

## پیاده‌سازی سیستم بهینه مدیریت انرژی برای مجموعه ریز شبکه‌ها

نرگس پرهیزی<sup>۱</sup>، موسی مرزبند<sup>۲</sup>، سید مازیار میر حسینی مقدم<sup>۳</sup>، فاطمه آذری نژادیان<sup>۴</sup> و بهنام محمدی ایواتلو<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - لاهیجان - ایران

narges\_parhizi@yahoo.com

۲- دانشیار پژوهشی، دانشکده مهندسی و فیزیک - دانشگاه منچستر - منچستر - انگلیس و استادیار، گروه برق،

دانشکده فنی و مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - لاهیجان - ایران

mousa.marzband@manchester.ac.uk, m.marzband@liau.ac.ir

۳- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - لاهیجان - ایران

m.mirhosseini@liau.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - لاهیجان - ایران

niloofar.azari@yahoo.com

۵- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

bmohammadi@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های دارای چند ریز شبکه، چالش‌های جدیدی را در سیستم‌های قدرت به وجود آورده است. بنابراین، ارائه سیستم‌های مدیریت انرژی با در نظر گرفتن عملکرد بهینه منابع موجود در ریز شبکه‌ها، کنترل تبادل توان با شبکه و نیز مابین ریز شبکه‌ها دارای اهمیت است. در این مقاله، برای مدیریت انرژی در سیستم‌های دارای ریز شبکه‌های متعدد با مالکیت‌های مختلف، ساختاری با دو لایه کنترلی به نام‌های کنترل اولیه و ثانویه پیشنهاد شده است. در سطح کنترل اولیه، سیستم مدیریت انرژی به طور مجزا برای هر ریز شبکه با در نظر گرفتن قیود مسأله و عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم تاگوچی، توان مربوط به منابع تولید، میزان مازاد و کمبود تولید هر ریز شبکه تعیین می‌شود. سپس، اطلاعات مربوط به توان‌های مازاد و کمبود هر ریز شبکه باید به سیستم مدیریت انرژی مرکزی در سطح ثانویه ارسال شوند. برای تأیید ساختار پیشنهادی، یک سیستم موردی با دو ریز شبکه و یک بار فشرده، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چند زمانه<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده، چندین سناریو نیز اعمال شده است. نتایج به دست آمده به وضوح نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی در مدیریت انرژی ریز شبکه‌های متعدد، مؤثر بوده و به عملکرد بهینه منابع موجود در هر ریز شبکه منجر شده است. افزون بر این، طرح کنترلی پیشنهاد شده به شکل مناسبی عملکرد ریز شبکه‌ها و شبکه را در تعاملات با یکدیگر کنترل می‌کند و دارای سطح بالایی از استحکام، رفتار پایدار تحت شرایط مختلف و کیفیت بالای منبع تغذیه است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم تاگوچی، سیستم چند ریز شبکه، سیستم‌های چندصاحب، کنترل مرکزی و غیر مرکزی، مدیریت بهینه انرژی، عدم قطعیت.

### ۱- مقدمه

امروزه، با توجه به رشد قابل توجه تولیدات پراکنده به ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، علاقه روز افزونی برای به‌کارگیری ریز شبکه‌ها<sup>۲</sup> ایجاد شده است. ریز شبکه‌ها ترکیبی از منابع تولید پراکنده مختلف هستند، که به عنوان یک سیستم قابل کنترل در سطح ولتاژ توزیع، برق یا گرما را، به

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸

نام نویسنده مسؤول: نرگس پرهیزی

نشانی نویسنده مسؤول: ایران - لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی -

دانشکده فنی مهندسی

گروهی از بارهای محلی عرضه می‌کنند [۱-۳]. از طرفی، با توجه به نوسانات بالای توان قابل دسترس در سطح ولتاژ توزیع، ممکن است سیستم‌های ریز شبکه برای تأمین مصرف‌کنندگان عمده با شکست مواجه شوند. بنابراین، با تقسیم مصرف‌کنندگان به واحدهای کوچکتر، از چند ریز شبکه استفاده شده و هر واحد بار، توسط یک ریز شبکه تغذیه می‌شود [۴]. با به‌کارگیری چند ریز شبکه در یک شبکه ولتاژ پایین، مفهوم ریز شبکه‌های یکپارچه با مالکیت چندگانه مطرح می‌شود [۵]. از طرف دیگر برای نظارت بر عملکرد ریز شبکه‌ها و بهینه‌سازی بهره‌برداری آن‌ها رایج سیستم‌های مدیریت انرژی<sup>۳</sup> (EMS) تحت شرایط مختلف دارای اهمیت است. EMS، برای کنترل عملکرد تمامی منابع تولید، بارهای قابل کنترل و سیستم ذخیره‌سازی موجود در تمامی ریز شبکه‌ها، مدیریت سمت تقاضا، کنترل تمامی تعاملات ریز شبکه‌ها با شبکه و همچنین، کنترل تبادلات توان مابین ریز شبکه‌ها استفاده می‌شود.

ساختارهای مختلفی برای سیستم‌های مدیریت انرژی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و همچنین، پیکربندی‌های مختلفی برای ریز شبکه با انواع مختلف منابع در مراجع ارائه شده است. برای مثال، [۶] با استفاده از مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط<sup>۴</sup> (MINLP) و با هدف به حداقل رساندن تابع هدف که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و زیست محیطی است، بهره‌برداری ریز شبکه را بهینه می‌کند. روش‌های حل ریاضیاتی مانند MINLP نمی‌توانند مسائل غیرخطی در مقیاس بزرگ را بهینه کنند. این مسائل می‌توانند به شکل مناسب توسط روش‌های ابتکاری حل شوند. به این منظور، برای مدیریت منابع انرژی یک روش جدید به نام SiPSO<sup>۵</sup> در [۷] ارائه شده است. در [۸] از الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور تعیین مدیریت بهینه انرژی استفاده شده است. در [۹] ترکیبی از بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل اصلاح شده ترکیبی با جستجوی محلی آشوب به‌کار برده شده است. در [۱۰] یک سیستم

مدیریت هوشمند انرژی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی عملکرد ریز شبکه پیشنهاد شده است. در این مقاله، در طول فرآیند بهینه‌سازی یک ماژول پیش‌بینی، یک ماژول مدیریت ESS و یک ماژول بهینه‌سازی استفاده شده است. به طور معمول، برای مدیریت مناسب ریز شبکه‌ها از روش چند شرکتی استفاده می‌شود، که کاربر را قادر به بهره‌برداری و یکپارچه‌سازی منابع متناوب انرژی می‌کند؛ همچنین، سبب افزایش قابلیت اعتماد و راندمان سیستم می‌شود. سیستم‌های هوشمند مبتنی بر چند شرکتی برای کاربردهای مهندسی قدرت در مراجع [۵، ۱۱ و ۱۲] گزارش شده است. در [۵] برای برنامه‌ریزی منابع انرژی یک سیستم قدرت مستقل از شبکه دارای تولیدات پراکنده که شامل ریز شبکه‌های یکپارچه و بارهای خارجی هستند، یک سیستم چند شرکتی ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده برای برنامه‌ریزی منابع تولید دارای ۳ مرحله اجرایی است. در مرحله اول، هر ریز شبکه برای تأمین تقاضای داخلی به شکل جداگانه برنامه‌ریزی می‌شود. مرحله بعدی پیدا کردن بهترین پیشنهاد ممکن برای گسیل توان به شبکه و رقابت در بازار عمده فروشی انرژی است. مرحله آخر، برنامه‌ریزی مجدد هر ریز شبکه به شکل جداگانه برای تأمین تقاضای کل که مجموعه‌ای از تقاضای داخلی و تقاضای به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی بازار عمده فروشی انرژی بوده، می‌باشد. در [۱۱] برای تسهیل دادوستد توان میان ریز شبکه‌ها با استفاده از پاسخ تقاضا و ذخیره‌سازی انرژی، یک EMS مبتنی بر شرکت ارائه شده است. تمرکز اصلی این مرجع، استفاده از نوع الگوی مصرف بار مصرف‌کنندگان و انرژی در دسترس منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره‌سازی و پاسخ تقاضا برای کاهش پیک تقاضا و حداقل‌سازی هزینه الکتریسته است. [۱۲] یک ساختار دو سطحی برای مدیریت منابع انرژی توزیع برای چند ریز شبکه با استفاده از سیستم‌های چند شرکتی، پیشنهاد می‌کند. به منظور مطابقت با خریداران و فروشندگان در بازار انرژی، مسأله انتساب متقارن مبتنی بر الگوریتم حراج ساده استفاده می‌شود.

