نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۶۷-۸۷

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

مهدیه منعمی بیدگلی[۱] ،محمد مهدی داوری[۳۲] *

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

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳ / ۱۲ / ۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴ / ۰۴ / ۲۸

کلمات کلیدی:
ریزشبکه چندگانه، شاخص استقلال سیستم، بهینه سازی تصادفی، شاخص انرژی تامین نشده

چکیده

این مقاله یک استراتژی همکاری برای مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه ارائه می‌دهد. استراتژی پیشنهادی، هزینه روزانه سیستم، انرژی تأمین نشده و استقلال ریزشبکه‌ها را در نظر می‌گیرد تا بهترین برنامه‌ریزی برای ریزشبکه‌ها انجام شود. بهره‌بردار ریزشبکه‌ها برای اولویت‌بندی اهداف خود را به اهداف اصلی و ثانویه تقسیم می‌کند. از آنجا که هزینه کل ریزشبکه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است. با این حال، انرژی تأمین نشده و استقلال ریزشبکه‌ها به‌عنوان اهداف ثانویه در نظر گرفته می‌شوند که قادر به بهینه‌سازی در یک فضای محدود هستند. این استراتژی همکاری به ریزشبکه‌ها 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 ریز شبکه چندگانه آزمایش شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی میزان انرژی تأمین نشده، تلفات و استقلال سیستم را بهبود می‌بخشد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۱. مقدمه:

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 توزیع‌شده شامل منابع کوچک‌مقیاس یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند که انرژی را در نزدیکی مصرف‌کنندگان تولید می‌کنند [۳،۴]. ریزشبکه‌ها شبکه‌های توزیع الکتریکی هستند که شامل بارها و منابع مختلف، مانند منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع انرژی قابل‌تنظیم می‌شوند و می‌توانند در دو حالت متصل به شبکه یا جزیره‌ای عمل کنند [۵] .

چندین پژوهش به مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها پرداخته‌اند. در مرجع [۶] از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای ارائه یک تکنیک جدید پیک‌سایی در یک ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه تحت بازار برق روز پیشرو مطالعه شده است، اما انرژی تأمین نشده و استقلال ریزشبکه در نظر گرفته نشده‌اند. در مرجع [۹] یک طرح مدیریت انرژی دو لایه برای کاهش هزینه کل روزانه یک ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 قابل‌تنظیم 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه از شبکه بالادست بررسی نشده است.

تعامل میان ریزشبکه‌ها مفهومی جدید به نام ریزشبکه‌های چندگانه ایجاد می‌کند که انرژی تبادلی میان ریزشبکه‌ها را بررسی می‌کند. در [۱۳] چارچوب بهینه‌سازی برای مدل‌سازی تعامل میان ریزشبکه‌های 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 ریزشبکه‌های 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 ریزشبکه‌ها و بهره‌بردار شبکه توزیع پیشنهاد شده است، اما مدل ارائه شده نقش برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را برای ریزشبکه‌ها بررسی نمی‌کند.

در [۱۶] تأثیر نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در مدیریت انرژی سیستم ریزشبکه‌های 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 ریزشبکه‌های چندگانه ارائه شده است، اما همچنان قابلیت اطمینان و استقلال ریزشبکه‌ها در نظر گرفته نشده است. در [۱۸] یک چارچوب چندهدفه برای شرایط بهینه و پیشامدی ریزشبکه‌های متصل ارائه شده است. اگرچه این مقاله سود ریزشبکه، انحراف ولتاژ و بارهای تأمین‌شده را به‌عنوان اهداف در نظر گرفته است، اما قابلیت اطمینان و استقلال سیستم نادیده گرفته شده است. در [۱۹] برخلاف مرجع [۱۵]، برای مدل‌سازی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

تعامل بهره‌بردار شبکه توزیع و ریزشبکه‌ها از بهینه‌سازی دو سطحی استفاده شده است. در این مدل بهره‌بردار سیستم ریزشبکه 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 ریزشبکه چندگانه ایزوله با در نظر گرفتن سیستم ذخیره انرژی و یک برنامه پاسخ گویی بار مرحله‌ای مطالعه شده است. نویسندگان قیمت‌گذاری تبادل توان را برای کنترل انرژی تبادلی میان ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها در شرایط عادی مورد بررسی قرار گرفت، در حالی که در مرحله دوم برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم ریزشبکه چندگانه در شرایط اضطراری مطالعه شده است. با این حال، با اینکه انرژی تأمین نشده در سیستم ریزشبکه چندگانه مورد توجه قرار گرفته است، استقلال ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها بوده است. با این حال، بسیاری از این تحقیقات به ابعاد وابستگی ریزشبکه‌ها به شبکه بالادستی و استقلال آن‌ها از شبکه اصلی توجه نکرده‌اند. این در حالی است که استقلال ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها، شکاف‌های موجود در تحقیقات قبلی را پر می‌کند. در این استراتژی، بهره‌بردار سیستم ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ها و مدیریت تعاملات میان ریزشبکه‌ها 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 نه‌تنها 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 ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

این نوآوری‌ها به ارتقا استقلال ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه‌ها 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 به‌صورت دقیق توضیح داده شده است.

