خرید و فروش انرژی در یک ریزش شبکه چندحاملی به صورت یک مدل دو مرحله‌ای ارائه شده است. در نهایت این مسئله به صورت یک مدل تصادفی خطی عدد صحیح آمیخته مدل شده است. به طور خلاصه، نوآوری اصلی مقاله به صورت زیر خلاصه شده است:

- محاسبه میزان پیش خرید/فروش برق در یک ریزش شبکه چندحاملی تحت عدم قطعیت.
- استفاده از یک روش دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی توامان در بازار روز - قبل و زمان - واقعی.
- در نظر گرفتن وابستگی قیمت برق و گاز در بازار روز - قبل، و وابستگی قیمت بازار روز - قبل و زمان - واقعی برای جلوگیری از تغییر یک‌جانبه قیمت بازار برق.

## ۲- ساختار ریزش شبکه چندحاملی

یک ریزش شبکه چندحاملی به صورت گروهی از بار و تولیدات پراکنده متصل به هم با زیرساخت‌های انرژی تعریف شده توصیف می‌شود. این ریزش شبکه چندحاملی به عنوان یک ناحیه مجزا نسبت به شبکه اصلی است که به صورت متصل به شبکه یا جزیره‌ای عمل می‌کند. در این مقاله، شکل (۱) ریزش شبکه چندحاملی با زیرساخت شبکه برق و گاز طبیعی، سیستم هاب انرژی، منابع تجدیدپذیر و باتری پیشنهاد شده که در اینجا سیستم هاب انرژی یک رابط بین منابع مختلف انرژی از جمله برق و گاز طبیعی و بارهای الکتریکی و حرارتی است. در اینجا ریزش شبکه پیشنهادی به شبکه برق و گاز بالادست متصل است و قابلیت جزیره‌ای شدن را دارد. همچنین برای تسهیل بهره‌برداری یک کنترلر مرکزی در ریزش شبکه در نظر گرفته شده است که اطلاعات را از هر کنترلر محلی نظیر وضعیت تولیدات پراکنده و بارها جمع‌آوری می‌کند و در صورت لزوم، فرمان‌های لازم را برای بهره‌برداری بهینه ریزش شبکه صادر می‌کند. در واقع این کنترلر مرکزی بهره‌برداری بهینه ریزش شبکه را براساس وضعیت تولیدات پراکنده، سرعت باد پیش‌بینی شده، تشعشع خورشید و میزان بارها را انجام می‌دهد و سپس سیگنال توزیع انرژی را به کنترلر محلی هر

است [۱۶]. تابع هدف ضمن در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های شبکه، هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار را به حداقل رسانده است و سناریوهای مرتبط با متغیرهای تصادفی مانند تولید تجدیدپذیر و بارهای الکتریکی و حرارتی با استفاده از توابع توزیع احتمال مربوطه تولید شده‌اند و با استفاده از تکنیک کاهش سناریو تعداد سناریوها کاهش یافته است. یک چارچوب تصادفی دو مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری کوتاه مدت ریزش شبکه‌ها شامل شبکه‌های برق و گاز طبیعی که از هاب‌های انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر و تأسیسات ذخیره انرژی تشکیل شده است، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پیش‌بینی شده در [۱۷] پیشنهاد شده است.

در مطالعات انجام شده تا کنون به بررسی پیشنهاد خرید و فروش برق در یک ریزش شبکه چندحاملی با در نظر گرفتن وابستگی شبکه برق و گاز پرداخته نشده است. همچنین اثر عدم قطعیت‌های گوناگون در بار و تولید روی هزینه‌های بهره‌برداری ریزش شبکه چندحاملی صورت نگرفته است. از آنجایی که عدم قطعیت‌های گوناگون روی بهره‌برداری بهینه ریزش شبکه‌ها در پیش خرید و پیش فروش انرژی تأثیر مستقیم دارد، بررسی یک استراتژی بهینه برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزش شبکه‌ها اهمیت پیدا می‌کند. پس در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی احتمالی روی یک ریزش شبکه چندحاملی پرداخته شده است. در ریزش شبکه پیشنهادی تولیدات پراکنده و مبدل نظیر ترانسفورماتور، مبدل تولید همزمان، بولبر، نیروگاه خورشیدی و بادی، باتری و سیستم گرمایشی در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که میزان تولیدات پراکنده، بار الکتریکی و حرارتی و قیمت برق در بازار روز - قبل و واقعی دارای عدم قطعیت‌اند، در این مقاله، یک مدل احتمالی سازگار با مسئله استراتژی توزیع انرژی در ریزش شبکه چندحاملی ارائه شده است. استراتژی پیشنهادی در این مقاله شامل خرید/فروش انرژی در بازار روز - قبل است که میزان خطای نامتعادلی بار در بازار با قیمت‌های زمان - واقعی جبران می‌شود. در این مدل عدم قطعیت روی قیمت بازار روز - قبل و زمان - واقعی دیده شده است. همچنین در این مقاله وابستگی قیمت گاز و برق در بازار روز - قبل و بازار زمان - واقعی بررسی شده است. در

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین های بادی بدون جعبه دنده

مطالعه و انحراف معیار برابر با ۵ درصد از بار پایه آن به صورت زیر مدل سازی می شود [۱۹-۲۱].

$$f(L_{t,l}) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(L_{t,l} - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right) \quad (1)$$

### ۲-۳- مدل سازی قیمت برق در بازار روز - قبل

#### و بازار زمان - واقعی

تجزیه و تحلیل آماری در [۲۲-۲۴] نشان می دهد توزیع منطبق عام مناسب ترین مدل است و استراتژی پیشنهاد شده در تحلیل را تأیید می کند؛ از این رو تابع توزیع لاگ نرمال با میانگین مقدار برابر با قیمت برق پایه در یک فاصله زمانی معین و مقدار برابر ۵٪ از قیمت پایه آن برای مدل بازار برق استفاده می شود.

$$f_{C_e}(C_{t,e}) = \frac{1}{C_{t,e} \sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(C_{t,e}) - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right) \quad (2)$$

### ۳-۳- مدل احتمالاتی از منابع انرژی تجدید پذیر

دو تابع توزیع برای مدل سازی عدم قطعیت مربوط به واحد بادی و خورشیدی اجرا می شود. توان خروجی ژنراتور بادی به سرعت باد با هزینه صفر سوخت بستگی دارد. سرعت باد هر لحظه متفاوت است که اهمیت یک مدل احتمالی را برجسته می کند. در مقالات موجود، استفاده از تابع توزیع نرمال و بیال برای سرعت باد [۲۵] معمول است. تابع توزیع نرمال و بیال به صورت رابطه (۳) است.

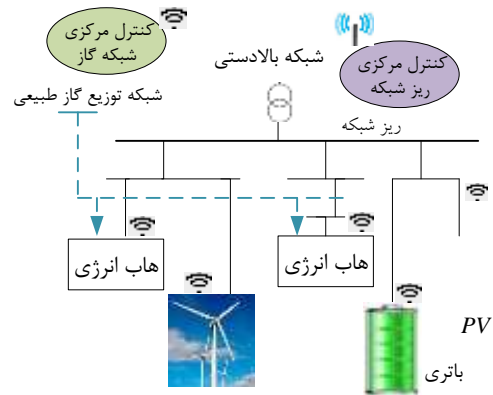
$$f_v(v_t) = \begin{cases} \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{v_t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v_t}{\alpha}\right)^\beta\right) & v_t \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

توان خروجی نیروگاه تولید بادی در هر فاصله زمانی معین با استفاده از منحنی قدرت با سرعت باد محاسبه می شود که بیان کننده معادله (۴) است [۲۶].

$$RP^{wt}(v_t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t \leq v_{ci} \\ & \text{or } v_t \geq v_{co} \\ P_r^{wt} \cdot \frac{v_t^2 - v_{ci}^2}{v_r^2 - v_{ci}^2} & v_{ci} \leq v_t \leq v_r \\ P_r^{wt} & v_r \leq v_t \leq v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

توان تولید شده از یک واحد خورشیدی با توجه به تابش خورشید متفاوت است که به عوامل متعددی نظیر شرایط

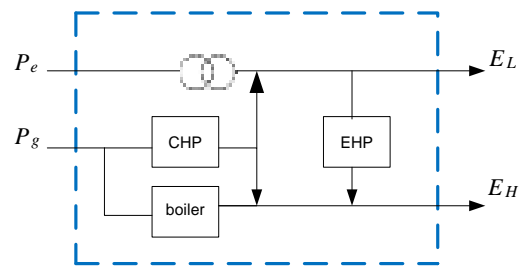
ریز شبکه ارسال می کند. این کنترلر مرکزی با بهره بردار مستقل ریز شبکه مدیریت می شود.