ساختارهای مختلفی برای سیستم‌های مدیریت انرژی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و همچنین، پیکربندی‌های مختلفی برای ریز شبکه با انواع مختلف منابع در مراجع ارائه شده است. برای مثال، [۶] با استفاده از مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط<sup>۴</sup> (MINLP) و با هدف به حداقل رساندن تابع هدف که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و زیست محیطی است، بهره‌برداری ریز شبکه را بهینه می‌کند. روش‌های حل ریاضیاتی مانند MINLP نمی‌توانند مسائل غیرخطی در مقیاس بزرگ را بهینه کنند. این مسائل می‌توانند به شکل مناسب توسط روش‌های ابتکاری حل شوند. به این منظور، برای مدیریت منابع انرژی یک روش جدید به نام SiPSO<sup>۵</sup> در [۷] ارائه شده است. در [۸] از الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور تعیین مدیریت بهینه انرژی استفاده شده است. در [۹] ترکیبی از بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل اصلاح شده ترکیبی با جستجوی محلی آشوب به‌کار برده شده است. در [۱۰] یک سیستم

بر این، برای هر یک از ریزشبه‌ها یک EMS مختص همان ریزشبه و یک سیستم مدیریت انرژی مرکزی<sup>۶</sup> (CEMS) در سطح بالایی کنترل برای کنترل تمامی این EMSها طراحی شده است. همچنین، در این شبکه مجموعه‌ای از بارهای فشرده نیز در نظر گرفته شده است. بار فشرده در واقع مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان است که به شکل مستقل ریزشبه‌ها یا شبکه سراسری تعلق ندارد و به شکل مستقل تقاضای مورد نظر خورد را از شبکه معرفی شده دریافت می‌کند. قیمت‌های پیشنهادی توسط هر یک از منابع تولید موجود در ریزشبه‌ها و تبادل توان بین آن‌ها و شبکه در جدول (۱) خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برخی از قیمت‌های پیشنهادی در بعضی از بازه‌های زمانی با قیمت‌های پیشنهادی منابع تولید و یا مصرف دیگر تداخل دارند. بنابراین، EMS و CEMS پیشنهادی، باید قابلیت انتخاب بهترین منبع تولید توان و نیز مصرف‌کننده جانبی با در نظر گرفتن حداقل هزینه توان تولیدشده را داشته باشد. شایان ذکر است، اطلاعات مربوط به منابع تجدیدپذیر و نیز پروفایل بار محلی موجود در ریزشبه‌ها از [۱-۳] گرفته شده است. این اطلاعات از مقادیر واقعی منطقه هواشناسی بلادونا واقع در بارسلونا-اسپانیا به شکل آنلاین به دست آمده است. همچنین، به منظور نشان دادن قابلیت پاسخگویی سریع الگوریتم به وقوع هر رویدادی سناریوهای مختلفی در سیستم در نظر گرفته شده است. این سناریوها عبارتند از:

سناریو ۱: عملکرد نرمال

سناریو ۲: افزایش ناگهانی بار (در بازه‌های زمانی

۱۷:۰۰-۱۷:۳۰ و ۱۸:۰۰-۱۸:۳۰).

سناریو ۳: قابلیت وصل کن و استفاده کن<sup>۷</sup>

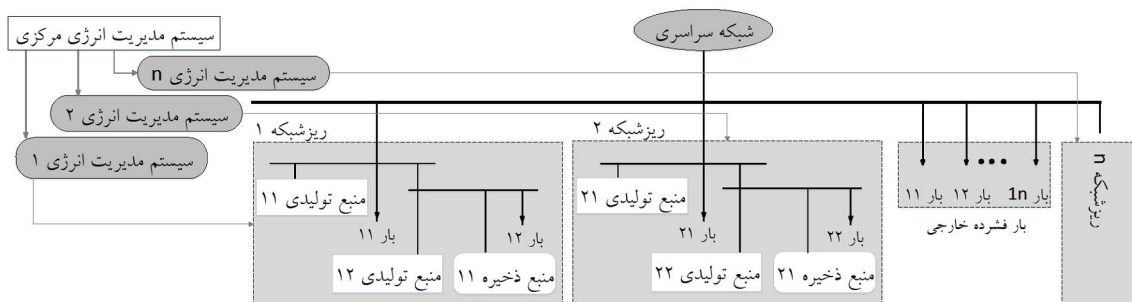
در این مقاله، برای مدیریت انرژی در سیستم‌های دارای ریزشبه‌های متعدد با مالکیت چندگانه، یک سیستم چند شرکتی ارائه شده است. هدف از ارائه ساختار پیشنهادی، مدیریت بهینه واحدهای تولید موجود در ریزشبه، مدیریت سمت تقاضا و تبادل ریزشبه‌ها با شبکه سراسری و تعاملات مابین ریزشبه‌هاست. در این روش، هر یک از اجزای ریزشبه به عنوان یک شرکت در نظر گرفته شده و رفتار هماهنگ شرکت‌ها در داخل ریزشبه سبب حداقل کردن هزینه تولید می‌شوند. این در حالی است که ریزشبه‌های مختلف برای حداکثر کردن سود خود با یکدیگر رقابت می‌کنند. بنابراین، در ریزشبه‌های یکپارچه نیاز به کنترل نظارتی توسط اپراتوری مستقل وجود دارد، که ناظر بر عملکرد ریزشبه‌ها باشد و هر ریزشبه با نظارت اپراتور مستقل، کنترل خود را انجام دهد. شایان ذکر است، از آنجا که مدل در نظر گرفته شده برای ریزشبه ماهیتی غیرخطی و گسسته دارد؛ برای پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی و با هدف یافتن بهترین راه‌حل ممکن، از الگوریتم رقابت استعماری چند بعدی استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده، مبتنی بر جمعیت و برپایه تکامل سیاسی و اجتماعی جوامع بشری بوده و دارای مزایای متعددی همچون سادگی، دقت، صرفه‌جویی در زمان و سرعت همگرایی بالاست. در مسأله مطرح شده، قیود فنی شامل تغذیه کامل بار، مشخصه‌های فنی مربوط به هر یک از منابع موجود در ریزشبه، قیود اتصال به شبکه اصلی و همچنین، قیود مربوط به تبادلات توان ما بین ریزشبه‌ها لحاظ شده است.

## ۲- ساختار شبکه تحت مطالعه

تصویر شماتیک سیستم تحت مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سیستم دارای چندین ریزشبه هست که هر یک از آن‌ها نیز دربرگیرنده بارهای محلی و منابع توزیع و ذخیره ویژه خودشان هستند. هر ریزشبه دارای قابلیت عملکرد در هر دو حالت مستقل و متصل به شبکه سراسری است. افزون

جدول (۱): قیمت‌های پیشنهادی هر یک از منابع تولید موجود در ریز شبکه‌ها و تبادل توان بین آن‌ها و شبکه

کمیت	نماد	€/kWh	
		حداقل	حداکثر
جریمه توان تأمین نشده <sup>۸</sup> (UP) در ریز شبکه n ام	$\pi^{UP,n}$	۱/۵	۱/۵
RLD بار در ریز شبکه n ام	$\pi^{RLD,n}$	۰/۰۸	۰/۱۵
منبع بادی در ریز شبکه n ام	$\pi^{WT,n}$	۰/۰۳	۰/۰۹
منبع خورشیدی در ریز شبکه n ام	$\pi^{PV,n}$	۰/۰۸	۰/۱۱
میکروتوربین در ریز شبکه n ام	$\pi^{MT,n}$	۰/۱۴	۰/۱۶
منبع ذخیره‌کننده انرژی به عنوان تولیدکننده در ریز شبکه n ام	$\pi^{ES+,n}$	۰/۱	۰/۱۶
منبع ذخیره‌کننده انرژی به عنوان مصرف‌کننده در ریز شبکه n ام	$\pi^{ES-,n}$	۰/۱	۰/۱۵
خرید توان از ریز شبکه k ام و فروش آن به ریز شبکه n ام	$\pi^{MG-,kn}$	۰/۰۷	۰/۱۷
خرید توان از ریز شبکه n ام و فروش آن به ریز شبکه k ام	$\pi^{MG+,kn}$	۰/۱۵	۰/۱۷
خرید توان از شبکه و فروش آن به ریز شبکه n ام	$\pi^{GRID-,n}$	۰/۱۶	۰/۱۸
خرید توان از ریز شبکه n ام و فروش آن به شبکه	$\pi^{GRID+,n}$	۰/۰۵	۰/۱۱۵
بار فشرده (LL) در ریز شبکه n ام	$\pi^{LL,n}$	۰/۰۶	۰/۱۲
منبع تولید مجازی <sup>۹</sup> در ریز شبکه n ام	$\pi^{VG,n}$	۰/۱۳۵	۰/۱۵
بار مجازی <sup>۱۰</sup> در ریز شبکه n ام	$\pi^{VL,n}$	۱/۵	۱/۵



شکل (۱): تصویر شماتیک سیستم تحت مطالعه دارای چند ریز شبکه

EMS و CEMS در ادامه ارائه شده است.