۱،۲. تابع هدف اصلی

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، اهداف سیستم ریزشبکه چندگانه توسط بهره‌بردار اولویت‌بندی می‌شوند. هزینه کل سیستم ریزشبکه چندگانه به‌عنوان تابع هدف اصلی در مرحله اول بهینه‌سازی کمینه می‌شود. هزینه کل سیستم ریزشبکه چندگانه به‌صورت روابط (۱) تا (۱۰) بیان شده است. معادله (۱) هزینه کل سیستم ریزشبکه 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 [۴] 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.

$$Cost^{Total} = Cost^{PV} + Cost^{WT} + Cost^{FC} + Cost^{MT} + Cost^{DG} + Cost^{CL} + Cost^{Grid} \quad (۱)$$

$$Cost^{PV} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_{O\&M}^{PV}\right] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} K_{O\&M}^{PV} \times P_{m,t}^{PV} \quad (۲)$$

$$Cost^{WT} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_{O\&M}^{WT}\right] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} K_{O\&M}^{WT} P_{m,t}^{WT} \quad (۳)$$

$$Cost^{DG} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_{O\&M}^{DG} + Cost_{Fuel,m}^{DG}\right] \quad (۴)$$

$$Cost_{Fuel,m}^{DG} P_{m,t}^{DG} = k_m I_{m,t} + \Delta T \sum_{n=1}^{Nn} \pi_{m,n} P_{m,n,t} \quad (۵)$$

$$Cost_{O\&M}^{DG} = K_{O\&M}^{DG} P_{m,t}^{DG} \quad (۶)$$

$$Cost^{FC} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_{Fuel}^{FC} + Cost_{O\&M}^{FC}\right] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[\frac{C_{ng}}{L_{ng}} \times \frac{P_{m,t}^{FC}}{\eta_{m,t}^{FC}} + K_{O\&M}^{FC} P_{m,t}^{FC}\right] \quad (۷)$$

[۴] Fuel cell

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$Cost^{MT} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_{Fuel}^{MT} + Cost_{O\&M}^{MT}\right] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\left[\frac{C_{ng}}{L_{ng}} \times \frac{P_{m,t}^{MT}}{\eta_{m,t}^{MT}} + K_{O\&M}^{MT} P_{m,t}^{MT}\right] \quad (۸)$$

$$Cost^{CL} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} C^{CL} P_{m,t}^{CL} \quad (۹)$$

$$Cost^{Grid} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} \rho_s C_t^{Grid} P_t^{Grid} \quad (۱۰)$$

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.

$$IPI = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left|P_t^{Grid}\right|}{\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} P_{m,t}^{Load}} \quad (۱۱)$$

$$P_{m,t}^{Load} = P_{m,t}^{Flex} + P_{m,t}^{Inflex} - P_{m,t}^{CL} \quad (۱۲)$$

$$ENS = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} P_{m,t}^{CL} \quad (۱۳)$$

۳,۲. محدودیت‌های بهره‌برداری

پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل‌ژنراتورها به عنوان منابع انرژی قابل‌تنظیم شناخته می‌شوند که توان خروجی آن‌ها به سوخت ورودی بستگی دارد. محدودیت‌های بهره برداری از پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل‌ژنراتورها 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 دیزل‌ژنراتورها 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.

$$0 \le P_{m,t}^{FC} \le P_{m,r}^{FC} \quad (۱۴)$$

$$0 \le P_{m,t}^{MT} \le P_{m,r}^{MT} \quad (۱۵)$$

$$\eta_{m,t}^{FC} = 0.023 \times P_{m,t}^{FC} + 0.6735 \quad (۱۶)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$\eta_{m,t}^{MT} = 0.0753 \times (\frac{P_{m,t}^{MT}}{65})^3 - 0.3095 \times (\frac{P_{m,t}^{MT}}{65})^2 + 0.4147 \times (\frac{P_{m,t}^{MT}}{65}) + 0.1068 \quad (۱۷)$$

