

## ارائه طرح جامع مدیریتی بهره‌برداری از یک ریزشبكة چندگانه بر پایه ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی با رویکرد تئوری بازی

مهدی ابوالحسن بیگی<sup>۱</sup>، سودابه سلیمانی\*<sup>۲</sup>، سید بابک مظفری<sup>۳</sup>، رضاشریفی

۱- گروه برق، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران، Mahdibeigi79@gmail.com

\*۲- گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Soodabeh\_soleymani@yahoo.com

۳- گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mozafari@srbiau.ac.ir

۴- گروه برق، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Sharifi.r@wtiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

**چکیده:** در این مقاله، طرح جامع مدیریتی بهره‌برداری از یک ریزشبكة چندگانه برپایه ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی با تشکیل ائتلاف بین ریزشبكة‌ها با هدف افزایش سود بهره‌برداری ریزشبكة‌ها ارائه خواهد شد. مدل پیشنهادی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندسطحی با رویکرد تئوری بازی فرمول‌بندی می‌شود. در سطح محلی، مسئله بهینه‌سازی دوهدفی زیست محیطی، اقتصادی برای هر ریزشبكة که بر پایه تولیدات توزیع‌پذیر و منابع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند، ارائه شده است. از آنجایی که مسئله برنامه‌ریزی برای بارهای الکتریکی و گرمایی اعمال گردیده، لذا در طرح مورد نظر حامل‌های انرژی از قبیل انرژی برق و سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها در بهینه‌سازی لحاظ گردیده و با توجه به نفوذ تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت در توان خروجی در ریزشبكة، در ساختار پیشنهادی دو ابزار کاربردی جهت استفاده بهینه از این تجهیزات و افزایش سود بهره‌بردار ریزشبكة پیشنهاد می‌گردد، که ابزار اول استفاده بهینه از منابع ذخیره‌ساز انرژی و ابزار دوم بارهای پاسخگو و برنامه مدیریت این بارها در جهت نیل به اهداف بهره‌بردار ریزشبكة خواهد بود. در این تحقیق از الگوریتم اجماع ذرات و همچنین مدل‌سازی مبتنی بر نظریه بازی به منظور بهینه‌سازی استفاده شده است، شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار گمز انجام و نتایج آن با پیاده‌سازی فضای همکاری و تشکیل ائتلاف میان ریزشبكة‌ها و شبکه توزیع، هزینه‌های نهایی مجموعه را به میزان قابل توجهی کاهش داده است.

### واژه‌های کلیدی: ریزشبكة چندگانه، منابع تولید پراکنده، تئوری بازی، انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی چند سطحی

#### ۱- مقدمه

سیستم در مسئله، مدیریت انرژی ریزشبكة‌های چندگانه مسئله پیچیده‌ای بوده که باید راه حلی برای آن فراهم گردد. این موضوع هدف اصلی این تحقیق محسوب می‌شود.

مدیریت انرژی ریزشبكة‌های چندگانه موضوع اصلی مطالعات کاری متعدد در سال‌های اخیر است.

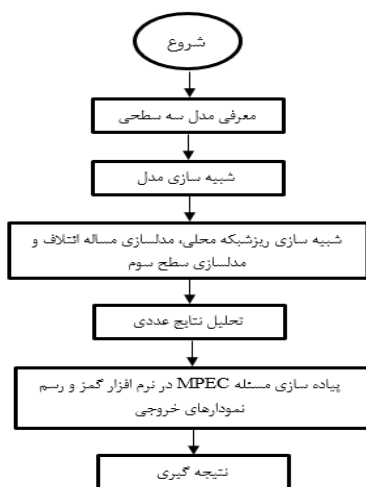
نویسندگان در [۲] یک متدولوژی دو سطحی تصادفی را برای عمل و راه‌اندازی یک طرح ریزشبكة‌های چندگانه پیشنهاد کرده‌اند. هدف از سطح اول به حداقل رساندن هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادستی است. در سطح دوم، شاخص‌های فنی برای امکان‌سنجی و کیفیت ترکیب‌های بهینه تعیین شده در سطح اول تعریف می‌شوند. در [۳] نظریه بازی برای برنامه‌ریزی عملیاتی شبکه توزیع با ریزشبكة‌های چندگانه استفاده می‌شود. در [۴]، استراتژی‌های بهینه‌سازی شده و

ریزشبكة‌ها یکی از مفاهیم جدید پیشنهاد شده در سیستم‌های قدرت بوده، که تأثیر قابل توجهی در افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر داشته‌اند [۱]. نوع مالکیت و نوع برنامه‌ریزی در ریزشبكة‌ها بر تصمیم‌گیری سنتی در سیستم‌های قدرت تأثیر داشته است. یکی از تصمیمات مهم در حضور ریزشبكة‌ها، مدیریت انرژی به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی است. مدیریت انرژی در حضور ریزشبكة‌های متعدد چالش‌هایی را برای تصمیم‌گیرندگان در این زمینه به وجود می‌آورد. از یک طرف اپراتورهای محلی به دنبال اهداف هر یک از ریزشبكة‌ها بوده و از سوی دیگر اپراتور مرکزی به دنبال تحقق اهداف کلی سیستم است. ضمناً با توجه به مزایای هر یک از ریزشبكة‌ها و همچنین کل

تعاملی برای مدیریت انرژی در ریزشبه‌های خوشه‌ای با در نظر گرفتن خواسته‌های انعطاف‌پذیر در [۲۲] ارائه شده است.

در این مقاله یک سیستم جدید مدیریت انرژی سه سطحی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای برنامه‌ریزی بهینه عملیات ریزشبه‌های چندگانه ارائه شده و در مدل پیشنهادی، اپراتورهای محلی ریزشبه‌ها به عنوان بازیگران اصلی بازی توانایی تصمیم‌گیری مستقل را خواهند داشت. در واقع هر اپراتور محلی می‌تواند نحوه کار منابع محلی در ریزشبه مربوطه را تعیین کند. از سوی دیگر اپراتور مرکزی علاوه بر کنترل مبادلات انرژی بین ریزشبه‌ها و شبکه بالادستی می‌تواند الزامات کلی سیستم را برآورده سازد. تعاملات بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی در روش مدیریت انرژی سه سطحی پیشنهادی مدل‌سازی شده است. به‌طور خلاصه نوآوری مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- مدل‌سازی چند هدفه ائتلاف برای مدیریت انرژی ریزشبه‌های چندگانه
- مدل‌سازی MPEC از تعاملات بازیکنان موجود در مساله بازی این تحقیق به صورت زیر سازماندهی شده است. مدل پیشنهادی در بخش ۲ ارائه و همچنین فرموله شده و در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی شرح داده شده و در نهایت نکات پایانی و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه می‌گردد. فلوجارت تحقیق بصورت شکل (۱) خواهد بود.