### ۳- فرمول‌بندی کردن مسأله بهینه‌سازی

سیستم تحت مطالعه دارای n ریز شبکه است که هر یک از آن‌ها دارای منابع تجدید پذیر (بادی<sup>۱۱</sup> (WT) و خورشید<sup>۱۲</sup> (PV) در این مطالعه)، منابع تجدید ناپذیر به عنوان رزرو چرخان (میکروتوربین<sup>۱۳</sup> (MT) و منابع ذخیره‌کننده انرژی<sup>۱۴</sup> (ES) و چندین نوع بار شامل بارهای غیر قابل قطع<sup>۱۵</sup> (NRLD) و بارهای قابل کنترل<sup>۱۶</sup> (RLD) می‌باشند، که به شبکه و تعدادی بار فشرده<sup>۱۷</sup> (LL) متصل شده‌اند. روابط ریاضی فرمول‌بندی شده برای پیاده‌سازی

### ۳-۱- پیاده‌سازی ریاضی تابع هدف در EMS-MICA

برای مسأله بهینه‌سازی دو نوع تابع هدف تعریف شده است. برای تمامی EMSها به طور جداگانه تابع هزینه‌ای با هدف حداقل کردن تابع هدف و مدیریت منابع تولید و مصرف مربوط به هر ریز شبکه تعریف شده است. تابع هزینه تعریف شده برای EMS در ریز شبکه n ام به شکل زیر

مدل سازی شده است:

$$z^{EMS,n} = \min \sum_{t=1}^{24} \left[ \begin{array}{l} \sum_{s \in S} \mu_s^{WT} P_{s,t}^{WT,n} \times \pi_t^{WT,n} + \\ \sum_{s \in S} \mu_s^{PV} P_t^{PV,n} \times \pi_t^{PV,n} + \\ P_t^{MT,n} \times \pi_t^{MT,n} + \\ P_t^{VG,n} \times \pi_t^{VG,n} + \\ P_t^{ES-,n} \times \pi_t^{ES-,n} - \\ P_t^{ES+,n} \times \pi_t^{ES+,n} - \\ P_t^{RLD,n} \times \pi_t^{RLD,n} - \\ P_t^{VL,n} \times \pi_t^{VL,n} + \\ P_t^{UP,n} \times \pi_t^{UP,n} \end{array} \right] \times \Delta t \quad (1)$$

اجتماعی اتخاذ می‌کند. در طول عملکرد روزانه سیستم، با توجه به مقدار قیمت پیشنهادی منبع تولید و بار مجازی، ریزشکه‌ها می‌توانند مازاد تولید و یا در مواقعی کمبود تولید داشته باشند. مقدار مازاد توان مورد نیاز و یا کمبود توان در ریزشکه‌ها توسط EMS‌های پیشنهاد شده به وسیله متغیرهای  $P_t^{VL,n}$  و  $P_t^{VG,n}$  به واحد CEMS اعلام می‌شود. توان اختصاص داده شده به منبع تولید و بار مجازی توسط ریزشکه  $n$  ام می‌تواند از رابطه زیر به دست آید:

$$P_t^n = (P_t^{WT,n} + P_t^{PV,n} + P_t^{MT,n} + P_t^{ES-,n}) - (P_t^{load,n} + P_t^{ES+,n} + P_t^{RLD,n}) \quad (2)$$

در صورتی که  $P_t^n$  مثبت باشد به معنای وجود اضافه تولید است، که تحت چنین شرایطی ریزشکه توانایی فروش توان به ریزشکه‌های دیگر و شبکه را داراست و این مازاد توان به بار مجازی اختصاص داده می‌شود. اما زمانی که  $P_t^n$  منفی باشد به معنای وجود کمبود تولید است، که تحت چنین شرایطی ریزشکه توانایی تأمین تقاضای داخلی خود را ندارد و تحت چنین شرایطی باید از ریزشکه‌های دیگر و شبکه کمک بگیرد، بنابراین این کمبود توان به عنوان منبع تولید مجازی تلقی می‌شود.

### ۳-۲- پیاده‌سازی ریاضی تابع هدف در CEMS-MICA

پس از تعیین مقدار مازاد و کمبود توان هر یک از ریزشکه‌ها، واحد CEMS اطلاعات مربوط به تمامی EMS‌های سیستم را دریافت کرده و باید بهترین شرایط لازم برای تأمین این مقادیر با کمترین هزینه بهره برداری را فراهم کند و تصمیم لازم را با استفاده از ریزشکه‌های موجود و یا شبکه اتخاذ نماید. هدف این تابع این است که کمبود و مازاد تولید ریزشکه‌ها را به نحوی تأمین کند که رفاه اجتماعی کل سیستم بیشینه شود. تابع هزینه تعریف شده برای واحد CEMS می‌تواند به شکل زیر تعریف شود:

در این مدل،  $P_{s,t}^{WT,n}$ ،  $P_{s,t}^{PV,n}$ ،  $P_t^{MT,n}$ ،  $P_t^{ES-,n}$  و  $P_t^{VG,n}$  به ترتیب توان‌های تولیدی توسط منابع بادی تحت سناریوی  $S$  (تعداد کل سناریوهای در نظر گرفته شده است)، خورشیدی تحت سناریوی  $S$ ، میکروتوربین، منبع تولید مجازی<sup>۱۸</sup> و منبع ذخیره‌کننده انرژی برای ریزشکه  $n$  ام در بازه زمانی  $t$  ام است. ضرایب  $\mu_s^{WT}$  و  $\mu_s^{PV}$  به ترتیب احتمال وقوع سناریوی  $S$  برای منابع بادی و خورشیدی هستند.  $P_t^{RLD,n}$ ،  $P_t^{ES+,n}$  و  $P_t^{VL,n}$  به ترتیب توان‌های مصرفی توسط منبع ذخیره‌کننده انرژی، بار RLD و بار مجازی<sup>۱۹</sup> برای ریزشکه  $n$  ام در بازه زمانی  $t$  ام است.  $\pi_t^{VG,n}$ ،  $\pi_t^{MT,n}$ ،  $\pi_t^{PV,n}$ ،  $\pi_t^{WT,n}$ ،  $\pi_t^{ES-,n}$ ،  $\pi_t^{ES+,n}$ ،  $\pi_t^{RLD,n}$  و  $\pi_t^{VL,n}$  به ترتیب قیمت پیشنهادی توسط منابع بادی، خورشیدی، میکروتوربین، منبع تولید مجازی، منبع ذخیره‌کننده انرژی به عنوان تولیدکننده، منبع ذخیره‌کننده انرژی به عنوان مصرف‌کننده، بار RLD و بار مجازی در ریزشکه  $n$  ام در بازه زمانی  $t$  ام است. همچنین  $P_t^{UP,n}$  میزان توان تأمین نشده و  $\pi_t^{UP,n}$  جریمه در نظر گرفته شده برای این توان در ریزشکه  $n$  ام و در بازه زمانی  $t$  ام است.

در هر بازه زمانی، EMS‌ها ابتدا قیمت‌های پیشنهادی تمامی منابع تولید و مصرف‌کنندگان موجود در هر ریزشکه را دریافت می‌کنند. پس از آن، بسته به مقدار قیمت‌های پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی تصمیم به به‌کارگیری منابع تولید و تغذیه مصرف‌کنندگان با هدف ماکزیم نمودن رفاه

۱- محدودیت ذخیره انرژی؛

۲- ماکزیمم و مینیمم توان در دوره شارژینگ و دشارژینگ.

۴- تعادل انرژی

قید ادوات رزرو چرخان [۲ و ۳]

قید مربوط به این ادوات شامل بیشینه و کمینه توان تولیدی توسط منابع تجدید ناپذیر است.

قید منابع تجدیدپذیر [۲ و ۳]

این قید بیانگر بیشینه و کمینه توان تولیدی پیش‌بینی شده توسط منابع تجدیدپذیر در ریز شبکه و در بازه زمانی  $t$  است. شایان ذکر است که توان تولیدی واقعی منابع تجدیدپذیر مقداری در این بازه خواهد بود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید این نوع مولدها، در این مقاله میزان تولید به شکل تصادفی در این بازه انتخاب شده است. مشخص است که با افزایش دقت پیش بینی این محدوده کوچکتر خواهد شد.

قید مربوط به بارهای RLD [۲ و ۳]

کل توان مصرفی توسط RLD باید کمتر یا مساوی بیشینه بار در نظر گرفته شده برای RLD باشد.

قید تبادل توان بین ریز شبکه‌ها و شبکه سراسری

همان‌طور که بیان شد، در صورتی که ریز شبکه در حالت متصل به شبکه باشد، می‌تواند با شبکه سراسری و سایر ریز شبکه‌ها تعامل داشته باشد. اما این تعاملات به قیودی محدود است. در واقع ریز شبکه  $n$  ام بیشتر از  $\bar{P}^{BUY}$  نمی‌تواند از شبکه و سایر ریز شبکه‌ها توان خریداری کند و یا بیشتر از  $\bar{P}^{SELL}$  به شبکه، سایر ریز شبکه‌ها و بار LL توان بفروشد. در واقع این قید ناشی از محدودیت خطوط انتقال واصل بین شبکه و ریز شبکه و همچنین، برای محدود کردن تبادلات با شبکه و استفاده بهتر از منابع موجود در ریز شبکه در نظر گرفته شده است.

$$z^{CEMS} = \min \left( \begin{array}{l} P_t^{VL,n} \times \pi_t^{VL,n} - \\ P_t^{LL,n} \times \pi_t^{LL,n} - \\ P_t^{GRID+,n} \times \pi_t^{GRID+,n} - \\ \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^K P_t^{MG+,kn} \times \pi_t^{MG+,kn} - \\ P_t^{VG,n} \times \pi_t^{VG,n} + \\ P_t^{GRID-,n} \times \pi_t^{GRID-,n} + \\ \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^K P_t^{MG-,kn} \times \pi_t^{MG-,kn} \end{array} \right) \times \Delta t \quad (3)$$

در این شکل  $P_t^{MG+,kn}$  و  $P_t^{GRID+,n}$ ،  $P_t^{LL,n}$  به ترتیب توان فروخته شده به بار LL، شبکه سراسری و به ریز شبکه  $k$  ام توسط ریز شبکه  $n$  ام در بازه زمانی  $t$  ام است.  $P_t^{MG-,kn}$  و  $P_t^{GRID-,n}$  به ترتیب توان خریداری شده از شبکه سراسری و ریز شبکه  $k$  ام توسط ریز شبکه  $n$  ام در بازه زمانی  $t$  ام است. همچنین،  $\pi_t^{GRID+,n}$ ،  $\pi_t^{LL,n}$  و  $\pi_t^{MG+,kn}$  به ترتیب قیمت پیشنهادی فروش توان به بار LL، شبکه سراسری و ریز شبکه  $k$  ام و  $\pi_t^{GRID-,n}$  و  $\pi_t^{MG-,kn}$  به ترتیب قیمت پیشنهادی خرید توان از شبکه سراسری و ریز شبکه  $k$  ام است.