$$0 \le P_{m,n,t} \le P_{m,n} \quad (۱۸)$$

$$P_m^{Min} I_{m,t} \le P_{m,t}^{DG} \le P_{m,n} \quad (۱۹)$$

$$P_{m,t}^{DG} = P_m^{Min} I_{m,t} + \sum_{n=1}^{N} P_{m,n,t} \quad (۲۰)$$

$$SU_{m,t} = CU_m Y_{m,t} \quad (۲۱)$$

$$P_{m,t}^{DG} - P_{m,t-1}^{DG} \le IR_m \quad (۲۲)$$

$$P_{m,t-1}^{DG} - P_m^{DG} \le DR_m \quad (۲۳)$$

$$\sum_{h=1}^{t+DT_m-1} I_{m,h} \ge IT_m Y_{m,t} \quad (۲۴)$$

$$\sum_{h=1}^{t+DT_m-1} (1-I_{m,h}) \ge DT_m Y_{m,t} \quad (۲۵)$$

$$Y_{m,t} - V_{m,t} = I_{m,t} - I_{m,t-1} \quad (۲۶)$$

$$Y_{m,t} + V_{m,t} \le 1 \quad (۲۷)$$

توان خروجی پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی[۵] 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].

$$P_{m,t,s}^{PV} = \eta^{PV} S_m^{PV} I_{t,s} (1 - 0.005(T_t^{Out} - 25)) \quad (۲۸)$$

$$P_{m,t,s}^{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \le v_{t,s} \le v_{ci} \quad \text{or} \quad v_{co} \le v_{t,s} \\ P_{m,r}^{WT} \frac{v_{t,s}^2 - v_{ci}^2}{v_r^2 - v_{ci}^2}, & v_{ci} \le v_{t,s} \le v_r \\ P_{m,r}^{WT} & v_r \le v_{t,s} \le v_{co} \end{cases} \quad (۲۹)$$

$$P_{m,t}^{WT} = \sum_{s=1}^{S} \rho_s P_{m,t,s}^{WT} \quad (۳۰)$$

$$P_{m,t}^{pv} = \sum_{s=1}^{S} \rho_s P_{m,t,s}^{pv} \quad (۳۱)$$

[۵] wind turbine

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 به‌صورت 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] .

$$0 \le P_{m,t}^{Ch} \le X_{m,t}^{Ch} P_{m}^{Ch} \quad (۳۲)$$

$$0 \le P_{m,t}^{Disch} \le X_{m,t}^{Disch} P_{m}^{Disch} \quad (۳۳)$$

$$SOC_{m,t+1} = SOC_{m,t} + \Delta T\left(\frac{\eta_{m}^{Ch} P_{m,t}^{Ch}}{E_{m}} - \frac{P_{m,t}^{Disch}}{\eta_{m}^{Disch} E_{m}}\right) \quad (۳۴)$$

$$SOC_{m}^{Min} \le SOC_{m,t} \le SOC_{m}^{Max} \quad (۳۵)$$

$$X_{m,t}^{Ch} + X_{m,t}^{Disch} \le 1 \quad (۳۶)$$

$$SOC_{m,t1} = SOC_{m,t24} \quad (۳۷)$$

فرمول‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت در معادلات (۳۸) تا (۴۰) ارائه شده است. معادله (۳۸) مصرف انرژی هر ریزشبکه 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 ریزشبکه‌ها تنها می‌توانند بارهای خود را جابه‌جا کنند [۳۶].

$$P_{m,t}^{Flex} = P_{m,t}^{B}(1 - DR_{m,t}) + ldr_{m,t} \quad (۳۸)$$

$$DR_{m}^{Min} \le DR_{m,t} \le DR_{m}^{Max} \quad (۳۹)$$

$$\sum_{t=1}^{T} ldr_{m,t} = \sum_{t=1}^{T} P_{m,t}^{B} DR_{m,t} ; \forall m \in MI \quad (۴۰)$$

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.

$$P_{t}^{Grid} + \sum_{m=1}^{M}(P_{m,t}^{PV} + P_{m,t}^{WT} + P_{m,t}^{FC} + P_{m,t}^{DG} + P_{m,t}^{MT} + P_{m,t}^{Disch} + P_{m,t}^{CL}) = \sum_{m=1}^{M}(P_{m,t}^{Flex} + P_{m,t}^{Inflex} + P_{m,t}^{Ch}) + \sum_{p,q \in A_p} B_{p,q}(\theta_{p,t} - \theta_{q,t}) \quad (۴۱)$$

$$-F_{p,q}^{Max} \le B_{p,q}(\theta_{p,t} - \theta_{q,t}) \le F_{p,q}^{Max} \quad (۴۲)$$

$$-P^{G\,max} \le P_{t}^{Grid} \le P^{G\,max} \quad (۴۳)$$

$$0 \le P_{m,t}^{CL} \le P_{m,t}^{Inflex} \quad (۴۴)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۳. روش تولید و کاهش سناریو