شکل (۱): روند تحقیق و شبیه سازی مدل پیشنهادی

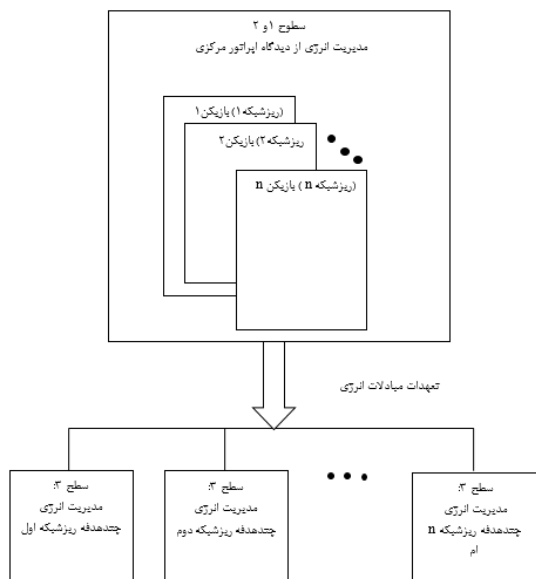
## ۲- معرفی مدل

### ۲-۱- ساختار مدل

مدل جدیدی برای برنامه‌ریزی بهینه عملیاتی یک ریزشبه چندگانه در این مقاله ارائه شده است. به منظور معرفی و نشان دادن قابلیت این مدل از ساختار سیستم نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شده است. بر اساس این شکل، هر ریزشبه شامل واحد تولید معمولی (CGU)، واحد تولید بادی، واحد تولید همزمان گرما و برق (CHP)، سیستم ذخیره-سازای انرژی (ESS)، بویلر (B)، بارهای ثابت (UL) و بارهای پاسخگو (RL) است.

هماهنگ برای مدیریت انرژی چند ریزشبه ارزیابی می‌شود. برای این کار یک شاخص احتمالات جدید برای تعیین موفقیت سناریوهای مدیریت انرژی برای به حداقل رساندن هزینه پیشنهاد شده است. یک روش بهینه‌سازی چند هدفه تعاونی برای مدیریت انرژی ریزشبه در [۵] ارائه شده است. در این اثر شاخص عملکرد استقلال برای ریزشبه‌ها پیشنهاد می‌شود تا تبادل انرژی با شبکه اصلی را مدیریت کنند. در [۶]، یک متدولوژی مدیریت انرژی اتفافی برای تعیین مشارکت بهینه ریزشبه‌های هوشمند در بازار برق ارائه شده که در این روش هزینه کل به حداقل می‌رسد و ظرفیت بهینه اجزای مختلف مشخص می‌گردد. یک متدولوژی یکپارچه مدیریت انرژی مبتنی بر زنجیره بلوکی در [۷] برای بهینه‌سازی جریان‌های انرژی با توجه به مکانیسم تجاری دوجانبه ارائه شده است. مدل جدید مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل نظارت کامل و وظایف سیستم اکتساب داده‌ها در [۸] ارائه شده است. کنترل زمان واقعی در [۹] برای مدیریت انرژی کارآمد از یک ریزشبه هیبریدی در مقیاس کوچک مبتنی بر باد، خورشیدی و باتری ارائه شده است. یک استراتژی بهینه مدیریت انرژی در [۱۰] برای یک ریزشبه DC پیشنهاد شده است. این استراتژی بر اساس الگوریتم ازدحام سالپ است. یک الگوریتم مدیریت انرژی کارآمد با استفاده از بهینه‌سازی توسعه یافته پرتو مانتا فورج در [۱۱] ارائه شده است. نویسندگان در [۱۲] از منطق فازی برای مدیریت انرژی یک ریزشبه استفاده کرده‌اند. روش پیشنهادی سود را بر اساس یک سیاست قیمت انرژی زمان استفاده به حداکثر می‌رساند. در [۱۳] یک استراتژی مدیریت انرژی تصادفی در یک ریزشبه با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر مورد خطاب قرار گرفته است. روش پیشنهادی بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه است و شامل کاهش هزینه و انتشار است. در [۱۴]، یک چارچوب یکپارچه برای ادغام یک برنامه جدید پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویق و روش پیکربندی مجدد در مشکل مدیریت انرژی ریزشبه در مقیاس زمانی روز ارائه شده است. در [۱۵]، یک متدولوژی زمانبندی ریزشبه‌های چند زمانی بهینه دو مرحله‌ای ارائه شده است. مراحل شامل روز پیش‌رو و درون روز است. یک نظریه بازی تعاونی در [۱۶] برای برنامه‌ریزی عملیات روز پیش‌رو سیستم‌های ریزشبه چندگانه پیشنهاد شده است. یک متدولوژی مدیریت انرژی در ریزشبه DC با مکانیزم جریان ولتاژ کارآمد در [۱۷] پیشنهاد شده است. یک استراتژی مدیریت قابلیت اطمینان احتمالاتی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبه‌های متصل/جزیره‌ای با انرژی تجدیدپذیر در [۱۸] ارائه شده است. در [۱۹]، یک مدیریت انرژی دو مرحله‌ای ریزشبه ترکیبی AC/DC با توجه به محدودیت‌های امنیتی فرکانس ارائه شده است. یک مدیریت انرژی مبتنی بر جریان قدرت ریزشبه‌های AC جزیره‌ای که از نظر سلسله مراتبی کنترل می‌شوند، در [۲۰] پیشنهاد شده است. در [۲۱] روش جدید مدیریت برای پیدا کردن بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبه متصل به شبکه ارائه شده است. این مسئله به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی مدلسازی شده و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل است. یک روش برنامه‌ریزی چندسطحی

عملیاتی ریزشکه‌ها) است. سطح بالایی و پایینی مسئله دو سطحی به ترتیب از دید اپراتور مرکزی و اپراتور محلی است. این مسئله به عنوان یک برنامه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی (MPEC) فرموله می‌شود، که در زیر بخش ۲-۲-۲ توضیح داده خواهد شد. مسئله سطح سوم یک مشکل تک سطحی است که با توجه به الزامات مبادلات بین ریزشکه‌ها به برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشکه‌های محلی می‌پردازد. در ادامه ابتدا فرمولاسیون عملیات ریزشکه‌های محلی ارائه می‌شود. پس از آن تدوین ائتلاف (سطح بالای مسئله) ارائه می‌شود. در نهایت روابط مربوط به سطح سوم مسئله توضیح داده خواهد شد.