شکل (۱): ساختار ریز شبکه

### ۱-۲- هاب انرژی

سیستم هاب انرژی تبدیل حامل های انرژی را تسهیل می کند. هاب انرژی به عنوان رابط بین منابع انرژی مختلف از جمله برق و گاز طبیعی و انواع بارها (مانند برق و حرارت) است. هاب انرژی شامل ترانسفورماتور، بویلر و مولد تولید همزمان برق و حرارت است که برق و گاز طبیعی را از شبکه بالادست به عنوان ورودی دریافت می کند و برق و حرارت مورد نیاز مشترکین را به عنوان خروجی هاب تأمین می کند [۱۸]. شبکه پیشنهادی هاب انرژی در ریز شبکه چندحاملی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): هاب انرژی

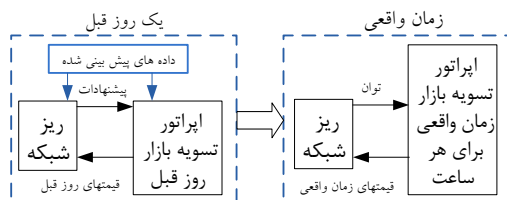
### ۳- مدل سازی احتمالی بار، قیمت برق و منابع

#### انرژی تجدید پذیر

#### ۱-۳- مدل سازی بارها

در این مطالعه، بارهای الکتریکی و حرارتی با استفاده از یک تابع توزیع نرمال با میانگین برابر با بار پایه در هر دوره،

تصادفی متغیرها ممکن است تغییراتی داشته باشد؛ بنابراین، مشتری فعالانه باید در بازار زمان - واقعی به منظور بالانس بار در زمان - واقعی شرکت کند [۲۹]. درخور ذکر است قیمت‌ها در این بازار ثانویه متفاوت از بازار روز - قبل است. همچنین از آنجا که اندازه ریز شبکه چندحاملی در مقایسه با اندازه شبکه کوچک فرض شده است، آن یک نهاد قیمت‌گیرنده در نظر گرفته شده است. به صورت خلاصه، در مدل پیشنهادی، ابتدا با توجه به اطلاعات موجود از بازار روز - قبل نظیر میزان بار الکتریکی و حرارتی پیش‌بینی شده، تولید تجدیدپذیر، قیمت برق و گاز در بازار روز - قبل یک بار برنامه شبیه‌سازی می‌شود و تابع هزینه به همراهی میزان بهینه خرید و فروش انرژی در بازار روز - قبل به دست می‌آید. سپس متغیرهای مرحله اول نظیر میزان بهینه خرید و فروش انرژی در بازار روز - قبل پارامترهای مرحله دوم در نظر گرفته می‌شوند. در مرحله دوم شبیه‌سازی مدل بازار زمان - واقعی، با توجه به عدم قطعیت‌های متعدد نظیر بار الکتریکی و حرارتی، تولیدات تجدیدپذیر و قیمت بازار لحظه‌ای برای تنظیم بالانس انرژی و تسویه بازار در هر ساعت صورت می‌گیرد.



شکل (۳): ریز شبکه چندحاملی در محیط بازار

منابع اصلی عدم قطعیت، قیمت روز - قبل و زمان - واقعی، تولید تجدیدپذیر و بارها هستند. از آنجا که در این مقاله شش نوع عدم قطعیت در مسئله پیشنهادی، بهینه‌سازی تصادفی در نظر گرفته شده، برای مطالعه اثر این عدم قطعیت روی استراتژی بهره‌برداری ریز شبکه، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوهای تصادفی استفاده شده است. همچنین با روش کاهش سناریو (روش کاهش عقبگرد براساس فاصله کانترویچ) سناریوهای تولید شده هر پارامتر به منظور کاهش بار محاسباتی مسئله به سه سناریو کاهش یافته است [۳۰].

محیطی، زمان، روز، ماه، فصل و جهت‌گیری نیروگاه خورشیدی به تابش خورشید در میان سایرین بستگی دارد. در این مقاله، تابش خورشید با یک تابع توزیع بتا ( $\beta$ ) مدل‌سازی می‌شود [۲۷]. تابع توزیع  $\beta$  با رابطه (۵) نمایش داده می‌شود.

$$f(R_t) = \frac{\Gamma(\varphi, \zeta)}{\Gamma(\varphi) \cdot \Gamma(\zeta)} \cdot R_t^{(\varphi-1)} \cdot (1-R_t)^\zeta \quad (5)$$

مولد خورشیدی توان خروجی مربوط به تابش خورشید است؛ بنابراین مدل‌سازی توان خروجی نیاز به مدل‌سازی تابش خورشیدی دارد. توان خروجی نیروگاه خورشیدی به‌عنوان تابعی از تابش در هر فاصله زمانی مشخص، منحنی توان تابش طبق رابطه (۶) بیان شده است [۲۸].

$$RP^{pv}(R_t) = \begin{cases} P_r^{pv} \cdot \left( \frac{R_t^2}{R_{STAD} \cdot R_{ce}} \right) & 0 \leq R_t \leq R_{ce} \\ P_r^{pv} \cdot \left( \frac{R_t}{R_{STAD}} \right) & R_{ce} \leq R_t \leq R_{STAD} \\ P_r^{pv} & R_{STAD} \leq R_t \end{cases} \quad (6)$$

#### ۴- تعریف مسئله

در این قسمت، روند استراتژی پیشنهادی (خرید و فروش) در بازار روز - قبل و زمان - واقعی انرژی در شرایط تصادفی، مدل و در شکل (۳) نشان داده شده است. منظور از استراتژی پیشنهادی میزان انرژی خریداری یا فروخته‌شده در بازار روز - قبل است. با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف در داده‌های پیش‌بینی شده و در سیستم، پیدا کردن یک رویکرد مطلوب پیشنهادی موضوع چالش‌برانگیزی است. در مدل پیشنهادی، امکان مبادله برق و گاز بین ریز شبکه چندحاملی پیشنهادی و شبکه بالادست دیده شده است که این امر نقش مهمی در بازار انرژی با دسترسی به اطلاعات زمان - واقعی بازی می‌کند. نهادهای قیمت‌دهنده، پیشنهادات (شامل قیمت خرید و فروش و ساعتی برق) خود را در روز - قبل به بهره‌بردار سیستم توزیع ارائه می‌دهند.

پیشنهادات ارائه‌شده به بهره‌بردار سیستم توزیع با توجه به قیمت بازار روز - قبل و پیش‌بینی تولید و مصرف براساس داده‌های پیش‌بینی شده است. پس از تسویه بازار با بهره‌بردار سیستم توزیع، تولید و مصرف به دلیل ماهیت

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین های بادی بدون جعبه دنده

#### ۴-۱- تابع هدف مرحله اول

$$C_{o\&m}(t,s) = P_e^{CHP}(t,s)k_{o\&m}^{CHP} + P_h^{AB}(t,s)k_{o\&m}^{AB} + P_e^{WT}(t,s)k_{o\&m}^{WT} + P_e^{Net}(t,s)k_{o\&m}^{tran} + |E_s(t,s)|k_{o\&m}^{ES} \quad (۸)$$

در معادله (۸) هزینه نگهداری هر واحد از ضرب میزان تولید هر واحد در ضریب هزینه نگهداری در هر ساعت محاسبه می شود.

#### ۴-۲- قیود مسئله

معادلات زیر نشان از رابطه تبدیل/تولید تجهیزات موجود در ریزشبكة دارد. در این ریزشبكة وظیفه تبدیل انرژی را با یک ترانس به عهده دارد که در معادله (۹) مدل شده است. همچنین میزان انرژی تولیدی با مولد تولید همزمان و بویلر در (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده که وابسته به میزان گاز خریداری شده و راندمان تجهیزات است.

$$P_e^{trans} = P_e^{Net}(t,s)\eta^{trans} \quad (۹)$$

$$P_l^{CHP}(t,s) = P_g(t,s)\eta_l^{CHP}v(t,s) \quad l \in \{e,h\} \quad (۱۰)$$

$$P^{AB}(t,s) = P_g(t,s)\eta^{AB}(1-v(t,s)) \quad (۱۱)$$

$$P^{EHP}(t,s) = P_l^{EHP}(t,s)\eta^{EHP}Co \quad (۱۲)$$

مدلسازی باطری در (۱۳) فرموله شده است؛ به طوری که معادله (۱۴) از شارژ و دشارژ همزمان باتری جلوگیری می کند. همچنین در معادله (۱۲) به منظور استفاده پایا از باطری میزان انرژی در لحظه اول و آخر روز باید با هم برابر باشند که در رابطه (۱۵) نوشته شده است.

$$M(t,s) = [E(t,s) - E(t-1,s)] \times (\eta^{ch}I^{ch}(t,s) + \eta^{dis}I^{dis}(t,s)) \quad (۱۳)$$

$$I^{ch}(t,s) + I^{dis}(t,s) = 1 \quad (۱۴)$$

$$E_l(1,m) = E_l(24,m) \quad (۱۵)$$

معادله (۱۶) بالانس بار الکتریکی و حرارتی را نشان می دهد که برای هر سناریو در هر ساعت باید برقرار باشد. معادله (۱۶) نشان می دهد میزان بار الکتریکی و برق لازم برای تأمین سیستم گرمایشی می تواند با شبکه بالادست، مولد تولید همزمان، نیروگاه بادی و خورشیدی و باطری

در ریزشبكة چندحاملی پیشنهادی، شش منبع عدم قطعیت در نظر گرفته شده وجود دارد: قیمت های روز - قبل و زمان - واقعی، میزان تولیدات خورشیدی و بادی، بارهای الکتریکی و حرارتی. در شبکه پیشنهادی میزان خرید و فروش انرژی در یک ریزشبكة چندحاملی به صورت یک مدل دو مرحله ای ارائه شده است. در مرحله اول، ریزشبكة چندحاملی پیشنهادات میزان خرید و فروش انرژی ساعتی را به بهره بردار سیستم توزیع ارائه می دهد؛ در حالی که عدم قطعیت های موجود در نظر گرفته نشده اند. پس از تسویه بازار، ریزشبكة به برنامه ریزی تولید برای بهره برداری ریزشبكة در روز آینده طبق پارامترهای قطعی می پردازد. در مرحله دوم (بهره برداری در زمان - واقعی)، با در نظر گرفتن پیشنهادات خرید و فروش روز - قبل تأیید شده، بهره بردار ریزشبكة به بهره برداری منابع به منظور متعادل کردن میزان تولید و مصرف به دلیل عدم قطعیت های موجود اقدام می کند. در واقع، این مرحله قبل از تسویه بازار زمان - واقعی در هر ساعت صورت می پذیرد؛ بنابراین، میزان تولید واحدها، شارژ و دشارژ ذخیره سازها و خرید و فروش انرژی در بازار لحظه ای بهینه می شود. این مدل یک مسئله خطی عدد صحیح آمیخته است که تابع هدف و قیود ریزشبكة چندحاملی پیشنهاد شده در مدت زمان ۲۴ ساعت برای هر یک از سناریوها در آن مدل سازی شده اند. در این مدل تابع هدف کمینه کردن هزینه های خرید و فروش انرژی و نگهداری تجهیزات است. تابع هدف با هدف حداقل رساندن به صورت رابطه (۷) مدل شده است.

