

برنامه‌ریزی و تجدید آرایش بهینه در شبکه‌ای با ریز شبکه‌های چندگانه

توحید فرهودی^۱، کارشناس ارشد؛ سجاد نجفی روادانق^۲، دانشیار

۱- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران -

farhoudi@azaruniv.edu

۲- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران -

s.najafi@azaruniv.edu

چکیده: در این مقاله، تجدید آرایش بهینه مجموعه‌ای از ریز شبکه‌های به هم پیوسته جهت تأمین بهینه توان شبکه برای یک دوره یک‌روزه ارائه شده است. در ساعات مختلف بهره‌برداری، بر اساس توابع هدف ارائه شده الگوی مشارکت ریز شبکه‌ها در شبکه توزیع مشخص می‌گردد. در هر ساعت و برای هر حالت در یک ساعت برای تمامی ریز شبکه‌های متصل به شبکه اصلی و نیز جزیره‌ای شده از بخش بار بهینه جهت تعیین توان‌های تولید منابع داخل ریز شبکه‌ها و نیز توان‌های عبوری از خطوط بین ریز شبکه‌ای با در نظرگیری قیود فنی و زیست‌محیطی استفاده شده است. در حالتی که برای یک ساعت مشخص ریز شبکه‌ای به صورت منفصل از شبکه و خود تأمین کار می‌کند، مسئولیت تأمین بار بر عهده خود ریز شبکه خواهد بود. نتایج مطالعه جدولی از حالت‌های مشارکت و عدم مشارکت ریز شبکه‌ها در تأمین کل بار شبکه توزیع در طول ۲۴ ساعت و نیز توان‌های تولیدی منابع انرژی در داخل هر ریز شبکه با در نظرگیری قیود فنی و اقتصادی شبکه است. از آنجاکه در این مقاله یک تابع هدف چندمنظوره برای تغییر آرایش بهینه ریز شبکه‌ها پیشنهاد شده است لذا، کارایی نتایج حاصل در حضور چندین تابع هدف با روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و با توجه به نتایج روش تحلیل پوششی داده‌ها کاراترین سناریو برای هر ساعت بهره‌برداری از بین سناریوهای مختلف ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ریز شبکه، تغییر آرایش ریز شبکه‌ها، پخش بار بهینه، برنامه‌ریزی، تحلیل پوششی داده‌ها، کلیدزنی.

Optimal Reconfiguration and Scheduling in a Network of Multiple Microgrids

T. Farhoudi¹, Msc; S. Najafi Ravadanegh², Associate Professor

1- Smart Distribution Grid research Lab, Electrical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Email: tf286@yahoo.com

2- Smart Distribution Grid research Lab, Electrical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Email: s.najafi@azaruniv.edu

Abstract: In this paper the optimal reconfiguration and scheduling of a networked-Microgrids (**networked-MGs**) community for a 24 hours horizon is presents. Based on different fitness functions the configuration and commitment of the MGs are determined for any scheduling time slots. For any hours in scheduling horizon and for each network reconfiguration states the generation power of each distributed energy resource within MGs and the power flow exchange between MGs and main is obtained using Optimal Power Flow (OPF) considering the electrical and environmental constraints. In case of MGs operation in island mode, each MG is responsible for its load individually. To balance the total power in each MG, the price of the power exchanges with either the MGs or the utility grid is considered. The main results include the MGs reconfiguration state table for 24 hours scheduling of MGs which includes MGs resources output power and interconnection line flow. While the fitness function is a multi-objective function, to select the best and effective solution considering all fitness function the Data Envelope Analysis (DEA) method is adapted to select the most efficient solution for networked-MG optimal reconfiguration at each hour.

Keywords: Microgrid, MG reconfiguration, optimal power flow, scheduling, data envelopment analysis (DEA), MGs switching.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۲ و ۱۳۹۵/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۱

نام نویسنده مسئول: سجاد نجفی روادانق

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - گروه مهندسی برق - آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند

۱- مقدمه

چالش‌هایی از قبیل تقاضای روزافزون انرژی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و در نتیجه آن افزایش قیمت انرژی، فرسودگی تجهیزات شبکه و در نتیجه کاهش بهره‌وری و نیاز به ایجاد زیرساخت‌های جدید، نگرانی‌های خاص از تغییرات جوی و غیره از انگیزه‌های اصلی گذر به سمت شبکه‌های هوشمند است [۱]. شبکه هوشمند سیستمی است که با بهره‌گیری کامل و یکپارچه از اطلاعات، ارتباط دوطرفه و امن در فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات و هوش محاسباتی جهت دستیابی به یک سیستم قدرت پاک، ایمن، با قابلیت اطمینان بالا، انعطاف‌پذیر، پربازده، ماندگار و پایدار ایجاد شده باشد [۲-۱۰]. این مفهوم تمامی لایه‌های سیستم‌های قدرت از نقطه تولید تا نقطه انتهایی مصرف را شامل می‌شود [۱۱-۱۲]. به عبارت دیگر، هوشمندسازی موجب افزایش بهره‌وری، امنیت و قابلیت اطمینان سیستم قدرت شده و نیز کیفیت توان تحویلی به مشترکین را ارتقا می‌دهد [۱۳]. در راستای نیل به اهداف متصور در باب هوشمندسازی نیازمند یکپارچه‌سازی و کاربرد تکنولوژی‌های نوین از قبیل نظارت بلادرنگ، اندازه‌گیری پیشرفته، فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات، نرم‌افزارهای پیشرفته در تحلیل و کنترل شبکه در جهت برقراری ارتباط دوطرفه در مبادله اطلاعات و توان است. تحقیقات اخیر مؤید این حقیقت است که شبکه‌های توزیع هوشمند به صورت ترکیبی از ریزشبکه‌های مختلف خواهد بود [۱۴-۱۵]. ریزشبکه به شبکه‌ای گفته می‌شود که مشتمل بر مصرف‌کننده‌های گوناگون و منابع انرژی پراکنده متعدد بوده و قادر است نیاز مصرف‌کنندگان محلی خود را در حالت‌های کارکرد متصل به شبکه و مستقل (جزیره‌ای) تأمین کند [۱۶-۱۷]. علاوه بر این، ریزشبکه از طریق تجمع و به کارگیری بهینه منابع انرژی پراکنده موجب ارتقا کیفیت توان، انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. میزان انعطاف‌پذیری تقاضای بحرانی مصرف‌کنندگان نهایی، مدت‌زمان خروج و نوسانات کیفیت توان عوامل محرک به تغییر وضعیت ریزشبکه به حالت عملکرد جزیره‌ای و تعیین‌کننده سرعت این تغییر است. ریزشبکه از طریق یک یا چند نقطه بنام نقطه اتصال مشترک به شبکه اصلی و/یا ریزشبکه‌های دیگر متصل هستند. در این بین کلید قدرت کم‌هزینه‌ترین ابزار برای قطع خط ارتباطی و در نتیجه جداسازی ریزشبکه‌ها است. میزان مبادله توان عبوری بین ریزشبکه‌ها و شبکه اصلی از طریق مدیریت خط ارتباطی قابل کنترل است. میزان مبادله توان بسته به نیاز ریزشبکه به توان وارداتی، قابلیت اطمینان، مسائل پایداری و کیفیت توان می‌تواند تغییر کند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت ریزشبکه‌ها، تعادل بار و تولید در هر بازه زمانی است. در مرجع [۱۸]، برنامه‌ریزی اقتصادی تولید در ریزشبکه‌های چندگانه در شبکه‌های هوشمند با در نظرگیری انواع منابع تولید پراکنده، آلودگی محیط زیست و قیمت انرژی ارائه شده است. مطالعه بر اساس پخش بار اقتصادی بوده و در آن ساختار شبکه و تلفات مورد مطالعه قرار نگرفته است. مسئله بهره‌برداری بهینه یک ریزشبکه در حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای در مقالات متعددی مورد

مطالعه قرار گرفته است [۱۹-۲۰]. اما مطالعه ریزشبکه‌های چندگانه که شامل یک شبکه توزیع با مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها باشد به ندرت مورد توجه قرار گرفته است [۲۱]. در [۲۲] یک روش برای بهینه‌سازی تولید و طراحی خطوط انتقال با فرض ایجاد ریزشبکه‌ها ارائه شده است مطالعه فوق به صورت کلی و در شبکه انتقال بوده است. توانایی تبادل توان و مدیریت بار در ریزشبکه‌ها از مباحث مهمی است که مطالعاتی نظیر استراتژی کنترلی جدید برای بهره‌برداری ریزشبکه‌های سیستم توزیع، ارائه می‌شود [۲۳-۲۴]. همان‌طور که ذکر شد، ریزشبکه‌ها تأثیر مستقیمی بر روی طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت داشته است [۲۵]. هزینه تولید توان این شبکه‌ها با استفاده از NSGA-II کمینه شده است [۲۶] و عمر مفید باتری‌ها افزایش پیدا کرده است. ارائه ساختاری ترکیبی از عملکرد اپراتور بازار و اپراتور شبکه توزیع در شبکه‌ای شامل چندین ریزشبکه از اهداف مقاله [۲۷] است که در آن اهداف مختلفی برای بازیگران شبکه لحاظ شده است و کمینه‌سازی قیمت تسویه بازار و یا تولیدکننده در راستای حداکثرسازی سود با دیگر ریزشبکه‌ها در بازار پیشنهادی مشارکت، حاصل شده است. برای بهره‌برداری بهینه در یک ریزشبکه برای حالت اتصال به شبکه، از شبکه عصبی بازگشتی استفاده شده است [۲۸]. از برنامه‌ریزی خطی نیز برای انتخاب بهینه ظرفیت‌های سیستم و برنامه‌ریزی بهره‌برداری در ریزشبکه استفاده شده است [۲۹].

