

## برنامه‌ریزی تصادفی انرژی در سیستم‌های ریزشبه چندگانه با در نظر گرفتن شاخص عملکرد استقلال و انرژی تامین نشده

مهديه منعمی بيدگلی<sup>۱</sup>، محمد مهدی داوری<sup>۲\*</sup>

۱- محقق مستقل، کاشان، ایران. m.monemi.b@gmail.com

۲- دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) [m\\_davary@sbu.ac.ir](mailto:m_davary@sbu.ac.ir)

۳- شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ، تهران، ایران

### چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳ / ۱۲ / ۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴ / ۰۴ / ۲۸

کلمات کلیدی:

ریزشبه چندگانه، شاخص  
استقلال سیستم، بهینه سازی  
تصادفی، شاخص انرژی  
تامین نشده

این مقاله یک استراتژی همکاری برای مدیریت انرژی در ریزشبه‌های چندگانه ارائه می‌دهد. استراتژی پیشنهادی، هزینه روزانه سیستم، انرژی تامین نشده و استقلال ریزشبه‌ها را در نظر می‌گیرد تا بهترین برنامه‌ریزی برای ریزشبه‌ها انجام شود. بهره‌بردار ریزشبه‌ها برای اولویت‌بندی اهداف خود را به اهداف اصلی و ثانویه تقسیم می‌کند. از آنجا که هزینه کل ریزشبه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است. با این حال، انرژی تامین نشده و استقلال ریزشبه‌ها به‌عنوان اهداف ثانویه در نظر گرفته می‌شوند که قادر به بهینه‌سازی در یک فضای محدود هستند. این استراتژی همکاری به ریزشبه‌ها اجازه می‌دهد منابع محلی خود را به اشتراک بگذارند و هزینه کل سیستم را به حداقل برسانند. برای مدیریت عدم قطعیت قیمت‌های بازار و تولیدات تجدیدپذیر، بهینه‌سازی تصادفی انجام شده است. همچنین، راه‌حل‌های بهینه پارتو با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی و تکنیک اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل رتبه‌بندی شده‌اند. برای ارزیابی کارایی استراتژی پیشنهادی، این روش بر روی یک سیستم نمونه ریزشبه چندگانه آزمایش شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی میزان انرژی تامین نشده، تلفات و استقلال سیستم را بهبود می‌بخشد.

در سیستم‌های قدرت سنتی، بیشتر انرژی توسط نیروگاه‌های بزرگ تأمین می‌شود. تلفات الکتریکی بالا، قابلیت اطمینان پایین و انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای از مشکلات اصلی نیروگاه‌های متمرکز هستند [۱،۲]. منابع انرژی توزیع شده شامل منابع کوچک‌مقیاس یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند که انرژی را در نزدیکی مصرف‌کنندگان تولید می‌کنند [۳،۴]. ریزشبه‌ها شبکه‌های توزیع الکتریکی هستند که شامل بارها و منابع مختلف، مانند منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع انرژی قابل تنظیم می‌شوند و می‌توانند در دو حالت متصل به شبکه یا جزیره‌ای عمل کنند [۵].

چندین پژوهش به مدیریت انرژی در ریزشبه‌ها پرداخته‌اند. در مرجع [۶] از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای ارائه یک تکنیک جدید پیک‌سایی در یک ریزشبه جزیره‌ای استفاده کرده‌اند. با این حال، ماهیت نامشخص منابع انرژی تجدیدپذیر و پاسخ‌گویی بار نادیده گرفته شده است. در مرجع [۷] به بررسی بهبود تاب‌آوری ریزشبه با استفاده از بهینه‌سازی مقاوم پرداخته شده است، اما تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۸] مسئله انرژی تجدیدپذیر تبادلی در یک ریزشبه تحت بازار برق روز پیشرو مطالعه شده است، اما انرژی تأمین نشده و استقلال ریزشبه در نظر گرفته نشده‌اند. در مرجع [۹] یک طرح مدیریت انرژی دو لایه برای کاهش هزینه کل روزانه یک ریزشبه تجدیدپذیر متصل به شبکه ارائه شده است. در این مطالعه، کارایی مدل از نظر قابلیت اطمینان و انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی نشده است. در مرجع [۱۰] مدیریت انرژی یک ریزشبه جزیره‌ای بررسی شده است، اما عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار نادیده گرفته شده است. در [۱۱] هماهنگی منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع قابل تنظیم به‌عنوان بهینه‌سازی تصادفی بررسی شده است. اگرچه ماهیت نامشخص منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است، اما عدم قطعیت قیمت‌های بازار نادیده گرفته شده است. در [۱۲] یک ترکیب تصمیم‌گیری چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارائه چارچوب جدیدی جهت برنامه‌ریزی بهینه یک ریزشبه واحد با در نظر گرفتن هزینه کل، ظرفیت ذخیره و انرژی تأمین نشده استفاده کرده‌اند. با این حال، کارایی مدل پیشنهادی از نظر انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید نادیده گرفته شده است. همچنین، استقلال ریزشبه از شبکه بالادست بررسی نشده است.

تعامل میان ریزشبه‌ها مفهومی جدید به نام ریزشبه‌های چندگانه ایجاد می‌کند که انرژی تبادلی میان ریزشبه‌ها را بررسی می‌کند. در [۱۳] چارچوب بهینه‌سازی برای مدل‌سازی تعامل میان ریزشبه‌های چندگانه و بهره‌بردار شبکه توزیع پیشنهاد شده است. اگرچه عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر اعمال شده است، اما تأثیر برنامه پاسخ‌گویی بار بررسی نشده است. در [۱۴] نقش برنامه مدیریت تقاضا بر تعامل میان سیستم ریزشبه‌های چندگانه و بهره‌بردار شبکه توزیع بررسی شده است، اما منابع انرژی تجدیدپذیر و قیمت‌های بازار نادیده گرفته شده است. در [۱۵] مدیریت انرژی با لحاظ ریسک برای ریزشبه‌ها و بهره‌بردار شبکه توزیع پیشنهاد شده است، اما مدل ارائه شده نقش برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را برای ریزشبه‌ها بررسی نمی‌کند.

در [۱۶] تأثیر نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در مدیریت انرژی سیستم ریزشبه‌های چندگانه به‌عنوان یک استراتژی همکاری مورد بررسی قرار گرفته است، اما عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و تأثیر آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای مطالعه نشده است. یک سازوکار بازار در [۱۷] برای اندازه‌گیری ارزش تبادل اضطراری انرژی در سیستم‌های ریزشبه‌های چندگانه ارائه شده است، اما همچنان قابلیت اطمینان و استقلال ریزشبه‌ها در نظر گرفته نشده است. در [۱۸] یک چارچوب چندهدفه برای شرایط بهینه و پیشامدی ریزشبه‌های متصل ارائه شده است. اگرچه این مقاله سود ریزشبه، انحراف ولتاژ و بارهای تأمین شده را به‌عنوان اهداف در نظر گرفته است، اما قابلیت اطمینان و استقلال سیستم نادیده گرفته شده است. در [۱۹] برخلاف مرجع [۱۵]، برای مدل‌سازی

تعامل بهره‌بردار شبکه توزیع و ریزشکبه‌ها از بهینه‌سازی دو سطحی استفاده شده است. در این مدل بهره‌بردار سیستم ریزشکبه چندگانه به‌عنوان رهبر عمل می‌کند و هدفش به حداقل رساندن هزینه کل است. همچنین، بهره‌بردار شبکه توزیع به‌عنوان پیرو در مسئله بهینه‌سازی عمل کرده و تلاش می‌کند هزینه خود را به حداقل برساند. در [۲۰] مدیریت انرژی یک سیستم ریزشکبه چندگانه ایزوله با در نظر گرفتن سیستم ذخیره انرژی و یک برنامه پاسخ‌گویی بار مرحله‌ای مطالعه شده است. نویسندگان قیمت‌گذاری تبادل توان را برای کنترل انرژی تبدیلی میان ریزشکبه‌ها ارائه دادند. با این حال، قابلیت اطمینان سیستم و ماهیت نامشخص قیمت‌های بازار بررسی نشده است.

در [۲۱] یک چارچوب دو مرحله‌ای ارائه دادند که در مرحله اول آن برنامه‌ریزی بهره‌برداری ریزشکبه‌ها در شرایط عادی مورد بررسی قرار گرفت، در حالی که در مرحله دوم برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم ریزشکبه چندگانه در شرایط اضطراری مطالعه شده است. با این حال، با اینکه انرژی تأمین نشده در سیستم ریزشکبه چندگانه مورد توجه قرار گرفته است، استقلال ریزشکبه‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است. علاوه بر این، وزن اهداف و رتبه‌بندی راه‌حل‌های پارتو از دیدگاه بهره‌بردار ارائه نشده است. در [۲۲] یک استراتژی تعاونی برای تشویق ریزشکبه‌ها به معاملات داخلی پیشنهاد شده است. نویسندگان از بهینه‌سازی مقاوم دو مرحله‌ای برای مدیریت ماهیت نامشخص تقاضای بار و منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده کرده‌اند.