$$OF : \sum_s \Omega_{t,s} \cdot \sum_t \left[ \rho^{DA}(t,s) \cdot P_e^{DA}(t,s) + \rho_g(t,s) \cdot P_g(t,s) + C_{o\&m}(t,s) \right] \quad (۷)$$

که عبارت اول هزینه خرید یا سود فروش انرژی در بازار روز - قبل برای هر ساعت است. عبارت دوم هزینه خرید گاز طبیعی به منظور تأمین واحدهای مصرف کننده سوخت گاز است که وظیفه تأمین برق و حرارت ریزشبكة را برعهده دارند و عبارت آخر، هزینه های نگهداری تجهیزات است که به صورت زیر مدل شده است.

برق در بازار روز - قبل که هر کدام از عوامل ذکر شده تا حدودی بر قیمت برق در بازار زمان - واقعی تأثیر می گذارد. در نهایت، برای تعیین اینکه چگونه عوامل مختلف قیمت برق در روزهای آینده و در زمان - واقعی در دوره های زمانی ذکر شده تأثیر می گذارند، ضریب همبستگی مربوط به قیمت برق و عوامل مختلف در هر هاب محلی محاسبه می شود. وابستگی قیمت حامل ها با رابطه (۲۶) نشان داده شده است که بردار  $Y$  قیمت های بازار روز - قبل و زمان - واقعی را نشان می دهد. همچنین بردار  $X$  به میزان خطای پیش بینی بار، خطای پیش بینی باد، قیمت گاز طبیعی و/یا قیمت برق روز - قبل اشاره دارد [۳۱].

$$y = \beta_1 x + \beta_2 \quad (25)$$

همچنین ضرایب  $\beta_1$  و  $\beta_2$  نشان دهنده بهترین خط مناسب به منظور وابستگی حامل ها هستند.

#### ۴-۴-۱- تابع هدف مرحله دوم

در این مرحله، متغیر مرحله اول میزان پیش خرید/فروش برق به عنوان یک پارامتر و ثابت در تابع هدف مرحله دوم قرار داده شده است (عبارت اول) و میزان کمبود/مازاد برق در بازار زمان - واقعی معامله می شود (عبارت دوم). در این مرحله، تمامی عدم قطعیت ها دیده شده است و همچنین امکان فروش برق مازاد پیش خرید شده در بازار زمان - واقعی برای بهره بردار ریز شبکه وجود دارد. تابع هدف مرحله دوم در (۲۶) نمایش داده شده است.

OF :

$$\sum_s \Omega_{t,s} \cdot \sum_t \left[ \begin{aligned} & \rho^{DA}(t,s) \cdot P_e^{DA}(t,s) + \\ & \rho_g^{RT}(t,s) P_g^{RT}(t,s) + \\ & \sum_t \rho_e^{RT}(t,s) P_e^{RT}(t,s) + \\ & C_{o\&m}^{RT}(t,s) \end{aligned} \right] \quad (26)$$

همچنین تمام قیود اشاره شده در بالا به جز قیود (۲۷-۲۸) - که تغییر یافته اند - برقرار است. پس در این مرحله میزان برق خریداری شده در (۲۷) تغییر یافته که در نتیجه آن بالانس بار الکتریکی مطابق معادله (۲۸) تغییر داده شده

تأمین شود. همچنین معادله (۱۷) نشان می دهد میزان بار حرارتی می تواند با مولد تولید همزمان، چیلر جذبی و سیستم گرمایشی تأمین شود.

$$\begin{aligned} Load_e(t,s) + P_i^{EHP}(t,s) &= P_e^{Net}(t,s) \alpha(t) \\ &+ P_e^{CHP}(t,s) + P^{WT}(t,s) \\ &+ P^{PV}(t,s) + M(t,s) \end{aligned} \quad (16)$$

$$Load_h(t,s) \leq P_h^{CHP}(t,s) + P_h^{AB} + P_h^{EHP} \quad (17)$$

حد بالا و پایین هر واحد نظیر ظرفیت ترانسفورماتور، مولد تولید همزمان، بویلر، سیستم گرمایشی، ظرفیت ذخیره ساز و میزان انرژی شارژ و دشارژ شده باطری به ترتیب زیرند:

$$P_{min}^{trans} < P_e^{trans}(t,s) < P_{max}^{trans} \quad (18)$$

$$P_{min}^{CHP} < P^{CHP}(t,s) < P_{max}^{CHP} \quad (19)$$

$$P_{min}^{AB} < P^{AB}(t,s) < P_{max}^{AB} \quad (20)$$

$$P_{min}^{EHP} < P^{EHP}(t,s) < P_{max}^{EHP} \quad (21)$$

$$E_{min} < E(t,s) < E_{max} \quad (22)$$

$$|M^{ES}(t,s)| < M^{ES} \quad (23)$$

همچنین ضریب میزان گاز ورودی به مولد تولید همزمان و بویلر به صورت رابطه (۲۴) مدل شده است.

$$0 \leq v(t,s) \leq 1 \quad (24)$$

#### ۴-۳- وابستگی قیمت برق به گاز

حساسیت بالای قیمت برق در زمان روز - قبل و واقعی به عرضه میزان گاز در زمستان سال ۲۰۱۴ نشان داده شد. اگرچه این قیمت برق به دنبال الگوی قیمت گاز طبیعی است، وابستگی نسبی آنها باید قدم اول برای ایجاد الگوهای مناسب وابستگی متقابل باشد [۳۱]؛ با این حال، قیمت برق بازار زمان - واقعی به بسیاری از عوامل دیگر بستگی دارد که تعداد کمی از آنها با استفاده از داده های در دسترس سنجش پذیرند؛ نظیر: قیمت گاز طبیعی در بازار لحظه ای، تأثیر ظرفیت خط لوله گاز، انحرافات الگوی بار و پاسخگویی بار، سطح نفوذپذیری منابع تجدیدپذیر، قیمت

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین های بادی بدون جعبه دنده

است. فتولتائیک و بادی، بویلر و مولد تولید همزمان، ترانسفورماتور و سیستم گرمایشی اند. مشخصات فنی تجهیزات به کاررفته در این ریزشبهه در جدول (۱) نشان داده شده است [۲۱].

جدول (۱): مشخصات فنی عناصر ریزشبهه

عناصر	ظرفیت (kW/kWh)	راندمان (%)		
		Σ	Th.	El.
ترانسفورماتور	۱۰۰۰	۹۲	-	۹۲
مولد همزمان برق و حرارت	۳۰۰	۸۰	۴۰	۴۰
بویلر	۶۰۰	۸۵	۸۵	-
خورشیدی	۵۰	۹۵	-	۹۵
بادی	۵۰	۹۰	-	۹۰
سیستم گرمایشی	۴۵۰	-	-	-
مبدل باطری	-۲۰/۲۰	-	-	-
ظرفیت باطری	۱۰۰	۹۵/۹۰	-	-

## ۶-۲- مطالعات موردی و نتایج

در شبیه سازی پیش رو تعداد ۵۰۰۰ سناریو با روش مونت کارلو برای شش پارامتر دارای عدم قطعیت نظیر (بار الکتریکی و حرارتی، قیمت روز - قبل، قیمت زمان - واقعی، تولید خورشیدی و نیروگاه بادی) و برای هر ساعت تولید شده است. همچنین به منظور کاهش زمان حل مسئله تعداد سناریوهای هر پارامتر به سه سناریو با روش کاهش سناریو (از روش کاهش عقبگرد براساس فاصله کانتروویچ) تقلیل یافته است. میزان احتمال هر سناریو برای هر پارامتر در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به جدول، تعداد کل سناریوها ۳<sup>۶</sup> حالت را ایجاد می کند. همچنین زمان حل مسئله برای تمام سناریوها زیر ۱۵ ثانیه است.

جدول (۲): میزان احتمال هر سناریو برای هر پارامتر

پارامترها	سناریو کاهش داده شده و احتمال آن		
	۱	۲	۳
بار الکتریکی	۰/۲۹	۰/۴۷۶	۰/۲۳۴
بار حرارتی	۰/۴۸۴	۰/۲۴	۰/۲۷۶
قیمت روز - قبل	۰/۴	۰/۳	۰/۳

$$P_e^{Net}(t,s) = P_e^{DA}(t,s) + P_e^{RT}(t,s) \quad (27)$$

$$Load_e(t,s) + P_i^{EHP}(t,s) = P_e^{Net}(t,s) + P_e^{CHP}(t,s) + P^{WT}(t,s) + P^{PV}(t,s) + M(t,s) \quad (28)$$

معادله (۲۷) نشان می دهد میزان کل برق خریداری شده از شبکه از جمع برق خریداری شده از بازار روز - قبل و بازار زمان - واقعی محاسبه شده است.