شکل (۳): مدل سه سطحی پیشنهادی برای مدیریت انرژی ریزشکه‌های چندگانه

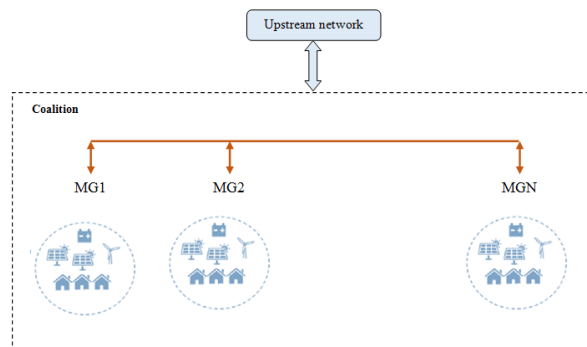
### ۱-۲-۲- شبیه‌سازی ریزشکه محلی

در مدل پیشنهادی هزینه عملیاتی و آلودگی آزاد شده در ریزشکه‌ها در تابع هدف در نظر گرفته شده است. بنابراین مسئله بهینه‌سازی شامل یک تابع چند هدفه است. تابع چند هدفه هر ریزشکه در ائتلاف به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\min \sum_{h=1}^{24} \left\{ \theta_1 \left( \frac{1}{CUC_m \times CUG_{mh}} + \frac{2}{CHPC_m \times CHPG_{mh}} + \frac{3}{BC_m \times BG_{mh}} + \frac{4}{SC_m^{ch} \times SP_{mh}^{ch} + SC_m^{dis} \times SP_{mh}^{dis}} + \frac{5}{DC_{m}^{DR} \times DP_{mh}^{DR}} + \frac{6}{\gamma_h \times (P_{mh}^{buy} - P_{mh}^{sell})} \right) + \theta_2 \left( \frac{7}{EM_{mh}^C + EM_{mh}^{CHP} + EM_{mh}^B} \right) \right\} \quad (1)$$

که در آن  $h$  و  $m$  به ترتیب شاخص زمان، روز و ریزشکه هستند. ضریب‌های  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به ترتیب ضریب‌های وزن‌دهی مربوط به هزینه عملیاتی و آلودگی هستند.

در مدل پیشنهادی در این مقاله، ریزشکه‌ها به عنوان بازیگران مستقل، ائتلافی را تشکیل می‌دهند تا سود خود را در تبادل انرژی به حداکثر برسانند. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ائتلاف شامل  $N$  بازیکن است که علاوه بر ارائه خواسته‌های محلی خود، به دنبال بهینه‌سازی مبادلات انرژی با ریزشکه‌های دیگر و همچنین شبکه بالادستی هستند. این ائتلاف که با هدف به حداکثر رساندن سود جمعی ریزشکه‌ها تشکیل می‌شود، توسط اپراتور مرکزی مدیریت می‌شود. با توجه به استقلال ریزشکه‌های محلی، اپراتور مرکزی میزان تبادل انرژی بین ریزشکه‌ها و همچنین شبکه بالادستی را تعیین خواهد نمود. به منظور مدل‌سازی تأثیر رفتار اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی از روش بازی تعاونی استفاده شده است.



شکل (۲): ساختار مدل مورد مطالعه

به منظور در نظر گرفتن رابطه متقابل بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی و همچنین استقلال تصمیم‌گیری هر بازیکن، یک مدل سه سطحی با توجه به شکل (۳) پیشنهاد شده است.

در این مقاله، از نظریه بازی برای مدل‌سازی مسئله از دیدگاه اپراتور مرکزی برای مدیریت انرژی ائتلاف، استفاده شده است. در ابتدا، یک مساله دو سطحی از این منظر برای تعیین تکلیف هر ریزشکه حل می‌شود. در قالب این مسئله دو سطحی، مدیریت انرژی در ریزشکه‌های چندگانه توسط اپراتور مرکزی انجام می‌شود. در این مسئله سطح دو، سطح بالایی از دید اپراتور مرکزی فرموله می‌شود و سطوح پایین‌تر از دید اپراتورهای محلی فرموله می‌شوند. به این ترتیب در این مسئله با تعدادی لایه‌های مختلف روبرو خواهیم شد.

تعهدات تعیین شده توسط مساله سطح دو شامل میزان تبادل بین ریزشکه‌ها و شبکه بالادستی خواهد بود.

در سطح سوم بر اساس خروجی سطوح ۱ و ۲ نحوه کار ریزشکه‌ها از دید عملگرهای محلی تعیین می‌شود. با توجه به شکل (۴)، برای هر یک از ریزشکه‌ها با مشکلات جداگانه‌ای مواجه خواهیم شد.

### ۲-۲- شبیه‌سازی مدل

مدل سه سطحی پیشنهادی شامل یک مدل دو سطحی (تعاملات بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی) و یک مدل تک سطحی (برنامه‌ریزی

قید (۲) قابلیت تولید واحد متعارف را محدود می‌کند. توانایی افزایش و کاهش تولید واحد معمولی توسط قیدهای (۳) و (۴) محدود شده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرف شده توسط واحد مرسوم به ترتیب با استفاده از (۵) و (۶) تعیین می‌شود. قید (۷) قابلیت تولید CHP را محدود می‌کند. توانایی افزایش و کاهش تولید CHP به ترتیب با قیدهای (۸) و (۹) محدود شده است. انتشار آزاد شده و سوخت مصرفی و تولید گرما توسط CHP به ترتیب با استفاده از (۱۰)-(۱۲) تعیین می‌شود. قابلیت تولید گرما توسط بویلر با (۱۳) محدود شده است. برابری‌های (۱۴) و (۱۵) میزان انتشار و سوخت مصرفی دیگر را تعیین می‌کنند. وضعیت شارژ سیستم ذخیره انرژی توسط (۱۶) تعیین می‌شود. تعادل انرژی در ابتدا و انتهای هر روز توسط (۱۷) برقرار می‌شود. همچنین تعادل انرژی در حالت‌های شارژ و دشارژ توسط (۱۸) حفظ می‌شود. نابرابری‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب ظرفیت انرژی و توان سیستم ذخیره انرژی را محدود می‌کنند. معادله (۲۱) قابلیت پاسخگویی به تقاضا را در هر ریزشکه تعیین می‌کند.