پخش‌بار بهینه به عنوان ابزار کارآمد، نقش بسزایی در بهره‌برداری هرچه اقتصادی‌تر از سیستم‌های قدرت ایفا می‌کند و از آن در حل مسائل تبادل اقتصادی بین چند ناحیه و ریزشبکه و به مدار آوردن نیروگاه‌ها استفاده می‌شود. مسئله بهره‌برداری اقتصادی از سیستم قدرت از زمانی مطرح شد که دو یا چند واحد تولید انرژی الکتریکی با یکدیگر در تأمین بار الکتریکی مشارکت داشته و ظرفیت کل آن‌ها در مجموع بیش از میزان مصرف بوده و لذا آرایش‌های متفاوتی از میزان تولید واحدها را به دنبال داشته است. مسئله بهینه‌سازی غیرخطی بوده و معمولاً هدف آن حداقل نمودن هزینه‌ها است. گاهی اهداف دیگری مانند بهبود امنیت سیستم و کاهش صدمات زیست‌محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی نیز هم‌زمان مورد نظر است. این بهینه‌سازی تحت یک دسته قیود معادله‌ای و نامعادله‌ای انجام می‌پذیرد. قیود معادله‌ای سیستم بر اساس نوع مدل انتخابی برای شبیه‌سازی شبکه و قیود نامعادله‌ای با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و عملکردی موجود در سیستم تعیین می‌شود. در حالت کلی می‌توان گفت، پخش‌بار بهینه یکی از ابزارهای نرم‌افزاری مهم در مراکز بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است که به منظور تنظیم بهینه متغیرهای تحت کنترل سیستم قدرت برای دستیابی به تولید مطمئن با حداقل هزینه و حداکثر امنیت در سیستم قدرت به شکل‌های مختلف بکار می‌رود [۳۰].

هدف اصلی در مدیریت شبکه‌های هوشمند، کمک به اپراتور شبکه در بهره‌برداری صحیح و برنامه‌ریزی شده شبکه در شرایط معین و

و استخراج جواب‌هایی با کارایی بالا در حضور چندین تابع هدف مختلف دومین نوآوری این مقاله است.

۲- توابع هدف

فرض کنید که در یک شبکه توزیع هوشمند تعداد زیادی ریزشبه وجود دارد که این ریزشبه‌ها در نقطه اتصال به شبکه به بدنه شبکه توزیع متصل می‌باشند. از طرفی به دلایل مختلفی مانند تأمین توان با قیمت کم‌تر و فروش انرژی به ریزشبه‌های مجاور، ریزشبه‌های فوق ممکن است به یک یا چند ریزشبه مجاور نیز تبادل توان نمایند. در چنین شرایطی هر ریزشبه در طول دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت روزانه می‌تواند به دلایل و اهداف بهره‌برداری مختلف مانند تأمین انرژی با قیمت بهتر، مسائل فنی مانند بهبود ولتاژ، قابلیت اطمینان و غیره به شبکه اصلی متصل و یا از آن جدا گردد. هدف از تغییر آرایش بهینه ریزشبه‌ها رسیدن به اهداف بهره‌برداری بهینه با ورود-خروج ریزشبه‌ها به شبکه اصلی و با توجه به محدودیت‌های بیان‌شده برای هر ریزشبه و شبکه توزیع است.

درواقع در این مسئله برای هر ریزشبه الگوی بهینه کلیدزنی تعیین می‌گردد تا شرایط اتصال به شبکه اصلی و یا ریزشبه‌های مجاور و یا جزیره‌ای شدن آن را در طول ۲۴ ساعت مشخص کند.

بر این اساس در این مقاله خطوط ارتباطی بین هر ریزشبه و شبکه توزیع و نیز بین دو ریزشبه مجاور، با یک کلید مدل‌سازی شده است که باز بودن آن به معنی عدم انتقال توان و بسته بودن آن حاکی از تبادل توان است. بنابراین در هر ساعت بهره‌برداری در حضور چندین ریزشبه که با تعدادی کلید (S) به هم و نیز به شبکه بالادستی متصل هستند، تعداد سناریوهای ممکن برای آرایش کلیدها برابر با 2^S خواهد بود. با توجه به توابع هدف مسئله ممکن است که وضعیت این کلیدها در بازه‌هایی از زمان تغییر کند و در نتیجه ریزشبه‌ها (ها) گاهی به صورت متصل به شبکه و گاهی به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شوند.

با توجه به ماهیت چندهدفه بودن روش پیشنهادی، این روش در دو گام قابل اجرا است که در گام اول تمامی سناریوهای ممکن برای هر بازه زمانی یک ساعته (۶۰ سناریو برای این مسئله) با استفاده از بخش بار بهینه و با در نظر گرفتن توابع هدف تعریف‌شده بررسی شده و در گام بعدی از بین سناریوهای ممکن با استفاده از DEA کاراترین سناریو انتخاب می‌شود.

کاراترین سناریو، به سناریویی اطلاق می‌شود که در کم‌ترین هزینه بهره‌برداری ممکن دارای بالاترین کیفیت توان و پایین‌ترین میزان آلودگی زیست‌محیطی باشد. بنابراین روش پیشنهادی قادر خواهد بود در هر بازه زمانی معین و با توجه به اهداف تعریف‌شده، آرایش اتصال ریزشبه‌ها به هم و به شبکه اصلی را مشخص کرده و میزان تبادل توان مابین ریزشبه‌ها و میزان تولید واحدهای مختلف در داخل هر ریزشبه را محاسبه کند.

خاص جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه، کاهش تلفات، پایداری ولتاژ، کاهش هزینه و سوددهی بالا است. در این راستا تجزیه و تحلیل شبکه‌های قدرت و شناسایی کاراترین عملکردها با توجه به برخی معیارها، کمک زیادی به بهبود و پایداری شبکه‌های حال و آینده می‌کند. انتخاب بهینه برای در نظرگیری معیارهای مذکور، یکی از مسائل مهم مورد بحث در گذشته و حال بوده و با پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته، الگوریتم‌هایی برای این منظور ارائه شده است که به مرور زمان ایرادات هر کدام مشخص و روشی دیگر پیشنهاد می‌شود. یکی از ایرادات اساسی الگوریتم‌های ارائه شده، نادیده گرفتن هم‌زمان معیارها برای ارزیابی و تصمیم‌گیری نهایی است. در این مطالعه، از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) که یکی از روش‌های پیشرفته تحقیق در عملیات است برای ارزیابی و انتخاب بهینه در عملکرد شبکه استفاده می‌شود [۳۱]. در این روش می‌توان با استفاده از چندین متغیر ورودی و خروجی، میزان کارایی عملکردها (و یا به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری (DMU's) در این روش) را محاسبه و کاراترین آن‌ها از ناکاراترین‌ها جدا کرد و بهینه آن‌ها انتخاب و استفاده کرد [۳۱]. این روش با راه‌حل‌های غیرغالب و رتبه‌بندی آن با روش اندرسون-پترسون (AP^*)، به اپراتور سیستم این امکان را می‌دهد که عملکردش را بر اساس هزینه و شرایط بهره‌برداری سیستم تنظیم کند [۳۲]. در رتبه‌بندی راه‌حل‌ها، نیازی به دخالت بهره‌بردار نیست و آن‌ها بر اساس میزان کارآمدی‌شان رتبه‌بندی می‌شوند. بعد از رتبه‌بندی، اپراتور می‌تواند ایده خود را اعمال و یکی از آن‌ها را در راستای اهداف اصلی مذکور در شبکه‌های هوشمند انتخاب کند.

هدف اصلی این مقاله، برنامه‌ریزی و تجدید آرایش بهینه ریزشبه‌های چندگانه متصل به هم برای یک دوره برنامه‌ریزی روزانه با اولویت تأمین بار کلیه ریزشبه‌ها، حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهبود شاخص‌های فنی شبکه است. روش پیشنهادی قادر خواهد بود تا با تأمین بار مورد نیاز ریزشبه‌ها هزینه‌های بهره‌برداری آن‌ها را نیز در کاراترین صورت برآورده کند. نتیجه کارا به نتیجه‌ای اطلاق می‌شود که دارای کم‌ترین هزینه بهره‌برداری ممکن، کیفیت توان بالا و کم‌ترین آلودگی زیست‌محیطی باشد. لازم به ذکر است که با توجه به تعریف تابع هزینه مربوط به هزینه بهره‌برداری به صورت ترکیبی از هزینه تلفات، هزینه تولید انرژی واحدهای مختلف، کاهش این هزینه خود موجب ارتقا قابلیت اطمینان سیستم نیز می‌شود. بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی مدیریت ریزشبه‌ها در کم‌ترین هزینه، بالاترین قابلیت اطمینان، بالاترین کیفیت توان و کم‌ترین آلودگی انجام خواهد شد.