## ۵- روندنمای حل مسئله

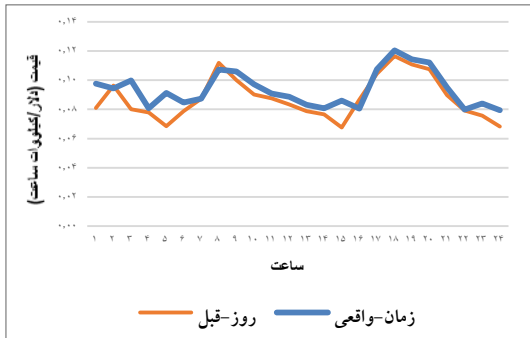
در این مقاله، برای حل مسئله، ابتدا سناریو در نرم افزار متلب برای هر کدام از پارامترهای غیرقطعی، تولید و سپس سناریوها با روش کانتروویچ به تعداد معینی کاهش داده شد. سپس این مقادیر به دست آمده با نرم افزار شبیه سازی گمز برای حل مسئله دو مرحله ای فراخوانی شد. در مرحله اول این شبیه سازی تنها عدم قطعیت قیمت برق بازار روز - قبل در نظر گرفته و از تابع هدف (۷) و قیود مربوطه (۸-۲۶) استفاده شد. بعد از محاسبه نتایج مرحله اول، متوسط میزان پیش خرید/فروش بهینه برای ریزشبهه که در مرحله اول محاسبه شده است، به عنوان پارامتر برای مرحله دوم در نظر گرفته شد و مجدداً در این مرحله، بهینه سازی برنامه ریزی زمان بندی تولید در زمان - واقعی با در نظر گرفتن تمام عدم قطعیت های موجود انجام شد.

## ۶-۱- شبیه سازی و بررسی نتایج

### ۶-۱- سیستم مورد مطالعه

ریزشبکه چندحاملی یک سیستم است که انعطاف پذیری انرژی را افزایش می دهد [۳۲]. برای پاسخگویی به انواع مختلف تقاضاها، ریزشبکه چندحاملی با مبدل های انرژی، ژنراتورها و سیستم های ذخیره سازی انرژی تجهیز شده است [۳۳]. شکل (۱) نمایش ساختار یک ریزشبکه چندحاملی را نشان می دهد. با توجه به شکل (۱) هر ریزشبکه چندحاملی شامل منابع انرژی مقیاس کوچک، تقاضاهای متعدد و باطری است. منابع انرژی مقیاس کوچک شامل نیروگاههای

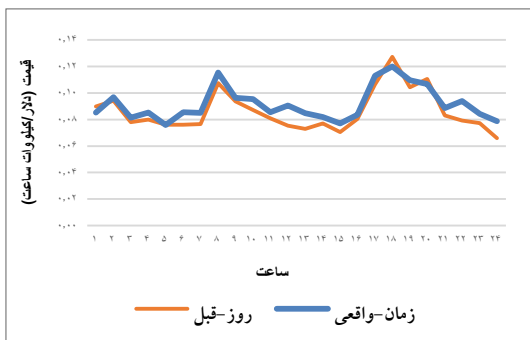




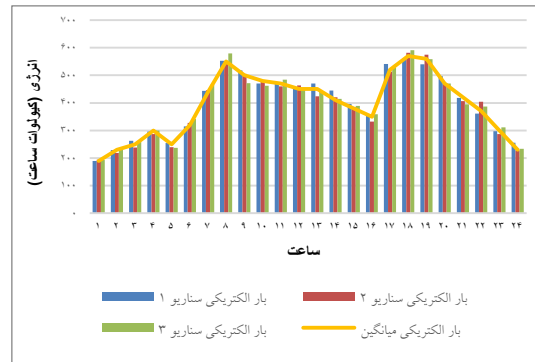
سناریو ۲

قیمت زمان - واقعی	۰/۳۱۲	۰/۱۸۴	۰/۵۰۴
تولید بادی	۰/۱۰۴	۰/۱۷۶	۰/۷۲
تولید خورشیدی	۰/۲۴۲	۰/۲۴۴	۰/۵۱۴

داده‌های بار الکتریکی و حرارتی، تولیدات بادی و خورشیدی، قیمت برق در بازار روز - قبل و در بازار زمان - واقعی در سه سناریو شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. قیمت برق و گاز طبیعی در شکل (۶) برای سه سناریو نشان داده شده است.



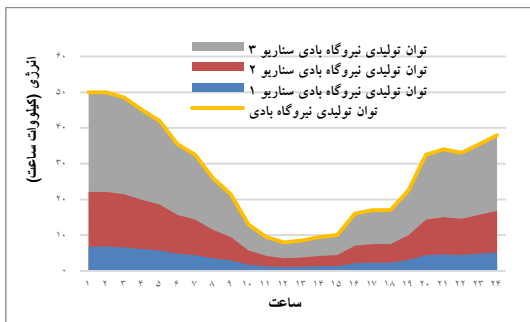
سناریو ۳



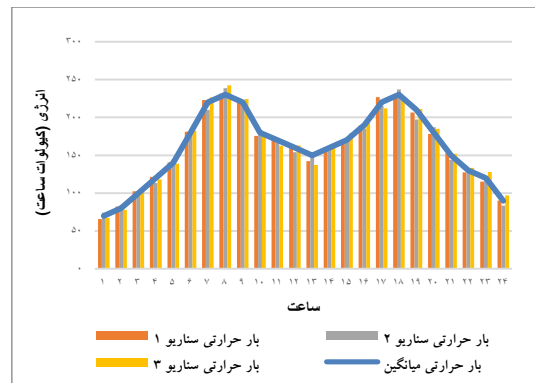
شکل (۴): منحنی بار الکتریکی

شکل (۶): قیمت برق در حالت‌های روز - قبل و لحظه‌ای برای سه سناریو

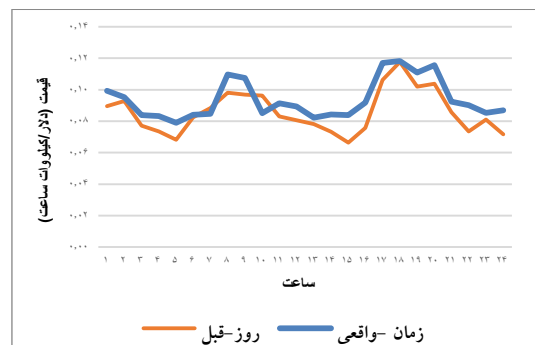
میزان تولید واحد خورشیدی و بادی برای هر سناریو در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل (۷): نمودار مقدار تولید نیروگاه بادی



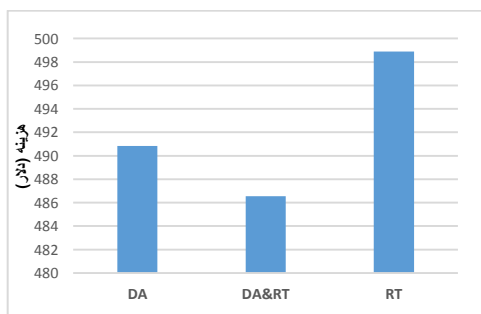
شکل (۵): منحنی بار حرارتی



سناریو ۱

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

به صورت توأم با عدم قطعیت قیمت برق در بازار روز - قبل و بازار زمان - واقعی مقایسه کرده است. با توجه به شکل (۹)، هزینه بهره‌برداری برای مدلی که ریزش‌بکه در هر دو بازار روز - قبل و زمان - واقعی به صورت توأم مشارکت می‌کند، نسبت به مدل مشارکت تنها در بازار روز - قبل یا بازار زمان - واقعی کاهش چشمگیری یافته است. همچنین هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه در صورت مشارکت در بازار زمان - واقعی به علت قیمت برق بالا افزایش شدیدی نسبت به مشارکت در بازار روز - قبل داشته است. مقایسه بهره‌برداری بهینه ریزش‌بکه با و بدون مشارکت در بازار روز - قبل نشان داده است که هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه حدود ۲,۵٪ با مشارکت توأم در بازار روز - قبل و زمان - واقعی نسبت به مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی کاهش یافته است.

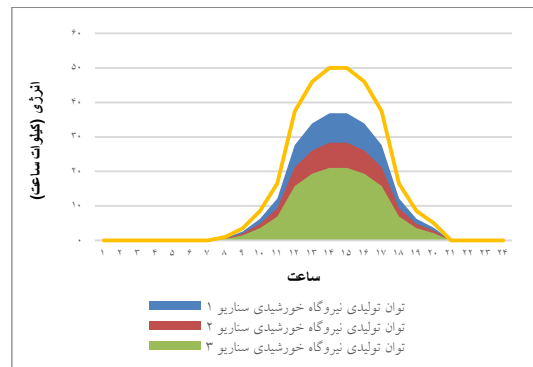


شکل (۹): هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه با عدم قطعیت روی قیمت برق روز - قبل و زمان - واقعی

## حالت ۲

برای نشان دادن اهمیت استراتژی پیشنهادی برای یک ریزش‌بکه چندحاملی و همچنین بهره‌وری از استراتژی پیشنهادی بهره‌برداری این شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت برق بازار روز - قبل و بازار زمان - واقعی بار الکتریکی و حرارتی و میزان تولیدات تجدیدپذیر نظیر خورشیدی و بادی روی حالت (۲) شبیه‌سازی شده است.