در بیشتر تحقیقات پیشین، تمرکز اصلی بر روی حداقل‌سازی هزینه‌ها و بهبود کیفیت توان در ریزشکبه‌ها بوده است. با این حال، بسیاری از این تحقیقات به ابعاد وابستگی ریزشکبه‌ها به شبکه بالادستی و استقلال آن‌ها از شبکه اصلی توجه نکرده‌اند. این در حالی است که استقلال ریزشکبه‌ها از شبکه‌های بالادستی می‌تواند بهبود چشمگیری در کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان، و کاهش تلفات توان و انتشار گازهای گلخانه‌ای به همراه داشته باشد. این مقاله با معرفی شاخص عملکرد استقلال و پیشنهاد یک استراتژی تعاونی برای مدل‌سازی تعاملات میان ریزشکبه‌ها، شکاف‌های موجود در تحقیقات قبلی را پر می‌کند. در این استراتژی، بهره‌بردار سیستم ریزشکبه چندگانه به طور همزمان به بهینه‌سازی هزینه‌های روزانه، افزایش استقلال و کاهش انرژی تأمین نشده می‌پردازد. برخلاف بسیاری از تحقیقات که تنها به جنبه‌های هزینه و کیفیت توان پرداخته‌اند، این مقاله بر ارتقا استقلال ریزشکبه‌ها و مدیریت تعاملات میان ریزشکبه‌ها تأکید دارد و این ابعاد را به طور مؤثری مدل‌سازی می‌کند.

مدل پیشنهادی از بهینه‌سازی دو مرحله‌ای استفاده می‌کند، جایی که در مرحله اول هزینه کلی سیستم به حداقل می‌رسد و در مرحله دوم، انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال بهینه می‌شوند. این رویکرد نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه باعث بهبود کیفیت توان و کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شود، بدون آنکه هزینه بهینه تغییر کند.

نوآوری‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

۱. استراتژی تعاونی برای مدیریت انرژی که در آن ریزشکبه‌ها منابع خود را به اشتراک می‌گذارند و یک ائتلاف برای برنامه‌ریزی بهینه تشکیل می‌دهند.
۲. معرفی شاخص عملکرد استقلال و در نظر گرفتن انرژی تأمین نشده به عنوان اهداف ثانویه بدون تغییر در بهینه‌سازی هزینه که باعث کاهش وابستگی ریزشکبه‌ها به شبکه بالادستی می‌شود.
۳. مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در قیمت‌های بازار و منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از چارچوب بهینه‌سازی احتمالاتی و کاهش سناریوها برای بهبود همگرایی.

این نوآوری‌ها به ارتقا استقلال ریزشبه‌ها و کاهش وابستگی آن‌ها به شبکه‌های بالادستی کمک می‌کنند و در نهایت به سیستم‌های انرژی پایدارتر و مستقل‌تر منجر می‌شوند؛ بنابراین، این مقاله به شکاف‌های موجود در تحقیقات پیشین پاسخ می‌دهد و راهکارهای نوینی را برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه‌ها در محیط‌های چندگانه و با در نظر گرفتن ابعاد مختلف ارائه می‌دهد.

ادامه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش دوم فرمول‌های ریاضی مدل پیشنهادی را توصیف می‌کند. روش تولید و کاهش سناریو در بخش سوم ارائه شده است. بهینه‌سازی چندهدفه دو مرحله‌ای در بخش چهارم ارائه شده است. نتایج در بخش پنجم تحلیل شده‌اند. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش هفتم ارائه شده است.

## ۲. فرمول‌بندی ریاضی مدل پیشنهادی

در این بخش، فرمول‌بندی ریاضی مدل پیشنهادی شامل توابع هدف و محدودیت‌ها به صورت دقیق توضیح داده شده است.

### ۱.۲. تابع هدف اصلی

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، اهداف سیستم ریزشبه چندگانه توسط بهره‌بردار اولویت‌بندی می‌شوند. هزینه کل سیستم ریزشبه چندگانه به‌عنوان تابع هدف اصلی در مرحله اول بهینه‌سازی کمینه می‌شود. هزینه کل سیستم ریزشبه چندگانه به صورت روابط (۱) تا (۱۰) بیان شده است. معادله (۱) هزینه کل سیستم ریزشبه چندگانه را نشان می‌دهد. معادلات (۲) و (۳) هزینه کل پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی را به ترتیب نشان می‌دهند. معادلات (۴) تا (۶) هزینه کل، هزینه سوخت و هزینه‌های نگهداری و تعمیر ژنراتورهای دیزلی را تعریف می‌کنند. هزینه کل پیل‌های سوختی<sup>۴</sup> و میکروتوربین‌ها در معادلات (۷) و (۸) توضیح داده شده است. در نهایت، هزینه قطع بار و خرید برق از شبکه اصلی در معادلات (۹) و (۱۰) به ترتیب ارائه شده است.

$$\text{Cost}^{\text{Total}} = \text{Cost}^{\text{PV}} + \text{Cost}^{\text{WT}} + \text{Cost}^{\text{FC}} + \text{Cost}^{\text{MT}} + \text{Cost}^{\text{DG}} + \text{Cost}^{\text{CL}} + \text{Cost}^{\text{Grid}} \quad (1)$$

$$\text{Cost}^{\text{PV}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\text{Cost}_{\text{O\&M}}^{\text{PV}}] = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T K_{\text{O\&M}}^{\text{PV}} \times P_{m,t}^{\text{PV}} \quad (2)$$

$$\text{Cost}^{\text{WT}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\text{Cost}_{\text{O\&M}}^{\text{WT}}] = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T K_{\text{O\&M}}^{\text{WT}} P_{m,t}^{\text{WT}} \quad (3)$$

$$\text{Cost}^{\text{DG}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\text{Cost}_{\text{O\&M}}^{\text{DG}} + \text{Cost}_{\text{Fuel},m}^{\text{DG}}] \quad (4)$$

$$\text{Cost}_{\text{Fuel},m}^{\text{DG}} P_{m,t}^{\text{DG}} = k_m I_{m,t} + \Delta T \sum_{n=1}^{N_n} \pi_{m,n} P_{m,n,t} \quad (5)$$

$$\text{Cost}_{\text{O\&M}}^{\text{DG}} = K_{\text{O\&M}}^{\text{DG}} P_{m,t}^{\text{DG}} \quad (6)$$

$$\text{Cost}^{\text{FC}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\text{Cost}_{\text{Fuel}}^{\text{FC}} + \text{Cost}_{\text{O\&M}}^{\text{FC}}] = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \left[ \frac{C_{\text{ng}}}{L_{\text{ng}}} \times \frac{P_{m,t}^{\text{FC}}}{\eta_{m,t}} + K_{\text{O\&M}}^{\text{FC}} P_{m,t}^{\text{FC}} \right] \quad (7)$$

<sup>۴</sup> Fuel cell

$$\text{Cost}^{MT} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\text{Cost}_{\text{Fuel}}^{MT} + \text{Cost}_{\text{O\&M}}^{MT}] = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \left[ \frac{C_{\text{ng}}}{L_{\text{ng}}} \times \frac{P_{m,t}^{MT}}{\eta_{m,t}^{MT}} + K_{\text{O\&M}}^{MT} P_{m,t}^{MT} \right] \quad (8)$$

$$\text{Cost}^{CL} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C_{m,t}^{CL} P_{m,t}^{CL} \quad (9)$$

$$\text{Cost}^{\text{Grid}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_s C_t^{\text{Grid}} P_t^{\text{Grid}} \quad (10)$$

## ۲.۲. تابع هدف ثانویه

شاخص عملکرد استقلال و انرژی تأمین نشده اهداف ثانویه‌ای هستند که باید در مرحله دوم بهینه‌سازی بهینه شوند. فرمول‌بندی‌های ریاضی شاخص عملکرد استقلال و انرژی تأمین نشده در معادلات (۱۱) تا (۱۳) توصیف شده‌اند.

$$\text{IPI} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |P_t^{\text{Grid}}|}{\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_{m,t}^{\text{Load}}} \quad (11)$$

$$P_{m,t}^{\text{Load}} = P_{m,t}^{\text{Flex}} + P_{m,t}^{\text{Inflex}} - P_{m,t}^{\text{CL}} \quad (12)$$

$$\text{ENS} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_{m,t}^{\text{CL}} \quad (13)$$

## ۳.۲. محدودیت‌های بهره‌برداری

پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل ژنراتورها به عنوان منابع انرژی قابل تنظیم شناخته می‌شوند که توان خروجی آن‌ها به سوخت ورودی بستگی دارد. محدودیت‌های بهره‌برداری از پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل ژنراتورها در روابط (۱۴) الی (۲۷) مدل‌سازی شده است [۲۴]. حدود بالایی و پایینی پیل‌های سوختی و میکروتوربین‌ها در معادلات (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. روابط بین توان خروجی و بازده پیل‌های سوختی و میکروتوربین‌ها در معادلات (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. یک مدل تکه‌ای خطی برای بهره‌برداری دیزل ژنراتورها استفاده شده است که در بسیاری از تحقیقات به طور گسترده‌ای به کار رفته است [۲۵، ۲۶]. معادلات (۱۸) و (۱۹) محدودیت تولید برای هر مرحله و محدودیت تولید کلی را به ترتیب شرح می‌دهند. توان خروجی کلی دیزل ژنراتورها در معادله (۲۰) ارائه شده است. همچنین، هزینه راه‌اندازی دیزل ژنراتورها در معادله (۲۱) نشان داده شده است. معادلات (۲۲) و (۲۳) محدودیت‌های شیب افزایش و کاهش تولید دیزل ژنراتورها را نشان می‌دهند. زمان شروع و زمان خاموش شدن واحدها در معادلات (۲۴) و (۲۵) تعریف شده است. در نهایت، روابط بین متغیرهای باینری در معادلات (۲۶) و (۲۷) نشان داده شده است.

