



Optimum Energy Management in the Radial Distribution Network by Considering Multiple Microgrids, Uncertainties, and Resilience Index Using the Modified Harris Hawk Optimization Algorithm

Marzieh Poshtyafteh¹, *PhD Student*, Hassan Barati¹, *Associate professor*,
Ali Darvish Falehi², *Assistant professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

² Department of Computer Engineering, Shadegan Branch, Islamic Azad University, Shadegan, Iran

Abstract:

This paper proposes optimal energy management for multiple microgrids (MMG) connected to a distribution network (DN), in which various objective functions including network cost, pollutant reduction and losses, and distribution network resilience are considered. Also, the effect of the placement of distributed generation sources and the distribution network's reconfiguration in the optimization process to reduce losses, increasing reliability and resilience are considered. Uncertainties are formulated using Information Gap Decision Theory (IGDT). The decision variables, including the location of resources and microgrids, installation capacity, power factor, and uncertainty radius, have been optimally determined using the Modified Harris Hawk Optimization algorithm (MHHO) and the CPLEX solver. In the MHHO algorithm, the rabbit energy parameter (E) changes dynamically with the behavior and value of the objective function. Finally, the proposed method on the IEEE 33-bus Radial Distribution System in the first stage in a 24-hour time horizon including three micro-grids with different renewable energy sources to determine the structure of the network due to the buses connecting micro-grids and scattered sources by the placement algorithm and in the next stage in time Different resilience indicators are investigated due to the disconnection of the distribution network with the upstream network. The simulation results show the MHHO algorithm's optimal performance in placing microgrids, distributed generation sources, and network reconfiguration to improve the optimal energy management and resilience index.

Keywords: Multiple-microgrids, Uncertainties, Modified Harris Hawk optimization, Resilience, Reconfiguration

Received: 28 June 2024

Revised: 28 July 2024

Accepted: 20 October 2024

Corresponding Author: Dr. Hassan Barati, barati@iaud.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.71691/teeges.2026.1123908>





مقاله پژوهشی

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

مدیریت بهینه انرژی در شبکه توزیع شعاعی با در نظر گرفتن ریزشکته‌های چندگانه، عدم قطعیت‌ها و شاخص تاب‌آوری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس بهبودیافته

مرضیه پشت یافته^۱، دانشجوی دکتری، حسن براتی^۱، دانشیار، علی درویش فالچی^۲، استادیار

۱- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲- گروه برق، واحد شادگان، دانشگاه آزاد اسلامی، شادگان، ایران

چکیده: در این مقاله، یک مدیریت بهینه انرژی برای یک ریزشکته چندگانه (MMG) متصل به شبکه‌ی توزیع (DN) پیشنهاد شده است. در این بهینه‌سازی توابع هدف مختلفی در نظر گرفته شده است شامل: هزینه شبکه، کاهش آلاینده‌ها و تلفات، و تاب‌آوری شبکه توزیع. همچنین، در این مقاله تأثیر جایابی منابع تولیدات پراکنده توأم با بازآرایی شبکه توزیع در فرآیند بهینه‌سازی و با هدف کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان و تاب‌آوری در نظر گرفته شده‌اند. عدم قطعیت موجود در منابع تجدیدپذیر و مصرف‌کننده‌ها با استفاده از روش تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی (IGDT) فرمول‌بندی شده است. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان منابع و ریزشکته‌ها، ظرفیت نصب و ضریب قدرت و شعاع عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بهبودیافته شاهین هریس (MHHO) و حل‌کننده CPLEX بصورت بهینه تعیین شده است. در الگوریتم MHHO، پارامتر انرژی خرگوش (E) با رفتار و مقدار تابع هدف، به‌طور دینامیکی تغییر نماید. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه IEEE در مرحله اول در افق زمانی ۲۴ ساعته شامل سه ریزشکته با منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر به جهت تعیین ساختار شبکه از بابت شین‌های اتصال ریزشکته‌ها و منابع پراکنده توسط الگوریتم جایابی و در مرحله بعد در زمان‌های مختلف شاخص تاب‌آوری بر اثر قطع ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادست بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مطلوب الگوریتم MHHO در جایابی ریزشکته‌ها، منابع تولید پراکنده و بازآرایی شبکه جهت بهبود مدیریت بهینه انرژی و شاخص تاب‌آوری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزشکته‌های چندگانه، عدم قطعیت‌ها، الگوریتم شاهین هریس، تاب‌آوری، بازآرایی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسن براتی، barati@iaud.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.71691/teeges.2026.1123908>