شکل (۱۰) هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه را در بازار روز - قبل، بازار زمان - واقعی و به صورت توأم با عدم قطعیت برای تمام پارامترهای موجود در بازار روز - قبل و زمان - واقعی مقایسه کرده است. با توجه به شکل (۱۰)، هزینه



شکل (۸): نمودار مقدار تولید نیروگاه خورشیدی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی، ارائه و بحث شده‌اند. مسئله استراتژی قیمت‌دهی در ریزش‌بکه چندحاملی روی شبکه پیشنهاد داده شده اجرا شده است. مسئله بعنوان یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته، مدل و روی نرم‌افزار GAMS کدنویسی شده است. به منظور ارزیابی مدل پیشنهاد هفت حالت در نظر گرفته شده است.

حالت ۱- استراتژی خرید و فروش با عدم قطعیت روی قیمت برق روز - قبل و زمان - واقعی.  
حالت ۲- استراتژی خرید و فروش با تمامی عدم قطعیت‌ها در قیمت برق روز - قبل و زمان - واقعی، بارهای الکتریکی و حرارتی، تولیدات تجدیدپذیر.

حالت ۳- تأثیر تغییر قیمت برق روز - قبل روی استراتژی خرید و فروش با تمامی عدم قطعیت‌های دیده‌شده در مقاله.  
حالت ۴- تأثیر ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر(بادی و خورشیدی) روی استراتژی خرید و فروش با تمامی عدم قطعیت‌های دیده‌شده در مقاله.

حالت ۵- تأثیر ظرفیت باطری روی استراتژی خرید و فروش با تمامی عدم قطعیت‌های دیده‌شده در مقاله.

حالت ۶- تأثیر قیمت گاز روی استراتژی خرید و فروش با تمامی عدم قطعیت‌های دیده‌شده در مقاله.

حالت ۷- اثر عدم قطعیت‌ها روی هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه.

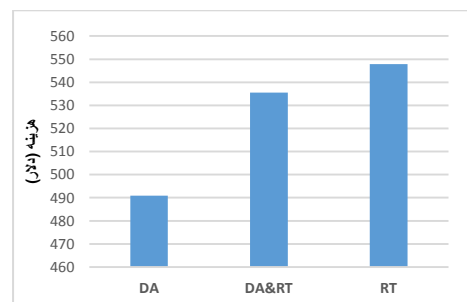
## حالت ۱

در نخستین حالت، استراتژی پیشنهادی در یک ریزش‌بکه چندحاملی انجام شده است. شکل (۹) هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه را در بازار روز - قبل، بازار زمان - واقعی و

است. با توجه به دو شکل زیر، در مرحله اول، ریزشبهکه در ساعات ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۲۳-۲۴ به دلیل مصرف کم و تولید زیاد تمایل به فروش انرژی داشته است؛ در صورتی که امکان تولید یا صرفه اقتصادی فروش در زمان - واقعی برای ریزشبهکه میسر نبوده است. یکی از دلایل این امر در نظر گرفتن حداکثر تولید برای واحدهای تجدیدپذیر در زمان روز - قبل بوده که در بازار زمان - واقعی به علت عدم قطعیت میزان کمتر انرژی را تولید کرده است. پس از تحلیل مرحله دوم و بررسی متغیر باینری تعریف شده (تأیید خرید یا فروش در بازار روز - قبل) این نتیجه حاصل می شود که ریزشبهکه بهتر است برق مازاد را در بازار زمان - واقعی به علت قیمت بالا به فروش برساند. همان طور که مشخص است بهره بردار ریزشبهکه در برنامه ریزی استراتژی پیش خرید و فروش در ساعت ۴ تصمیم به فروش انرژی گرفته بود؛ در صورتی که در زمان - واقعی حتی در آن ساعت به خرید مقدار کمی برق از شبکه بالادست نیاز بوده است. همچنین در ساعات ۷-۹ و ۱۱-۱۵ و ۱۷، ۱۹ و ۲۰-۲۲ بهره بردار ریزشبهکه تصمیم گرفته بود برق را از شبکه بالادست پیش خرید کند که در بیشتر ساعات پذیرفتنی بوده است و حتی در بازار زمان - واقعی میزان کمی برق را برای تأمین بار مازاد از شبکه خریداری کند. نکته تأمل برانگیز، تأیید نشدن پیش خرید برق در ساعات ۱۰ و ۱۸ است که بهره بردار در مرحله زمان - واقعی پی برده است کاهش قیمت برق در بازار زمان - واقعی اتفاق افتاده و برایش مقرون به صرفه بوده است که در بازار زمان - واقعی کل خرید برق را انجام دهد.

در نهایت این نتیجه حاصل می شود که بهره بردار ریزشبهکه بهتر است به دلیل عدم قطعیت های موجود، برق مورد نیاز را در ساعات پرباری پیش خرید کند؛ ولی به هیچ عنوان هیچ برقی را پیش فروش نکند و برق مازاد را در بازار زمان - واقعی به فروش برساند. همچنین پیش خرید برق مازاد برای فائق شدن بر عدم قطعیت های موجود مطلوب تر از پیش خرید کم است؛ زیرا امکان فروش برق مازاد پیش خریداری شده در بازار زمان - واقعی میسر است.

بهره برداری برای مدلی که ریزشبهکه در هر دو بازار روز - قبل و زمان - واقعی به صورت توأم مشارکت می کند، نسبت به مدل مشارکت تنها در بازار روز - قبل به علت افزایش بار الکتریکی و حرارتی و کاهش پیش بینی تولیدات پراکنده افزایش یافته و نسبت به مدل مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی به دلیل قیمت برق گران در بازار زمان - واقعی کاهش یافته است. این حالت نشان می دهد هزینه بهره برداری در صورت مشارکت توأم نسبت به حالت (۱) به دلیل وجود یک مدل واقعی تر با عدم قطعیت های گوناگون افزایش داشته است. این اختلاف هزینه ممکن است در نگاه اول غیر منطقی به نظر برسد؛ ولی به علت وجود عدم قطعیت در تولیدات پراکنده و قیمت انرژی، ریزشبهکه تمایل بیشتر به خرید انرژی را در بازار روز - قبل به علت ارزانی برق دارد؛ در صورتی که در بازار زمان - واقعی تمایل به فروش انرژی را با قیمت بالاتر دارد.



شکل (۱۰): هزینه بهره برداری ریزشبهکه در بازار روز - قبل، بازار زمان - واقعی با عدم قطعیت برای تمام پارامترهای موجود

شکل های (۱۱) و (۱۲) متوسط انرژی خریداری/فروخته شده در بازار روز - قبل و مبادلات انرژی در بازار زمان - واقعی را برای جبران نامتعادلی نشان می دهند. در شکل (۱۲) از شکل ساعت برای نشان دادن میزان پیش خرید/فروش در بازار روز - قبل و همچنین خرید و فروش انرژی در بازار زمان - واقعی برای جبران نامتعادلی بار استفاده شده است. به صورتی که از یک متغیر باینری برای بررسی آیا پیش خرید یا پیش فروش انرژی که در مرحله اول انجام شده مقرون به صرفه بوده است یا خیر و با مقدار صفر (عدم تأیید) و یک (تأیید) نشان داده شده

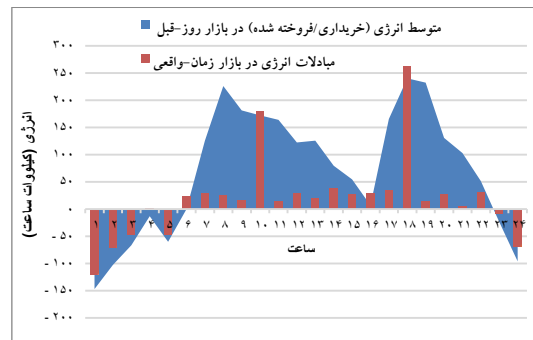
طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

مشارکت توأم مقدار کمی افزایش می‌یابد؛ اما چنانچه قیمت برق به تدریج از ۲۰ درصد به بالا افزایش یابد، هزینه بهره‌برداری در مدل مشارکت در روز - قبل در حال افزایش است؛ ولی در مدل مشارکت توأم هزینه بهره‌برداری رو به کاهش است. همچنین با افزایش قیمت برق در بازار روز - قبل تا ۳۰ درصد، هزینه بهره‌برداری تنها در بازار روز - قبل افزایش یافته است؛ ولی در مدل مشارکت توأم تغییرات محسوس نبوده است؛ ولی همچنان هزینه مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی همچنان بیشتر است. نکته تأمل برانگیز در اینجا روند کاهشی هزینه بهره‌برداری با افزایش بالای ۳۰ درصدی قیمت برق روز - قبل در مدل مشارکت توأم است که دلیل آن فروش برق در بازار روز - قبل و خرید آن در بازار زمان - واقعی است. همچنین شکل (۱۳) نشان می‌دهد حداقل افزایش ۵۰ درصدی قیمت برق در بازار روز - قبل موجب افزایش تصاعدی هزینه بهره‌برداری در بازار روز - قبل شده است؛ درحالی‌که موجب کاهش هزینه در مشارکت توأم شده است. همچنین در این مدل هزینه بهره‌برداری مشارکت توأم نسبت به مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی کمتر است. در ادامه نشان داده می‌شود وقتی قیمت برق در بازار روز - قبل ۱۰۰ درصد افزایش یابد، بهتر است برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبه‌میزان خیلی کمی از انرژی در روز - قبل و بیشترین مقدار انرژی در زمان - واقعی خریداری شود.