تعادل تولید و مصرف توان در هر ساعت در هر ریزشکه با استفاده از (۲۲) حفظ می‌شود. قابلیت تبادل برای هر ریزشکه توسط (۲۳) محدود شده است. برابری (۲۴) کل گرمای تولید شده در هر ریزشکه را تعیین می‌کند. قید انتشار ساعتی و مصرف سوخت روزانه برای هر ریزشکه به ترتیب با استفاده از (۲۵) و (۲۶) تعیین می‌شود.

### ۲-۲-۲- مدل سازی مساله سطح بالا (مساله ائتلاف)

تابع هدف سطح بالا هزینه عملیاتی تجمعی ائتلاف را به صورت رابطه (۲۷) به حداقل می‌رساند:

$$\min \left( \left( \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^{24} \left( \frac{1}{CUC_m \times CUG_{mh}} + \frac{2}{CHPC_m \times CHPG_{mh}} + \frac{3}{BC_m \times BG_{mh}} + \frac{4}{SC_m^{ch} \times SP_{mh}^{ch} + SC_m^{dis} \times SP_{mh}^{dis}} + \frac{5}{DC_m^{DR} \times DP_{mh}^{DR}} + \frac{6}{\gamma_h \times (P_{mh}^{buy} - P_{mh}^{sell})} + \frac{7}{\gamma_h \times (P_h^{t,buy} - P_h^{t,sell})} \right) \right) \right) \quad (27)$$

اصطلاحات ۱ تا ۶ در معادله (۱) معرفی شده‌اند. بخش هفتم نیز هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادستی را محاسبه خواهد کرد. محدودیت‌های سطح بالایی بصورت روابط (۲۸) و (۲۹) (پیوست) می‌باشند.

در رابطه (۱) شرایط ۱ تا ۶ به ترتیب نشان‌دهنده هزینه تولید روزانه واحد مرسوم، هزینه تولید روزانه CHP، هزینه تولید روزانه بویلر، هزینه عملیاتی روزانه سیستم ذخیره‌سازی انرژی، هزینه پاسخ تقاضای روزانه و هزینه تبادل انرژی روزانه می‌باشد. بخش ۷ آلودگی منتشر شده توسط تجهیزات داخل ریزشکه را در طول روز مشخص می‌کند.

قیدهای ریزشکه به شرح زیر هستند:

قیدهای واحد تولید مرسوم توزیع شده: [۲۶-۲۳].

$$CUG_m \leq CUG_{mh} \leq CUG_m \quad \forall m, \forall h \quad (2)$$

$$CUG_{mh} - CUG_{mh-1} \leq CURU_m \quad \forall m, \forall h \quad (3)$$

$$CUG_{mh-1} - CUG_{mh} \leq CURD_m \quad \forall m, \forall h \quad (4)$$

$$EM_{mh}^c = CUG_{mh} \times ER_m^c \quad \forall m, \forall h \quad (5)$$

$$F_{mh}^c = CUG_{mh} \times FR_m^c \quad \forall m, \forall h \quad (6)$$

$$CHPG_m \leq CHPG_{mh} \leq CHPG_m \quad \forall m, \forall h \quad (7)$$

$$CHPG_{mh} - CHPG_{mh-1} \leq CHPRU_m \quad \forall m, \forall h \quad (8)$$

$$CHPG_{mh-1} - CHPG_{mh} \leq CHPRD_m \quad \forall m, \forall h \quad (9)$$

$$EM_{mh}^{CHP} = CHPG_{mh} \times ER_m^{CHP} \quad \forall m, \forall h \quad (10)$$

$$F_{mh}^{CHP} = CHPG_{mh} \times FR_m^{CHP} \quad \forall m, \forall h \quad (11)$$

$$H_{mh}^{CHP} = CHPG_{mh} \times HR_m^{CHP} \quad \forall m, \forall h \quad (12)$$

$$0 \leq BG_{mh} \leq BG_m \quad \forall m, \forall h \quad (13)$$

$$EM_{mh}^B = BG_{mh} \times ER_m^B \quad \forall m, \forall h \quad (14)$$

$$F_{mh}^B = BG_{mh} \times FR_m^B \quad \forall m, \forall h \quad (15)$$

$$E_{mh}^s = E_{mh-1}^s + \eta_m^{s,ch} \times SP_{mh}^{ch} - \frac{1}{\eta_m^{s,dis}} \times SP_{mh}^{dis} \quad \forall m, \forall h \quad (16)$$

$$E_{m24}^s = E_{m0}^s \quad \forall m \quad (17)$$

$$\sum_{h=1}^{24} \eta_m^{s,ch} \times SP_{mh}^{ch} = \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{\eta_m^{s,dis}} \times SP_{mh}^{dis} \quad \forall m \quad (18)$$

$$E_m^s \leq E_{mh}^s \leq E_m^s \quad \forall m, \forall h \quad (19)$$

$$0 \leq SP_{mh}^{ch}, SP_{mh}^{dis} \leq P_m^s \quad \forall m, \forall h \quad (20)$$

$$0 \leq DP_{mh}^{DR} \leq DP_m^{DR} \quad \forall j, \forall t \quad (21)$$

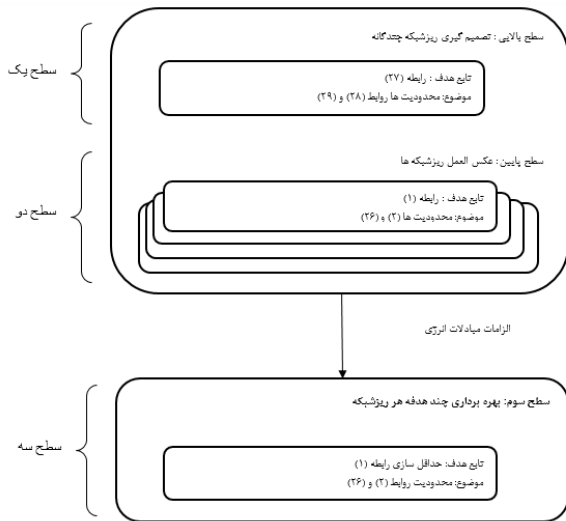
$$CUG_{mh} + CHPG_{mh} + SP_{mh}^{dis} + P_{mh}^w + DP_{mh}^{DR} + P_{mh}^{buy} = SP_{mh}^{ch} + P_{mh}^{fl} + P_{mh}^{vl} + P_{mh}^{sell} \quad \forall m, \forall h \quad (22)$$

$$0 \leq P_{mh}^{buy}, P_{mh}^{sell} \leq P_m^{trade} \quad \forall m, \forall h \quad (23)$$

$$H_{mh}^{CHP} + BG_{mh} = H_{mh}^l \quad \forall m, \forall h \quad (24)$$

$$EM_{mh}^c + EM_{mh}^{CHP} + EM_{mh}^B \leq E_{mh} \quad \forall m, \forall h \quad (25)$$

$$\sum_{h=1}^{24} (F_{mh}^c + F_{mh}^{CHP} + F_{mh}^B) \leq F_m^c \quad \forall m \quad (26)$$