با توجه به افزایش تولید منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم‌قطعیت‌های 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 μ و انحراف معیار δ سرعت باد به دست می‌آیند. توزیع احتمالی بتا و پارامترهای آن در معادله (۴۶) شرح داده شده است. در توزیع بتا، پارامترهای α و β به‌عنوان پارامترهای شکل (α,β≥۰) و Γ به‌عنوان تابع گاما معرفی می‌شوند [۳۲].

$$\mathrm{PDF(v)}=\frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1}\exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)\right)\quad ,k=\left(\frac{\delta}{\mu}\right)^{-1.086},c=\frac{\mu}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \tag{۴۵}$$

$$\mathrm{PDF(x)}=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}\quad ,\beta=(1-\mu)\left(\frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2}-1\right),\alpha=\frac{\mu\beta}{1-\mu} \tag{۴۶}$$

برای مدل‌سازی ماهیت نامشخص قیمت‌های بازار، از تابع توزیع نرمال استفاده شده است. معادله (۵۴) تابع توزیع نرمال را با استفاده از مقدار میانگین و انحراف معیار ارائه می‌دهد. پارامترهای μ و δ به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار تابع توزیع نرمال هستند، در حالی که واریانس این توزیع δ^2 است.

$$\mathrm{PDF(x)}=\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right) \tag{۴۷}$$

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:

$$\rho_{x,n_x}=\int_{x_{star},n_x}^{x_{end},n_x}\mathrm{PDF(x)dx},n_x=1,2,\ldots,N_x \tag{۴۸}$$

$$\chi_{x,n_x}=\frac{1}{\rho_{x,n_x}}\left(\int_{x_{sar},n_x}^{x_{end},n_x}x.\mathrm{PDF(x)dx}\right),n_x=1,2,\ldots,N_x \tag{۴۹}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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].

$$\text{Min f} = \sum_{n1=1}^{N1}\sum_{n2=1}^{N2}\sum_{n3=1}^{N3} W_{n1,n2,n3} \tag{۵۰}$$

$$\text{s.t}: \begin{cases} \rho_{1,n1} = \sum_{n2=1}^{N2}\sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1,n2,n3) \\ \rho_{1,n2} = \sum_{n1=1}^{N1}\sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1,n2,n3) \\ \rho_{1,n3} = \sum_{n1=1}^{N1}\sum_{n2=1}^{N2} \rho_s(n1,n2,n3) \\ \sum_{n1=1}^{N1}\sum_{n2=1}^{N2}\sum_{n3=1}^{N3} \rho_s(n1,n2,n3) = 1 \\ \rho_s(n2,n2,n3) \le W_{n1,n2,n3} \\ 0 \le \rho_s(n1,n2,n3) \le 1 \\ W_{n1,n2,n3} \in \{0,1\} \end{cases} \tag{۵۱}$$

۴. بهینه‌سازی چندهدفه دو مرحله‌ای

در این مقاله، از یک بهینه‌سازی چندهدفه دو مرحله‌ای مشارکتی برای مدیریت انرژی سیستم ریزشبکه چندگانه استفاده شده است. در مرحله اول، هزینه کل سیستم ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه چندگانه تعریف شود:

$$\begin{cases} MinCost = Min\left[Cost^{PV} + Cost^{WT} + Cost^{DG} + Cost^{FC} + Cost^{MT} + Cost^{CL} + Cost^{Grid}\right] \\ \text{S.t:Eqs. } \{(2)-(10),(14)-(44)\} \end{cases} \tag{۵۲}$$

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 ریزشبکه 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 ریزشبکه چندگانه بدون تغییر باقی می‌ماند؛ بنابراین، فرموله‌سازی مدل در مرحله دوم به صورت رابطه (۶۶) است:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$\begin{cases} \text{Optimize} \left\{ ENS, \left(1- \dfrac{\sum_{t=1}^{T} \left| P_t^{Grid} \right|}{\sum_{m=1}^{M} \sum_{t=1}^{T} P_{m,t}^{Lood}} \right) \right\} \\ S.t: \ \text{Eqs.} \{(2)-(10),(12),(14)-(44)\}, Cost \le \alpha \cdot Cost^* \end{cases} \quad (۵۳)$$