حل مسئله تغییر آرایش بهینه مجموعه‌ای از ریزشبه‌ها در یک شبکه توزیع هوشمند و تعیین مشارکت بهینه آن‌ها در طول یک دوره بهره‌برداری معین نوآوری اصلی این مقاله است. همچنین استفاده از روش تحلیل پوششی داده برای حل یک مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره

تابع هزینه بهره‌برداری و تلفات هر ریزشکه و به تبع آن کل سیستم در صورت اتصال ریزشکه‌ها به شبکه اصلی در فرمول (۱) بیان شده است. اگر فرض شود که $U_n \in (0,1)$ حالت‌های اتصال ریزشکه n را نشان دهد در این صورت اگر ریزشکه‌ها به شبکه اصلی متصل باشند تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$U = 1 \quad n \in N_{MG} \quad \forall n$$

$$F_{OC} = F(\text{Operation Cost})$$

$$= \sum_{n=1}^{N_{MG}} \sum_{i=1} (a_i + b_i P_{n,Gi} + c_i P_{n,Gi}^2) + \sum_{n=1} (P_{loss} \times C_{P-loss} + Q_{loss} \times C_{Q-loss}) + \sum_n DT_{OM} \times CF_{DT} \times P_{DT} \quad (1)$$

که در آن

$$K_{Grid} = K_{CO_2-GRID} + M_{CO_2/NO_2} K_{NO_2-GRID}$$

$$K_{DT} = K_{CO_2-DG} + M_{CO_2/NO_2} K_{NO_2-DG}$$

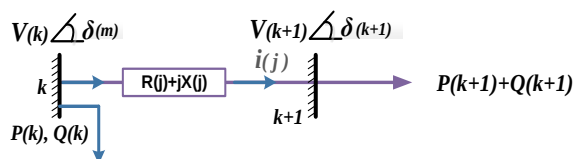
$$F_{EM} = F(\text{Emission}) =$$

$$\sum_{n=1}^{N_{MG}} \sum_{j=1} P_{j,M} \times K_{Grid} + \sum_{n \in N} \sum_{j=1}^{N_{MG}} P_{j,DT} \times K_{DT} \quad (2)$$

$$F_{VD} = F(\text{Voltage Deviation}) = \sum_{n=1}^{N_{MG}} \sum_{k=1} (V_{n,k} - V_{rated})^2 \quad (3)$$

$$F_{VSI} = F(\text{Voltage Stability}) = \sum_{n=1}^{N_{MG}} \sum_{k=1} (2V_{n,k+1} - V_{n,k}) \quad (4)$$

شاخص پایداری ولتاژ با استفاده از شکل ۱ که قسمتی از یک شبکه توزیع با دو باس بار را نشان می‌دهد محاسبه می‌گردد. برای شاخص پایداری ولتاژ برای هر باس $m+1$ ، از این مدل‌سازی استفاده شده است.



شکل ۱: قسمتی از شبکه توزیع با دو باس بار

قیود خطی و غیرخطی که باید در حل مسئله رعایت شوند، در زیر اشاره شده است:

$$\left. \begin{aligned} &P_k = 0, P_{int} - P_{sch} = 0 \\ &Q_k = 0, V_k - V_{kset} = 0 \end{aligned} \right\} h(x) = 0$$

$$\left. \begin{aligned} &P_{Gi} - P_{Gimax} \leq 0, P_{Gimin} - P_{Gi} \leq 0 \\ &P_l - P_{lmax} \leq 0, P_{lmin} - P_l \leq 0 \\ &Q_{Gi} - Q_{Gimax} \leq 0, Q_{Gimin} - Q_{Gi} \leq 0 \\ &V_k - V_{kmax} \leq 0, V_{kmin} - V_k \leq 0 \end{aligned} \right\} g(x) \leq 0 \quad (5)$$

به منظور حفظ بهترین شرایط بهره‌برداری در یک شبکه توزیع با مجموعه‌ای از ریزشکه‌ها، مسئله پخش بار بهینه در ریزشکه‌ها با الگوی پیش‌بینی شده روزانه حل می‌شود. سرویس‌دهی به مشترکین در کم‌ترین هزینه ممکن بهره‌برداری، با قابلیت اطمینان و کیفیت توان بالا و کم‌ترین آلودگی می‌تواند با توابع هدفی چون افزایش کاهش هزینه بهره‌برداری، آلودگی، بهبود شاخص پایداری ولتاژ، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ تأمین شود. هزینه بهره‌برداری خود مشتمل بر هزینه تلفات، هزینه تولید واحدهای مختلف سیستم است. اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای به کاررفته در روابط (۱) و (۹) عبارتند از:

اندیس‌ها

k: شمارنده باس

i: شمارنده منابع تولید پراکنده

l: شمارنده خط

n: شماره ریزشکه

G: شمارنده ژنراتور

Sch: برنامه‌ریزی شده

DT: منبع تولید پراکنده

OM: بهره‌برداری و نگهداری

CO₂-Grid: آلودگی دی‌اکسیدکربن شبکه

CO₂-DG: آلودگی دی‌اکسیدکربن منابع تولید پراکنده

NO₂-Grid: آلودگی دی‌اکسید نیتروژن شبکه

پارامترها

F_{OC}: تابع هدف هزینه‌های بهره‌برداری

F_{EM}: تابع هدف هزینه‌های آلاینده‌گی

F_{VD}: تابع هدف بهبود پروفیل ولتاژ

F_{VSI}: تابع هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ

g(.) : قیود غیرخطی

h(.) : قیود خطی

L(.) : تابع لاگرانژ

a, b, c: ضرایب هزینه تولید منابع

متغیرها:

P: توان اکتیو شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده

Q: توان راکتیو شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده

V: دامنه ولتاژ

C: هزینه

(δ): زاویه ولتاژ

K: ضریب

CF: ضرایب ظرفیت منابع

R(j)+jX(j): امپدانس خط

در صورتی که خروجی‌ها به نسبت افزایش ورودی‌ها تغییر کند در این صورت به آن روش بازگشت به مقیاس و یا بازده به مقدار گفته می‌شود. بازده به مقیاس بیانگر پیوند بین تغییرات ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم است. یکی از توانایی‌های روش تحلیل پوششی داده‌ها، کاربرد الگوی مختلف، با بازده به مقیاس‌های متفاوت و همچنین اندازه‌گیری بازده به مقیاس واحدهاست. بازده به مقیاس ثابت، یعنی هر مضربی از ورودی‌ها همان مضرب از خروجی‌ها را تولید می‌کند. روش CCR دارای بازده ثابت به مقیاس است و سعی دارد با انتخاب وزن‌های بهینه برای متغیرهای ورودی و خروجی واحد تحت بررسی، کسر کارایی این واحد (واحد صفر) را به گونه‌ای بیش‌تر کند که کارایی سایر واحدها از حد بالای یک تجاوز نکند.

حال فرض می‌کنیم n تا DMU با m تا ورودی و s تا خروجی وجود دارد، کارایی مربوط به هر DMU با حل مدل برنامه‌ریزی کسری زیر حاصل شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta_0 &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \\ \text{s.t. } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} &\leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ u_r &\geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \\ v_i &\geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

در معادله بالا، j شاخص DMU ($j = 1, 2, \dots, n$)، وزن u_r (وزن r امین خروجی برای $r = 1, 2, \dots, s$)، y_{rj} (وزن r امین خروجی برای $r = 1, 2, \dots, s$)، v_i (وزن i امین ورودی برای $i = 1, 2, \dots, m$)، x_{ij} (وزن i امین ورودی برای $i = 1, 2, \dots, m$)، θ_0 (میزان کارآمدی DMU) باشد. می‌تواند کم‌تر یا مساوی یک باشد. هرچقدر این نسبت از لحاظ عددی به یک نزدیک باشد، میزان کارآمدی بیش‌تر و نیز هرچقدر این نسبت از لحاظ عددی از یک کوچک‌تر باشد، میزان ناکارآمدی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه وزن‌ها با مدل مشخص می‌شود، می‌توان بر این اساس متوجه شد که هیچ نیازی به وجود اعمال نظرات و ایده‌های تصمیم‌گیرندگان در مدل نیست.

اگر فرض کنیم که صورت و یا مخرج کسر فوق ثابت و برابر عدد یک باشد، عبارت کسری فوق می‌تواند به برنامه‌ریزی خطی تبدیل شود. در عبارت (۱۰) صورت کسر نماینده‌ای از ورودی‌های DMU و مخرج آن نماینده‌ای از خروجی‌های آن‌ها است. لذا اگر صورت کسر برابر با مقدار ثابت یک فرض شود تمرکز بر روی خروجی‌ها بوده و روش را خروجی‌گرا گویند و اگر مخرج کسر برابر با یک فرض شود روش را ورودی‌گرا

در صورتی که ریزشک‌های به صورت جزیره‌ای کار کند یعنی

$$U = 0 \quad n \in N_{MG} \quad \forall n$$

در این صورت پخش بار بهینه و نیز توابع هدف برای آن به صورت

زیر جداگانه محاسبه می‌گردد:

$$F_{OC} = F(\text{Operation Cost}) =$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_{n,Gi} + c_i P_{n,Gi}^2) \\ &+ (P_{loss} \times C_{P-loss} + Q_{loss} \times C_{Q-loss}) + \\ &(DT_{OM} \times CF_{DT} \times P_{DT}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$F_{EM} = F(\text{Emission}) =$$

$$\sum_{j=1}^n P_{j,M} \times K_{Grid} + \sum_{j=1}^n P_{j,DT} \times K_{DT} \quad (7)$$

$$F_{VD} = F(\text{Voltage Deviation}) = \sum_{k=1}^n (V_k - V_{rated})^2 \quad (8)$$

$$F_{VSI} = F(\text{Voltage Stability}) = \sum_{k=1}^n (2V_{k+1} - V_k) \quad (9)$$

۲-۱- روش تحلیل پوششی داده‌ها

ارائه مبانی روش تحلیل پوششی داده‌ها خارج از حوصله این مقاله است اما مطالب کامل برای بررسی این روش در منابع متعددی ارائه شده است [۳۲]. روش تحلیل پوششی داده‌ها، یک روش چندمعیاره برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تولیدی، خدماتی، آموزشی و ... است که معمولاً آن‌ها را بنام DMU معرفی می‌کنند و مورد توجه جدی مهندسين و اقتصاددانان قرار گرفته است. در این روش با استفاده از چندین متغیر ورودی و خروجی، میزان کارایی DMU با توجه به اطلاعات آن‌ها محاسبه می‌گردد. همچنین می‌توان علت ناکارا بودن شرکت‌ها را با تحلیل حساسیت تعیین و از اطلاعات به دست آمده، جهت انتخاب پرتفوی بهینه از بین DMUهای کارا استفاده کرد. DEA یک رویکرد غیرپارامتریک و مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است که ارزیابی کارایی DMUهای مشابه را که دارای داده‌ها (ورودی‌ها) و ستاده‌های (محصولات) چندگانه هستند را امکان‌پذیر می‌سازد. DEA دارای سه نوع است که عبارتند از CCR^* ، BCC^* و VRS^* . با توجه به نوع مسئله مطرح شده در این مقاله از مدل CCR استفاده شده است. در این مقاله، ستاده به نتایج حاصل از OPF^A در نتیجه اعمال تمامی حالت‌های کلیدزنی و در نهایت اعمال DEA بر این نتایج جهت تعیین کاراترین حالت کلیدزنی گفته می‌شود.