$$0 \leq P_{m,t}^{\text{FC}} \leq P_{m,r}^{\text{FC}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{\text{MT}} \leq P_{m,r}^{\text{MT}} \quad (15)$$

$$\eta_{m,t}^{\text{FC}} = 0.023 \times P_{m,t}^{\text{FC}} + 0.6735 \quad (16)$$

$$\eta_{m,t}^{MT} = 0.0753 \times \left(\frac{P_{m,t}^{MT}}{65}\right)^3 - 0.3095 \times \left(\frac{P_{m,t}^{MT}}{65}\right)^2 + 0.4147 \times \left(\frac{P_{m,t}^{MT}}{65}\right) + 0.1068 \quad (17)$$

$$0 \leq P_{m,n,t} \leq P_{m,n} \quad (18)$$

$$P_m^{\text{Min}} I_{m,t} \leq P_{m,t}^{\text{DG}} \leq P_{m,n} \quad (19)$$

$$P_{m,t}^{\text{DG}} = P_m^{\text{Min}} I_{m,t} + \sum_{n=1}^N P_{m,n,t} \quad (20)$$

$$SU_{m,t} = CU_m Y_{m,t} \quad (21)$$

$$P_{m,t}^{\text{DG}} - P_{m,t-1}^{\text{DG}} \leq IR_m \quad (22)$$

$$P_{m,t-1}^{\text{DG}} - P_m^{\text{DG}} \leq DR_m \quad (23)$$

$$\sum_{h=1}^{t+DT_m-1} I_{m,h} \geq IT_m Y_{m,t} \quad (24)$$

$$\sum_{h=1}^{t+DT_m-1} (1-I_{m,h}) \geq DT_m Y_{m,t} \quad (25)$$

$$Y_{m,t} - V_{m,t} = I_{m,t} - I_{m,t-1} \quad (26)$$

$$Y_{m,t} + V_{m,t} \leq 1 \quad (27)$$

توان خروجی پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی<sup>۵</sup> در زمان  $t$  و سناریوی  $s$  مطابق روابط (۲۸) تا (۳۱) است. معادله (۲۸) توان خروجی نیروگاه‌های خورشیدی در زمان  $t$  و سناریوی  $s$  را نشان می‌دهد. توان خروجی نهایی واحدهای خورشیدی در معادله (۲۹) تعریف شده است. همچنین، توان خروجی واحدهای توربین بادی در زمان  $t$  و سناریوی  $s$  در معادله (۳۰) ارائه شده است، در حالی که معادله (۳۱) توان خروجی نهایی واحدهای توربین بادی در زمان  $t$  را توصیف می‌کند [۳۲].

$$P_{m,t,s}^{PV} = \eta S_m^{PV} I_{t,s} (1 - 0.005(T_t^{\text{Out}} - 25)) \quad (28)$$

$$P_{m,t,s}^{\text{WT}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_{t,s} \leq v_{ci} \quad \text{or} \quad v_{co} \leq v_{t,s} \\ P_{m,r}^{\text{WT}} \frac{v_{t,s}^2 - v_{ci}^2}{v_r^2 - v_{ci}^2}, & v_{ci} \leq v_{t,s} \leq v_r \\ P_{m,r}^{\text{WT}} & v_r \leq v_{t,s} \leq v_{co} \end{cases} \quad (29)$$

$$P_{m,t}^{\text{WT}} = \sum_{s=1}^S \rho_s P_{m,t,s}^{\text{WT}} \quad (30)$$

$$P_{m,t}^{PV} = \sum_{s=1}^S \rho_s P_{m,t,s}^{PV} \quad (31)$$

<sup>۵</sup> wind turbine

محدودیت‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی باتری به ترتیب در معادلات (۳۲) و (۳۳) ارائه شده‌اند. حالت دینامیکی شارژ ذخیره‌سازهای انرژی باتری در معادله (۳۴) نشان داده شده است. حدود بالایی و پایینی میزان شارژ باتری در معادله (۳۵) توصیف شده‌اند. معادله (۳۶) نشان می‌دهد که ذخیره‌سازهای انرژی باتری نمی‌توانند به صورت همزمان شارژ و دشارژ شوند [۳۶]. در نهایت، معادله (۳۷) تضمین می‌کند که انرژی اولیه و نهایی ذخیره شده در ذخیره‌سازهای انرژی باتری برابر باشد [۲۷-۲۹].

$$0 \leq P_{m,t}^{Ch} \leq X_{m,t}^{Ch} P_m^{Ch} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{Disch} \leq X_{m,t}^{Disch} P_m^{Disch} \quad (33)$$

$$SOC_{m,t+1} = SOC_{m,t} + \Delta T \left( \frac{\eta_m^{Ch} P_{m,t}^{Ch}}{E_m} - \frac{P_{m,t}^{Disch}}{\eta_m^{Disch} E_m} \right) \quad (34)$$

$$SOC_m^{Min} \leq SOC_{m,t} \leq SOC_m^{Max} \quad (35)$$

$$X_{m,t}^{Ch} + X_{m,t}^{Disch} \leq 1 \quad (36)$$

$$SOC_{m,t1} = SOC_{m,t24} \quad (37)$$

فرمول‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت در معادلات (۳۸) تا (۴۰) ارائه شده است. معادله (۳۸) مصرف انرژی هر ریزشبه را پس از مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار نشان می‌دهد. محدودیت‌های حداقل و حداکثر مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار در معادله (۳۹) ارائه شده است. در نهایت، معادله (۴۰) نشان می‌دهد که ریزشبه‌ها تنها می‌توانند بارهای خود را جابه‌جا کنند [۳۶].

$$P_{m,t}^{Flex} = P_{m,t}^B (1 - DR_{m,t}) + ldr_{m,t} \quad (38)$$

$$DR_m^{Min} \leq DR_{m,t} \leq DR_m^{Max} \quad (39)$$

$$\sum_{t=1}^T ldr_{m,t} = \sum_{t=1}^T P_{m,t}^B DR_{m,t}; \forall m \in MI \quad (40)$$

تعادل توان و حداکثر ظرفیت خطوط به ترتیب در روابط (۴۱) و (۴۲) نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، حدود توان وارداتی از شبکه بالادستی در رابطه (۴۳) تعریف شده است. در نهایت، معادله (۴۴) حدود پایین و بالای قطع بار را نشان می‌دهد.

$$P_t^{Grid} + \sum_{m=1}^M (P_{m,t}^{PV} + P_{m,t}^{WT} + P_{m,t}^{FC} + P_{m,t}^{DG} + P_{m,t}^{MT} + P_{m,t}^{Disch} + P_{m,t}^{CL}) = \sum_{m=1}^M (P_{m,t}^{Flex} + P_{m,t}^{Inflex} + P_{m,t}^{Ch}) + \sum_{p,q \in \Lambda_p} B_{p,q} (\theta_{p,t} - \theta_{q,t}) \quad (41)$$

$$-F_{p,q}^{Max} \leq B_{p,q} (\theta_{p,t} - \theta_{q,t}) \leq F_{p,q}^{Max} \quad (42)$$

$$-P^{Gmax} \leq P_t^{Grid} \leq P^{Gmax} \quad (43)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{CL} \leq P_{m,t}^{Inflex} \quad (44)$$

### ۳. روش تولید و کاهش سناریو

با توجه به افزایش تولید منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت‌های مرتبط با این منابع باید مدنظر قرار گیرند. روش‌های مختلفی برای مدیریت عدم قطعیت در سیستم‌های قدرت ارائه شده است، از جمله رویکردهای احتمالی، بهینه‌سازی مقاوم، بهینه‌سازی بازه‌ای و نظریه تصمیم‌گیری در شکاف اطلاعات. در این مطالعه، برای مدیریت ماهیت نامطمئن منابع انرژی تجدیدپذیر و قیمت‌های بازار، از تکنیک احتمالی استفاده شده است؛ زیرا سرعت باد، تابش خورشید و قیمت‌های بازار از توابع توزیع احتمالی پیروی می‌کنند که بر اساس داده‌های تاریخی مربوطه هستند. توزیع احتمالی ویبول و بتا برای مدل‌سازی عدم قطعیت توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به کار گرفته شده‌اند [۳۱، ۳۲]. این توزیع‌های احتمالی به صورت زیر توصیف شده‌اند:

معادله (۴۵) توزیع احتمالی ویبول و پارامترهای مرتبط با آن را توصیف می‌کند. پارامتر  $k$  شاخص شکل و  $c$  شاخص مقیاس هستند که از مقدار میانگین  $\mu$  و انحراف معیار  $\delta$  سرعت باد به دست می‌آیند. توزیع احتمالی بتا و پارامترهای آن در معادله (۴۶) شرح داده شده است. در توزیع بتا، پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  به‌عنوان پارامترهای شکل ( $\alpha, \beta \geq 0$ ) و  $\Gamma$  به‌عنوان تابع گاما معرفی می‌شوند [۳۲].

$$\text{PDF}(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right), k = \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^{-1.086}, c = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (45)$$

$$\text{PDF}(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \beta = (1-\mu) \left(\frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2} - 1\right), \alpha = \frac{\mu\beta}{1-\mu} \quad (46)$$