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

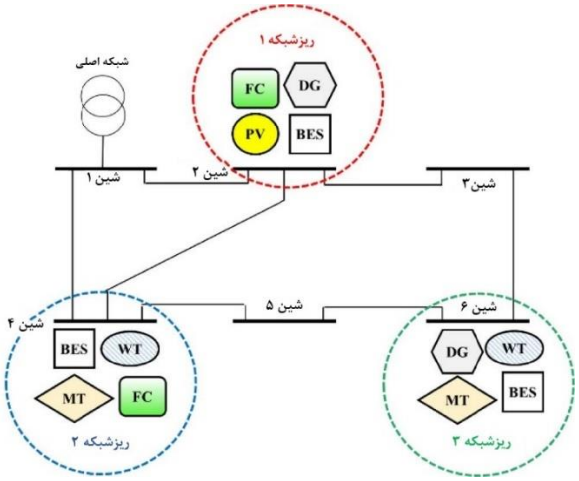


شکل ۱ الگوریتم روند حل مدل پیشنهادی

۵ .نتایج

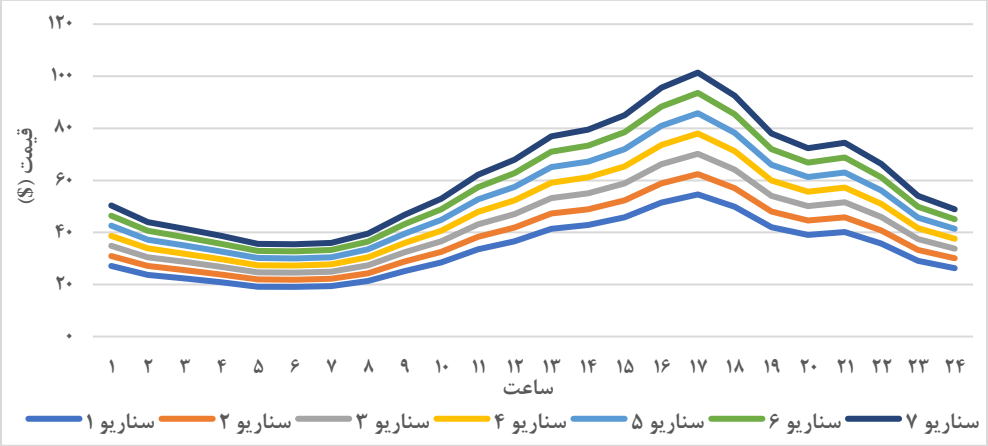
مدل پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی استاندارد شامل سه ریزشبکه آزمایش شده است. مکان و منابع محلی هر ریزشبکه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



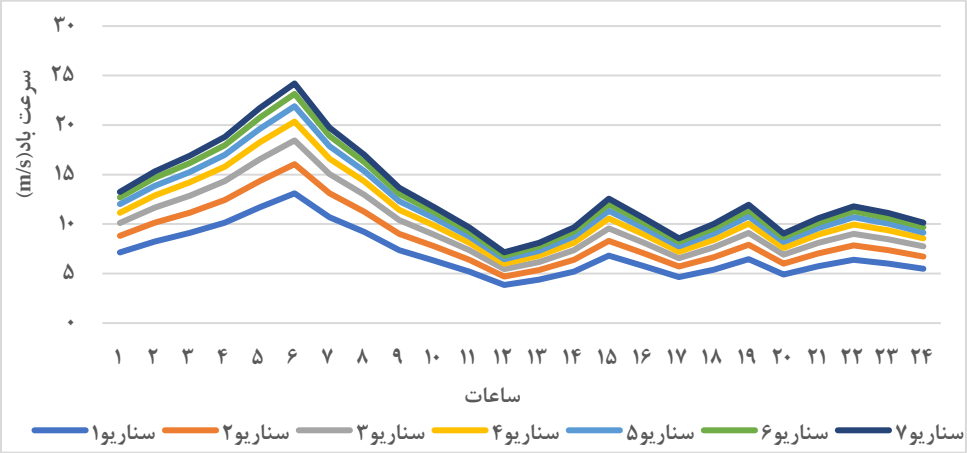
شکل ۲ شبکه استاندارد ۶ باس IEEE.