شکل ۵: ساختار کلی سه سطحی مدل پیشنهادی

بار پاسخگو است. خواص واحدهای مرسوم در جدول (۱) ارائه شده است. در جدول (۲)، ویژگی‌های CHPs در ریزشبه‌های مختلف دیده می‌شود. مشخصات بویلرها در جدول (۳) نشان داده شده و در جدول (۴)، خواص سیستم‌های ذخیره انرژی را می‌توان یافت. کل بارهای الکتریکی در هر ریزشبه در شکل (۶) نمایش داده می‌شوند. بارهای الکتریکی شامل بارهای انعطاف‌پذیر (پاسخگو) و بارهای ثابت (بی‌پاسخ) است. در شکل (۷)، بارهای انعطاف‌پذیر نشان داده می‌شوند. مصرف گرمایی ساعتی در ریزشبه‌های مختلف در شکل (۸) دیده می‌شود. تولید واحد بادی در هر ریزشبه در شکل (۹) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی تولید واحد بادی از تابع احتمال توزیع وایبول استفاده شده است [۲۸].

حداکثر قابلیت تبادل با بالادست و همچنین تبادل بین ریزشبه‌ها ۲ مگاوات در نظر گرفته شده است. حداکثر تولید آلودگی در هر ساعت در هر ریزشبه ۱۰۰۰ پوند فرض می‌شود. ضریب وزن‌دهی هزینه و آلودگی به ترتیب ۰/۸ و ۰/۲ انتخاب شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های واحدهای تولید مرسوم

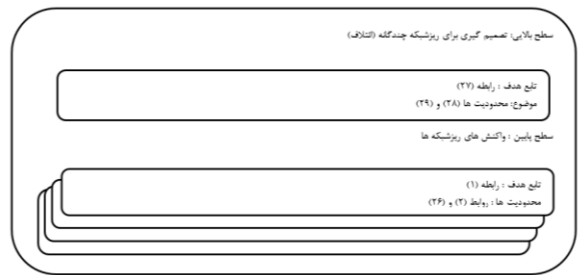
Microgrid	1	2	3
$MC_i^c$ (\$/Kw)	0.11	0.12	0.1
$P_i^c$ (kW)	0	0	0
$\overline{P_i^c}$ (kW)	8500	7500	7000
$RU_i^c$ (kW/h)	3000	3000	3000
$RD_i^c$ (kW/h)	3000	3000	3000
$ER_i$ (lb/kwh)	0.011	0.012	0.014
FR(m <sup>3</sup> /kWh)	0.21	0.22	0.21

با پیاده‌سازی مسئله MPEC در نرم‌افزار گمز، خروجی مدل دو سطحی میزان تبادل بین ریزشبه‌های مختلف را تعیین خواهد کرد. نتایج نشان

$$\sum_{j=1}^N (CUG_{mh} + CHPG_{mh} + SP_{mh}^{dis} + P_{mh}^w + DP_{mh}^{DR} + P_{mh}^{buy}) + P_h^{t,buy} = \sum_{j=1}^N (SP_{mh}^{ch} + P_{mh}^{fl} + P_{mh}^{vl} + P_{mh}^{sell}) + P_h^{t,sell} \quad \forall h \quad (28)$$

$$0 \leq P_h^{t,buy}, P_h^{t,sell} \leq \overline{P^t,trade} \quad \forall h \quad (29)$$

تبادل توان ساعتی برای ائتلاف توسط (۲۸) برقرار می‌شود. قابلیت تبادل توان ائتلاف با بالادست توسط (۲۹) محدود شده است. مدل دو سطحی برای تعیین اثرات متقابل اپراتور مرکزی و اپراتورهای محلی بر اساس ساختار نشان داده شده در شکل (۴) فرموله می‌شود. در سطح بالا اهداف کلی ائتلاف دنبال می‌شود. اما در سطح پایین‌تر مسئله که از چند لایه تشکیل شده است، اهداف اپراتورهای محلی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین یک برنامه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی (MPEC) توسعه می‌یابد. در این مقاله از روش تبدیل دوگان اصلی برای حل مسئله MPEC استفاده شده است. برای این منظور شرایط مکمل با یک معادله مضاعف قوی جایگزین می‌شود [۲۷].



شکل ۴: چارچوب مساله دو سطحی برای مدل‌سازی ائتلاف

### ۳-۲-۲- شبیه‌سازی سطح سوم

به منظور توضیح بهتر مدل پیشنهادی در این مقاله، ساختار سه سطحی کلی این مدل در شکل (۵) نشان داده شده است. سطوح یک و دو یک مشکل MPEC را تشکیل می‌دهند که الزامات تبادل انرژی بین ریزشبه‌ها و شبکه با بالادستی را تعیین می‌کند. بر اساس خروجی مدل دو سطحی در سطح سوم مسئله برنامه‌ریزی عملیاتی با توجه به تعداد ریزشبه‌های ائتلاف حل می‌شود. فرمولاسیون مسئله سطح سوم مشابه مسئله پایین‌تر است که در زیر بخش ۲-۲-۱ توضیح داده شده است.

### ۳- نتایج عددی

به منظور نشان دادن قابلیت‌های فنی مدل پیشنهادی در این مقاله، یک سیستم ریزشبه چندگانه شامل سه ریزشبه با قابلیت تبادل توان با شبکه با بالادستی مشابه سیستم نشان داده شده در شکل (۲) در نظر گرفته شده است. هر ریزشبه شامل یک واحد تولید مرسوم، یک واحد تولید بادی، یک CHP، یک سیستم ذخیره انرژی، یک بار ثابت و یک

می‌دهد که ریزشکته‌های اول و سوم انرژی تحویل می‌دهند و ریزشکته دوم انرژی دریافت می‌کند.