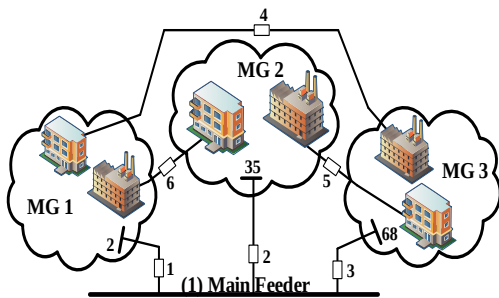
۲-۱-۱- مدل سازی روش تحلیل پوششی داده‌ها با مدل CCR

نام این الگو از حروف اول نام سه محقق به وجودآورنده آن یعنی چارلز، کوپر، رودز گرفته شده است و به عنوان پایه‌ای برای شکل‌گیری سایر الگوها در DEA مطرح است. در برنامه‌ریزی به روش DMUها

در این مقاله، به منظور ارزیابی DMU از ترکیب DEA با مدل AP استفاده شده است که این ترکیب می‌تواند در کنار برنامه‌ریزی بهینه برای ریزشکه‌ها مزایای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی در پی داشته باشد.

۳- شبیه‌سازی و نتایج

در شکل ۲ یک شبکه توزیع هوشمند متشکل از سه ریزشکه متصل به هم و متصل به شبکه بالادستی که مبنای مطالعات این مقاله است ارائه شده است. در این شکل نحوه اتصال این ریزشکه‌ها مشخص شده است. شش عدد کلید اصلی وجود دارد که ارتباط بین هر ریزشکه با شبکه اصلی و نیز ریزشکه مجاور را برقرار می‌کند. این خطوط درواقع خطوط بین ریزشکه‌ای در این مطالعه می‌باشند. مطابق با شکل ۳ هر ریزشکه خود از سه فیدر اصلی و با انواع بار متفاوت خانگی، تجاری و صنعتی ایجاد شده است. در هر ریزشکه، ۲ توربین بادی، ۲ میکروتوربین، ۲ سلول خورشیدی، ۱ واحد سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) و ۳ پیل سوختی استفاده شده است. ظرفیت هر یک از منابع در نظر گرفته شده در باس‌های نصب شده در ریزشکه‌ها و نیز ضرایب هزینه‌های تولید و آلودگی منابع در جدول ۱ آورده شده است [۴۱-۴۲].



شکل ۲: شبکه مورد مطالعه و نحوه اتصال ریزشکه‌ها به هم و شبکه اصلی

جدول ۱: اطلاعات ظرفیت هر یک از منابع تولید پراکنده [۴۱-۴۲]

DG units	Min power (kW)	Max power (kW)	a_i	b_i	c_i	Emission factors (lb/MW)		
						NO _x	SO ₂	CO ₂
MT	۳۰	۱۵۰	۰/۳	۲۹	۰	۰/۴۴	۰/۰۰۸	۱۵۹۶
WT	۰	۱۰۰	۰/۰۷	۵	۰	۰	۰	۰
FC1	۳۰	۱۰۰	۰/۲	۵۰	۰	۱/۱۵	۰/۰۰۸	۱۱۰۸
FC2	۳۰	۵۰	۰/۲	۵۰	۰	۱/۱۵	۰/۰۰۸	۱۱۰۸
PV	۰	۷۵	۰/۴	۵۶	۰	۰	۰	۰
CHP	۱۵۰	۱۰۰۰	۰/۳۱	۳۰	۰	۰	۰	۰

بار مصرفی در این مقاله در سه نوع خانگی، تجاری، صنعتی است. اطلاعات مربوط به بارهای موجود در ریزشکه‌ها در پیک بار و همچنین ناحیه مشخص شده برای هر یک از بارها (طبق شکل ۳، عدد ۱ بیانگر ناحیه بار خانگی، عدد ۲ بیانگر ناحیه صنعتی و عدد ۳ نیز بیانگر ناحیه تجاری) در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول مجموع بار و مقادیر بار انواع کاربری‌ها در هرکدام از ریزشکه متفاوت از سایر

می‌نامند. بنابراین با تنظیم مخرج کسر به عدد یک و تغییر فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی، ضرایب مدل ورودی‌گرایی CCR به صورت زیر خواهد بود:

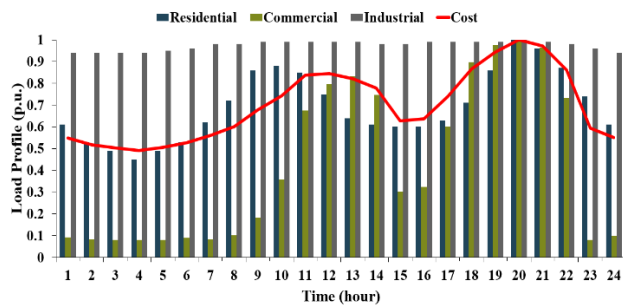
$$\begin{aligned} \text{Max } \theta_0 &= \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} &= 1 \\ \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} &\leq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \\ u_r &\geq 0, \quad r=1, 2, \dots, s \\ v_i &\geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

با قرار دادن صورت کسر برابر یک، ضرایب خروجی‌گرایی CCR به دست خواهد آمد. به دلیل ماهیت فرمول‌بندی، مقدار تابع هدف بهینه ورودی و خروجی‌گرایی CCR، مقدار کارآمدی متقابل رانسان می‌دهد. دوگان فرمول (۱۱) با متغیرهای حقیقی θ و ضرایب متغیرهای ورودی با بردار نامنفی $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ به صورت زیر است:

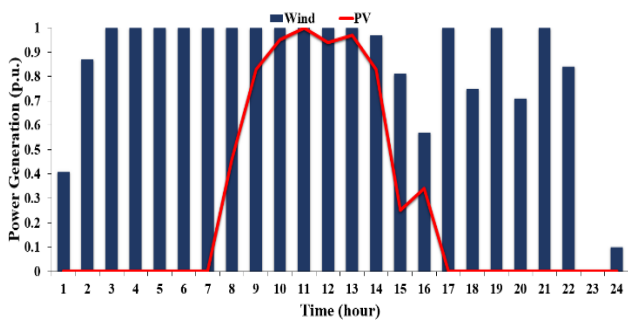
$$\begin{aligned} \text{Min } \theta \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \mu_j x_{ij} &= \theta x_{i0} \\ \sum_{j=1}^n \mu_j x_{ij} &\geq y_{r0} \\ \mu_j &\geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (12)$$

فرمول (۱۲) مدل ورودی‌گرایی CCR را نشان می‌دهد [۳۳-۳۵]. به طور خلاصه، DMU با استفاده از DEA به دو گروه کارآمد و ناکارآمد تقسیم می‌شود، یا به عبارتی از بیشترین کارایی تا کمترین کارایی رتبه‌بندی می‌شوند. در DEA، معمولاً بیش از یک DMU ممکن است کارآمد باشد و میزان کارآمدی آن یک باشد، بنابراین یکی از جذاب‌ترین روش‌های تحقیق در DEA، تعیین واحدهای کارآمد است [۳۶-۳۹]. معمولاً مفهوم کارآمدترین نشان‌دهنده تفاوت کامل بین همه DMUهای کارآمد است زمانی که بیش از یک تصمیم‌گیرنده وجود داشته باشد. در این راستا برای رتبه‌بندی مؤثر DMUها در DEA از بین کارآمدترین مدل‌ها، از روش AP استفاده شده است [۴۰]. برنامه‌ریزی خطی زیر کارآمدترین واحد را از بین چندین واحد کارآمد را به دست می‌آورد.