برای مدل‌سازی ماهیت نامشخص قیمت‌های بازار، از تابع توزیع نرمال استفاده شده است. معادله (۴۷) تابع توزیع نرمال را با استفاده از مقدار میانگین و انحراف معیار ارائه می‌دهد. پارامترهای  $\mu$  و  $\delta$  به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار تابع توزیع نرمال هستند، در حالی که واریانس این توزیع  $\delta^2$  است.

$$\text{PDF}(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right) \quad (47)$$

مجموعه‌ای از بازه‌ها از توزیع‌های احتمالی انتخاب می‌شوند، زیرا داشتن یک مجموعه بی‌نهایت از انتخاب‌ها امکان‌پذیر نیست [۳۱]. تعداد بازه‌ها برای پارامتر  $x$  با  $n_x$  نشان داده می‌شود. علاوه بر این، احتمال و مقدار هر سناریو با استفاده از روابط (۴۸) و (۴۹) محاسبه شده‌اند:

$$\rho_{x,n_x} = \int_{x_{\text{star},n_x}}^{x_{\text{end},n_x}} \text{PDF}(x) dx, n_x = 1, 2, \dots, N_x \quad (48)$$

$$\chi_{x,n_x} = \frac{1}{\rho_{x,n_x}} \left( \int_{x_{\text{star},n_x}}^{x_{\text{end},n_x}} x \cdot \text{PDF}(x) dx \right), n_x = 1, 2, \dots, N_x \quad (49)$$

یک بهینه‌سازی جدید برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای کاهش پیچیدگی مدل با استفاده از تکنیک کاهش سناریو به‌کارگرفته‌شده است. این تکنیک در روابط (۵۰) و (۵۱) ارائه شده است که در آن  $W_{n1,n2}$  یک متغیر باینری است که انتخاب سناریوهای  $n_1, n_2, n_3$  را نشان می‌دهد. علاوه بر این، پارامتر  $\rho_s(n_1, n_2, n_3)$  احتمال سناریوهای  $n_1, n_2, n_3$  را نشان می‌دهد [۳۳].

$$\text{Min } f = \sum_{n1=1}^{N1} \sum_{n2=1}^{N2} \sum_{n3=1}^{N3} W_{n1,n2,n3} \quad (50)$$

$$\text{s.t.} : \begin{cases} \rho_{1,n1} = \sum_{n2=1}^{N2} \sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1, n2, n3) \\ \rho_{1,n2} = \sum_{n1=1}^{N1} \sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1, n2, n3) \\ \rho_{1,n3} = \sum_{n1=1}^{N1} \sum_{n2=1}^{N2} \rho_s(n1, n2, n3) \\ \sum_{n1=1}^{N1} \sum_{n2=1}^{N2} \sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1, n2, n3) = 1 \\ \rho_s(n2, n2, n3) \leq W_{n1,n2,n3} \\ 0 \leq \rho_s(n1, n2, n3) \leq 1 \\ W_{n1,n2,n3} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (51)$$

#### ۴. بهینه‌سازی چندهدفه دو مرحله‌ای

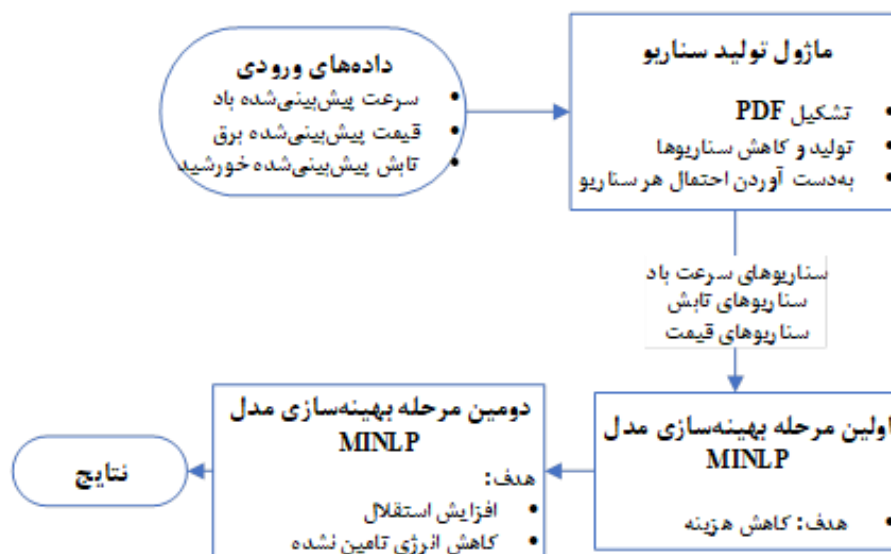
در این مقاله، از یک بهینه‌سازی چندهدفه دو مرحله‌ای مشارکتی برای مدیریت انرژی سیستم ریزشبه چندگانه استفاده شده است. در مرحله اول، هزینه کل سیستم ریزشبه چندگانه به‌عنوان هدف اصلی بهینه‌سازی شده است تا بهترین برنامه از نظر اقتصادی تعیین شود؛ بنابراین، مرحله اول بهینه‌سازی به‌عنوان یک بهینه‌سازی تک‌هدفه تصادفی فرمول‌بندی شده است. هزینه بهینه سیستم ریزشبه چندگانه از مرحله اول به‌دست‌آمده و به‌عنوان داده ورودی در مرحله دوم استفاده می‌شود؛ بنابراین، در مرحله اول، مسئله زیر باید حل شود تا هزینه روزانه بهینه سیستم ریزشبه چندگانه تعریف شود:

$$\begin{cases} \text{MinCost} = \text{Min} [ \text{Cost}^{PV} + \text{Cost}^{WT} + \text{Cost}^{DG} + \text{Cost}^{FC} + \text{Cost}^{MT} + \text{Cost}^{CL} + \text{Cost}^{Grid} ] \\ \text{S.t: Eqs. } \{(2)-(10), (14)-(44)\} \end{cases} \quad (52)$$

اهداف ثانویه (انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال) در مرحله دوم در نظر گرفته شده‌اند. یک بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد شده است که انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال را برای سیستم ریزشبه چندگانه بهینه می‌کند. هزینه بهینه که از مرحله اول بهینه‌سازی به دست آمده است، به‌عنوان یک محدودیت در مرحله دوم استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هزینه سیستم ریزشبه چندگانه بدون تغییر باقی می‌ماند؛ بنابراین، فرموله‌سازی مدل در مرحله دوم به صورت رابطه (۶۶) است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Optimize} \left\{ \text{ENS}, \left( 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |P_t^{\text{Grid}}|}{\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_{m,t}^{\text{Load}}} \right) \right\} \\ \text{S. t. : Eqs. } \{(2)-(10), (12), (14)-(44)\}, \text{Cost} \leq \alpha \cdot \text{Cost}^* \end{array} \right. \quad (53)$$

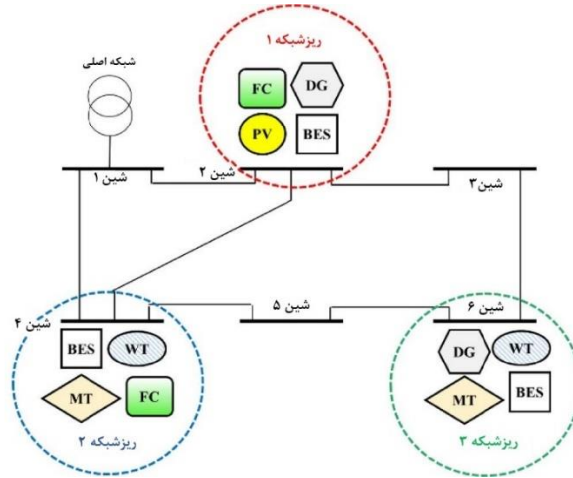
که در آن  $\text{Cost}^*$  هزینه بهینه سیستم ریزشبهه چندگانه است که از مرحله اول بهینه‌سازی به دست آمده است. پارامتر  $\alpha$  بر اساس ترجیحات بهره‌بردار سیستم ریزشبهه چندگانه تنظیم می‌شود. اگر  $\alpha=1$  باشد، مرحله دوم بهینه‌سازی هزینه سیستم ریزشبهه چندگانه را در مقدار بهینه خود حفظ می‌کند، در حالی که برنامه‌ریزی اولیه ریزشبهه‌ها را تغییر می‌دهد تا انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال را بهبود بخشد. افزایش مقدار  $\alpha$ ، انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال را بهبود می‌دهد اما هزینه سیستم ریزشبهه چندگانه از مقدار بهینه خود منحرف می‌شود. مدل مفهومی بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ الگوریتم روند حل مدل پیشنهادی