جدول (۳): سناریو درصد تغییرات قیمت برق نسبت به حالت

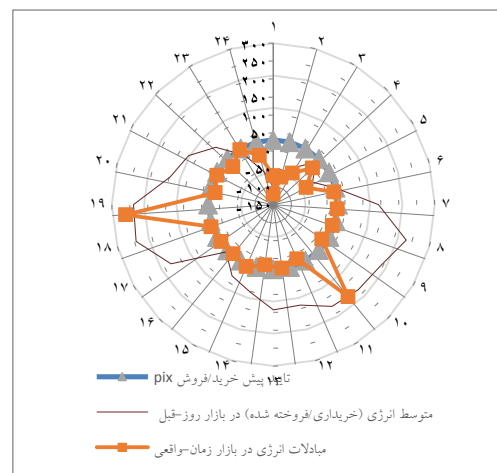
دوم در بازار روز - قبل

سناریو	تغییرات قیمت برق	هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)		
		RT	DA&RT	DA
۱	۵۰٪-	۵۴۷/۸۷۴۲	۴۳۱/۳۸۰۹	۴۰۶/۶۶۰۵
۲	۳۰٪-	۵۴۷/۸۷۴۲	۴۷۳/۲۸۳۱	۴۴۰/۷۳۵۳
۳	۲۰٪-	۵۴۷/۸۷۴۲	۴۹۴/۱۷۸۷	۴۵۷/۴۶۴۷
۴	۱۰٪-	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۱۵/۱۹۶۹	۴۷۴/۱۶۷۵
۵	۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۳۵/۵۳۳۲	۴۹۰/۸۴۱۹
۶	۱۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۴۶/۱۹۵۴	۵۰۷/۵۰۳۲
۷	۲۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۴۵/۰۱۷۷	۵۲۴/۱۵۶
۸	۳۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۴۱/۵۶۰۷	۵۴۰/۸۰۴۹
۹	۵۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۳۳/۳۱۱۹	۵۷۴/۱۰۲۵
۱۰	۱۰۰٪	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۱۲/۳۱۶۴	۶۵۷/۳۰۶۶



شکل (۱۱): متوسط انرژی (خریداری/فروخته‌شده) در بازار

روز - قبل و مبادلات انرژی در بازار زمان - واقعی



شکل (۱۲): متوسط انرژی (خریداری/فروخته‌شده) در بازار

روز - قبل و مبادلات انرژی در بازار زمان - واقعی

### حالت ۳

اثر تغییرات (افزایش/کاهش) قیمت برق روز - قبل روی هزینه بهره‌برداری ریزشبه‌میزان در شکل (۱۳) و جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است چنانچه قیمت برق در بازار روز - قبل روند کاهشی داشته باشد، هزینه بهره‌برداری ریزشبه‌میزان در حالت فقط مشارکت در بازار روز - قبل یا به‌صورت توأم کاهش می‌یابد که در این حالت مقرون‌به‌صرفه است بهره‌بردار ریزشبه‌میزان در بازار روز - قبل پیش‌خرید لازم را انجام دهد. نکته جالب در اینجا این است که در این حالت هزینه تمام‌شده مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی بیشتر از دو حالت دیگر است. در کل اگر قیمت برق هیچ تغییری نکند، هزینه‌های بهره‌برداری در زمان‌های روز - قبل و زمان - واقعی هم ثابت هست. نیز اگر قیمت برق ۱۰ درصد افزایش پیدا کند، هزینه بهره‌برداری فقط در مدل مشارکت در روز - قبل یا



شکل (۱۴): نمودار تأثیرات ظرفیت نیروگاه تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) در زمان روز - قبل، زمان - واقعی و زمان مشارکت توأم روی هزینه‌های بهره‌برداری

### حالت ۵

در شکل (۱۴) و جدول (۵) تأثیر ظرفیت باطری روی هزینه بهره‌برداری نشان داده شده است. این سناریو نشان می‌دهد با افزایش ظرفیت باطری انعطاف‌پذیری بیشتری برای خرید/فروش انرژی به بهره‌بردار سیستم در هر سه حالت مشارکت در بازار روز - قبل، روز بعد و توأم داده شده است که در نهایت، موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشکبه شده است.

همچنین برای نمونه، عملکرد ذخیره‌ساز در مدل اصلی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. عملکرد باطری نشان می‌دهد ریزشکبه در ساعات کم باری تمایل به شارژ داشته و در ساعات پیک که قیمت برق زیاد است، عمل دشارژ انرژی را برای تأمین بار انجام داده است.

جدول (۵): تأثیر افزایش ظرفیت باطری بر هزینه‌های

#### بهره‌برداری ریزشکبه

هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)			انرژی باطری (کیلووات ساعت)	توان مبدل (کیلووات)	سناریو
RT	DA&RT	DA			
۵۴۹/۹۴۳۷	۵۳۷/۶۰۹۶	۴۹۳/۴۳۶۷	۰	۰	۱
۵۴۸/۹۳۸۷	۵۳۶/۵۸۵۱	۴۹۲/۱۷۱۶	۱۰	۵۰	۲
۵۴۷/۸۷۴۲	۵۳۵/۵۳۳۲	۴۹۰/۸۴۱۹	۲۰	۱۰۰	۳
۵۴۶/۸۲۷۱	۵۳۴/۵۲۱۳	۴۸۹/۵۱۲۳	۳۰	۱۵۰	۴
۵۴۵/۸۱۱۶	۵۳۳/۵۱۶۹	۴۸۸/۲۸۳۲	۴۰	۲۰۰	۵
۵۴۴/۸۴۷۵	۵۳۲/۵۰۹۶	۴۸۷/۰۹۸۴	۵۰	۲۵۰	۶
۵۴۳/۹۴۷۶	۵۳۱/۵۰۶۴	۴۸۵/۹۱۳۶	۶۰	۳۰۰	۷
۵۴۰/۸۱۴۷	۵۲۸/۰۴۸۴	۴۸۱/۶۸۴۲	۱۰۰	۵۰۰	۸
۵۳۱/۷۴۲۷	۵۱۵/۷۶۰۸	۴۷۰/۷۷۷۱	۲۵۰	۱۰۰۰	۹



شکل (۱۳): نمودار اثر تغییرات (افزایش/کاهش) قیمت برق در زمان روز - قبل، زمان - واقعی و مشارکت توأم روی هزینه بهره‌برداری ریزشکبه

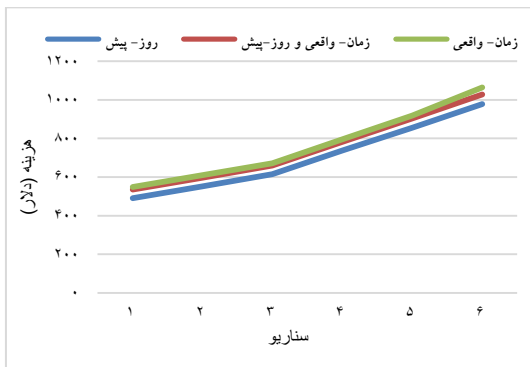
### حالت ۴

شکل (۱۴) تأثیرات ظرفیت نیروگاه تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) را روی هزینه‌های بهره‌برداری نشان می‌دهد؛ به طوری که هرچه قدر ظرفیت نیروگاههای تجدیدپذیر بیشتر شوند، هزینه‌های بهره‌برداری کاهش پیدا می‌کند. نکته درخور توجه در این سناریو این است که با افزایش ۱۰ برابری ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر هزینه بهره‌برداری ریزشکبه به شدت کاهش پیدا کرده است. همچنین از جدول (۴) می‌توان دریافت با این میزان احداث نیروگاه تجدیدپذیر نیازی به مشارکت در بازار روز - قبل نیست و مشترک می‌تواند تمام برق مورد نیاز خود را در بازار زمان - واقعی خرید/فروش کند.

جدول (۴): تأثیر ظرفیت نیروگاههای تجدیدپذیر

سناریو	ظرفیت نیروگاه تجدیدپذیر	هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)			ضریب تغییر
		RT	DA&RT	DA	
۱	۰	۵۹۳/۹۴۲	۵۷۷/۰۷۹۱	۵۷۲/۹۰۷	۰
۲	۰/۵	۵۷۰/۸۵۲	۵۵۶/۱۳۱۳	۵۳۱/۶۶۸	۰/۵
۳	۱	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۳۵/۵۳۳۲	۴۹۰/۸۴۱۹	۱
۴	۲	۵۰۲/۲۳۹۶	۴۹۴/۳۱۲۷	۴۱۰/۶۹۸۱	۲
۵	۳	۴۵۷/۱۶۴۴	۴۵۲/۰۷۴۹	۳۳۲/۷۵۴۵	۳
۶	۴	۴۱۲/۸۸۹۲	۴۰۹/۶۰۳۱	۲۵۶/۵۴۵۵	۴
۷	۵	۳۶۹/۴۴۷۶	۳۶۷/۰۸۳۶	۱۸۲/۹۰۵۶	۵
۸	۱۰	۱۶۰/۱۲۷۹	۱۶۰/۱۲۸۶	-۱۷۶/۸۴۲	۱۰