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta_0 &= \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} &= 1 \\ \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} &\leq 0, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad j \neq 0 \\ u_r &\geq 0, \quad r=1, 2, \dots, s \\ v_i &\geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$



شکل ۴: پروفیل قیمت و سه نوع بار خانگی، تجاری و صنعتی

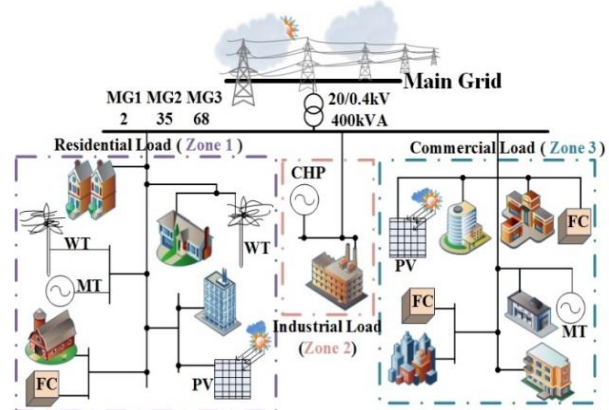


شکل ۵: پروفیل تولید توان توربین بادی و سلول خورشیدی در ۲۴ ساعت

برای هر بازه زمانی معین، تک‌تک سناریوها وارد پخش بار بهینه می‌شود تا توابع هدف تعریف‌شده، با توجه به محدودیت‌های ولتاژ، حد جریانی خطوط، حداکثر و حداقل توان تولیدی واحدها محاسبه شود. اگر پخش بار بهینه همگرا شود، مقادیر توابع هدف مربوط به آن جواب به‌عنوان یک DMU ذخیره می‌شود. این کار برای تمام سناریوها تکرار می‌شود. در پایان DEA در ترکیب با روش AP به تمام DMUها اعمال می‌شود و DMU کارا مشخص می‌شود. به عبارتی حالت‌های کلیدزنی به‌عنوان DMU هستند و توابع هدف انحراف ولتاژ، آلودگی و هزینه بهره‌برداری به‌عنوان ورودی و پایداری ولتاژ به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. دلیل انتخاب ورودی و خروجی به ماهیت CCR برمی‌گردد که هرآنچه باید بیشینه شود به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده و ورودی پارامترهایی هستند که کمینه آن‌ها مطلوب است. جواب نهایی حاکی از یک سناریو کارا برای هر بازه زمانی معین است که مشخص‌کننده آرایش بهینه ریزشبه‌ها، میزان توان تولیدی واحدهای مختلف و مقدار تبادل توان است. همان‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره شده، نتیجه کارا در کم‌ترین هزینه ممکن دارای بالاترین قابلیت اطمینان و کیفیت توان است و علاوه بر این میزان آلودگی زیست‌محیطی در کمینه مقدار است.

در این قسمت نتایج حاصل از تغییر آرایش بهینه ریزشبه‌های چندگانه جهت بهبود توابع هدف مختلف و ارائه یک آرایش بهینه با توجه به خروجی‌های این توابع هدف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها ارائه می‌گردد. مهم‌ترین تابع هدف برای بهره‌برداران ریزشبه‌ها و شبکه توزیع، هزینه بهره‌برداری‌های آن‌ها است. در جدول ۳ نتایج تجدید آرایش بهینه ریزشبه‌های به‌هم پیوسته ارائه شده است. همان‌گونه که بیان شد با توجه به تعداد کلیدهای اصلی در هر ساعت بهره‌برداری ۶۴ حالت وجود دارد که بسته به باز یا بسته بودن کلید نوع آرایش شبکه

ریزشبه‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ پروفیل روزانه بار سه ناحیه و نیز قیمت خرید انرژی به نمایش گذاشته شده است. الگوی تولید روزانه منابع بادی و خورشیدی در هر ساعت از شبانه‌روز برای یک روز نمونه پاییزی در شکل ۵ ارائه شده است. در این مطالعه فقط مقادیر مورد انتظار متغیرهای دارای عدم قطعیت به‌عنوان مقادیر ساعتی استفاده شده است و عدم قطعیت‌های موجود در مطالعه شبکه با مقادیر مورد انتظار آن‌ها جایگزین شده است. قیمت انرژی طوری ارائه شده است که تقریباً متناسب با پیک بار شبکه تغییر کند.



شکل ۳: آرایش منابع و فیدرهای هر یک از ریزشبه‌ها

جدول ۲: مقدار و نوع بار داخل ریزشبه‌ها در پیک بار

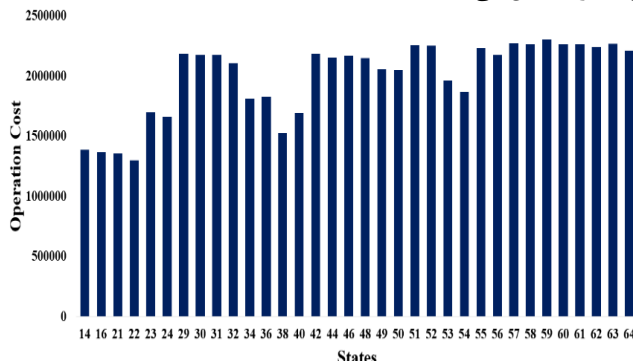
Area	MG1	MG2	MG3
Load's zone			
Residential (kW)	۴۵۶	۴۸۰	۳۱۷
Industrial (kW)	۴۹۷	۴۶۳	۵۳۷
Commercial (kW)	۴۳۷	۴۶۹	۴۷۹

فرض می‌گردد که زیرساخت مخابراتی و نیز سیستم کنترل مرکزی در سیستم مدیریت توزیع شبکه هوشمند ایجاد شده است و امکان مبادله دوطرفه اطلاعات بین ریزشبه‌ها و نیز مرکز مدیریت توزیع فراهم است. هر ریزشبه می‌تواند شامل مجموعه‌ای از منابع با خصوصیات منحصربه‌فرد خود باشد که شرایط تولید توان متفاوتی در ساعات مختلف روز ارائه نماید. در کارکرد جزیره‌ای ریزشبه‌ها، هر ریزشبه فقط به منابع خود متکی بوده و نمی‌تواند از سایر نقاط شبکه انرژی دریافت کند. اما در کارکرد ریزشبه‌ها به‌صورت مجموعه‌ای از ریزشبه‌های به‌هم پیوسته، این امکان وجود دارد که با باز-بست کلیدهای موجود بین ریزشبه‌ها و نیز شبکه اصلی، امکان تبادل توان در شرایط خاص جهت کمک به ریزشبه‌های مجاور وجود خواهد داشت. به این ترتیب تأمین انرژی و افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌برداری با هزینه کم‌تر میسر خواهد بود در این مقاله، با استفاده از این ایده، اطلاعات ساختاری ریزشبه به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است و با برنامه پخش بار بهینه توابع هدف اشاره‌شده در قسمت‌های قبلی و با توجه به محدودیت‌های موجود محاسبه شده و با روش DEA بهینه سناریو انتخاب می‌شود. فلوچارت الگوریتم روش پیشنهادی برای هر بازه زمانی معین در شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است.

۱۰	حالت ۵	۱۰۲۳۲۹	۲۲	حالت ۱۰	۵۲۸۶۶۹
۱۱	حالت ۶	۱۱۴۷۸۷	۲۳	حالت ۶	۸۸۴۱۵
۱۲	حالت ۵	۱۱۵۸۳۲	۲۴	حالت ۵	۸۱۹۹۰

شکل ۷: مقادیر هزینه بهره‌برداری حالت‌های مختلف در زمان

پیک را نمایش می‌دهند.



شکل ۷: نتایج پخش بار بهینه برای هزینه بهره‌برداری در زمان پیک

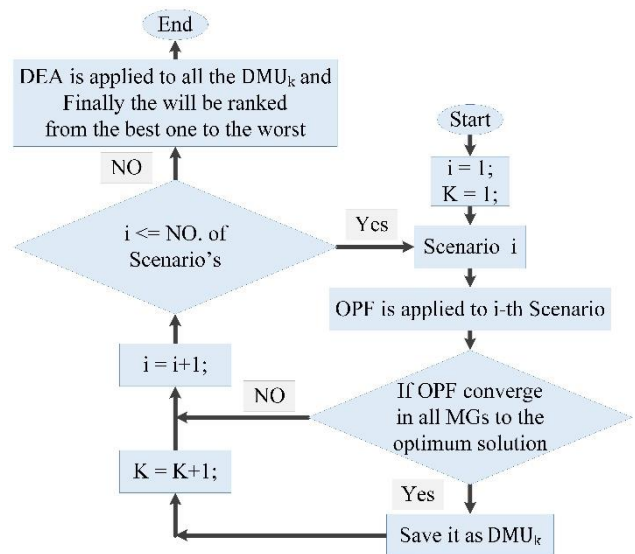
به‌همان ترتیب با نتایج مطالعه با در نظر گرفتن هزینه آلاینده‌گی برای بهره‌برداران ریزشبه‌ها و شبکه توزیع، در این بخش ارائه شده است. در جدول ۴ نتایج تجدید آرایش بهینه ریزشبه‌های به هم پیوسته برای کاهش هزینه آلاینده‌گی‌های زیست‌محیطی ارائه شده است. در این حالت نیز با توجه به تعداد کلیدهای اصلی در هر ساعت بهره‌برداری ۶۴ حالت وجود دارد که با توجه به باز یا بسته بودن کلید نوع آرایش شبکه تغییر می‌کند. در این جدول بهترین حالت در هر ساعت شبانه روز به همراه مقدار تابع هدف آن نشان داده شده است. به عنوان مثال با توجه به جدول ۴ بهترین ترکیب حالت و آرایش ریزشبه‌ها در ساعت ۱، حالت ۴۰ یعنی $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 0, 0, 1, 1, 1)$ است. در شکل ۸ مقادیر محاسبه شده برای آلاینده‌گی ارائه شده است و نشان می‌دهد که مقدار آن در ساعت پیک بار (ساعت ۲۰) به ازای حالت کلیدزنی شماره ۲۲ یعنی $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ حداقل است.