۳-۳- قیود مسأله

قیود رایبه شده برای مسأله بهینه‌سازی شامل موارد زیر است:

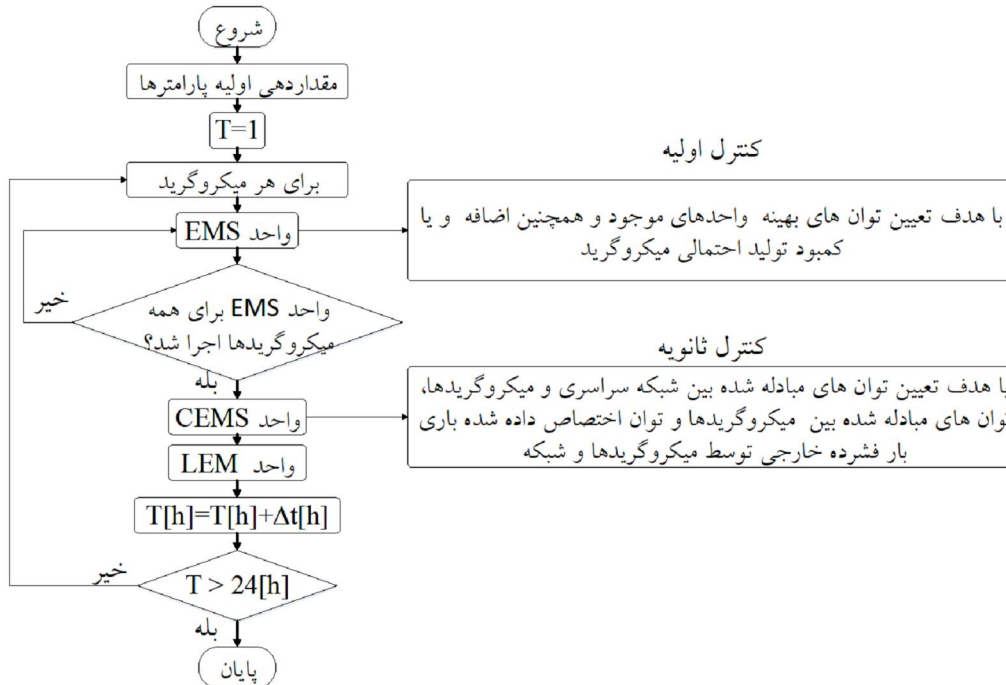
قید تعادل

در هر ریز شبکه مقدار کل توان تولید شده توسط تولیدکنندگان در هر بازه زمانی باید برابر مقدار تقاضای کلی مصرف‌کنندگان باشد.

$$P_{Tot,t}^{MG+,n} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^K P_t^{MG+,kn} + P_t^{GRID+,n} + P_t^{LL,n} = P_{Tot,t}^{MG-,n} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^K P_t^{MG-,kn} + P_t^{GRID-,n} \quad (4)$$

قیود ES [۲،۳]

فلوچارت الگوریتم پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی کنترل دو لایه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این الگوریتم دارای ۳ واحد به نام‌های واحد EMS، CEMS و LEM بازار محلی انرژی<sup>۲۰</sup> LEM است. واحد LEM به طور مفصل در مقالات ارائه شده توسط نویسندگان تشریح شده‌اند [۱].



شکل (۲): الگوریتم پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی مدیریت انرژی با دو لایه کنترلی

همچنین، فروش توان به آن‌ها در زمان مازاد تولید است. از سوی دیگر، ریزشبه متصل به شبکه، می‌تواند بارهای فشرده خارجی را نیز تغذیه کند. به عبارت دیگر، در مدیریت انرژی کنترل اولیه ریزشبه‌های متصل به شبکه، علاوه بر تعیین توان‌های بهینه برای واحدهای موجود در ریزشبه، همان‌طور که قبلاً بیان شد دو متغیر دیگر به نام‌های منبع تولید مجازی ( $P_t^{VG,n}$ ) و بار مجازی ( $P_t^{VL,n}$ ) نیز تعیین می‌شوند. این دو متغیر، در واقع مجموع توان‌های اختصاص داده شده برای فروش به شبکه، فروش به ریزشبه‌های دیگر و تغذیه بارهای فشرده خارجی به عنوان یک بار مجازی و مجموع توان‌های اختصاص داده شده برای خرید از شبکه، خرید از ریزشبه‌های دیگر به عنوان یک منبع تولید مجازی است. به بیان دیگر، بار

## ۵- پیاده‌سازی ساختار مدیریت انرژی پیشنهادی با دو لایه کنترلی

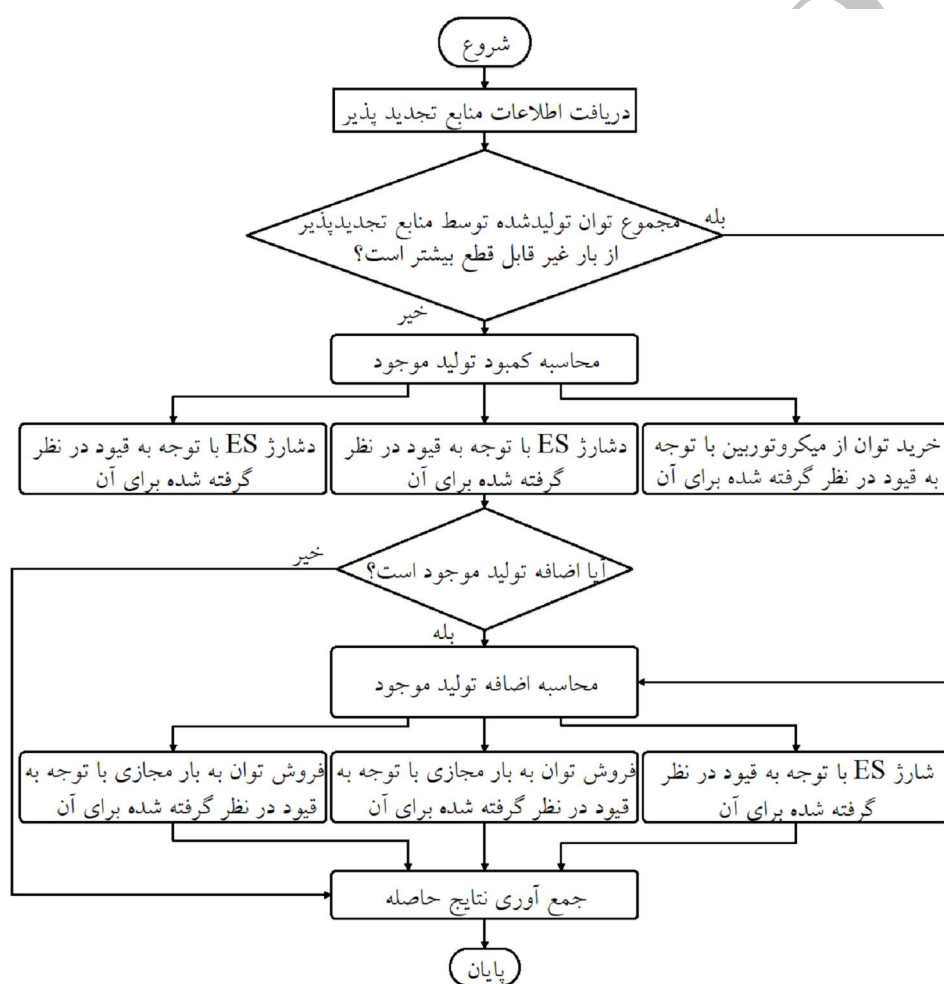
ساختار سیستم مدیریت انرژی پیشنهاد شده در این مقاله، برای ریزشبه‌هایی با مالکیت چندگانه دارای دو لایه کنترلی به نام‌های کنترل اولیه و ثانویه است. در شکل (۲)

### ۵-۱- کنترل اولیه

فلوچارت پیشنهادی برای پیاده‌سازی واحد EMS در کنترل اولیه در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از انتخاب حالت عملکرد ریزشبه‌ها (مستقل از شبکه/متصل به شبکه) در کنترل اولیه، EMS برای هر ریزشبه به شکل کاملاً مستقل اجرا شده و با توجه به قیود در نظر گرفته شده برای مسأله، مقادیر توان بهینه واحدهای تولیدی و مصرفی موجود در همان ریزشبه تعیین می‌شود. شایان به ذکر است، اگر ریزشبه در حالت مستقل از شبکه باشد؛ هیچگونه تبادلاتی با شبکه نخواهد داشت. اما در حالت متصل به شبکه، می‌تواند با شبکه و ریزشبه‌های دیگر تبادل توان انجام شود. تبادل توان به معنای خرید توان از شبکه سراسری و ریزشبه‌های دیگر در مواقع کمبود تولید و

سیستم مدیریت انرژی هر ریز شبکه با توجه به قیود فنی و اقتصادی در نظر گرفته شده، تعیین می‌شود. حال اینکه چه میزان از این بار و تولید مجازی به کدام مولفه اختصاص داده شود از حوزه وظایف مدیریت انرژی ریز شبکه در سطح کنترل اولیه خارج است. بنابراین، در هر بازه زمانی کمبود و یا اضافه تولید ریز شبکه‌ها به شکل یک مجموعه اطلاعات وارد سیستم مدیریت انرژی مرکزی در سطح کنترل ثانویه می‌شود.