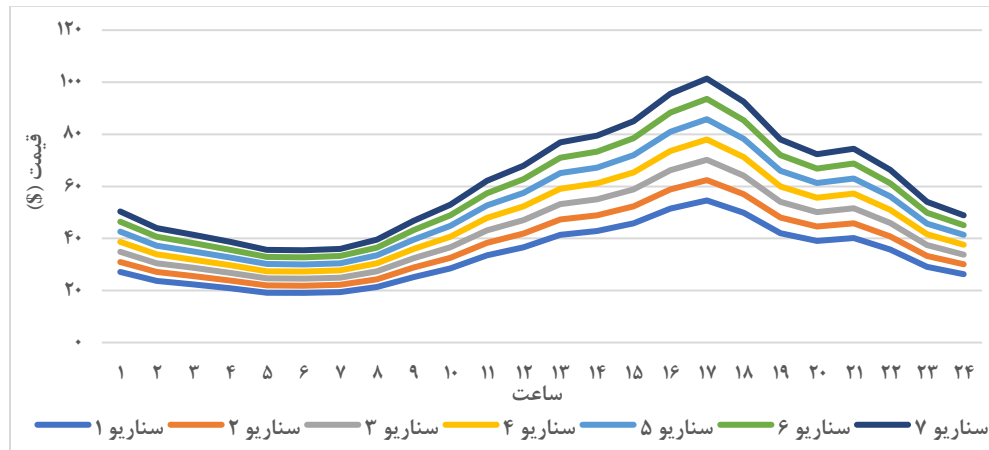
## ۵. نتایج

مدل پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی استاندارد شامل سه ریزشبهه آزمایش شده است. مکان و منابع محلی هر ریزشبهه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

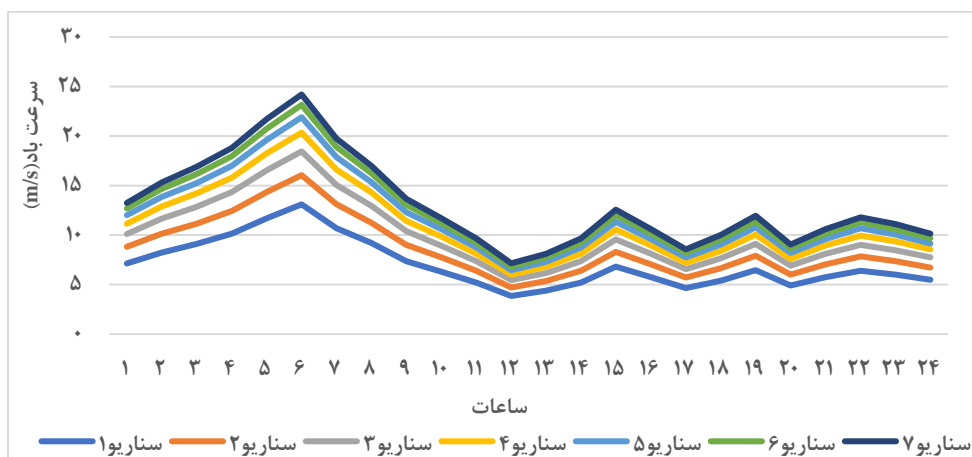


شکل ۲ شبکه استاندارد ۶ باس IEEE.

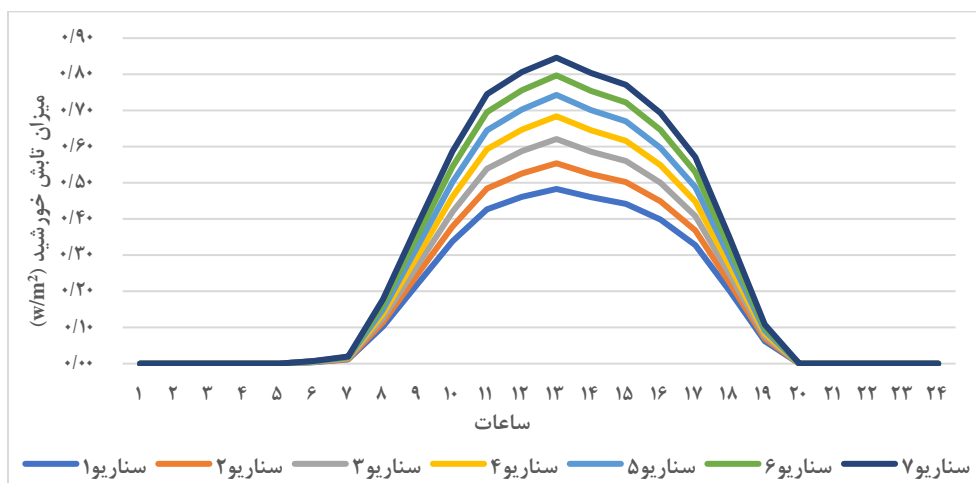
سناریوهای قیمت، سرعت باد و تابش خورشیدی به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.



شکل ۳ سناریوهای قیمت شبکه.



شکل ۴ سناریوهای سرعت باد.



شکل ۵ سناریوهای میزان تابش خورشید.

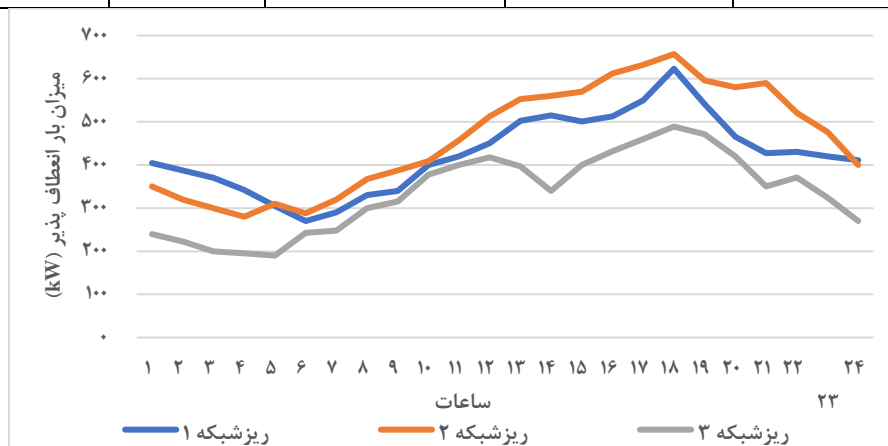
ویژگی‌های ژنراتورهای دیزلی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. علاوه بر این، بارهای پیش‌بینی شده انعطاف‌پذیر و غیرانعطاف‌پذیر سیستم ریزشبه چندگانه‌ای بر اساس شکل‌های ۶ و ۷ هستند. حداکثر پاسخ‌گویی بار برای هر ریزشبه ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های ژنراتورهای دیزلی

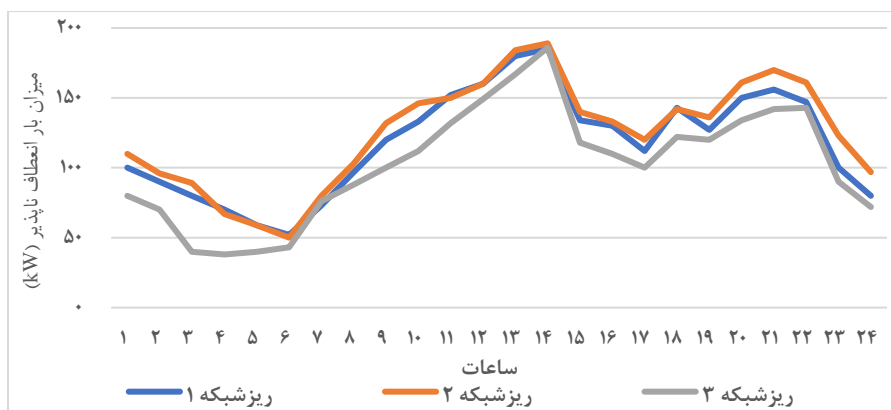
پارامترها	ریزشبکه ۱	ریزشبکه ۲	ریزشبکه ۳
هزینه راه‌اندازی اولیه (\$)	۲۰	-	۳۰
حداقل ظرفیت تولید برق (kW)	۱۰	-	۲۰
حداکثر ظرفیت تولید برق (kW)	۱۲۰	-	۲۰۰
تابع هزینه تولید برق خطی (\$/kWh)	۰,۱۳	-	۰,۱۲
حداقل زمان خاموش / روشن ماندن (h)	۲	-	۲
محدودیت شیب افزایش و کاهش تولید (kw)	۳۰	-	۴۰

جدول ۲ ویژگی‌های ذخیره‌سازهای انرژی باتری.

راندمان باتری (%)	ظرفیت باتری (kWh)	قدرت شارژ و دشارژ باتری (kW)	حداقل شارژ مجاز باتری (kWh)	حداکثر شارژ مجاز باتری (kWh)	ریزشبکه
۹۵	۱۰۰	۲۰	۵	۹۵	ریزشبکه ۱
۹۵	۲۰۰	۴۰	۱۰	۱۹۰	ریزشبکه ۲
۹۵	۱۰۰	۲۰	۵	۹۵	ریزشبکه ۳



شکل ۶ میزان بار انعطاف پذیر در سیستم ریزشبکه چندگانه.