جدول (۲): ویژگی‌های CHPs

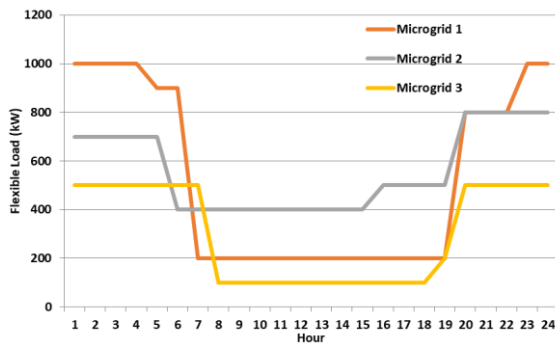
Microgrid	1	2	3
$MC_i^{CHP}$ (\$/kW)	0.12	0.11	0.13
$(Kw) \overline{P_i^{CHP}}$	0	0	0
$(Kw) \overline{P_i^{CHP}}$	4000	4000	5000
$RU_i^{CHP}$ (kW/h)	2000	2000	2000
$(kW/h) RD_i^{CHP}$	2000	2000	2000
$HR_i^{CHP}$	1.8	1.95	1.9
$(lb/kwh) ER_i^{CHP}$	0.013	0.013	0.013
FR (m <sup>3</sup> /kWh)	0.25	0.26	0.25

جدول (۳): ویژگی‌های بویلرها

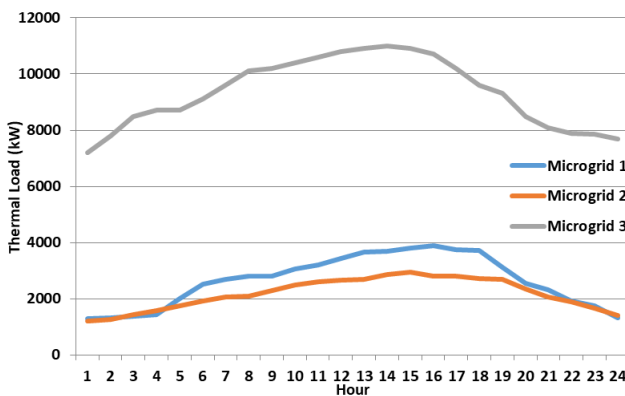
Microgrid	1	2	3
$MC_i^B$ (\$/kW)	0.037	0.041	0.042
$\overline{H_i^B}$ (kW)	2500	2000	1500
$(lb/kwh) ER_i^B$	0.01	0.011	0.012
FR (m <sup>3</sup> /kWh)	0.18	0.17	0.18

جدول (۴): ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

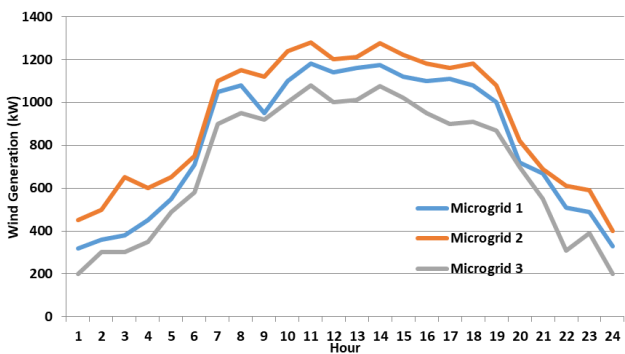
Microgrid	1	2	3
$\overline{P_i^S}$ (kW)	100	150	150
$\overline{E_i^S}$ (kWh)	500	500	600
$\underline{E_i^S}$ (kWh)	0	0	0
$\eta_i^{s,dis}$	0.95	0.95	0.95
$\eta_i^{s,ch}$	0.95	0.95	0.95
$MC_i^{dis}$ (\$/kW)	0.01	0.01	0.01
$MC_i^{ch}$ (\$/kW)	0.01	0.01	0.01



شکل ۷: بارهای انعطاف پذیر در هر ریزشکته



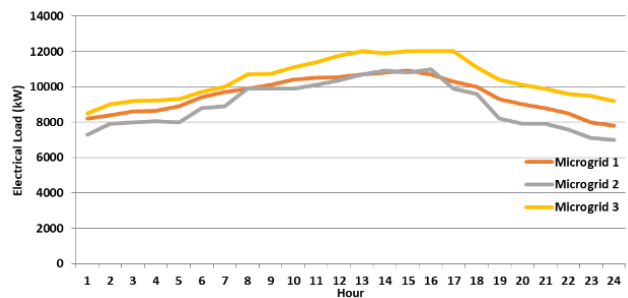
شکل ۸: بارهای حرارتی در هر ریزشکته



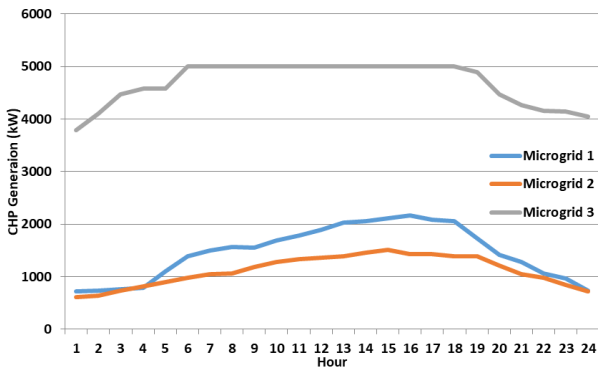
شکل ۹: تولید نیروگاه بادی در هر ریزشکته

در شکل (۱۰)، انرژی تحویل داده شده توسط ریزشکته‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد ریزشکته‌های اول و سوم انرژی را تحویل می‌دهند. در ساعات ۱ تا ۹ ریزشکته اول هیچ مبادله‌ای ندارد. در ساعت ۱۰ تا ۱۸:۰۰، ۲۱:۰۰ و ۲۲:۰۰، این ریزشکته انرژی را به ریزشکته دوم تحویل می‌دهد. این رقم نشان می‌دهد که انرژی تحویل داده شده توسط ریزشکته سوم در تمام ساعات روز است.