اخيراً، بلايای طبيعى مكرر تلفات وسيعى براى سيستم قدرت به وجود آورده است كه ضرورت بهبود تاب‌آوری سيستم قدرت را برجسته‌تر مى‌كنند. سيستم‌هاى قدرت اطراف جهان به صورت سنتى براساس اصول اصلى قابليت اطمينان، همچون امنيت، شايستگى (كفايت)، طراحي و بهره‌بردارى شده‌اند. اين اصول مى‌توانند به طور احتمالى در رابطه با شكست‌هاى شناخته‌شده اجزاي زيرساخت قدرت باشند. با اين حال، اخيراً بلاهاى ناگهانى طبيعى نگرانى‌هاى حول ديدگاه قابليت اطمينان قديمى را بالا برده است. اين مساله با تجربه خاموشى در طول طوفان سيدنى كه متمايل به سمت شمال شرقى ايالات متحده بالای ۱۰۰۰۰۰ كابل را تخریب كرد، و منجر به قطع شدن ارتباط تقريباً ۷ ميليون نفر شد، ثابت شده است. در دهه اخير، سوانح آب‌وهوایى موجب ۶۷۹ خاموشى برق در ايالت متحده شده است، هر کدام منجر به قطعى سرويس‌دهى برق حداقل ۵۰۰۰۰ مصرف‌كننده شد. با در نظر گرفتن اين حقايق، مى‌توان ادعا كرد اين حوادث يك تهديد اصلى براى زيرساخت‌هاى انرژى هستند [۱]. در كشور ايران، سيل‌هاى جارى شده در ابتدای سال ۱۳۹۸ با آسیب جدى به شبكه‌هاى توزيع برق، علاوه بر تعدادى از شهرهاى بزرگ، ۲۳۵۲ روستا را در استان‌هاى شمالى و غربى كشور براى چند روز با قطعى برق مواجه كرد. در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵ خارج شدن تعداد زيادى از پست‌ها و خطوط شبكه در استان خوزستان به علت طوفان گردوغبار شديد و رطوبت بالای هوا، بيش از ۹۰٪ مشتركين در ۱۱ شهر اين استان را بى‌برق كرد [۲].

تاب‌آوری شبكه توزيع در واقع توانايى آن در بازيايى بارهاى حساس در کوتاه‌ترين زمان بعد از يك رخداد شديد مى‌باشد [۳]. چندين تعريف از تاب‌آوری سيستم قدرت وجود دارد و اغلب آنها بر روى توانايى به پيش‌بينى كردن، جذب، و بازيايى سريع از شوک حوادث شديد تمرکز مى‌كنند. در مقايسه با قابليت اطمينان سيستم قدرت، تاب‌آوری مرتبط با حوادث با يك احتمال كم اما با تاثيرگذارى بالا مى‌باشد [۴]. در اصل، تاب‌آوری سيستم قدرت معادل با تاب‌آوری سيستم توزيع قدرت تلقى مى‌شود. يك سيستم قدرت مقاوم (تاب‌آور) قادر خواهد بود اختلالات مربوط به حوادث شديد و تغييرات آب‌وهوایى (به‌عنوان مثال، طوفان‌ها، گردبادها)، و حوادث فاجعه‌بارى كه توسط انسان‌ها انجام مى‌شود به‌عنوان مثال، حملات بدخواهانه (سايبى، تروريستى و...)، و اشتباهات انساني و تركيبى از چنين حوادثى را تحمل كند [۵].