با توجه به شرایط بهره‌برداری در طول ساعات مختلف بهره‌برداری و با توجه به میزان بار ریزشبه‌ها، این احتمال وجود دارد که به دلایل مختلفی برنامه پخش بار بهینه در شبکه به هم پیوسته و نیز

جدول ۴: بهترین حالت کلیدزنی برای آلودگی در طول شبانه‌روز

ساعت	حالت	آلودگی	ساعت	حالت	آلودگی
۱	حالت ۴۰	۴۰۵۴۴۲	۱۳	حالت ۷	۵۱۰۸۱۸
۲	حالت ۶	۳۴۵۴۳۱	۱۴	حالت ۳	۴۸۶۸۶۹
۳	حالت ۷	۳۲۷۵۹۷	۱۵	حالت ۱۶	۴۰۴۵۹۸
۴	حالت ۵	۳۲۳۰۱	۱۶	حالت ۴۰	۴۲۹۱۴۵
۵	حالت ۵	۳۳۱۰۷۱	۱۷	حالت ۴	۵۳۲۸۲۵
۶	حالت ۱۴	۳۴۴۶۹۶	۱۸	حالت ۷	۷۶۲۵۲۵
۷	حالت ۱۴	۳۶۶۲۳۲	۱۹	حالت ۱۰	۸۳۲۸۸۹
۸	حالت ۵	۳۶۰۶۰۲	۲۰	حالت ۲۱	۹۷۷۵۹۲
۹	حالت ۶	۳۸۲۱۲۳	۲۱	حالت ۶	۸۴۸۵۶۹
۱۰	حالت ۱۶	۴۰۷۴۴۷	۲۲	حالت ۱۰	۷۴۰۲۸۹
۱۱	حالت ۸	۵۰۷۳۴۳	۲۳	حالت ۶۴	۵۳۲۶۵۶
۱۲	حالت ۲	۵۴۶۱۵۸	۲۴	حالت ۳۲	۴۵۱۵۲۴

تغییر می‌کند. در جدول ۳ مقدار تابع هدف این بخش (هزینه بهره‌برداری) در تمامی ساعات به ازای بهترین حالت کلیدزنی از بین ۶۴ حالت ارائه شده است.

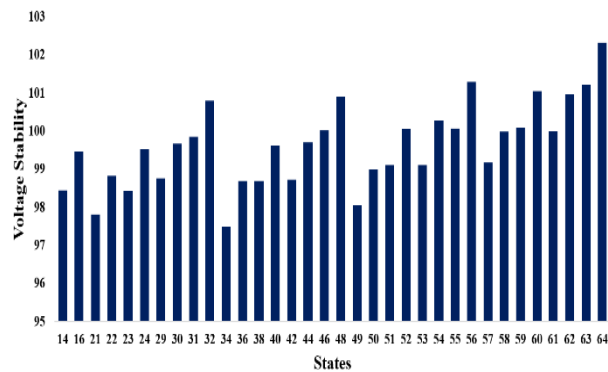


شکل ۶: فلوچارت روش پیشنهادی برای هر بازه زمانی معین

درواقع در این جدول الگوی کلیدزنی به ازای حداقل سازی هزینه بهره‌بردار نشان داده شده است. به عنوان مثال با توجه به جدول ۳ بهترین حالت و آرایش ریزشبه‌ها برای ساعت ۱ حالت ۱ یعنی $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ است که به معنی قطع بودن هر شش کلید است. در پیک بار شبکه یعنی ساعت ۲۰ حالت کلیدزنی ۲۲ یعنی $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ بهترین حالت ممکن و کاراترین جواب بوده است. لازم به ذکر است که شماره حالت‌های کلیدزنی به صورت باینری بوده و از حالت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب به صورت $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 0, 0, 1, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 0, 0, 0, 1)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 0, 1, 0, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 0, 0, 1, 0, 0, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 1, 1, 0, 1, 1)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 1, 1, 0, 1, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 1, 1, 1, 0, 0)$ ، $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ است، ختم می‌شود.

جدول ۳: بهترین حالت کلیدزنی برای هزینه بهره‌برداری (دلار)

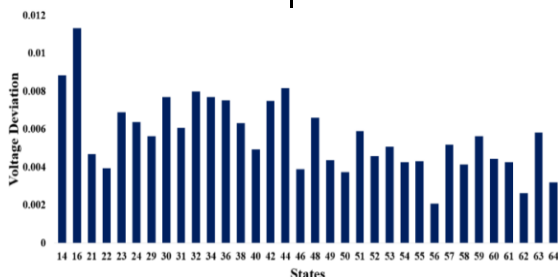
ساعت	حالت	هزینه	ساعت	حالت	هزینه
۱	حالت ۱	۷۷۷۰۳	۱۳	حالت ۷	۱۱۲۹۱۸
۲	حالت ۲	۶۵۵۹۸	۱۴	حالت ۵	۱۰۷۲۵۳
۳	حالت ۷	۶۰۸۹۰	۱۵	حالت ۵	۸۴۳۶۲
۴	حالت ۱	۵۸۸۷۴	۱۶	حالت ۷	۸۹۸۹۰
۵	حالت ۱	۶۱۵۱۴	۱۷	حالت ۷	۹۱۵۹۱
۶	حالت ۲	۶۴۷۴۱	۱۸	حالت ۷	۱۱۰۸۰۵
۷	حالت ۲	۶۹۲۹۷	۱۹	حالت ۱۱	۵۷۹۱۰۵
۸	حالت ۲	۷۸۳۰۹	۲۰	حالت ۲۲	۱۲۹۶۵۶
۹	حالت ۲	۹۱۶۹۹	۲۱	حالت ۶	۱۱۹۰۱۴



شکل ۹: نتایج پخش بار بهینه برای شاخص پایداری ولتاژ در زمان پیک

جدول ۷: بهترین حالت کلیدزنی برای انحراف ولتاژ برای ۲۴ ساعت

ساعت	حالت	VD	ساعت	حالت	VD
۱	حالت ۳۱	۰/۰۰۶۲۲	۱۳	حالت ۶۱	۰/۰۰۸۲۴
۲	حالت ۱۶	۰/۰۰۷۴۲	۱۴	حالت ۶۲	۰/۰۰۸۰۹
۳	حالت ۱۶	۰/۰۰۷۵۱	۱۵	حالت ۱۶	۰/۰۰۶۶۸
۴	حالت ۱۶	۰/۰۰۷۹۸	۱۶	حالت ۱۶	۰/۰۰۵۴۶
۵	حالت ۱۶	۰/۰۰۷۵۶	۱۷	حالت ۲۹	۰/۰۰۵۲۰
۶	حالت ۱۶	۰/۰۰۷۱۱	۱۸	حالت ۶۴	۰/۰۰۴۰۷
۷	حالت ۱۶	۰/۰۰۶۴۴	۱۹	حالت ۶۴	۰/۰۰۳۶۶
۸	حالت ۱۶	۰/۰۰۵۹۷	۲۰	حالت ۵۶	۰/۰۰۲۰۹
۹	حالت ۱۶	۰/۰۰۵۳۴	۲۱	حالت ۶۴	۰/۰۰۳۰۰
۱۰	حالت ۱۶	۰/۰۰۵۷۸	۲۲	حالت ۶۰	۰/۰۰۳۱۸
۱۱	حالت ۷	۰/۰۰۵۳۰	۲۳	حالت ۲۰	۰/۰۰۳۶۰
۱۲	حالت ۲۹	۰/۰۰۶۲۷	۲۴	حالت ۳۶	۰/۰۰۴۱۲

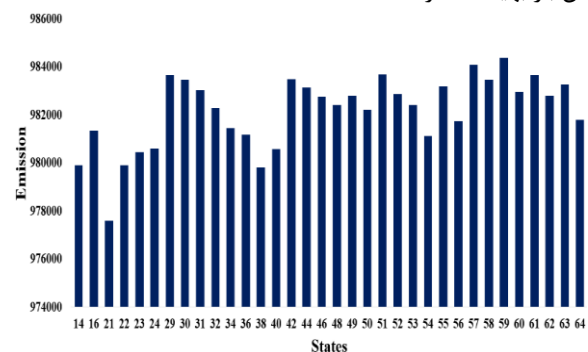


شکل ۱۰: نتایج پخش بار بهینه برای انحراف ولتاژ در زمان پیک

سومین تابع هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ در شبکه است.

جدول ۶ نشان‌دهنده بهترین حالت کلیدزنی جهت حداکثر نمودن شاخص پایداری ولتاژ برای تمام ساعات شبانه‌روز است (ولتاژ پایه ۲۲۰ V). با توجه به جدول فوق اولاً از بین تمامی ۶۴ سناریوی کلیدزنی ممکن، در تمامی ساعات روز، حالت ۶۴ ($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 = 1, 1, 1, 1, 1, 1$) یعنی وصل بودن تمامی کلیدها و بهره‌برداری یکپارچه از ریزشکها، بهترین حالت برای پایداری ولتاژ است. ثانیاً مقدار این شاخص در ساعت ۲۴ از تمامی ساعات بیش‌تر است. در شکل ۹، شاخص پایداری ولتاژ برای ساعت پیک برای همه حالت‌های کلیدزنی نشان داده شده است که مقدار عددی این شاخص برای حالت ۶۴ نشان از بیشینه بودن این حالت از همه حالت‌ها است.

ریزشک‌های جزیره‌ای همگرا نشود. در جدول ۵ حالت‌های همگرا نشده در ساعات مختلف بهره‌برداری ارائه شده است. به‌عنوان مثال در ساعت ۴ بهره‌برداری به‌ازای تغییر آرایش‌های مربوط در حالت‌های ۶، ۷ و ۸ برنامه پخش بار بهینه همگرا نشده است.



شکل ۸: نتایج پخش بار بهینه برای آلودگی در زمان پیک

همچنین در ساعت ۲۰ که ساعت پیک بار شبکه است، تعداد حالت‌هایی از تجدید آرایش شبکه که همگرا نشده است بسیار بیش‌تر شده است که نشان‌دهنده شرایط سخت بهره‌برداری در پیک بار است.