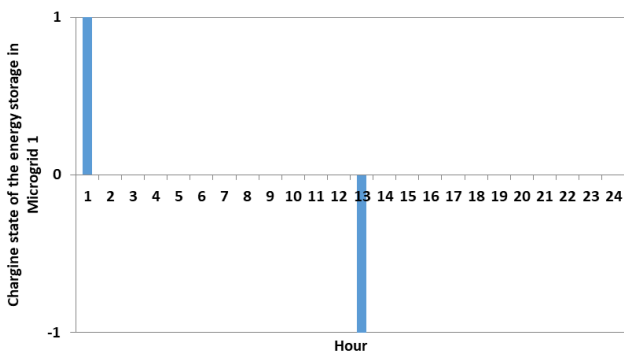
انرژی دریافت شده در ساعات مختلف روز و شب توسط ریزشکته دوم در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، این ریزشکته در تمام ساعات روز و شب از ریزشکته‌های دیگر انرژی دریافت می‌کند. شکل (۱۲) خروجی واحدهای مرسوم را در ریزشکته‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ریزشکته اول بزرگترین سهم را در تولید انرژی الکتریکی توسط واحدهای سنتی دارد، و ریزشکته دوم کمترین نقش را دارد.



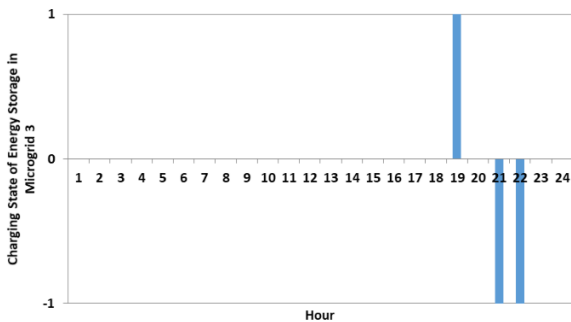
شکل ۶: مجموع بارهای الکتریکی در هر ریزشکته



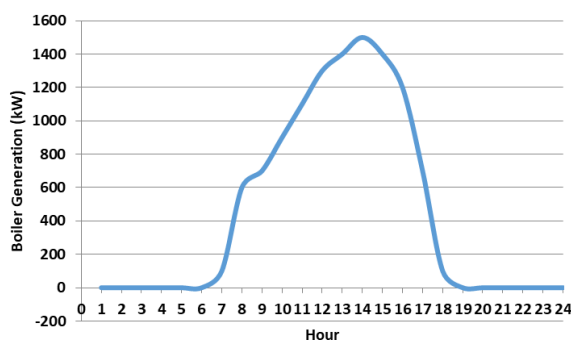
شکل ۱۳: واحدهای تولید CHP در ریزشبهه ها



شکل ۱۴: وضعیت شارژ ESS در ریزشبهه ۱

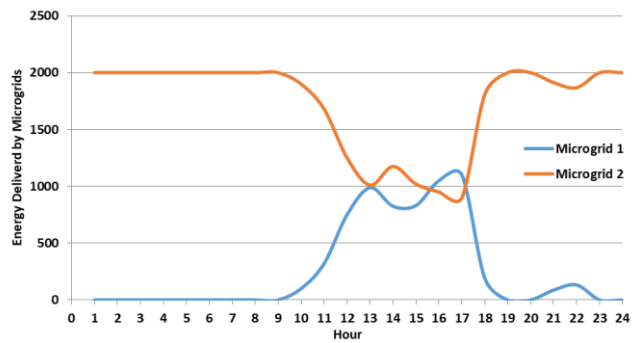


شکل ۱۵: وضعیت شارژ ESS در ریزشبهه ۳

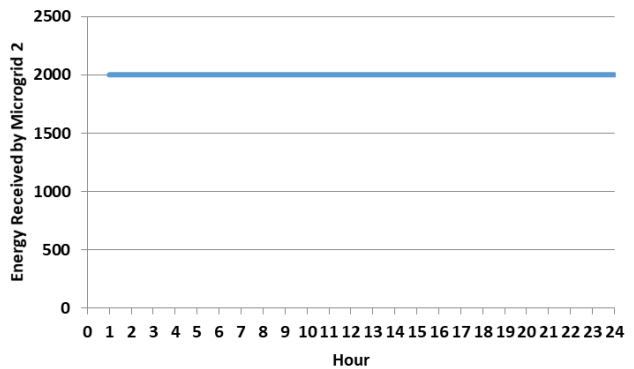


شکل ۱۶: تولید انرژی حرارتی توسط دیگ بخار در ریزشبهه ۳

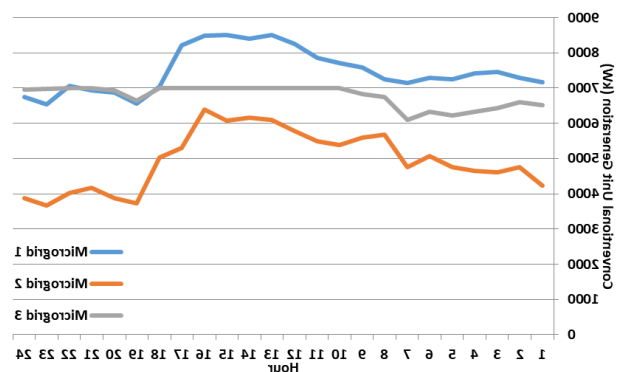
خروجی های الکتریکی CHPs در هر ریزشبهه در شکل (۱۳) ارائه شده است. از نظر انرژی الکتریکی تولید شده توسط CHPs، ریزشبهه ۳ مهم ترین است. وضعیت شارژ ESS در ریزشبهه اول را می توان در شکل (۱۴) دید. در این شکل، وضعیت ۱ نشان دهنده وضعیت شارژ و ۱- نشان دهنده وضعیت تخلیه ESS است. وضعیت شارژ ذخیره سازی در ریزشبهه سوم در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این ریزشبهه علاوه بر CHP، دیگ بخار نیز گرما تولید می کند. تولید حرارتی بویلر در ریزشبهه سوم در شکل (۱۶) ارائه شده است.



شکل ۱۰: توان خروجی ریزشبهه ها



شکل ۱۱: توان ورودی ریزشبهه ۲



شکل ۱۲: واحدهای تولید مرسوم در هر ریزشبهه

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی عملیاتی بهینه یک ریزشبه چندگانه به صورت ائتلافی پیشنهاد شده است. نظریه بازی برای مدل‌سازی استقلال تصمیم‌گیری برای اپراتور مرکزی و اپراتورهای محلی استفاده می‌شود. در این مدل امکان تعامل دو طرفه بین تصمیمات اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی وجود دارد. به این ترتیب، همزمان دغدغه‌های تک تک ریزشبه‌ها مانند تأمین نیازهای الکتریکی و حرارتی و همچنین حداکثر کردن سودآوری برآورده می‌شود. از سوی دیگر اهداف کلی ائتلاف نیز فراهم خواهد شد. در مدل پیشنهادی از انعطاف‌پذیری سیستم با استفاده از حضور بارهای پاسخگو و همچنین سیستم‌های ذخیره انرژی استفاده می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان تصمیم مناسب برای تبادل انرژی بین ریزشبه‌ها را با در نظر گرفتن اهداف تمام بازیکنان بازی ائتلاف در نظر گرفت و به این ترتیب اهداف ائتلاف را دنبال کرد.