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

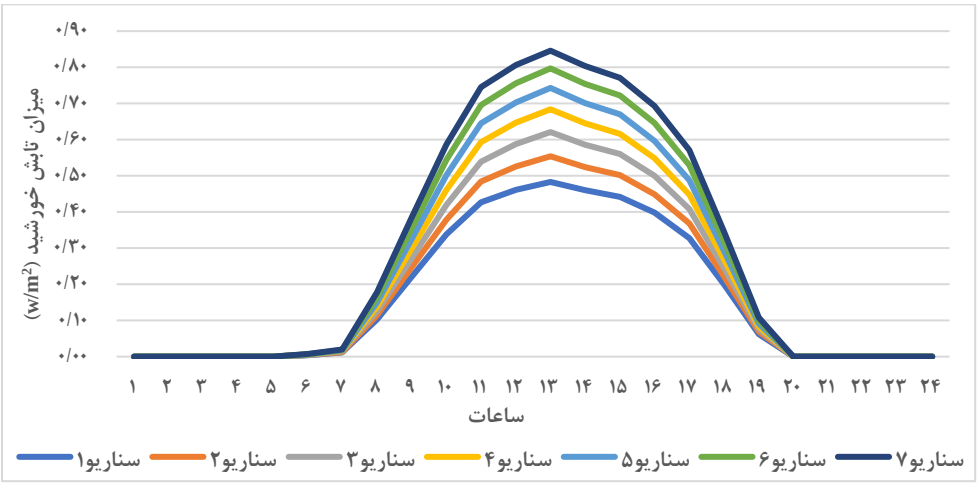


شکل ۳ سناریوهای قیمت شبکه.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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 پیش‌بینی‌شده انعطاف‌پذیر و غیرانعطاف‌پذیر سیستم ریزشبکه چندگانه‌ای بر اساس شکل‌های ۶ و ۷ هستند. حداکثر پاسخ‌گویی بار برای هر ریزشبکه ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است.

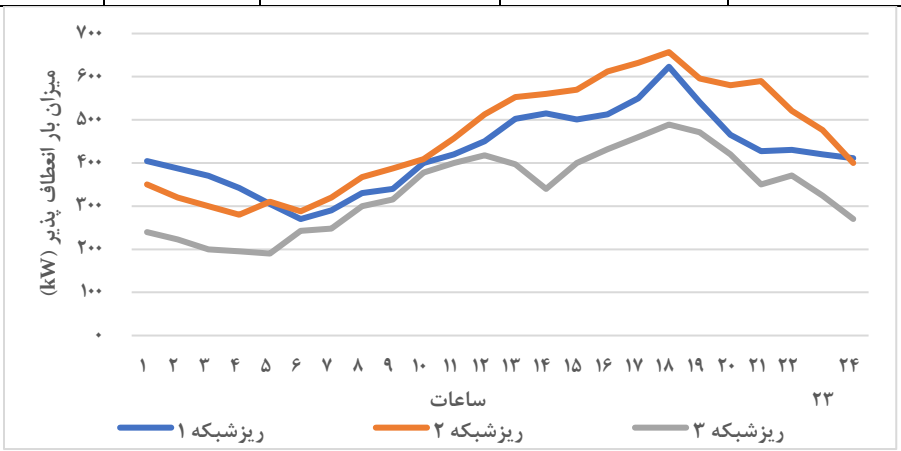
جدول ۱ ویژگی‌های ژنراتورهای دیزلی

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

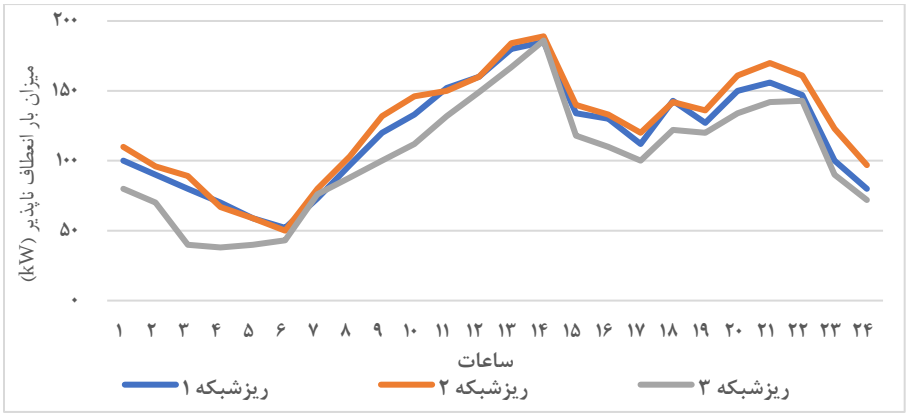
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

جدول ۲ ویژگی‌های ذخیره‌سازهای انرژی باتری.

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



شکل ۶ میزان بار انعطاف‌پذیر در سیستم ریزشبکه چندگانه.



شکل ۷ میزان بار انعطاف‌ناپذیر 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 ریزشبکه چندگانه بر اساس الگوریتم اولویت‌بندی پیشنهادی انجام می‌شود. در ابتدا، هزینه سیستم ریزشبکه 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 α در رابطه (۶۶) برابر با ۱ در نظر گرفته شده است تا اطمینان حاصل شود که هزینه سیستم ریزشبکه چندگانه در حالت بهینه باقی می‌ماند.