مجازی میزان اضافه تولید احتمالی و منبع تولید مجازی میزان کمبود تولید احتمالی ریز شبکه است. با توجه به تابع هدف و قیمت پیشنهادی واحدهای موجود در ریز شبکه و همچنین قیمت پیشنهادی عناصر خارجی، یعنی شبکه و ریز شبکه‌های دیگر، EMS هر ریز شبکه در کنترل اولیه تشخیص می‌دهد که آیا تبادل توان با دنیای خارج به نفع صاحب ریز شبکه است یا خیر. بنابراین، میزان توان اختصاص داده شده برای بار و منبع تولید مجازی توسط



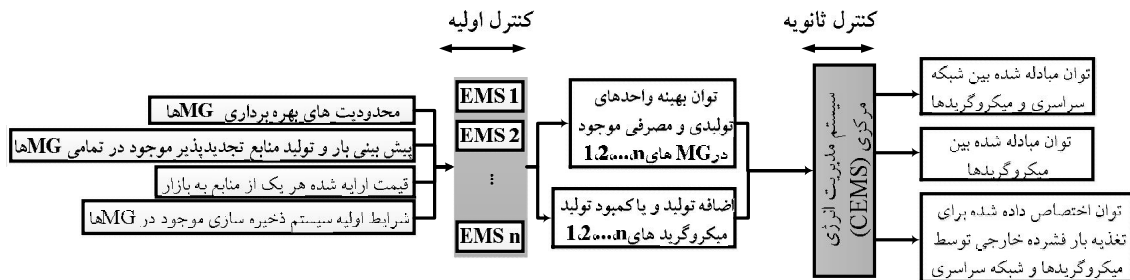
شکل (۳): فلوچارت پیشنهادی برای پیاده‌سازی واحد EMS در کنترل اولیه

پیش‌بینی بارها و منابع تولید تجدیدپذیر، قیمت‌های پیشنهاد شده هر یک از منابع موجود در ریز شبکه‌ها به EMS‌های موجود در سطح کنترل اولیه ارسال می‌شود. پس از تعیین توان‌های بهینه هر یک از ریز شبکه‌ها و تعیین مقدار

در شکل (۴)، ارتباط بین EMS پیشنهاد شده در کنترل اولیه و CEMS در کنترل ثانویه نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، اطلاعاتی از قبیل قیود فنی مربوط به ادوات درگیر در ریز شبکه‌ها، اطلاعات



توان‌های مازاد و کمبود هر یک از آن‌ها، این اطلاعات به CEMS پیشنهاد شده در سطح کنترل ثانویه ارسال می‌شود.



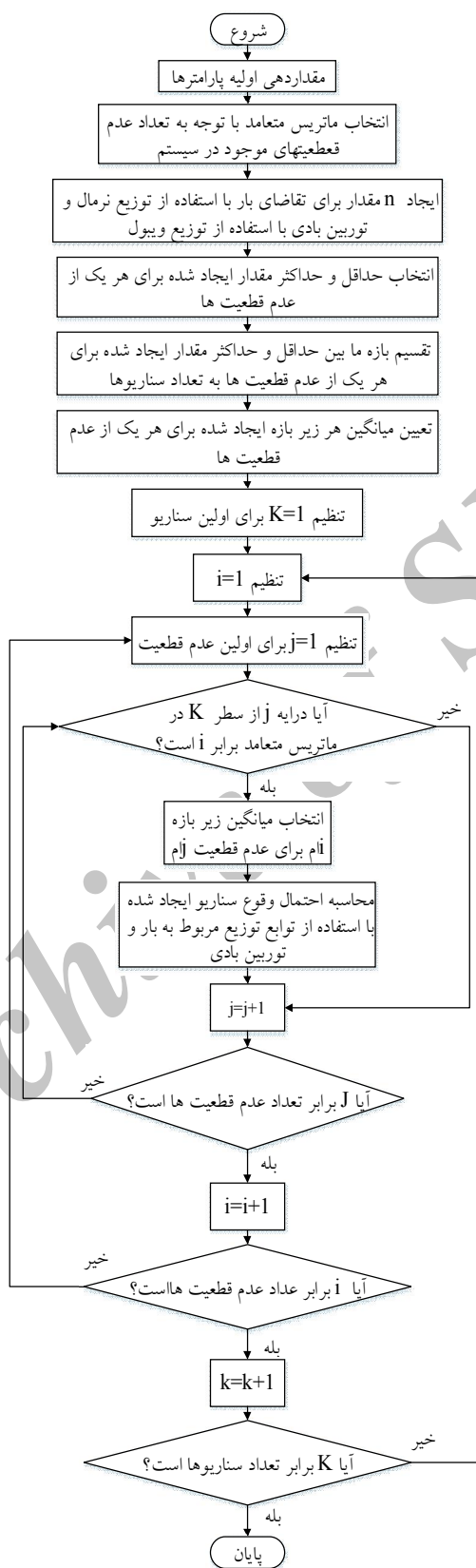
شکل (۴): پیوند بین EMS هر یک از ریزشبه‌ها و CEMS

به دست آوردن راه‌حل‌های قوی در مسائل آزمایشی طراحی تولید، روش قدرتمند آزمون آرایه متعامد تاگوچی (Taguchi's orthogonal array testing-TOAT) را ارائه داده است. در بهره‌برداری با عدم قطعیت، TOAT با حداقل تعداد سناریو تضمین می‌کند که سناریوهای آزمایشی در نظر گرفته شده اطلاعات آماری خوبی را ارائه می‌دهند و به طور درخور توجهی تعداد آزمون را کاهش می‌دهد. برای مدل‌های مختلفی ثابت شده است که از بین تمامی سناریوهای ممکن TOAT توانایی انتخاب سناریو بهینه را داراست [۱۴]. در مقایسه با روش مونت کارلو، TOAT سناریوهای آزمون بسیار کمتری ارائه می‌دهد و به کاهش زمان محاسبات منجر می‌شود. این روش قابلیت خود را به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی برای حل مسأله پخش بار و مسایل گسیل اقتصادی توان در سیستم‌های قدرت اثبات کرده است [۱۵]. عدم قطعیت‌های موجود در مسأله مطرح شده با سناریوهای ایجاد شده مطابق با فلوجارت شکل (۵) پیاده‌سازی شده است.

#### ۴-۱-۱-۱- الگوریتم آزمون آرایه متعامد تاگوچی

#### TOAT<sup>۲۱</sup>

یکی از مزایای استفاده از ریزشبه‌ها، افزایش تولید منابع تجدیدپذیر در شبکه است. با این حال، یک مشکل بزرگ این نوع ادوات، طبیعت متناوبی آن‌هاست. توان تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر تنها به شاخص‌های آب و هوایی مانند سرعت باد و تابش خورشید بستگی دارد. بنابراین، عدم قطعیت موجود در این منابع به علت تغییرات مستمر در تولید برق تجدیدپذیر نیست، بلکه به علت غیر قابل پیش‌بینی بودن بخشی از انرژی باد و خورشیدی به علت خطاهای پیش‌بینی آن‌هاست. یکی از علل اصلی عدم قطعیت تغییرات غیر منتظره در تقاضای سیستم در طول روز است. با این حال، با وجود عدم قطعیت راه‌حل به دست آمده ممکن است مطلوب و یا حتی امکان‌پذیر نباشد. بنابراین، به منظور دستیابی به راه‌حل قابل اعتماد باید عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر در برنامه‌ریزی تولید توان در ریزشبه‌ها منظور شود. در این مقاله، به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت از روش تاگوچی استفاده شده است. تاگوچی در [۱۳] برای



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم TOAT

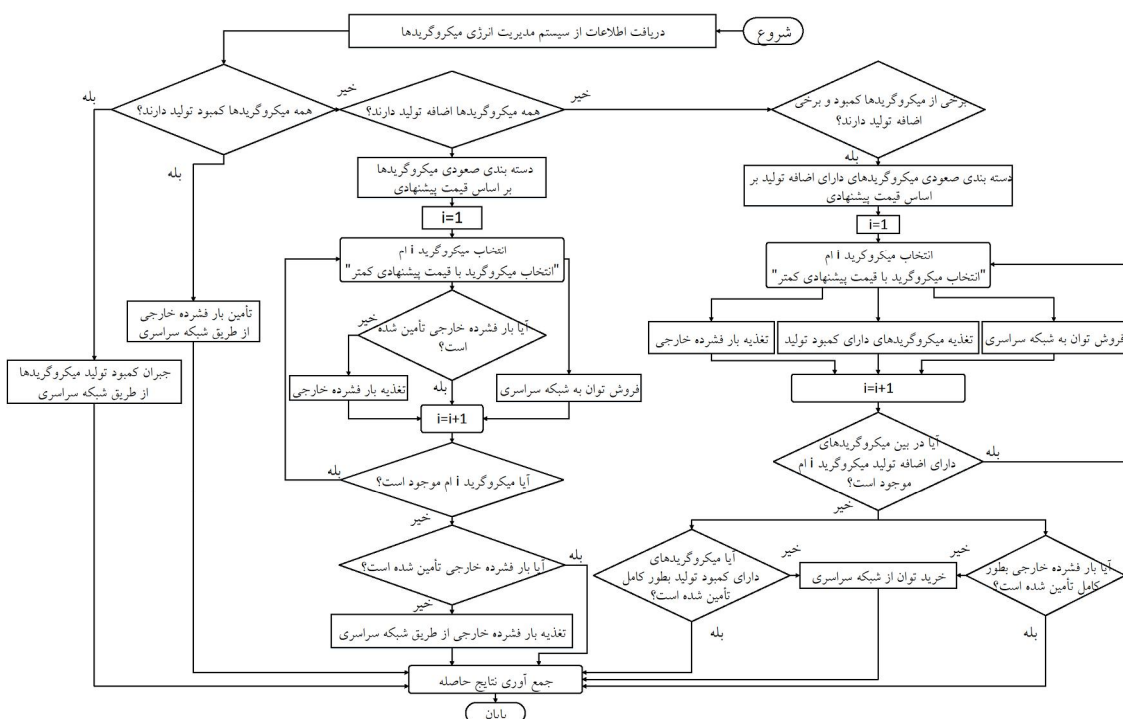
در شکل (۶) فلوچارت پیشنهادی برای پیاده‌سازی