## مراجع

- [12] Leonori, S., et. al., "Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms", Applied Soft Computing, 2020. 86.
- [13] Hajiamoosha, P., et. al., "Stochastic energy management in a renewable energy-based microgrid considering demand response program", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. 129.
- [14] Harsh, P., and Das, D., "Energy management in microgrid using incentive-based demand response and reconfigured network considering uncertainties in renewable energy sources", Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021. 46.
- [15] Hou, J., Yu, W., Xu, Z., Ge, Q., Li, Z., Meng, Y., "Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty", Electric Power Systems Research, 2022. 216.
- [16] Movahednia, M., Karimi, H., Jadid, S., "A cooperative game approach for energy management of interconnected microgrids", Electric Power Systems Research, 2022. 213.
- [17] ShafiulAlam, M., et. al., "Energy management in DC microgrid with an efficient voltage compensation mechanism", Electric Power Systems Research, 2023. 214.
- [18] Rahimi, M., et. al., "Probabilistic reliability management of energy storage systems in connected/islanding microgrids with renewable energy", Electric Power Systems Research, 2023. 214.
- [19] Li, Z., et. al., "A novel two-stage energy management of hybrid AC/DC microgrid considering frequency security constraints", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. 146.
- [20] Chopra, C., et. al., "Power-flow-based energy management of hierarchically controlled islanded AC microgrids", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. 141.
- [21] Dashtaki, A., et. al., "Optimal management algorithm of microgrid connected to the distribution network considering renewable energy system uncertainties", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. 145.
- [22] Saki, R., et. al., "Interactive Multi-level planning for energy management in clustered microgrids considering flexible demands", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. 138.
- [23] Chen, S. X., Gooi, H. B., and Wang, M. Q., "Sizing of Energy Storage for Microgrids", IEEE Transactions on Smart grid, 2012. 3(1): 142-151.
- [24] Azami, R., Haghifam, M. R., and Aflaki, K., "Stochastic Energy and Spinning Reserve Market with Considering Smart Transmission Switching Action", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015. 6(2): 491 - 498.
- [25] Yang, P., and Nehorai, A., "Joint Optimization of Hybrid Energy Storage and Generation Capacity With Renewable Energy", IEEE Transactions on Smart Grid, , 2014. 5(4): 1566 - 1574.
- [26] [Conejo, A.J., Baringo Morales, L., Jalal, K., Siddiqui, A.S., "Investment in Electricity Generation and Transmission: Decision Making under Uncertainty", Springer International Publishing, 2016.
- [27] Hawkes, A. D., and Leach, M. A., "Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid", Applied Energy, 2009, 86 (7): 1253-1265.
- [28] Hajipour, E., Bozorg, M., and Fotuhi-Firuzabad, M., "Stochastic Capacity Expansion Planning of Remote Microgrids With Wind Farms and Energy Storage", 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012.
- [1] Karthik, N., et al., "A review of optimal operation of microgrids", International Journal of Electrical and computer engineering, 2019. 14(1): 1-8.
- [2] Haddadian, H. and Noroozian, R., "Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices", Applied Energy, 2017. 185: 650-663.
- [3] Du, Y., et al., "A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems", Applied Energy, 2018. 222: 383-395.
- [4] Arefifar, S. A., Ordóñez, M., and Abdel-Rady I. Mohamed, Y., "Energy Management in Multi-Microgrid Systems-Development and Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, 2017. 32 (2): 910-922.
- [5] Karimi, H., and Jadid, S., "Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs": A stochastic multi-objective framework, Energy, 2020.
- [6] Hasankhani, A., and Hakimi, S. M., "Stochastic energy management of smart microgrid" with intermittent renewable energy resources in electricity market, Energy, 2021. 219.
- [7] Leeuwen, G., et. al., "An integrated blockchain-based energy management platform" with bilateral trading for microgrid communities, Applied Energy, 2020. 263.
- [8] Kermani, M., et. al., "Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications", Renewable Energy, 2021. 171. 1115-1127.
- [9] Kumar, P. S., et. al., "Energy Management System for Small Scale Hybrid Wind Solar Battery Based Microgrid", IEEE Access, 2020. 8. 8336-8345.
- [10] Ferahtia, S., et. al., "Optimal control and implementation of energy management strategy for a DC microgrid", Energy, 2022. 238.
- [11] Dong, Y., et. al., "Multi-objective economic environmental energy management microgrid using hybrid energy storage implementing and developed Manta Ray Foraging Optimization Algorithm", Electric Power System Research, 2022. 211.

# Presenting a comprehensive management plan for the operation of a multiple microgrid based on economic and environmental considerations with a game theory approach

Mahdi Abolhassan beygi<sup>1</sup>, Soodabeh Soleymani<sup>2\*</sup>, Seyed Babak Mozafari<sup>3</sup>, Reza Sharifi<sup>4</sup>

1-Department of Electrical Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

2-Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3-Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4-Department of Electrical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**Abstract:** In this article, a comprehensive management plan for the operation of a multiple microgrid will be presented based on economic and environmental considerations with the formation of a coalition between microgrids with the aim of increasing the profit of microgrid operation. The proposed model is formulated as a multilevel optimization problem with a game theory approach. At the local level, the environmental and economic dual-objective optimization problem is presented for each microgrid based on distributed production and renewable energy resources. Since the problem of planning for electrical and thermal loads is applied, therefore, energy carriers such as electrical energy and fuel required by power plants are included in the optimization plan, and due to the penetration of scattered productions based on renewable energies, there is uncertainty in power. output in the microgrid, in the proposed structure, two practical tools are proposed for the optimal use of this equipment and increasing the profit of the microgrid operator, the first tool is the optimal use of energy storage resources and the second tool is responsive loads and the management plan of these loads in order to achieve The objectives of the microgrid operator will be. In this research, particle consensus algorithm as well as game theory-based modeling are used for optimization, simulation is done using Games software, and its results are implemented by implementing a collaboration space and forming a coalition between microgrids and distribution network. It has significantly reduced the final costs of the collection.

**Keywords:** response Multiple microgrids, distributed generation sources, game theory, renewable energies, multilevel optimization