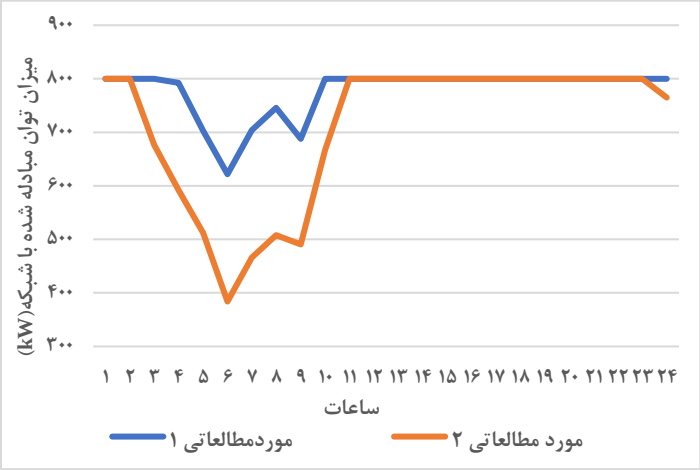
عملکرد مطالعات موردی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که هزینه بهینه سیستم ریزشبکه چندگانه برابر با ۳۹۲۰,۴۹ دلار است. نتایج جدول نشان می‌دهد که استراتژی پیشنهادی به طور قابل‌توجهی انرژی تأمین نشده و شاخص عملکرد استقلال را بهبود می‌بخشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مطالعه موردی دوم از نظر 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 ($)	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

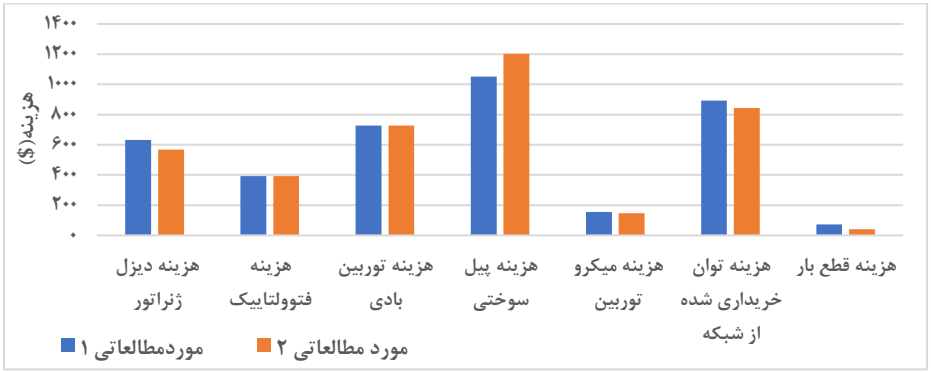
نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است انرژی تأمین نشده را از ۳۶,۳۹ کیلو وات‌ساعت به ۲۰,۴۷کیلو وات‌ساعت کاهش دهد. به عبارت دیگر، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند انرژی تأمین نشده را به میزان ۴۴٪ کاهش دهد. همچنین با وجود ثابت ماندن هزینه کل اما میزان استقلال سیستم ریزشبکه چندگانه‌ای در مورد مطالعاتی 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 ریزشبکه چندگانه را به حداکثر برساند. ازآنجاکه 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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.



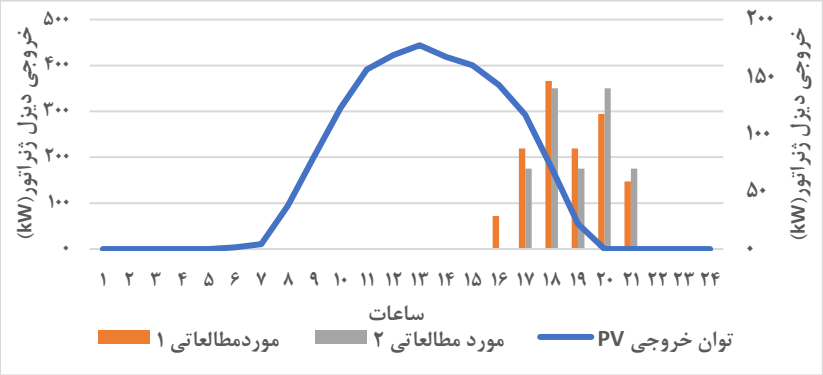
شکل ۹ هزینه‌های مختلف سیستم ریزشبکه چندگانه در مطالعات موردی.

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.