۵-۲- کنترل ثانویه

وجود خواهد داشت که ریزشبهه برنده به طور کامل بار فشرده خارجی را تغذیه نکند؛ در چنین شرایطی ریزشبهه‌های دیگر برای تغذیه این بار به همین ترتیب عمل خواهند کرد و اگر همچنان بار فشرده خارجی به طور کامل تأمین نشده باشد، شبکه سراسری وارد عمل خواهد شد. در نهایت، اگر همچنان در ریزشبهه‌ها اضافه تولید موجود باشد، به شبکه سراسری فروخته خواهد شد.

از طرف دیگر، این امکان وجود دارد شرایطی به وجود آید که برخی از ریزشبهه‌ها کمبود و برخی اضافه تولید داشته باشند؛ در این صورت، ابتدا بین ریزشبهه‌های با اضافه تولید، ریزشبهه‌ای با قیمت پیشنهادی کمتر انتخاب شده و مازاد تولید آن می‌تواند برای جبران کمبود تولید ریزشبهه‌های دیگر، تغذیه بار فشرده خارجی و فروش به شبکه سراسری به کار برده شود. در واقع در چنین شرایطی ابتدا کمبود تولید، ریزشبهه با قیمت پیشنهادی بیشتر جبران می‌شود. سیستم مدیریت انرژی مرکزی تصمیم می‌گیرد چه میزان از مازاد تولید به این سه مولفه اختصاص داده شود. این روند تا اتمام اضافه تولید ریزشبهه‌ها ادامه پیدا خواهد کرد و در نهایت، اگر ریزشبهه‌های با کمبود تولید و بار فشرده خارجی به طور کامل تأمین نشوند، شبکه سراسری وارد عمل شده و تعادل توان را برقرار خواهد کرد. بنابراین، همان‌طور که بیان شد در واحد CEMS سه حالت کلی خواهیم داشت. یکی از حالت‌هایی که ممکن است با آن مواجه شویم این است که همه ریزشبهه‌ها کمبود تولید داشته باشند؛ در چنین شرایطی نیازی به بهینه‌سازی نیست، زیرا واضح است که تمامی کمبود تولیدها و بار فشرده خارجی باید به وسیله شبکه سراسری تغذیه شوند. اما در سایر موارد الگوریتم بهینه‌سازی مطابق با فلوچارت ارایه شده انجام می‌شود.

واحد CEMS در کنترل ثانویه ارایه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود پس از دریافت اطلاعات از واحد EMS از تمامی ریزشبهه‌ها فرآیند مدیریت انرژی در کنترل ثانویه آغاز می‌شود. شایان به ذکر است اگر ریزشبهه‌ای در حالت عملکرد جزیره‌ای باشد؛ کنترل ثانویه برای این ریزشبهه عمل نخواهد کرد. به این ترتیب، ریزشبهه‌های متصل به شبکه کمبود و یا اضافه تولید احتمالی خود را به سیستم مدیریت انرژی مرکزی در سطح ثانویه ارسال خواهند کرد و این سیستم وضعیت بارها و تولیدات مجازی تعیین شده در سطح کنترل اولیه را مشخص می‌کند. در چنین شرایطی سناریوهای مختلفی ممکن است با توجه به تعداد ریزشبهه‌های موجود در سیستم قدرت، اتفاق بیفتد. اگر  $n$  ریزشبهه در سیستم موجود به تعداد  $2^n$  سناریو در سیستم رخ خواهد داد. اگر همه ریزشبهه‌ها کمبود تولید داشته باشند، این بدان معناست که سیستم مدیریت انرژی مستقل ریزشبهه‌ها، توانی برای منبع تولید مجازی در نظر گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تولید مجازی به معنای خرید از شبکه و ریزشبهه‌های دیگر است. از آنجا که همه ریزشبهه‌ها دارای کمبود تولید هستند، کاملاً واضح است که نمی‌تواند توانی برای فروش اختصاص دهند و کمبود تولید خود را تنها از شبکه سراسری تهیه خواهند کرد. در این سناریو هیچ کدام از ریزشبهه‌ها توانایی تغذیه بار فشرده خارجی را نخواهند داشت و این بار به طور کامل به وسیله شبکه سراسری تغذیه خواهد شد. زمانی که همه ریزشبهه‌ها اضافه تولید داشته باشند؛ این اضافه تولید برای تغذیه بار فشرده خارجی و فروش به شبکه سراسری مصرف خواهد شد. در این سناریو ابتدا ریزشبهه‌ها برای تغذیه بار فشرده خارجی با یکدیگر رقابت کرده و ریزشبهه با قیمت پیشنهادی کمتر برنده این رقابت خواهد شد. شایان ذکر است این امکان

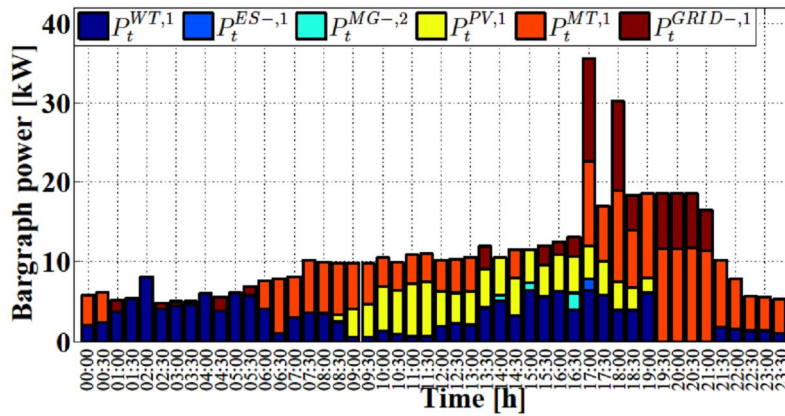


شکل (۶): فلوجارت پیشنهادی برای پیاده سازی واحد CEMS در کنترل ثانویه

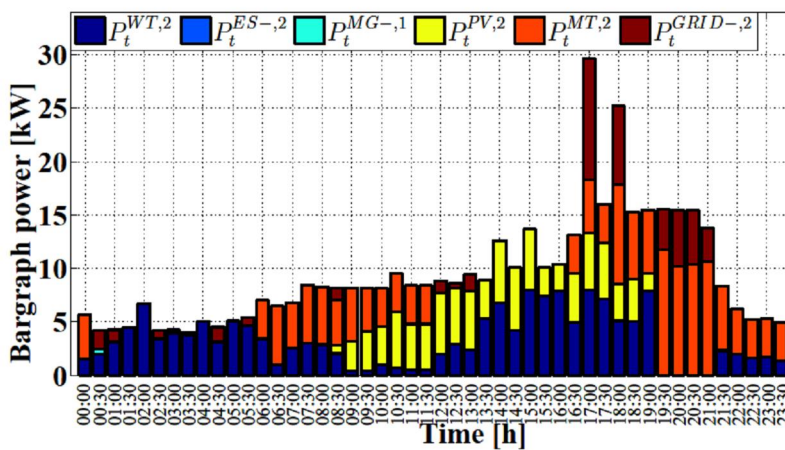
## ۶- نتایج و بحث

نتیجه، الگوریتم تلاش کرده است بیشینه توان قابل دسترس را از این منابع خریداری کند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در بازه زمانی ۰۰:۰۱-۰۰:۳۰ با توجه به قیمت پیشنهادی کمتر MT در نتیجه سود بیشتر نسبت به قیمت‌های پیشنهادی خرید از شبکه و ریز شبکه دیگر، ریز شبکه ۱ علاوه بر تغذیه RLD و ES بخشی از توان مورد نیاز ریز شبکه ۲ و LL را نیز تأمین کرده است. نکته قابل توجه این است که الگوریتم بهینه‌سازی برای کاهش هزینه کلی تولید، این منبع را برای تأمین توان مورد نیاز منابع دیگر اختصاص داده است. در ساعت بعدی، با وجود بالا بودن  $\pi_t^{GRID-1}$  نسبت به تمامی قیمت‌های پیشنهادی دیگر، EMS ریز شبکه ۱ تصمیم گرفته است تا این که بخشی از RLD را توسط خرید از شبکه تأمین کند.