جدول ۵: حالت‌های همگرا نشده طول پخش بار بهینه در ۲۴ ساعت

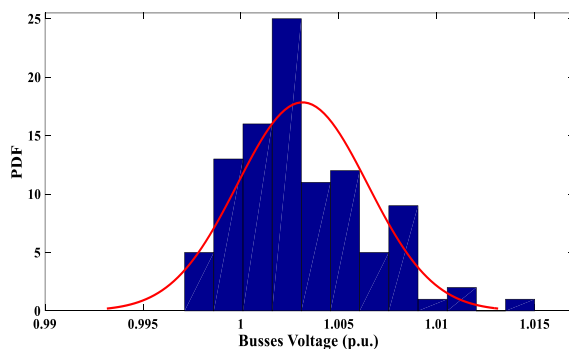
حالت‌ها	ساعت	حالت‌ها	ساعت
۱۳، ۴، ۸	۱۳	۴، ۵، ۷، ۸، ۲۱	۱
۴، ۷، ۸، ۳۵	۱۴	۴، ۷، ۷	۲
۴، ۷، ۸	۱۵	۱، ۴، ۶، ۸، ۲۱	۳
۱، ۴، ۸	۱۶	۶، ۷، ۸	۴
۱، ۲، ۵، ۶، ۸	۱۷	۳، ۴، ۶، ۸، ۲۱	۵
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۳۵	۱۸	۶، ۷، ۸، ۱۰، ۲۱	۶
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۳۵	۱۹	۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰	۷
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۳۳، ۳۵، ۳۷، ۳۹، ۴۱، ۴۳، ۴۵، ۴۷	۲۰	۴، ۶، ۷، ۸	۸
۱، ۳، ۴، ۷، ۸، ۳۵، ۳۹	۲۱	۷، ۸	۹
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸	۲۲	۲، ۴، ۶، ۸	۱۰
۱، ۳، ۴، ۵، ۷، ۸	۲۳	۱، ۵	۱۱
۳، ۴، ۷، ۸	۲۴	۱، ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، ۲۱	۱۲

جدول ۶: بهترین حالت کلیدزنی برای پایداری ولتاژ برای ۲۴ ساعت

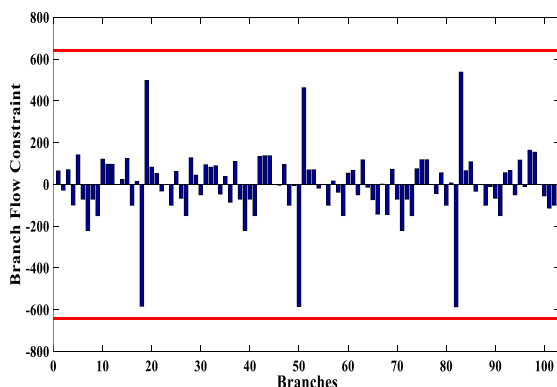
حالت	ساعت	VSI	حالت	ساعت	VSI
حالت ۶۴	۱۳	۱۰۲/۷۸	حالت ۶۴	۱۳	۱۰۲/۱۲
حالت ۶۴	۱۴	۱۰۲/۶۷	حالت ۶۴	۱۴	۱۰۲/۱۷
حالت ۶۴	۱۵	۱۰۲/۶۳	حالت ۶۴	۱۵	۱۰۲/۴۵
حالت ۶۴	۱۶	۱۰۲/۶۳	حالت ۶۴	۱۶	۱۰۲/۴۴
حالت ۶۴	۱۷	۱۰۲/۶۲	حالت ۶۴	۱۷	۱۰۲/۱۲
حالت ۶۴	۱۸	۱۰۲/۶۰	حالت ۶۴	۱۸	۱۰۲/۲۲
حالت ۶۴	۱۹	۱۰۲/۵۸	حالت ۶۴	۱۹	۱۰۲/۰۹
حالت ۶۴	۲۰	۱۰۲/۵۶	حالت ۶۴	۲۰	۱۰۲/۳۲
حالت ۶۴	۲۱	۱۰۲/۴۶	حالت ۶۴	۲۱	۱۰۲/۱۳
حالت ۶۴	۲۲	۱۰۲/۳۴	حالت ۶۴	۲۲	۱۰۲/۲۹
حالت ۶۴	۲۳	۱۰۲/۰۱	حالت ۶۴	۲۳	۱۰۲/۶۰
حالت ۶۴	۲۴	۱۰۱/۹۷	حالت ۶۴	۲۴	۱۰۲/۷۴

در شکل ۱۱ پراکندگی ولتاژ تمامی باس‌های شبکه به‌صورت هیستوگرام نشان داده شده است و نشان می‌دهد که محدودیت ولتاژ همواره در تمامی باس‌ها رعایت شده است. همچنین شکل ۱۲ میزان محدودیت توان عبوری در خطوط شبکه را نشان می‌دهد که در هیچ شاخه‌ای توان فراتر از حد مجاز (۶۵۰ کیلووات) نیست.

همین‌طور در ساعت اوج مصرف با توجه به جدول ۹ و با استفاده از آرایش مربوط به حالت ۵۶، تبادل توان بین ریزشبهه و شبکه بالادستی به این صورت است که شبکه اصلی به ریزشبهه‌های ۱ و ۲ به‌اندازه ۱۶۵/۲۸، ۱۵۳/۹۳ (مجموع ۳۱۹/۲۱) کیلووات توان تزریق کرده است. همچنین تبادلات انجام‌گرفته بین این ریزشبهه‌ها به‌قرار زیر است که ریزشبهه ۱ به‌اندازه ۱۰۰/۲۱ به ریزشبهه ۲، ریزشبهه ۲ به‌اندازه ۱۱۴/۲۹ به ریزشبهه ۳ و ریزشبهه ۳ به ریزشبهه ۱ به‌اندازه ۵۹/۴۹ کیلووات توان انتقال داده است. لازم‌به‌ذکر است که این تبادل با توجه به متفاوت بودن بار و ناحیه در هر یک از ریزشبهه‌ها صورت گرفته شده است. تلفات کل حاصل از این تبادلات در حدود ۲۱/۳۴ کیلووات است.



شکل ۱۱: محدودیت ولتاژ برای باس‌های شبکه



شکل ۱۲: توان عبوری و حداکثر توان مجاز برای خطوط شبکه

با توجه به این جدول با عنایت به اینکه نتایج برای ساعت ۲۰ ارائه شده است توان‌های تولیدی برای منابع خورشیدی صفر به‌دست آمده است. همچنین در شرایط پیک بار شبکه با توجه به منحنی قیمت شبکه بالادستی، اکثر منابع داخل ریزشبهه‌ها در توان‌های حداکثر خود کار می‌کنند.

در آخرین گام نتایج پخش بار بهینه برای تابع هدف انحراف ولتاژ در جهت ارتقا کیفیت توان ارائه شده است. در جدول ۷ نتایج مورد نظر آورده شده است. با توجه به جدول فوق بهترین حالت کلیدزنی جهت حداقل‌سازی کردن انحراف ولتاژ برای ساعت پیک مصرف، حالت ۵۶ است که نتایج برای تمامی حالت‌ها در ساعت پیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

آنچه از جدول ۷ مشخص است، همه ریزشبهه‌ها از حداکثر ظرفیت منابع تولید پراکنده خود در ساعت اوج مصرف استفاده می‌کنند. همچنین جزئیات مربوط به میزان تولید توان شبکه بالادستی، تلفات هر ریزشبهه و میزان بار هر ریزشبهه در این جدول آمده است. لازم‌به‌ذکر است که با توجه به جدول ۹ حالت ۵۶ بهترین حالت برای ارتباط بین ریزشبهه‌ها و شبکه اصلی در زمان اوج بار است.

نتایج حاصل از چهار تابع هدف فوق با استفاده از روش پیشنهادی تحلیل پوششی داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد تا کارآمدترین جواب‌ها و حالت‌های کلیدزنی و در نتیجه آرایش بهینه ریزشبهه‌ها برای هر ساعت به‌دست می‌آید. بدین صورت که روش DEA به نتایج حاصل از پخش بار بهینه در هر بازه زمانی اعمال شده و بهترین کلیدزنی برای هر ساعت مشخص می‌شود. در جدول ۸ نتایج حاصل نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه در صورتی که تمامی توابع هدف مدنظر قرار داده برای ساعات ۲-۶ حالت ۶۴ برای آرایش بهینه ریزشبهه‌ها شبکه پیشنهاد می‌گردد که در آن تمامی کلیدها بسته می‌باشند.

با توجه به اینکه از پخش بار بهینه برای حل مسئله و تعیین الگوی بهره‌برداری داخل ریزشبهه‌ها و نیز شبکه توزیع استفاده شده است لذا کلیه قیود مربوط به پخش بار بهینه از جمله محدودیت‌های ولتاژ باس‌ها، توان‌های عبوری از خطوط و غیره باید در محدوده مجاز قرار داشته باشند. برای این منظور با توجه به حجم مقاله برخی از مقادیر مهم در داخل ریزشبهه‌ها و خطوط ارتباطی بین آن‌ها فقط برای ساعت پیک بار (ساعت ۲۰) و برای حالت ۵۶ ارائه شده است.

جدول ۸: بهترین حالت به‌دست‌آمده از DEA و با لحاظ کردن تمامی

توابع هدف

حالت	ساعت	حالت	ساعت
حالت ۱۶	۱۳	حالت ۲۴	۱
حالت ۴۸	۱۴	حالت ۶۴	۲
حالت ۴۸	۱۵	حالت ۶۴	۳
حالت ۴۶	۱۶	حالت ۶۴	۴
حالت ۶۲	۱۷	حالت ۶۴	۵
حالت ۲۶	۱۸	حالت ۶۴	۶
حالت ۲۰	۱۹	حالت ۴۶	۷
حالت ۴۲	۲۰	حالت ۴۸	۸
حالت ۲۰	۲۱	حالت ۵۶	۹
حالت ۲۴	۲۲	حالت ۴۶	۱۰
حالت ۲۲	۲۳	حالت ۱۶	۱۱
حالت ۵۴	۲۴	حالت ۱۲	۱۲

market considering DER uncertainties," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 12, pp. 2999-3009, 2016.