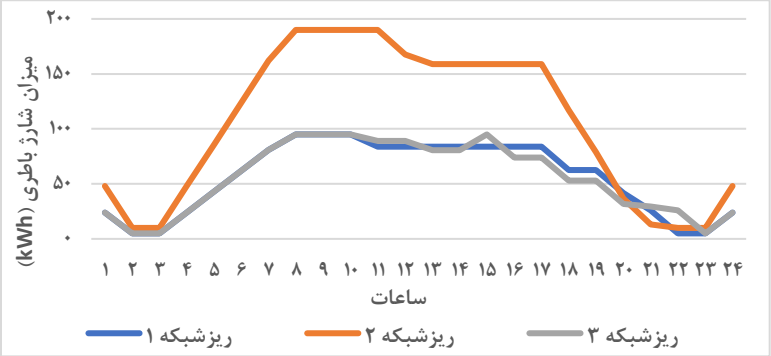
توان خروجی ژنراتورهای دیزلی و پنل‌های خورشیدی برای سیستم ریزشبکه چندگانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۰، در مورد مطالعاتی دوم، ژنراتورهای دیزلی در ساعات ۱۵ تا ۲۱ بیشتر از حالت مورد مطالعاتی اول انرژی تولید می‌کنند؛ بنابراین، انرژی تأمین نشده در مورد مطالعاتی دوم کاهش یافته و به ۲۰,۴۷کیلووات‌ساعت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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

انرژی از این واحدها، بهره‌بردار در دوره اوج بار، ژنراتورهای دیزلی را روشن می‌کند .وضعیت شارژ ذخیره‌سازی انرژی باتری در شکل ۱۱ نمایش‌داده‌شده 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 ریزشبکه چندگانه پیشنهاد شده است. ریزشبکه‌ها به هم متصل هستند و می‌توانند انرژی را در یک محیط مشترک تبادل کنند. مدل پیشنهادی، هزینه کل، استقلال و انرژی تأمین نشده سیستم ریزشبکه 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 ریزشبکه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 ریزشبکه چندگانه فراهم می‌کند و هزینه را در حد بهینه نگه می‌دارد.

جدول٤ فهرست متغیرها و پارامترها

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

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): ۹۳۱٤۸٦.

[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* ۳۲٤ (۲۰۲۲): ۱۱۹۸٤۷.

[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 (۲۰۲٤): ۳۲۳٤-۳۲٤٦.

[٤] 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. ٤ (۲۰۲۳): ٦٤۰-٦۷۱.

[٥] Louassaa, Khalil, Josep M. Guerrero, Mahdi Boukerdja, Aissa Chouder, Baseem Khan, Abdelhafid Cherifi, and Muhammad Zain Yousaf. "A novel hierarchical control strategy for enhancing stability of a DC microgrid feeding a constant power load." *Scientific Reports* ۱٥, no. ۱ (۲۰۲٥): ۷۰٦۱.

[٦] 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 ۱۹٦ (۲۰۲۰), ۱۱۷۰۸٤.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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* ۱۰٦, no. ۳ (۲۰۲٤): 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 (۲۰۲٤).

[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, Razieh, 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* ۹۵ (۲۰۲٤): 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* ۳۵ (۲۰۲۳): ۱۰۱۰۸۷.

[۱٤] 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* ۱٤, no. ۳ (۲۰۲۲): ۱۹۳۳-۱۹٤۵.

[۱٦] 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. ۱۵ (۲۰۲۱): ۸۱٤٦.

[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* ۱٤٤ (۲۰۲۳): ۱۰۸۵٤۷.

[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 (۲۰۲٤): 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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* ۱٤, no. ۳ (۲۰۲۲): ۱۹۳۳-۱۹٤٥.

[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): ۳۳۷۸٥۳۸.

[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.

[۲٤] 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. ٤ (۲۰۲٥): ۸۹٦.

[۲٥] Bidgoli, Mahdieh 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, ۲۰۲٥.

[۲٦] Miri, Mohammad, and Madeleine McPherson. "Demand response programs: Comparing price signals and direct load control." *Energy* ۲۸۸ (۲۰۲٤): ۱۲۹٦۷۳.

[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), ۱۰۱۳۰٦.

[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): ۲٥۷٥-۲٥۹۱.

[۲۹] Monemi Bidgoli, M. (۲۰۲٤). Optimal Energy Management of Water-Energy Nexus in Multi-Carrier Systems Integrated with Renewable Sources. *Power, Control, and Data Processing Systems*, *1*(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* ۱٥, no. ٥ (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* ۱٦, no. ۸ (۲۰۲۳): ۳۳٥٦.

[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* ۱٦, no. ۸ (۲۰۲۳): ۳۳٥٦.

[۳٤] Feng, Fei, Xin Du, Qiang Si, and Hao Cai. "Operation optimization of distributed multi-energy multi-microgrid considering system robustness." *Energy Exploration & Exploitation* ٤۱, no. ۳ (۲۰۲۳): ۱۰۸٥-۱۱۰٦.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[۳۵] Bidgoli, Mahdieh 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, Mahdieh 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): ۱۰۹۳۵۳.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]