در مباحث مربوط به شبكه توزيع، ريزشبكه‌ها زيرسيستم‌هاى شبكه توزيع هستند كه از منابع انرژى پراكنده، دستگاه‌هاى ذخيره‌ساز، و بارهاى متصل شده تشكيل شده‌اند و به‌عنوان يك سيستم كنترل واحد يا به‌صورت متصل و يا جدا از شبكه بهره‌بردارى مى‌شوند. نياز روزافزون در تأمين تقاضاى انرژى به طريق مؤثر مفهوم ريزشبكه را بسيار مورد توجه قرار داده است. ريزشبكه‌ها مى‌توانند به شكل مؤثر مديريت و هماهنگى منابع توليد پراكنده و بارها را انجام دهند و همچنين نفوذ بالای منابع انرژى تجديدپذير را پشتيبانى كنند. به‌منظور بهره‌بردارى مناسب از يك ريزشبكه، استفاده از سيستم مديريت انرژى (EMS) يك امر ضرورى مى‌باشد. هدف از مديريت انرژى، تأمين توان با كمترين هزينه به‌منظور پاسخگويى مطلوب به بار است. سيستم مديريت انرژى ريزشبكه مى‌تواند پيش‌بينى به هنگام انرژى منابع تجديدپذير، عناصر ذخيره‌ساز انرژى و بارهاى كنترل‌پذير را به‌منظور برنامه‌ريزى کوتاه‌مدت مناسب براى حداقل كردن كل هزينه‌هاى بهره‌بردارى انجام دهد. هدف سيستم مديريت انرژى کاهش كل هزينه انرژى و حداكثر كردن درآمدهاى منابع توليد هر يك از ريزشبكه‌ها مى‌باشد. وسايل و تجهيزات هوشمند اجزاي اصلى سيستم مديريت انرژى هستند كه مى‌توانند در پاسخ به سيگنال‌هاى قيمت روشن و خاموش شوند و در برنامه‌هاى پاسخگويى بار (DR) ^۲ نيز مورد نيازند. مديريت بهينه انرژى ريزشبكه‌ها همراه با برنامه‌هاى پاسخگويى بار مى‌تواند به مسطح شدن منحنى بار كمك كند و تعداد نيروگاه‌هاى گران‌قيمت مورد استفاده براى دوره‌هاى پيكبار را کاهش دهد؛ بنابراین ريزشبكه‌ها چالش‌هاى زيادى را از ديدگاه‌هاى موردنياز براى كنترل و مدل‌سازى عرضه مى‌كنند. كنترل بهينه و مديريت انرژى ريزشبكه‌ها يك شاخه فعال تحقيقاتى است و توسط عدم قطعيت‌هاى موجود در تقاضاى انرژى، توليدات تجديدپذير، قيمت‌هاى انرژى، و همچنين بارهاى انعطاف‌پذير كه به اولويت مصرف‌كنندگان بستگى دارد، پيچيده‌تر نيز مى‌شود.

زمانى كه تعداد ريزشبكه‌ها رشد مى‌يابند، تقابل آنها با يكديگر افزايش مى‌يابد و يك شبكه از ريزشبكه‌ها پديدار مى‌شود كه ريزشبكه چندگانه ناميده مى‌شود [۶]. ريزشبكه‌ها به صورت راه‌حل‌هاى پايدار براى راهنمايى چالش‌هاى تاب‌آوری سيستم قدرت ملاحظه شده‌اند. ريزشبكه‌ها مى‌توانند از بخش‌هاى آسیب ديده شبكه در مواقع حادثه و حفظ تأمين برق از طريق مديريت بهينه