[4] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "Distributed Smart Decision-Making for a Multimicrogrid System Based on a Hierarchical Interactive Architecture," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 637-648, June 2016.

[5] M. Marzband; F. Azarinejadian; M. Savaghebi; J. M. Guerrero, "An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain," in *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no.99, pp.1-11, 2015.

[6] Mousa Marzband, Ebrahim Yousefnejad, Andreas Sumper, José Luis Domínguez-García, "Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone Microgrid by using multi-layer ant colony optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, p.p 265-274, Feb. 2016.

[7] Mousa Marzband, Majid Ghadimi, Andreas Sumper, José Luis Domínguez-García, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode," *Applied Energy*, vol. 128, p.p 164-174, Sep. 2014.

[8] M. Marzband, N. Parhizi, J. Adabi, "Optimal energy management for stand-alone microgrids based on multi-period imperialist competition algorithm considering uncertainties: experimental validation," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, p.p 1358-1372, June 2016.

[9] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-Álvarez, J. L. Domínguez-García, B. Tomoiagă, "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.

[10] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Domínguez-García, R. Gumara-Ferret, "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.

[11] P. P. Varaiya, F. F. Wu and et al., *Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch*, Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 40-57, Jan. 2011.

[12] U.S. Department of Energy, *The Smart Grid: An Introduction* 2009. [Online]. Available: http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single.pdf

[13] A. L. Dimeas and N. D. Hatziaargyriou, "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1447-1455, Aug. 2005.

[14] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, "Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1883-1891, Nov. 2010.

[15] F. Katiraei, R. Iravani, et al., "Microgrids management," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May-June 2008.

[16] Q. Jiang, M. Xue and et al., "Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380-3389, Aug. 2013.

[17] S. Mishra, D. Ramasubramanian and et al., "A Seamless Control Methodology for a Grid Connected and Isolated PV-Diesel Microgrid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4393-4404, Nov. 2013.

[18] S. Najafi Ravadanegh and N. Nikmehr, "Optimal Power Dispatch of Multi-Microgrids at Future Smart Distribution Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1648-1657, Jul. 2015.

جدول ۹: میزان توان تولیدی، بار و تلفات ریزشکها در پیک‌بار

برحسب کیلووات (ساعت ۲۰) و حالت ۵۶

	MG1	MG2	MG3	Main Grid	Total
P _{Gen,Total}	۱۲۷۸/۱	۱۲۷۸/۱	۱۲۸۰/۵	۳۱۹/۲	۴۱۵۶/۳
P _{Losses}	۶/۹۵	۶/۶۳	۶/۲۱	۱/۵۵	۲۱/۳۴
P _{Load}	۱۳۹۰	۱۴۱۲	۱۳۳۳	---	۴۱۳۵
Wind	۷۱	۷۱	۷۱	---	۴۲۶
MT	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	---	۹۰۰
PV	.	0	0	---	.
FC1	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	---	۶۰۰
FC2	۵۰	۵۰	۵۰	---	۱۵۰
CHP	۵۸۶/۰۸	۵۸۶/۵۴	۵۸۸/۵۰	---	۱۷۶۱/۱۲

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش تعداد ریزشکها در شبکه‌های توزیع مسئله برنامه‌ریزی و نیز تجدید آرایش بهینه آن‌ها مطرح می‌گردد. در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی و تجدید آرایش بهینه ریزشکها با در نظرگیری توابع هدف مختلف ارزیابی شده است. از پخش بار بهینه جهت ارزیابی شبکه و نیز اعمال قیود و محدودیت‌های شبکه استفاده شده است. با توجه به چندمنظوره بودن مسئله بهینه‌سازی از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب جواب‌هایی که دارای کارایی بیش‌تری از نقطه‌نظر حداقل هزینه بهره‌برداری، بهتر بودن پارامترهای فنی و کمینه بودن میزان آلودگی نسبت به سایر جواب‌ها هستند استفاده شده است. مطالعات فوق نشان می‌دهند که با توجه به قیمت انرژی در ساعات مختلف هرکدام از ریزشکها نیازمند برنامه‌ریزی خاص خود بوده و درعین حال با توجه به شرایط کلی شبکه مورد مطالعه نیز مجبور به مسامحه با شرایط شبکه هستند. از طرفی در برخی حالات کلیدزنی جهت حفظ امنیت شبکه سیستم از نظر پخش باری همگرا نشده است. با بهره‌برداری مناسب از منابع انرژی پراکنده در ریزشکها هم‌زمان با مدیریت خطوط ارتباطی آن‌ها امکان بهبود پارامترهای فنی شبکه توزیع هوشمند حاصل می‌شود. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع هوشمند با سه ریزشکها اعمال شده و نتایج حاصل تحلیل و بررسی شده‌اند. یکی از نتایج مهم این تحقیق یافتن الگوی بهینه تغییرآرایش مجموعه‌ای از ریزشکهای به‌هم‌پیوسته است به‌طوری که در تمامی ساعات برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت روزانه امکان تأمین توان برای بارهای ریزشکها را با حداقل هزینه و بدون خاموشی ارائه می‌دهد.

مراجع

- [1] U.S. Dept. Energy, *Annual Energy Outlook*, Dec. 2011.
- [2] Mousa Marzband, Maziar Mirhosseini Moghaddam, Mudathir Funsho Akorede, Ghazal Khomeyran, "Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, p.p 78-86, Nov. 2016.
- [3] M. Marzband, M. Javadi, J. L. Domínguez-García and M. Mirhosseini Moghaddam, "Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail

- [29] A.D. Hawkes, M.A. Leach, "Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid," *Applied Energy*, vol. 86, p.p 1253-1265, July-Aug. 2009.
- [30] E. Dall'Anese, H. Zhu and et al., "Distributed Optimal Power Flow for Smart Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1464-1475, Sept. 2013.
- [۳۱] دکتر میربهادر قلی آریانژاد و دکتر سید جعفر سجادی، تحقیق در عملیات پیشرفته، تهران، انتشارات میر، سال ۱۳۸۰.
- [32] P. Anderson and N. C. Peterson, "A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis," *Manage Sci.* 39, 1261-1264, 1993.
- [33] S. C. Ray, *Data Envelopment Analysis: Theory and Techniques for Economics and Operations Research*, Cambridge University Press, New York, 2004.
- [34] W. W. Cooper, A. Lewin and et al., *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Application*, Kluwer, Boston, 1994.
- [35] W. W. Cooper, L. M. Seiford and et al., *Data Envelopment Analysis: A Comprehension Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
- [36] P. Anderson and N. C. Peterson, "A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis," *Manage. Sci.* 39, pp. 1261-1264, 1993.
- [37] W. Cook, M. Kress and et al., "Prioritization models for frontier decision making units in DEA," *Eur. J. Oper. Res.* 59, pp. 319-323, 1992.
- [38] Sexton, Thomas R., Richard H. Silkman, and Andrew J. Hogan. "Data envelopment analysis: Critique and extensions." *New Directions for Evaluation*, pp. 73-105, 1986.
- [39] F. H. F. Liu and H. H. Peng, "Ranking of units on the DEA frontier with common weights," *Comput. Oper. Res.* 35, pp. 1624-1637, 2008.
- [40] W. Cook, M. Kress and et al., "Prioritization models for frontier decision making units in DEA," *Eur. J. Oper. Res.* 59, pp. 319-323, 1992.
- [41] L. Shi, Y. Luo and et al., "Bidding strategy of microgrid with consideration of uncertainty for participating in power market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 59, pp. 1-13, July 2014.
- [۴۲] یوسف علی شعبانی، بهره‌برداری اقتصادی در نیروگاههای با واحدهای CHP، کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز، ۶۳-۶۹، ۱۳۹۳.
- [19] M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad and et al., "Optimal Demand Response Aggregation in Wholesale Electricity Markets," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1957-1965, Dec. 2013.
- [20] D. T. Nguyen and L. B. Le, "Risk-Constrained Profit Maximization for Microgrid Aggregators with Demand Response," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 135-146, Jan. 2015.
- [21] Y. Xu, W. Liu and et al., "Stable Multi-Agent-Based Load Shedding Algorithm for Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2006-2014, Nov. 2011.
- [22] A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Microgrid-Based Co-Optimization of Generation and Transmission Planning in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1582-1590, May 2013.
- [23] I. Koutsopoulos and L. Tassiulas, "Challenges in demand load control for the smart grid," *IEEE Network*, vol. 25, no. 5, pp. 16-21, September-October 2011.
- [24] Z. Wang, B. Chen and et al., "Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 45-53, Jan. 2015.
- [۲۵] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سیدمازبار میرحسینی مقدم، بهنام محمدی ایوانلو، فاطمه آذری‌نژادیان، پیاده‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۵-۴۰، بهار ۱۳۹۵.
- [26] B. Zhao, X. Zhang, J. Chen and et al., "Operation Optimization of Standalone Microgrids Considering Lifetime Characteristics of Battery Energy Storage System," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 934-943, Oct. 2013.
- [۲۷] سید مازبار میرحسینی مقدم، موسی مرزبند، معصومه جوادی، مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های چند-ریزشبکه‌ای در بازار خرده‌فروشی انرژی برپایه الگوریتم سلسه‌مراتبی تعاملی، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحه ۱۲۰-۱۰۷، پاییز ۱۳۹۵.
- [28] M. E. Gamez Urias, E. N. Sanchez and et al., "Electrical Microgrid Optimization via a New Recurrent Neural Network," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 945-953, Sept. 2015.

زیرنویس‌ها

^۱Banker, Charnes and Cooper

^۲variable-returns-to-scale

^۳Optimal Power Flow

^۴Combined Heat and Power

^۱Data Envelope Analysis

^۲Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

^۳Decision Making Unit

^۴Anderson-Peterson

^۵Charnes, Cooper and Rhodes