شکل ۷ میزان بار انعطاف ناپذیر در سیستم ریزشبکه چندگانه

برای بررسی کارایی استراتژی پیشنهادی، دو مطالعه موردی زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- **مطالعه موردی ۱:** در این حالت، یک طرح کلی مدیریت انرژی اجرا می‌شود که در آن بهره‌بردار سیستم ریزشبکه چندگانه هزینه‌های خود را بهینه می‌کند. ریزشبکه‌ها یک ائتلاف تشکیل می‌دهند و منابع محلی خود را برای دستیابی به بهترین برنامه به اشتراک می‌گذارند. در مطالعه اول، بهره‌بردار سیستم ریزشبکه چندگانه فقط بر روی کمینه‌سازی هزینه تمرکز

دارد و تأثیرات انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال نادیده گرفته شده است. این مطالعه به عنوان حالت پایه برای نشان دادن کارایی استراتژی پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

- **مطالعه موردی ۲:** مدیریت انرژی سیستم ریزشبهه چندگانه بر اساس الگوریتم اولویت‌بندی پیشنهادی انجام می‌شود. در ابتدا، هزینه سیستم ریزشبهه چندگانه به عنوان هدف اصلی کمینه شده و هزینه بهینه به دست می‌آید. سپس در مرحله دوم بهینه‌سازی، انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال نیز بهینه‌سازی می‌شوند. مقدار پارامتر  $\alpha$  در رابطه (۶۶) برابر با ۱ در نظر گرفته شده است تا اطمینان حاصل شود که هزینه سیستم ریزشبهه چندگانه در حالت بهینه باقی می‌ماند. عملکرد مطالعات موردی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که هزینه بهینه سیستم ریزشبهه چندگانه برابر با ۳۹۲۰،۴۹ دلار است. نتایج جدول نشان می‌دهد که استراتژی پیشنهادی به طور قابل توجهی انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال را بهبود می‌بخشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مطالعه موردی دوم از نظر انرژی تأمین نشده، انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص عملکرد استقلال عملکرد بهتری نسبت به مطالعه موردی ۱ دارد.

جدول ۳ نتایج برای مطالعات موردی

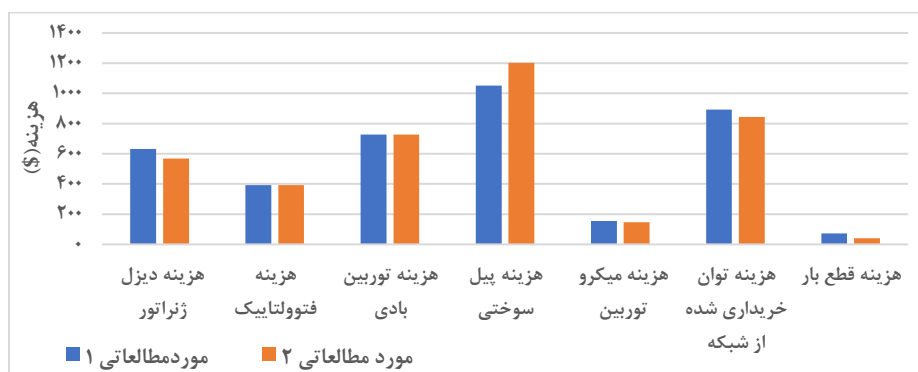
مطالعه موردی	هزینه کل (\$) (KWh)	میزان انرژی تأمین نشده (KWh)	شاخص استقلال (%)	میزان کل انتشار آلودگی (kg/kWh)
مورد ۱	۳۹۲۰،۴۹	۳۶،۳۹	۵۵	۰،۴۹۳
مورد ۲	۳۹۲۰،۴۹	۲۰،۴۷	۵۹	۰،۴۶۵

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است انرژی تأمین نشده را از ۳۶،۳۹ کیلو وات‌ساعت به ۲۰،۴۷ کیلو وات‌ساعت کاهش دهد. به عبارت دیگر، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند انرژی تأمین نشده را به میزان ۴۴٪ کاهش دهد. همچنین با وجود ثابت ماندن هزینه کل اما میزان استقلال سیستم ریزشبهه چندگانه‌ای در مورد مطالعاتی ۲ می‌تواند از ۵۵٪ به ۵۹٪ برسد. همچنین مدل پیشنهادی نسبت به حالت پایه آلودگی زیست محیطی کمتری دارد. دلایل متعددی برای بهبود انتشار آلودگی وجود دارد. اولاً، تولید محلی در مدل پیشنهادی بیشتر از مورد مطالعاتی ۱ است زیرا بهره‌بردار سعی می‌کند شاخص عملکرد استقلال سیستم ریزشبهه چندگانه را به حداکثر برساند. از آنجاکه منابع محلی دارای ضرایب انتشار پایین‌تری هستند، مدل پیشنهادی انتشار آلودگی را کاهش می‌دهد. دوم، تبادل توان با شبکه اصلی در مورد مطالعاتی ۲ کمتر از مورد مطالعاتی ۱ است، بنابراین انرژی کمتری توسط نیروگاه‌های بزرگ متمرکز تولید می‌شود.



شکل ۸ میزان تبادل توان با شبکه اصلی.

در مورد مطالعاتی ۲، توان وارداتی از شبکه اصلی کمتر از مورد مطالعاتی ۱ است. به عبارت دیگر، با اجرای مدل دو مرحله‌ای، بهره‌بردار انرژی مورد نیاز خود را از منابع محلی تأمین می‌کند تا شاخص عملکرد استقلال افزایش یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که بیشترین توان موجود از شبکه اصلی در ساعات ۱-۲ و ۱۱ الی ۲۴ خریداری می‌شود، زمانی که بارها بیشتر از سایر زمان‌ها هستند. هزینه‌های مختلف سیستم ریزشبکه چندگانه به طور دقیق در شکل ۹ نشان داده شده است.

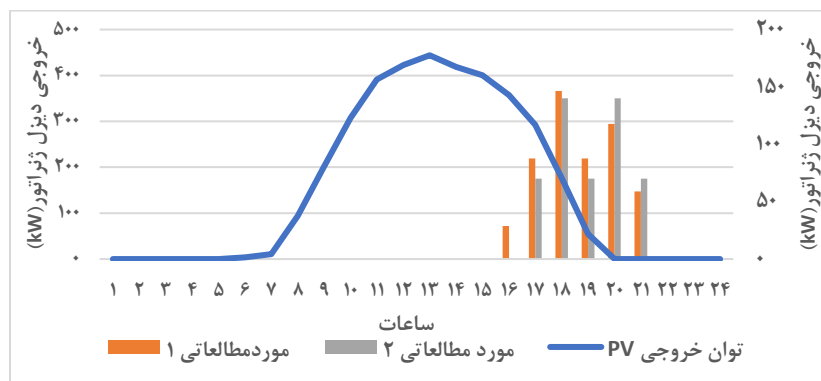


شکل ۹ هزینه‌های مختلف سیستم ریزشبکه چندگانه در مطالعات موردی.

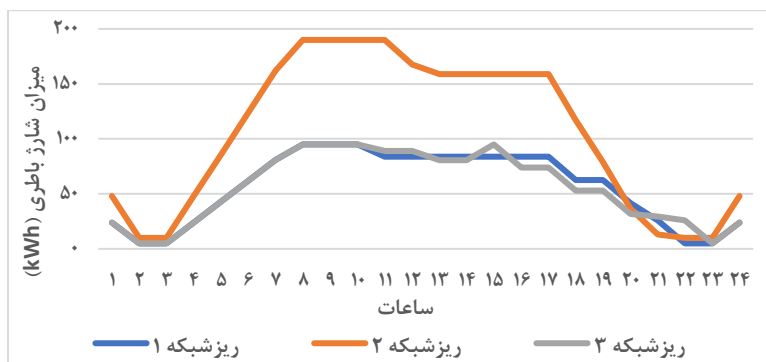
مشاهده می‌شود که هزینه قطع بار در مورد مطالعاتی اول بیشتر از مورد مطالعاتی دوم است، زیرا انرژی تأمین نشده در بهینه‌سازی دو مرحله‌ای کاهش یافته است. در واقع، بهره‌بردار ترجیح می‌دهد انرژی را از واحدهای گران‌تر تولید کند تا بار را قطع کند. همچنین، هزینه واردات توان از شبکه اصلی در مدل پیشنهادی کاهش یافته است زیرا سیستم ریزشبکه چندگانه بارهای مورد نیاز خود را توسط منابع محلی تأمین می‌کند.

توان خروجی ژنراتورهای دیزلی و پنل‌های خورشیدی برای سیستم ریزشبکه چندگانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۰، در مورد مطالعاتی دوم، ژنراتورهای دیزلی در ساعات ۱۵ تا ۲۱ بیشتر از حالت مورد مطالعاتی اول انرژی تولید می‌کنند؛ بنابراین، انرژی تأمین نشده در مورد مطالعاتی دوم کاهش یافته و به ۲۰،۴۷ کیلووات ساعت می‌رسد. علاوه بر این، با توجه به قیمت بالای تولید

انرژی از این واحدها، بهره‌بردار در دوره اوج بار، ژنراتورهای دیزلی را روشن می‌کند. وضعیت شارژ ذخیره‌سازی انرژی باتری در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. طبق شکل ۱۱ که مربوط به مورد مطالعاتی دوم است، ذخیره‌سازی انرژی باتری‌ها در دوره غیراوج به طور کامل شارژ شده و در زمان‌هایی که قیمت برق بالا است، در دوره اوج بار تخلیه می‌شود.