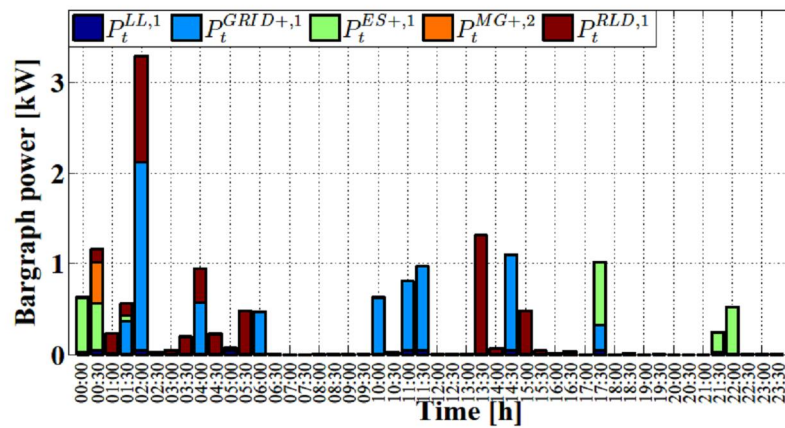
برنامه‌ریزی منابع انرژی برای ریز شبکه‌های ۱ و ۲ به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۷) الف و (۷) ب نشان داده شده است. در شکل‌های ۸ الف و ۸ ب نیز مقدار توان فروخته شده به شبکه، توان فروخته شده به بار LL از طرف هر یک از ریز شبکه‌ها، مقدار توانی که به ریز شبکه دیگر فروخته شده است، توان تغذیه بار RLD و توان شارژ ES نشان داده شده است. تولید توان توسط PV و WT متأثر از شرایط آب و هوایی (وزش باد و تابش خورشیدی) است. این منابع با شدت بیشتری از منابع دیگر در تأمین توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان مشارکت کرده‌اند. زیرا قیمت‌های پیشنهادی پایین‌تری ارائه کرده‌اند که رقابتی‌تر از منابع دیگر است. در



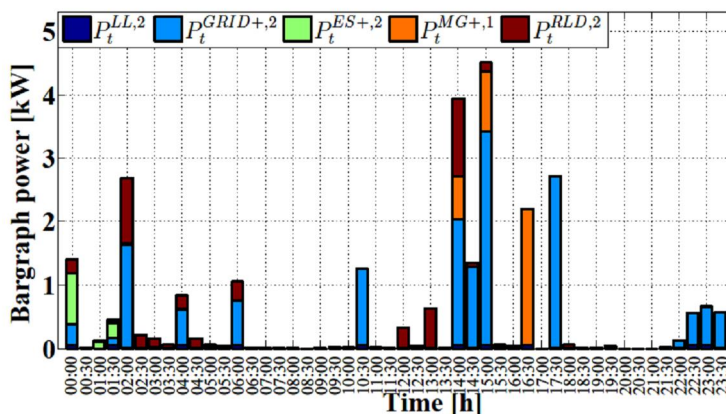
شکل (۷) الف: برنامه ریزی منابع انرژی برای ریزشبکه ۱



شکل (۷) ب: برنامه ریزی منابع انرژی برای ریزشبکه ۲



شکل (۸) الف: توان مصرفی توسط مصرف کنندگان موجود در ریزشبکه ۱



شکل (۸) ب: توان مصرفی توسط مصرف‌کنندگان موجود در ریز شبکه ۲

اولیه صبح با افزایش تقاضای بار ابتدا به علت کم شدن توان خروجی WT تقاضای بار بیشتر توسط MT تغذیه شده و به مرور با به سرویس آمدن PV، مشارکت MT نیز به تدریج کاهش پیدا کرده است. EMS ریز شبکه ۱ را برای تأمین تقاضای خود از MT استفاده کرده و بخشی از آن نیز توسط توان خریداری شده از شبکه تغذیه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) ب مشاهده می‌شود، در ساعات اولیه روز که مقدار تقاضای بار پایین است EMS ریز شبکه ۱، مقدار توان تولیدی را برای شارژ ES در طول این دوره اختصاص داده است؛ و با توجه به تعریف قید محدودیت حداکثر توان شارژ ES به مقدار  $\bar{P}^{ES}$  در نتیجه مابقی مازاد توان برای تغذیه RLD استفاده شده است. در این بازه زمانی، مقداری از توان مازاد به ریز شبکه ۱ فروخته شده است که صرف شارژ ES شده است. با توجه با پایین‌تر بودن قیمت پیشنهادی خرید از ریز شبکه ۲ نسبت به قیمت پیشنهادی شارژ ES در نتیجه صاحب ریز شبکه ۱ منفعت خوبی به دست آورده است.

مقادیر درصد روزانه تولید توان توسط منابع تولید و نیز درصد سهم هر یک از مصرف‌کنندگان برای مصرف مقدار توان مازاد تولید شده به ترتیب در شکل‌های (۱۰) الف و (۱۰) ب برای ریز شبکه ۲ نشان داده شده است. ریز شبکه ۲ نیز مشابه ریز شبکه ۱ از منابع MT و شبکه در ساعاتی که بار محلی شروع به افزایش کرده است (۰۶:۰۰ - ۰۹:۰۰) پیش از به سرویس وارد شدن PV و در زمان اوج مصرف و یا وقوع سناریوهای ۲ و ۳ (۰۸:۰۰ - ۰۴:۰۰) استفاده کرده

در ساعت ۰۲:۰۰ با توجه به افت تقاضای بار محلی توان  $P_t^{EGP,1}$  بیشتری تولید شده و این توان با توجه به اینکه قیمت پیشنهادی  $\pi_t^{GRID+,1}$  بالاتر است، بیشتر صرف تغذیه شبکه شده است. نکته دیگر آن این است که بین بارهای RLD و LL با وجود بالاتر بودن  $\pi_t^{LL-,1}$  نسبت به  $\pi_t^{RLD,1}$  RLD کاندید بعدی برای تغذیه توان مازاد تولیدی توسط ریز شبکه ۱ در این بازه زمانی است. EMS-MICA بار مصرفی در هر دو ریز شبکه را برای اجتناب از پرداخت جریمه در طول پیک مصرف زمانی که دیاگرام بار به حداکثر مصرف می‌رسد و یا وقوع سناریوهای ۲ و ۳، زمانی که ترکیب تمامی منابع تولید برای تغذیه بار کافی نیست، کاهش داده است. شارژ ES تنها در ۳ ساعت در هر دو ریز شبکه رخ داده و تأثیر عمیقی بر روی کل توان مصرف شده ندارد. پس از این بازه‌های زمانی SOC در هر دو ریز شبکه به حداکثر مقدار رسیده و ES در حالت آماده به‌کار نگه داشته می‌شود تا این که در مواقع عملکرد ریز شبکه‌ها در حالت مستقل از شبکه توانایی پشتیبانی آن‌ها را داشته باشد.

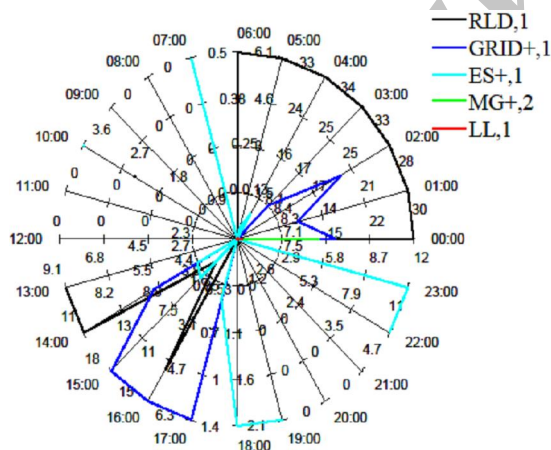
مقادیر درصد روزانه تولید توان توسط منابع تولید و نیز درصد سهم هر یک از مصرف‌کنندگان برای مصرف مقدار توان مازاد تولید شده به ترتیب در شکل‌های (۹) الف و (۹) ب برای ریز شبکه ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساعات اولیه روز زمانی که بار مصرفی پایین است، منابع تجدیدپذیر بیشتر آن‌ها را تغذیه کرده‌اند و مواردی نیز از شبکه توان خریداری شده است. در ساعات

سیستم چند شرکتی توسعه یافته در این مقاله، به وسیله الگوریتم رقابت استعماری چند بعدی پیاده‌سازی شده و برای کنترل بهره‌برداری در هر دو حالت مستقل و متصل به شبکه ارایه شده است. در الگوریتم پیشنهاد شده، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه مد نظر قرار گرفته به نحوی که شرایط مندرج در قیود فنی را به طور کامل برآورده کند. نتایج حاصل از سیستم مورد مطالعه شامل دو ریزشبهه و یک بار فشرده، عملکرد ساختار پیشنهادی را در مدیریت انرژی در میان ریزشبهه‌های متعدد تأیید کرده و به وضوح نشان می‌دهد که سیستم چند شرکتی ارایه شده به لحاظ اقتصادی موثر بوده، زیرا سبب مدیریت موثر منابع پراکنده با کم‌ترین هزینه بهره‌برداری می‌شود. ساختار پیشنهادی می‌تواند سیستم قدرت را به طور دقیق نظارت، کنترل و بهره‌برداری کند و همچنین، مقیاس‌پذیر، مقاوم و به راحتی قابل تنظیم مجدد است. بنابراین، این سیستم می‌تواند در شرایط و نیازهای مختلف، برای مدیریت و کنترل هر ساختاری از سیستم قدرت و با گسترش توابع شرکت‌ها و ایجاد شرکت‌های اضافی در سیستم، توسعه یابد.