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

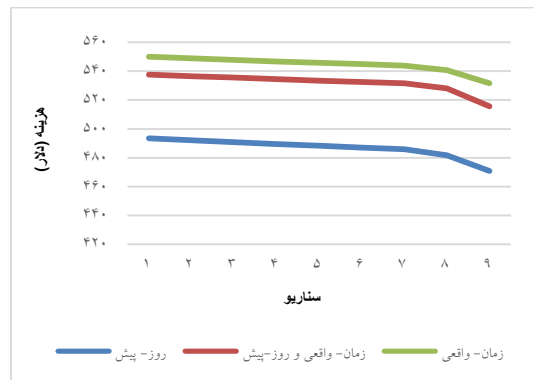


شکل (۱۶): قیمت برق به قیمت گاز در زمان روز - قبل و زمان - واقعی و مشارکت توأم

### حالت ۷

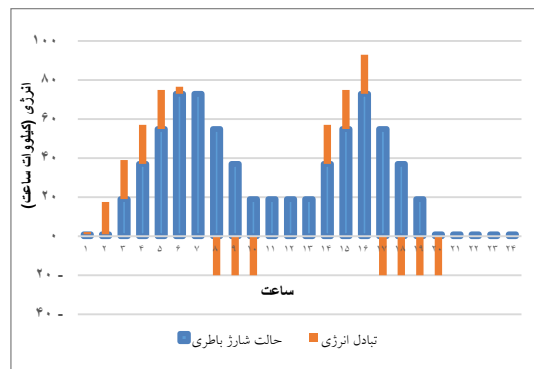
در این مدل اثر وجود عدم قطعیت روی هزینه ریزش‌بکه در مدل مشارکت توأم با توجه به جدول (۷) مطالعه شده است. همچنان که مشاهده می‌شود نبود عدم قطعیت در میزان تولید تجدیدپذیرها باعث کاهش هزینه‌ها به صورت غیرواقعی شده است.

در سناریو اول اهمیت عدم قطعیت روی تجدیدپذیرها و باتری روی هزینه بهره‌برداری از ریزش‌بکه از همه حالات بیشتر است، به طوری که اگر دیده نشود، هزینه واقعی شبکه به صورت غیرواقعی خیلی کم دیده می‌شود که دلیل این امر فرض تولید حداکثر نیروگاههای تجدیدپذیر است. پس در نظر گرفتن عدم قطعیت روی تجدیدپذیرها حتی با ظرفیت کم در بهره‌برداری ریزش‌بکه امری اجتناب ناپذیر است؛ اما در مدلی که عدم قطعیت بار دیده نشده، هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به سناریو اول افزایش چشمگیری یافته است که یک دلیل این امر، در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید نیروگاههای تجدیدپذیر است. همچنین در سناریو سوم نشان داده شده که اثر در نظر نگرفتن عدم قطعیت روی قیمت، موجب افزایش هزینه بهره‌برداری نسبت به سناریو دو شده است. مقایسه سناریو دو و سه نشان می‌دهد دلیل این امر اهمیت بیشتر در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار و تا حد کمی در نظر نگرفتن عدم قطعیت در قیمت است که موجب افزایش بیشتر هزینه‌ها در شبکه موجود شده است. همچنین در سناریو چهارم، عدم قطعیت تمام موارد دیده شده که نسبت به سناریو سوم تا حد خیلی کمی هزینه بهره‌برداری را کاهش داده است. نتیجه مهم در اینجا این



شکل (۱۴): نمودار تأثیرات ظرفیت باتری در زمان روز - قبل، زمان - واقعی و زمان مشارکت توأم روی هزینه‌های

### بهره‌برداری



شکل (۱۵): عملکرد ذخیره‌ساز در مدل اصلی

### حالت ۶

در جدول (۶) و شکل (۱۶) مشخص است قیمت برق به قیمت گاز در زمان روز - قبل و واقعی وابسته است؛ به صورتی که با افزایش قیمت گاز، قیمت برق نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه، هزینه بهره‌برداری کل ریزش‌بکه افزایش یافته است.

جدول (۶): تأثیر افزایش قیمت گاز طبیعی بر هزینه‌های بهره‌برداری

سناریو	تغییرات قیمت برق	هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)		
		RT	DA&RT	DA
۱	۱	۵۴۷/۸۷۴۲	۵۳۵/۵۳۳۲	۴۹۰/۸۴۱۹
۲	۲	۶۰۹/۷۹۳۵	۵۹۷/۴۵۲۶	۵۵۲/۷۶۱۳
۳	۳	۶۷۱/۷۱۲۹	۶۵۹/۳۷۱۹	۶۱۴/۶۸۰۶
۴	۵	۷۹۵/۵۵۱۶	۷۸۳/۲۱۰۶	۷۳۸/۱۲۴۴
۵	۷	۹۱۸/۲۶۷۵	۹۰۲/۹۹۴۱	۸۵۶/۱۸۳۲
۶	۱۰	۱۰۶۴/۵۳۹	۱۰۲۸/۴۹۴	۹۷۸/۵۹۲۸

با در نظر گرفتن قيود و اطلاعات پیش‌بینی شده بهینه می‌کند. در این مدل شش پارامتر دارای عدم قطعیت‌های گوناگون نظیر قیمت برق در بازار روز - قبل و زمان - واقعی، تولیدات بادی و خورشیدی و میزان بارهای الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت در این مقاله به بررسی یک مدل دو مرحله‌ای مشارکت توأم در بازار روز - قبل و زمان - واقعی برای تأمین بار الکتریکی و حرارتی و مقابله با عدم قطعیت‌های موجود به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبهک پرده‌اشته شده است. این مسئله به صورت یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته با نرم‌افزار GAMS و روش کاهش سناریو کانترویچ حل شده است. در این مقاله از یک ریزشبهک چندحاملی برای اثبات اثرگذاری روش پیشنهادی استفاده شده است که در آن از یک رابط به نام سیستم‌هاب انرژی برای اتصال باس‌های مختلف به نقاط محلی در نظر گرفته شده است که در نهایت کار بهره‌برداری این ریزشبهک را تسهیل می‌کند. نتایج مدل پیشنهادی، اثرگذاری مشارکت توأم در بازار روز - قبل و زمان - واقعی ریزشبهک چندحاملی و مزایای آن را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهند بهره‌برداری ریزشبهک حدود ۲,۵٪ با مشارکت توأم در بازار روز - قبل و زمان - واقعی نسبت به مشارکت تنها در بازار زمان - واقعی کاهش یافته است. همچنین نشان داده شد در حالتی که تمام عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده باشند، ریزشبهک تمایل بیشتر به خرید انرژی در بازار روز - قبل به علت ارزانی برق و فروش انرژی در بازار زمان - واقعی قیمت بالاتر دارد. افزایش توان و ظرفیت باطری در ریزشبهک تأثیر بسزایی در کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبهک در زمان - واقعی شده است. با بررسی نتایج می‌توان درک کرد با افزایش قیمت برق در بازار زمان - واقعی هزینه بهره‌برداری ریزشبهک به دلیل فروش انرژی، تقلیل چشم‌گیری یافته است. همچنین نشان داده شد بهره‌برداری هم‌زمان چندین حامل انرژی نظیر برق و گاز به شدت از اثر عدم قطعیت‌های موجود روی هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبهک کاسته است. علاوه بر آن، استفاده از روش احتمالاتی موجب شده است نتایج با در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت بسیار قابل اعتمادتر باشند.

است که بهره‌برداری هم‌زمان چندین حامل انرژی نظیر برق و گاز به شدت از اثر تغییرات قیمت برق روی هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبهک کاسته و در واقع اثرات عدم قطعیت قیمت برق، چه در بازار روز - قبل یا زمان - واقعی کم‌رنگ شده است.

جدول (۷): اثر عدم قطعیت‌ها روی هزینه بهره‌برداری ریزشبهک

سناریوها	سناریوها			
	۴	۳	۲	۱
عدم قطعیت روی بارها	✓	✓		✓
تجدیدپذیرها	✓	✓	✓	
قیمت انرژی	✓		✓	✓
هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)	۵۳۵/۵۳	۵۳۵/۷۰	۵۲۹/۵۸	۴۹۳/۰۵

در هیچ‌کدام از مقالات چاپ‌شده در [۱۷-۱۴] تمام عدم قطعیت‌های موجود بررسی هم‌زمان نشده است. همچنین این مقالات فقط به بهره‌برداری ریزشبهک‌ها و حل مدل تنها در بازار زمان - واقعی پرداخته‌اند و تأثیر میزان پیشنهاد خرید و فروش انرژی را در بازار روز - قبل برای کاهش هزینه‌ها در بازار زمان - واقعی بررسی نکرده‌اند.