منابع در دسترس می‌توانند از شبکه جدا شوند. در این مفهوم، منبع محلی، ذخیره‌سازی و کنترل انرژی بدون نیاز واحدهای تولیدی دور و خطوط انتقال می‌تواند موجب شود که ریزشکته‌ها کمتر نسبت به بلاها آسیب‌پذیر شوند، و آنها می‌توانند به صورت اورژانسی به یک روش سریع‌تر و کارآمدتر پاسخگو باشند [۱]. ریزشکته‌ها انرژی را به صورت قابلیت کنترل دستی محدود می‌کنند، با در نظر گرفتن ذات محلی تولید توان بر طبق توصیه‌های IEEE، حداکثر ریزشکته‌ها به صورت 10 MVA می‌باشد. از این رو، سرویس‌دهی یک حجم زیاد درخواست از طریق تبدیل کردن بارها به چندین بار کوچک‌تر و تامین هر واحد توسط یک ریزشکته امکان‌پذیر است. بر طبق این روش، سیستم توزیع هوشمند می‌تواند بصورت چندین ریزشکته با کنترل و بهینه‌سازی توزیع شده دیده شود. در این ساختار، ریزشکته‌ها می‌توانند به صورت خود مختار براساس استراتژی اپراتورهای آنها مدیریت شوند. در عمل پس، هر ریزشکته برای دسترسی به سطح قابل قبول امنیت و سرویس‌دهی طی حوادث اضطراری باید ظرفیت ذخیره‌سازی در تولید کافی نصب کند که این مساله منجر به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری برای ریزشکته‌ها می‌شود. راه‌حل دیگر اشتراک‌گذاری ظرفیت تولید و ذخیره‌سازی میان ریزشکته‌ها و بهره‌برداری آنها در هماهنگی کامل می‌باشد. این استراتژی هزینه کلی و بهره‌بردار شبکه‌ها را کاهش می‌دهد و بطور چشمگیری تاب‌آوری کل سیستم توزیع را در مقابل حوادث پیش‌بینی نشده بالا می‌برد [۱]. ریزشکته‌ها همچنین می‌توانند هر گونه قطع برق در خارج از قلمرو خود را کوتاه کنند و فرآیند بازیابی در سیستم‌های توزیع برق را تسریع کنند. به ویژه، ریزشکته‌ها سیستم‌های قدرت را قادر می‌سازند تا یک استراتژی بازیابی پایین به بالا به موازات استراتژی‌های معمولی پایین به پایین اتخاذ کنند. به این معنی که، ریزشکته‌ها شروع به انرژی دادن به شبکه توزیع محلی با بازگرداندن عرضه به بارهای بحرانی در محدوده خود می‌کنند، در حالی که ژنراتورها شروع به انرژی دهی مجدد اجزای شبکه انتقال می‌کنند. این دو استراتژی بازسازی در هماهنگی نزدیک اجرا می‌شوند تا زمانی که کل سیستم قدرت هماهنگ شود. بر این اساس، گسترش ریزشکته‌ها می‌تواند در سیستم‌های قدرت تاب‌آوری ایجاد کند به حدی که به مقابله با حوادث شدید در مناطق مربوطه ریزشکته‌ها کمک کند. توزیع نابرابر خرابی‌های حوادث شدید نیاز به ریزشکته‌ها را اثبات می‌کند، زیرا احتمال این که تمام اجزای عملکردی در کل خوشه ریزشکته نتوانند به طور همزمان عمل کنند بسیار کم است. از آنجا که تاب‌آوری در برابر یک حادثه شدید به ویژگی‌های ذاتی زیرساخت سیستم قدرت، و نیز اثربخشی عملیاتی آن بستگی دارد، تاب‌آوری می‌تواند با معرفی تقویت‌کننده‌های زیرساختی و تقویت عملیاتی بهبود یابد. به طور کلی، تقویت زیرساختی شامل اقدامات قوی کردن و برنامه‌ریزی است، در حالی که تقویت عملیاتی می‌تواند بیشتر به اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی مربوط گردد [۵].

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

در مرجع [۱]. یک برنامه مدیریت خاموشی سلسله‌مراتبی به منظور بالابردن تاب‌آوری یک سیستم توزیع هوشمند متشکل از چندین ریزشکته در برابر رخداد‌های مخرب غیرمنتظره ارائه می‌دهد. بدین منظور، بعد از شناسایی ویژگی‌های اصلی و الزامات برای یک برنامه مدیریت خاموشی تاب‌آور، یک چارچوب مناسب تدبیر شده است و نقش‌ها و وظایف نهادهای مدیریتی مختلف در یک سیستم ریزشکته چندگانه معرفی می‌شوند. براساس این چارچوب، ریزشکته‌ها منابع در دسترس‌شان را در گام اول با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر کنترل مدل پیش‌بینی جدید برنامه‌ریزی می‌کنند. در گام دوم، اپراتور سیستم توزیع تبادل توان ممکن میان ریزشکته‌ها را هماهنگ می‌کند و ظرفیت استفاده نشده منابع ریزشکته‌ها برای تغذیه بارهای سرویس‌دهی نشده در گام اول استفاده می‌کند. در مرجع [۳]. با استفاده از ریزشکته‌ها به بازیابی بارهای حساس در شبکه توزیع بر حسب اولویت بارها پرداخته است و بر اساس میزان بار بازیابی شده شاخصی با عنوان شاخص تاب‌آوری را محاسبه می‌کند. در مرجع [۴] یک چارچوب مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی براساس ریزشکته‌های چندگانه برای افزایش تاب‌آوری ارائه می‌دهد. طبق چارچوب، موقعی که تولید توان از شبکه اصلی قطع می‌شود، ریزشکته‌ها به مود جزیره‌ای می‌روند و تولید توان را بطور بهینه از طریق یک برنامه دو مرحله‌ای، هر ریزشکته منابع در دسترس‌اش را به منظور حداقل کردن خاموشی بار و هزینه بهره‌برداری با استفاده از بهینه‌سازی افق چرخان، دوباره برنامه‌ریزی می‌کند. یک روش مدیریت سمت تقاضا براساس دسته‌بندی بار برای جزیره‌ای کردن ریزشکته‌ها طراحی می‌شود. در گام دوم، ریزشکته‌ها با ظرفیت‌های توان اضافی به منظور حمایت ریزشکته‌ها با بارهای قطع شده توان صادر می‌کنند. در واقع، یک الگوریتم توافقی برای ارتباطات توزیع