شکل ۱۰ توان تولیدی ژنراتورهای دیزلی و پنل‌های خورشیدی در دو مورد مطالعاتی



شکل ۱۲. وضعیت شارژ باتری‌ها در مورد مطالعاتی دوم

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی سیستم ریزشبه چندگانه پیشنهاد شده است. ریزشبه‌ها به هم متصل هستند و می‌توانند انرژی را در یک محیط مشترک تبادل کنند. مدل پیشنهادی، هزینه کل، استقلال و انرژی تأمین نشده سیستم ریزشبه چندگانه را در نظر می‌گیرد و یک چارچوب ترکیبی از بهینه‌سازی چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمعیاره را ارائه می‌دهد. استراتژی پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی استاندارد آزمایش شده و نتایج شبیه‌سازی با یک مطالعه موردی عمومی مقایسه شده است. بر اساس ترجیحات بهره‌بردار، بهترین راه‌حل از میان جبهه پارتو با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی و روش تاپسیس انتخاب می‌شود. مدل پیشنهادی از نظر کارایی محاسباتی بالا، سادگی، فرم ریاضی ساده برخوردار است و می‌تواند به راحتی برای هر سیستم و اهداف غیرهمگن استفاده شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی مزایای زیر را داراست: اولاً مدل پیشنهادی قادر است انرژی تأمین نشده را تا ۴۳ درصد کاهش دهد؛ ثانیاً مدل پیشنهادی می‌تواند استقلال سیستم ریزشبه

چندگانه می‌تواند از ۵۵ درصد به ۵۹ درصد افزایش یابد؛ ثالثاً مدل پیشنهادی قادر است انتشارات را تا ۶ درصد کاهش دهد؛ رابعاً مدل پیشنهادی یک حاشیه ایمن برای سیستم ریزشکه چندگانه فراهم می‌کند و هزینه را در حد بهینه نگه می‌دارد.

جدول ۴ فهرست متغیرها و پارامترها

$B_{p,q} & F_{p,q}^{Max}$	سوسپتانس و ظرفیت خط p,q	$k_m$	حداقل هزینه بهره‌برداری تولید پراکنده (\$)
$P_{m,t}^{FC} & P_{m,t}^{MT}$	توان خروجی پیل سوختی و میکروتوربین (kw)	$K_{O\&M}^{PV} & K_{O\&M}^{WT}$	ضرایب هزینه بهره‌برداری و تعمیرات پنل‌های فتوولتائیک و توربین بادی
$G_t^{Grid}$	قیمت گاز طبیعی $\$/m^3$	$K_{O\&M}^{DG}$	ضرایب هزینه بهره‌برداری و تعمیرات تولید پراکنده
$G^{CL}$	ضریب جریمه کاهش بار $\$/kwh$	$K_{O\&M}^{FC} & K_{O\&M}^{MT}$	ضرایب هزینه بهره‌برداری و تعمیرات میکروتوربین و پیل سوختی
$DT_m & IT_m & DR_m & IR_m$	حداقل زمان روشن و خاموش ماندن تولید پراکنده (h) و حداقل و حداکثر شیب تولید (kw)	$L_{ng}$	مقدار گرما گاز طبیعی ( $kwh/m^3$ )
$E_m$	ظرفیت باتری (kwh)	$P_{m,t}^B$	بار پایه ریزشکه (kw)
$I_{t,s} & T_t^{out}$	تابش خورشید ( $kw/m^2$ ) و دمای هوا (c)	$P_{m,r}^{FC} & P_{m,r}^{MT}$	توان نام پیل سوختی و میکروتوربین (kw)
$\theta_{p,t}$	زاویه باس p ( $rad/s$ )	$P^{Gmax}$	حداکثر توان خریداری شده از شبکه بالا دست (kw)
$P_{m,r}^{WT}$	توان نامی توربین بادی (kw)	$P_m^{Min} & P_m^{Max}$	حداقل و حداکثر توان تولید پراکنده (kw)
$P_{m,t}^{Inflex}$	بار غیرانعطاف پذیر (kw)	$SOC_m^{Min} & SOC_m^{Max}$	حداقل و حداکثر حالت شارژ باتری (kw)
$P_m^{Ch} & P_m^{Disch}$	بیشینه توان شارژ و دشارژ باتری (kw)	$S_m^{PV}$	مساحت آرایه پنل‌های فتوولتائیک ( $m^2$ )
$P_{m,n}$	حد بالای n امین مرحله خطی‌سازی توان تولید پراکنده (kw)	$v_{co} & v_{ci}$	سرعت قطع بالا و پایین توربین بادی (m/s)
$v_r$	سرعت نامی توربین بادی (m/s)	$\cos t^{PV} & \cos t^{WT}$	هزینه کل پنل‌های فتوولتائیک و توربین بادی (\$)
$v_{t,s}$	سرعت توربین بادی (m/s)	$\cos t_{O\&M}^{PV} & \cos t_{O\&M}^{WT}$	هزینه بهره‌برداری و تعمیرات پنل‌های فتوولتائیک و توربین بادی (\$)
$\delta$	حداقل سرعت توربین بادی (m/s)	$\cos t^{FC} & \cos t^{MT}$	هزینه کل پیل سوختی و میکروتوربین (\$)
$\rho_s$	احتمال سناریو s	$\cos t_{fuel}^{FC} & \cos t_{O\&M}^{FC}$	هزینه بهره‌برداری و تعمیرات پیل سوختی و میکروتوربین (\$)
$\Delta T$	طول شکاف زمانی	$\cos t^{DG}$	هزینه کل تولید پراکنده (\$)
$\eta_m^{Ch} & \eta_m^{Disch}$	بازده شارژ و دشارژ باتری	$\cos t_{fuel,m}^{DG} & \cos t_{O\&M}^{DG}$	هزینه سوخت، بهره‌برداری و تعمیرات تولید پراکنده (\$)

$\pi_{m,n}$	تابع هزینه توان تولیدی خطی تولیدی پراکنده (\$/kwh)	$\text{Cost}^{CL}$	هزینه ازدست‌رفتن بار (\$)
$\text{Cost}^{Grid}$	هزینه خرید توان از شبکه بالا دست (\$)	$P_{m,t}^{PV} \& P_{m,t}^{WT}$	توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک و توربین بادی (kw)
$DR_{m,t}$	ضریب مشارکت بار در برنامه پاسخ‌گویی بار (%)	$P_{m,t}^{CL}$	بار ازدست‌رفته ریزش‌بکه (kw)
$I_{m,t} \& V_{m,t} \& Y_{m,t}$	شاخص وضعیت تولید، استارت و خاموشی تولید پراکنده	$P_{m,t}^{Ch} \& P_{m,t}^{Disch}$	توان شارژ و دشارژ باتری (kw)
$IPI^{MMG}$	شاخص استقلال سیستم ریزش‌بکه چندگانه (/.)	$P_{m,t}^{Flex}$	توان انعطاف‌پذیر ریزش‌بکه (kw)
$ldr_{m,t}$	میزان جابه‌جایی بار (kw)	$P_{m,t}^{DG}$	توان خروجی تولید پراکنده (kw)
$P_t^{Grid}$	توان شبکه بالا دست (kw)	$P_{m,n,t}$	توان طراحی شده برای تولید پراکنده در مرحله n ام (kw)
$P_{m,t}^{Load}$	بار کل ریزش‌بکه (kw)	$SOC_{m,t}$	حالت شارژ باتری m (kwh)
$X_{m,t}^{Ch} \& X_{m,t}^{Disch}$	متغیرهای باینری حالت شارژ و دشارژ باتری	$\eta_{m,t}^{FC} \& \eta_{m,t}^{MT}$	بازده پیل سوختی و میکروتوربین

مراجع:

- [۱] Yang, Qixiong, Zhenqiu Li, Yu Chen, Ying Zhu, and Qing Dou. "An investment efficiency evaluation model for distribution network with distributed renewable energy resources." *Frontiers in Energy Research* ۱۰ (۲۰۲۲): ۹۳۱-۹۸۶.
- [۲] Gayo-Abeleira, Miguel, Carlos Santos, Francisco Javier Rodríguez Sánchez, Pedro Martín, José Antonio Jiménez, and Enrique Santiso. "Aperiodic two-layer energy management system for community microgrids based on blockchain strategy." *Applied Energy* ۳۲۴ (۲۰۲۲): ۱۱۹۸-۱۲۰۷.
- [۳] Shabanian-Poodeh, Mostafa, Rahmat-Allah Hooshmand, and Yahya Kabiri-Renani. "Probabilistic co-expansion planning for natural gas and electricity energy systems with wind curtailment mitigation considering uncertainties." *IET Generation, Transmission & Distribution* ۱۸, no. ۲۰ (۲۰۲۴): ۳۲۳۴-۳۲۴۶.
- [۴] Yu, Shiwei, Limin You, and Shuangshuang Zhou. "A review of optimization modeling and solution methods in renewable energy systems." *Frontiers of Engineering Management* ۱۰, no. ۴ (۲۰۲۳): ۶۴۰-۶۷۱.
- [۵] Louassaa, Khalil, Josep M. Guerrero, Mahdi Boukerdja, Aissa Chouder, Baseem Khan, Abdelhafid Cherifi, and Muhammad Zain Yousof. "A novel hierarchical control strategy for enhancing stability of a DC microgrid feeding a constant power load." *Scientific Reports* ۱۵, no. ۱ (۲۰۲۵): ۷۰۶۱.
- [۶] M. Uddin, M.F. Romlie, M.F. Abdullah, C.K. Tan, G.M. Shafiullah, A.H.A. Bakar, A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system, *Energy* ۱۹۶ (۲۰۲۰), ۱۱۷۰-۱۱۸۴.

[۷] Buchibabu, Prathikantham, and Jarupula Somlal. "Green energy management in DC microgrids enhanced with robust model predictive control and muddled tuna swarm MPPT." *Electrical Engineering* ۱۰۶, no. ۳ (۲۰۲۴): ۲۷۹۹-۲۸۱۹.