## ۷- نتیجه‌گیری

در یک محیط با منابع مختلف، تولیدات پراکنده، تقاضا و قیمت انرژی در بازار برق، قطعی نیست. پس در چنین شرایطی، محاسبات قطعی خرید و فروش انرژی یک ریزشبهک چندحاملی با شبکه بالادست با در نظر گرفتن عدم قطعیت گوناگون نیاز به یک مدل استراتژی بهره‌برداری در بازار روز - قبل و زمان - واقعی ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین، در این مقاله، بهینه‌سازی توزیع اقتصادی انرژی هم‌زمان حامل‌ها برای سیستم‌های الکتریکی و هیدرولیکی در یک محیط با عدم قطعیت در بازار روز - قبل و زمان - واقعی در یک ریزشبهک چندحاملی صورت پذیرفته است. در این مدل، سیستم مدیریت انرژی ریزشبهک چندحاملی، پیشنهاد میزان خرید/فروش انرژی را به بهره‌بردار سیستم توزیع به منظور مشارکت در بازار روز - قبل ارائه می‌دهد. مسئله بهره‌برداری هزینه‌های ریزشبهک را

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

در مطالعات بعدی می‌توان در زمینه بررسی استراتژی خرید	$v$	ضریب توزیع گاز
و فروش انرژی بین چندریزشبکه و شبکه بالادست در بازار	$\Omega$	احتمال
روز - قبل و زمان - واقعی در محیط بازارهای انرژی	بالانویس	
مختلف تحقیق کرد. همچنین انواع برنامه‌های پاسخگویی بار	$pv$	فتوولتائیک
و اثر هر کدام از برنامه‌ها روی کاهش تراکم خطوط بین این	$wt$	توربین بادی
ریزشبکه‌ها درخور بررسی است.	$Ru$	واحدهای تجدیدپذیر
	$chp$	مولد تولید همزمان
	$EHP$	پمپ حرارتی الکتریکی
	$AB$	بویلر
	$ES$	ذخیره‌ساز انرژی
	$Net$	شبکه
	$char$	مبدل تبدیل توان ذخیره‌ساز در حال شارژ
	$dischar$	مبدل تبدیل توان ذخیره‌ساز در حال دشارژ
	$trans$	ترانسفورماتور
	پایین‌نویس	
	$e$	برق
	$g$	گاز طبیعی
	$h$	حرارت
	$tot$	کل
	$p$	حامل ورودی
	$l$	حامل خروجی
	$\ell$	نوع حامل
	$0$	مقدار اولیه
	$stb$	تلفات انرژی ذخیره‌ساز
	$O \& M$	بهره‌برداری و نگهداری
	$r$	توان نامی
	$ci$	سرعت حداقل
	$co$	سرعت حداکثر
	$ce$	نقطه تابش خاص
	$STAD$	شرایط استاندارد
	اختصارات	
	$RT$	زمان - واقعی
	$DA$	روز - قبل
	$OF$	هزینه‌های بهره‌برداری
	$SOC$	وضعیت شارژ باطری
	$ME$	مبدل باطری
	$C$	قیمت
	$Po$	تولید انرژی
	$P$	انرژی دریافت شده
	$T$	انرژی انتقال داده شده
	$E$	انرژی ذخیره‌ساز
	$I$	متغیر باینری و ضیعت ذخیره‌ساز
	$L$	بار غیرپاسخگو
	$M$	انرژی شارژ و دشارژ شده ذخیره‌ساز
	$t$	ساعت
	$RP$	تولیدات پراکنده
	$P_r$	توان نامی
	$R$	تابش خورشید
	$v$	سرعت باد
	$\alpha, \beta$	پارامترهای انتخاب و بیال
	$\varphi, \zeta$	پارامترهای انتخاب بتا
	$\eta$	راندمان واحدها
	$K$	ضریب هزینه نگهداری
	$S$	ضریب کوپلاژ ذخیره‌ساز
	$\sigma$	انحراف استاندارد
	$\mu$	مقدار میانگین
	$m$	شماره ریزشبکه
	$s$	سناریو
	$P_{ix}$	تأیید پیش خرید/فروش {۰ عدم تأیید و ۱ تأیید}
	علائم یونانی	
	$P$	قیمت خرید انرژی



- Optimal energy management in domestic Microgrids considering optimal distributed energy resources bidding strategy based on game theory method”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 6, No3, pp. 69–86, 2016.
- [13] Narges Parhizi , Mousa Marzband , Seyyed Maziar Mirhosseini Moghaddam , Fatemeh Azarinajadian , and Behnam Mohammadi-Ivatloo, “Optimal energy management system implementation in power networks with multiple Microgrids by using multi-period imperialist competition” , *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 5, No1, pp.49-66, 2015.
- [14] I. G. Moghaddam, M. Saniei and E. Mashhour, “A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building,” *Energy*, Vol. 94, pp. 157–170, 2016.
- [15] M. Nazari-Heris, S. Abapour and B. Mohammadi-Ivatloo, “Optimal economic dispatch of FC- CHP based heat and power micro-grids,” *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 114, pp. 756-769, 2017.
- [16] M. H. Shams, M. Shahabi, M. Kia, A. Heidari, M. Lotfi, M. Shafie-khah and P.S. João Catalão, “Optimal operation of electrical and thermal resources in microgrids with energy hubs considering uncertainties,” *Energy*, Vol. 187, 2019.
- [17] M. H. Shams, M. Shahabi and M.E. Khodayar, “Stochastic day-ahead scheduling of multiple energy Carrier microgrids with demand response,” *Energy*, Vol. 155, pp. 326-338, 2018.
- [18] M. H. Shams, M. Shahabi, M. E. Khodayar, “Stochastic day-ahead scheduling of multiple energy Carrier microgrids with demand response,” *Energy*, Vol. 155, pp. 326-338, 2018.
- [19] N. Nikmehr, S. N. Ravadanegh, “Solving probabilistic load flow in smart distribution grids using heuristic methods,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 7(4), 2015.
- [20] K. C. Sharma, R. Bhakar, and H. P. Tiwari, “Influence of price uncertainty modeling accuracy on bidding strategy of a multi-unit GenCo in electricity markets,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.*, Vol. 38, No. 2, pp. 191–203, 2014.
- [21] V. Amir, S. Jadid and M. Ehsan “Probabilistic Optimal Power Dispatch in Multi-Carrier Networked Microgrids under Uncertainties,” *Energies*, Vol. 10, pp. 1770, November 2017.
- [22] S. K. Aggarwal, L. M. Saini, A. Kumar, “Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation,” *Int. J.*
- مراجع
- [1] S. Chowdhury, P. Crossley “Microgrids and active distribution networks,” *Inst. Eng. Technol.* 2009.
- [2] V. Davatgaran, M. Saniei, S. S. Mortazavi, " Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market," *Energy*, Vol. 148, pp. 482-493, 2018.
- [3] R. Aboli, M. Ramezani, H. Falaghi, "Joint optimization of day-ahead and uncertain near real-time operation of microgrids," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 107, pp. 34–46, 2019.
- [4] G. Liu, Y. Xu and K. Tomsovic, "Bidding Strategy for Microgrid in Day-Ahead Market Based on Hybrid Stochastic/Robust Optimization," in *IEEE Tran. Smart Grid*, Vol. 7, No. 1, pp. 227-237, Jan. 2016.
- [5] CERTS Microgrid Concept. [Online]. Available: <http://certs.lbl.gov/certs-der-micro.html>, 2003.
- [6] T. Zhao, X. Pan, S. Yao, C. Ju and L. Li, "Strategic Bidding of Hybrid AC/DC Microgrid Embedded Energy Hubs: A Two-stage Chance Constrained Stochastic Programming Approach," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018.
- [7] S. Beer et al., “An economic analysis of used electric vehicle batteries integrated into commercial building microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 517–525, Mar. 2012.
- [8] R. Aboli, M. Ramezani, H. Falaghi, “Joint optimization of day-ahead and uncertain near real-time operation of microgrids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 107, pp. 34-46, May. 2019.
- [9] A. R. Majzoobi, A. Khodaei, "Application of microgrids in providing ancillary services to the utility grid," *Energy*, Vol. 123, pp. 555-563, March 2017.
- [10] V. S. Tabar, M. A. Jirdehi, R. Hemmati “Energy management in microgrid based on the multi objective stochastic programming incorporating portable renewable energy resource as demand response option,” *Energy*, Vol. 118, pp. 827–839, 2017.
- [11] J. Soares, M. A. F. Ghazvini, N. Borges and Z. Vale, “A stochastic model for energy resources management considering demand response in smart grids,” *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 599–610, 2017.
- [12] Masoumeh Javadi, Mousa Marzban, and Seyyed Maziar Mirhosseini Moghaddam.”

energy storage systems," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.

- Electr. Power Energy Syst., Vol. 31, pp.13–22, 2009.
- [23] G. Kumbaroglu, R. Madlener, "Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings," *Energy Build.*, Vol. 49, pp. 327–334, 2012.
- [24] K. Sharma, R. Bhakar, H. P. Tiwari, "Influence of price uncertainty modeling accuracy on bidding strategy of a multi-unit GenCo in electricity markets," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.*, Vol. 38, pp. 191–203, 2014.
- [25] S. N. Ravadanegh, T. Farhudi, N. Nikmehr, M. R. J. Oskuee, "Statistical analysis on results of optimal power sharing between linked microgrids," *Int. J. Ambient Energy*, Vol. 38, pp. 710-718, 2016.
- [26] I. Prodan, E. Zio, "A model predictive control framework for reliable microgrid energy management," *Int. J. Electr. Power and Energy Syst.*, Vol. 61, pp. 399–409, 2014.
- [27] N. Nikmehr, S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm," *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 9, pp. 982–990, 2015.
- [28] S. Bahramirad, W. Reder, A. Khodaei, "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, pp. 2056–2062, 2012.
- [29] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami, A.M. Ranjbar, "Integrated demand side management game in smart energy hubs," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, pp. 675–683, 2015.
- [30] Eslami, R., Eyvazi, B., Soveyzi, M.H., Hosseini, S.A. and Aghaei, S.T., "A Multi-Objective Approach for Improving Technical Factors of Distribution Networks Considering Uncertainties in Loads and Wind Turbines," *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9, p.43, 2016.
- [31] C. Adcock, M. Cvetkovic, A. Annaswamy, "Influence of Natural Gas Price and Other Factors on ISO-NE Electricity Price," *Massachusetts Institute of Technology*, February 2015.
- [32] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson and K. Frohlich, "Energy hubs for the future," *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, No. 1, pp. 24-30, Jan.-Feb. 2007.
- [33] M. S. Javadi, A. Anvari-Moghaddam and J. M. Guerrero, "Optimal scheduling of a multi-carrier energy hub supplemented by battery