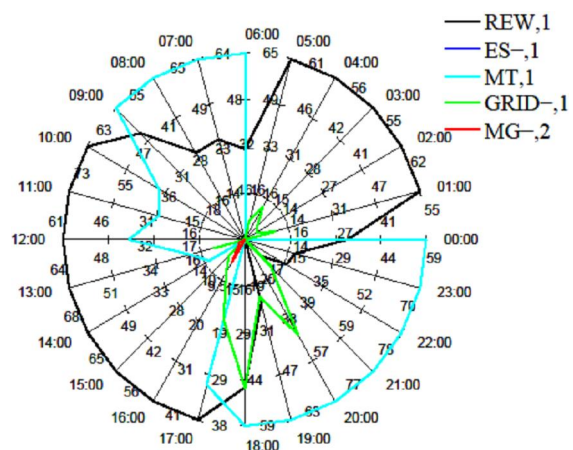
است. EMS ریزشبهه ۲ به جز در یک ساعت (۰۰:۳۰-۰۰:۰۱) در بقیه ساعات از ریزشبهه ۱ توانی خریداری نکرده است. در این ساعت با توجه به ترتیب قیمت‌های پیشنهادی بارهای ES، RLD و ریزشبهه ۲ به ترتیب تعذیه شده‌اند. در طول بازه زمانی ۰۰:۱۸-۰۰:۲۴، با توجه به بالاتر بودن قیمت پیشنهادی MT نسبت به خرید از شبکه، MT با توان  $\bar{P}^{MT}$  وارد مدار شده و بقیه توان از شبکه خریداری شده است. زیرا با توجه به اولویت قیمت پیشنهادی مصرف‌کنندگان مازاد تولید صرف تعذیه RLD و ES داخلی شده و توان مازادی برای فروش به ریزشبهه ۲ تولید نشده است.

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، برای تعیین توان بهینه واحدهای تولیدی و مصرفی موجود در ریزشبهه‌ها و همچنین، کنترل تبادلات آن‌ها با یکدیگر و شبکه سراسری، با استفاده از سیستم‌های چند شرکتی، ساختاری با دو لایه کنترلی برای مدیریت انرژی ریزشبهه‌های با مالکیت چندگانه پیشنهاد شده است.

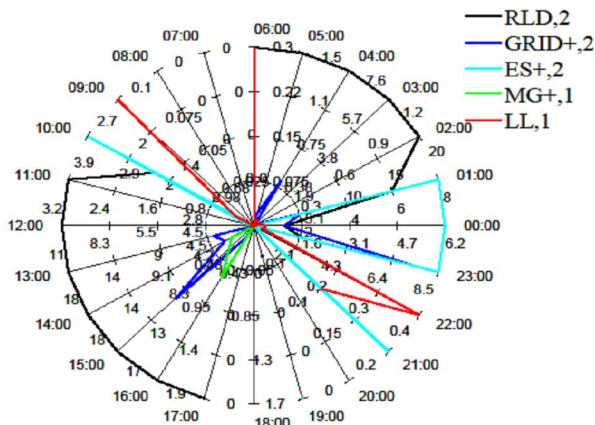


شکل (۹) ب: درصد مشارکت روزانه منابع مصرف ریزشبهه ۱

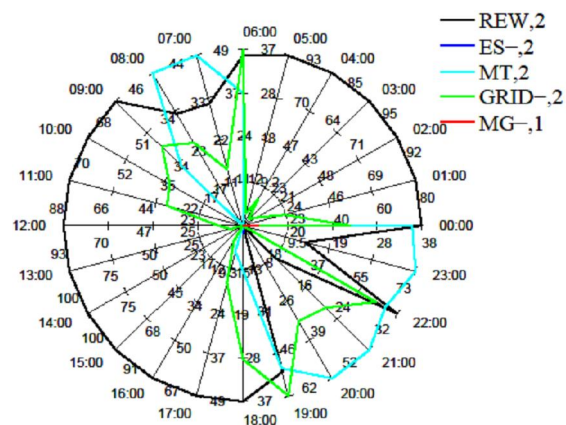


شکل (۹) الف: درصد مشارکت روزانه منابع تولید ریزشبهه ۱





شکل (۱۰) ب: درصد مشارکت روزانه منابع مصرف ریز شبکه ۲



شکل (۱۰) الف: درصد مشارکت روزانه منابع تولید ریز شبکه ۲

مراجع

- [1] Marzband, M., Sumper, A., Ruiz-Álvarez, A., Domínguez-García, J. L., Tomoiagă, B., "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets", *Applied Energy*, Vol. 106, pp. 365-76, 2013.
- [2] Marzband, M., Sumper, A., Domínguez-García, J. L., Gumara-Ferret, R., "Experimental Validation of a Real Time Energy Management System for Microgrids in Islanded Mode Using a Local Day-Ahead Electricity Market and MINLP", *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 314-22, 2013.
- [3] Marzband, M., Ghadimi, M., Sumper, M., Domínguez-García, J. L., "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode", *Applied Energy*, Vol. 128, pp. 164-78, 2014.
- [4] Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., Crossley, P., "Microgrids and Active Distribution Networks" The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
- [5] Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone, A. M., "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 1, pp. 138-148, 2011.
- [6] Mehleri, E. D., Sarimveis, H., Markatos N. C., Papageorgiou, L. G., "Optimal Design and Operation of Distributed Energy Systems", *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 331-342, 2013.
- [7] Soares, J., Silva, M., Sousa, T., Vale, Z., Morais, H., "Distributed energy resource short-term scheduling using signaled particle swarm optimization", *Energy*, Vol. 42, No. 1, pp. 466 - 476, 2012.
- [8] Niknam, T., Golestaneh, F., Malekpour, A., "Probabilistic energy and operation management of a Microgrid containing Wind-Photovoltaic-Fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm", *Energy*, Vol. 43,

ضمایم

جدول (۲): توان‌های تولیدی و مصرفی توسط ریز شبکه n ام در بازه زمانی t ام

نماد	کمیت
$P_t^{WT,n}$	توان تولیدی منبع WT
$P_t^{PV,n}$	توان تولیدی منبع PV
$P_t^{MT,n}$	توان تولیدی منبع MT
$P_t^{VG,n}$	توان تولیدی منبع تولید مجازی
$P_t^{ES-,n}$	توان تولیدی منبع ES
$P_t^{ES+,n}$	توان مصرفی منبع ES
$P_t^{RLD,n}$	توان مصرفی بار RLD
$P_t^{VL,n}$	توان مصرفی بار مجازی
$P_t^{load,n}$	توان مصرفی بار NRLD
$P_t^{LL,n}$	توان مصرفی بار LL
$P_t^{GRID+,n}$	توان فروخته شده به شبکه سراسری از ریز شبکه n ام
$P_t^{GRID-,n}$	توان خریداری شده از شبکه سراسری به ریز شبکه n ام
$P_t^{MG+,kn}$	توان فروخته شده به ریز شبکه k ام از ریز شبکه n ام
$P_t^{MG-,kn}$	توان خریداری شده از ریز شبکه k ام به ریز شبکه n ام
$\bar{P}^{BUY}$	حداکثر توان خریداری شده توسط ریز شبکه n ام
$\bar{P}^{SELL}$	حداکثر توان فروخته شده توسط ریز شبکه n ام



- A.M., Htay Nwe Aung, "Multiagent System for Real-Time Operation of a Microgrid in Real-Time Digital Simulator", IEEE transactions on smart grid, Vol. 3, No. 2, pp. 925 – 933, 2012.
- [13] Kumar Karna, S., Sahai, R., "An Overview on Taguchi Method", IEEE transactions on power delivery, Vol. 1, No. 1, pp. 1 – 7, 2012.
- [14] Atkinson, A. C., Donev, A. N., Tobias, R. D., "Optimum Experimental Designs, with SAS", Oxford University Press, 2007.
- [15] Byrne, D. M., Taguchi, S., "The Taguchi approach to parameter design", Quality Progress, Vol. 20, No. 12, pp. 19-26, 1987.
- No. 1, pp. 427 – 437, 2012.
- [9] Niknam, T., Meymand, H., Mojarrad, H., "An efficient algorithm for multi-objective optimal operation management of distribution network considering fuel cell power plants", Energy, Vol. 36, No. 1, pp. 119 – 132, 2011.
- [10] Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B., Hu, G., "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation", IET Renew Power Gener. Vol. 5, No. 3, pp. 258-67, 2011.
- [11] Kumar Nunna, H. S. V. S., Suryanarayana D., "Energy Management in Microgrids Using Demand Response and Distributed Storage—A Multiagent Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, NO. 2, pp. 939 – 947, 2013.
- [12] Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone,

---

<sup>1</sup> Multi-period imperialist competition algorithm

<sup>2</sup> Microgrids

<sup>3</sup> Energy management systems

<sup>4</sup> Mixed integer linear programming

<sup>5</sup> Signaled particle swarm optimization

<sup>6</sup> Central energy management system

<sup>7</sup> Plug and play

<sup>8</sup> Undelivered power

<sup>9</sup> Virtual generation unit

<sup>10</sup> Virtual load unit

<sup>11</sup> Wind turbine

<sup>12</sup> Photovoltaic

<sup>13</sup> Micro-turbine

<sup>14</sup> Energy storage

<sup>15</sup> Non-responsive load demand

<sup>16</sup> Responsive load demand

<sup>17</sup> Lumped load

<sup>18</sup> Virtual generation units

<sup>19</sup> Virtual load units

<sup>20</sup> Local energy market

<sup>21</sup> Taguchi's orthogonal array testing