[۸] Daneshvar, Mohammadreza, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "An innovative transactive energy architecture for community microgrids in modern multi-carrier energy networks: A Chicago case study." *Scientific Reports* ۱۳, no. ۱ (۲۰۲۳): ۱۵۲۹.

[۹] Abdelghany, Muhammad Bakr, Ahmed Al-Durra, Hatem Zeineldin, and Jiefeng Hu. "Integration of cascaded coordinated rolling horizon control for output power smoothing in islanded wind-solar microgrid with multiple hydrogen storage tanks." *Energy* ۲۹۱, no. C (۲۰۲۴).

[۱۰] Zeng, Bing, Yifan Wang, Yu Zhou, Xiaopin Yang, and Yunmin Xie. "Multi-objective Optimal Configuration of Isolated Micro-grid with Wind/Photovoltaic/Battery/Diesel." In *Annual Conference of China Electrotechnical Society*, pp. ۳۲۰-۳۲۷. Singapore: Springer Nature Singapore, ۲۰۲۳.

[۱۱] Darshi, Raziq, Saeed Shamaghdari, Aliakbar Jalali, and Hamidreza Arasteh. "Decentralized reinforcement learning approach for microgrid energy management in stochastic environment." *International Transactions on Electrical Energy Systems* ۲۰۲۳, no. ۱ (۲۰۲۳): ۱۱۹۰۱۰۳.

[۱۲] Wang, Yeqin, et al. "Multi-strategy reference vector guided evolutionary algorithm and its application in multi-objective optimal scheduling of microgrid systems containing electric vehicles." *Journal of Energy Storage* ۹۰ (۲۰۲۴): ۱۱۲۵۰۰.

[۱۳] Karimi, Hamid, and Shahram Jadid. "A collaborative hierarchal optimization framework for sustainable multi-microgrid systems considering generation and demand-side flexibilities." *Sustainable Energy, Grids and Networks* ۳۰ (۲۰۲۳): ۱۰۱۰۸۷.

[۱۴] Osman, Sally R., Bishoy E. Sedhom, and Sahar S. Kaddah. "Optimal resilient microgrids formation based on darts game theory approach and emergency demand response program for cyber-physical distribution networks considering natural disasters." *Process Safety and Environmental Protection* ۱۷۳ (۲۰۲۳): ۸۹۳-۹۲۱.

[۱۵] Daneshvar, Mohammadreza, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "A fair risk-averse stochastic transactive energy model for ۱۰۰% renewable multi-microgrids in the modern power and gas incorporated network." *IEEE Transactions on Smart Grid* ۱۴, no. ۳ (۲۰۲۲): ۱۹۳۳-۱۹۴۰.

[۱۶] Alhasnawi, Bilal Naji, Basil H. Jasim, Zain-Aldeen SA Rahman, Josep M. Guerrero, and M. Dolores Esteban. "A novel internet of energy based optimal multi-agent control scheme for microgrid including renewable energy resources." *International Journal of Environmental Research and Public Health* ۱۸, no. ۱۰ (۲۰۲۱): ۸۱۴۶.

[۱۷] Ghadimi, Maryam, and Seyed-Masoud Moghaddas-Tafreshi. "A decentralized operating model for a multi-microgrid system including private microgrids by using an auction-based day-ahead market framework." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* ۱۴۴ (۲۰۲۳): ۱۰۸۵۴۷.

[۱۸] Khan, Muhammad Raheel, Zunaib Maqsood Haider, Farhan Hameed Malik, Fahad M. Almasoudi, Khaled Saleem S. Alatawi, and Muhammad Shoaib Bhutta. "A comprehensive review of microgrid energy management strategies considering electric vehicles, energy storage systems, and AI techniques." *Processes* ۱۲, no. ۲ (۲۰۲۴): ۲۷۰.

[۱۹] Wenzhi, Sun, Huijuan Zhang, Ming-Lang Tseng, Zhang Weipeng, and Li Xinyang. "Hierarchical energy optimization management of active distribution network with multi-microgrid system." *Journal of Industrial and Production Engineering* ۳۹, no. ۳ (۲۰۲۲): ۲۱۰-۲۲۹.

[۲۰] Javidsharifi, Mahshid, Hamoun Pourroshanfekr Arabani, Tamas Kerekes, Dezso Sera, and Josep M. Guerrero. "Stochastic optimal strategy for power management in interconnected multi-microgrid systems." *Electronics* ۱۱, no. ۹ (۲۰۲۲): ۱۴۲۴.

[۲۱] Daneshvar, Mohammadreza, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "A fair risk-averse stochastic transactive energy model for ۱۰۰% renewable multi-microgrids in the modern power and gas incorporated network." *IEEE Transactions on Smart Grid* ۱۴, no. ۳ (۲۰۲۲): ۱۹۳۳-۱۹۴۵.

[۲۲] Sabzalian, Mohammad Hosein, Sasan Pirouzi, Mauricio Aredes, Bruno Wanderley Franca, and Ana Carolina Cunha. "Two-layer coordinated energy management method in the smart distribution network including multi-microgrid based on the hybrid flexible and securable operation strategy." *International Transactions on Electrical Energy Systems* ۲۰۲۲, no. ۱ (۲۰۲۲): ۳۳۷۸۵۳۸.

[۲۳] Mohamed, Mohamed A., Ali Hajjiah, Khalid Abdulaziz Alnowibet, Adel Fahad Alrasheedi, Emad Mahrous Awwad, and S. M. Muyeen. "A secured advanced management architecture in peer-to-peer energy trading for multi-microgrid in the stochastic environment." *IEEE access* ۹ (۲۰۲۱): ۹۲۰۸۳-۹۲۱۰۰.

[۲۴] Tang, Jincheng, and Xiaolan Li. "Two-Stage Dual-Level Dispatch Optimization Model for Multiple Virtual Power Plants with Electric Vehicles and Demand Response Based on a Stackelberg Game." *Energies* ۱۸, no. ۴ (۲۰۲۵): ۸۹۶.

[۲۵] Bidgoli, Mahdich Monemi, and Milad Asadi. "Management of Renewable Energy Resources and Demand Response in Electricity Retailers with the Presence of Water Systems." In *2025 12th Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation (ICREDG)*, pp. ۱-۸. IEEE, ۲۰۲۵.

[۲۶] Miri, Mohammad, and Madeleine McPherson. "Demand response programs: Comparing price signals and direct load control." *Energy* ۲۸۸ (۲۰۲۴): ۱۲۹۶۷۳.

[۲۷] L. Luo, S.S. Abdulkareem, A. Rezvani, M.R. Miveh, S. Samad, N. Aljojo, M. Pazhoohesh, Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty, *J. Energy Storage* ۲۸ (۲۰۲۰), ۱۰۱۳۰۶.

[۲۸] Gilasi, Yasin, Seyed Hamid Hosseini, and Hossein Ranjbar. "Resilience-oriented planning and management of battery storage systems in distribution networks." *IET Renewable Power Generation* ۱۷, no. ۱۰ (۲۰۲۳): ۲۵۷۵-۲۵۹۱.

[۲۹] Monemi Bidgoli, M. (۲۰۲۴). Optimal Energy Management of Water-Energy Nexus in Multi-Carrier Systems Integrated with Renewable Sources. *Power, Control, and Data Processing Systems, I(۱)*.

[۳۰] Wu, Jiaxin, In-Bum Chung, Zheng Liu, and Pingfeng Wang. "Co-design optimization of combined heat and power-based microgrids." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* ۱۵, no. ۵ (۲۰۲۳).

[۳۱] Li, Jianying, Minsheng Yang, Yuexing Zhang, Jianqi Li, and Jianquan Lu. "Micro-grid day-ahead stochastic optimal dispatch considering multiple demand response and electric vehicles." *Energies* ۱۶, no. ۸ (۲۰۲۳): ۳۳۵۶.

[۳۲] Bidgoli, M. M., Karimi, H., Jadid, S., & Anvari-Moghaddam, A. (۲۰۲۱). Stochastic electrical and thermal energy management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy: A prioritized multi-objective framework. *Electric Power Systems Research*, 196, ۱۰۷۱۸۳.

[۳۳] Li, Jianying, Minsheng Yang, Yuexing Zhang, Jianqi Li, and Jianquan Lu. "Micro-grid day-ahead stochastic optimal dispatch considering multiple demand response and electric vehicles." *Energies* ۱۶, no. ۸ (۲۰۲۳): ۳۳۵۶.

[۳۴] Feng, Fei, Xin Du, Qiang Si, and Hao Cai. "Operation optimization of distributed multi-energy multi-microgrid considering system robustness." *Energy Exploration & Exploitation* ۴۱, no. ۳ (۲۰۲۳): ۱۰۸۵-۱۱۰۶.

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»  
دوره ۲۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۶۷-۸۷

[۳۵] Bidgoli, Mahdiah Monemi, Mahdi Azimian, Vahid Amir, Mehdi Zarrati, Saeid Javadi, Soheil Mohseni, and Alan C. Brent. "Multi-criteria dispatch optimization of a community energy network with desalination: Insights for trading off cost and security of supply." *Heliyon* ۹, no. ۱۰ (۲۰۲۳).

[۳۶] Karimi, Hamid, Mahdiah Monemi Bidgoli, and Shahram Jadid. "Optimal electrical, heating, cooling, and water management of integrated multi-energy systems considering demand-side management." *Electric Power Systems Research* ۲۲۰ (۲۰۲۳): ۱۰۹۳۰۳.