شده ریزشکه‌ها به منظور مشخص کردن برنامه تبادل توان بکارگرفته می‌شود. در مرجع [۵] به تعریف و پیشنهادهای یک چارچوب کلی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم قدرت می‌پردازد و همچنین به چالش‌هایی برای توسعه دادن نقش سیستم‌های توزیع اشاره می‌کند و نتیجه می‌گیرد که ریزشکه‌های شبکه شده یک راه حل سراسری برای بهبود تاب‌آوری در مقابل حوادث شدید در شهرهای کوچک فراهم می‌کنند.

در مرجع [۶] یک بهینه‌سازی چندهدفه از نوع همکاری برای مدیریت انرژی ریزشکه‌های شبکه شده ارائه می‌دهد. شاخص عملکرد مستقل را برای ریزشکه‌ها به منظور کاهش انرژی تبدیلی با شبکه اصلی معرفی شده است. عدم قطعیت تولید منبع تجدیدپذیر بعنوان یک بهینه‌سازی تصادفی مدلسازی شده که روش تصمیم‌گیری سناریو تولیدی و کاهشی بکار گرفته شده است. این بهینه‌سازی چندهدفه تصادفی توسط روش برنامه مقایسه‌ای حل شده که برای ترکیب توابع هدف ناهمگون استفاده می‌شود. این تکنیک مساله چند هدفه اصلی را به یک مساله تک هدفه تبدیل می‌کند. در مرجع [۷] ریزشکه‌ها با منابع توزیع شده (DG) یک راه حل مقاوم در برابر خطاهای اصلی در یک سیستم توزیع بدلیل بلایای طبیعی فراهم می‌کند. در این مقاله یک روش بهره‌برداری سیستم توزیع بوسیله فرم‌دهی چندین ریزشکه انرژی دهی شده توسط DG از سیستم توزیع شعاعی در زمان آنی بهره‌برداری مخصوصاً به بازیابی بارهای حساس از خاموشی توان، یک برنامه خطی فرمول‌بندی می‌شود برای به حداکثر رساندن بارهای بحرانی که باید برداشت شوند در حینی که خودکفایی و قیود بهره‌برداری برای مساله فرم‌دهی ریزشکه‌ها ارضا می‌شوند بوسیله کنترل وضعیت ON/OFF تجهیزات کلیدزنی کنترل شده از راه دور و DG. یک برنامه هماهنگی چندعاملی توزیع شده توسط ارتباطات محلی برای بازیابی اطلاعات سراسری بعنوان ورودی‌های بهینه‌سازی طراحی می‌شود که برای الزامات ارتباطات اتوماسیونی (اتوماتیک) بعد از رخداد بلایا مناسب است. در [۸] یک شبکه توزیع را بررسی می‌کند که به شبکه بالادستی متصل شده است و خود این شبکه توزیع به سه ریزشکه تقسیم می‌شود که هر کدام دارای DG می‌باشند، به هنگام خطایی در شبکه بالایی می‌توان شبکه توزیع با ریزشکه‌هایش از شبکه اصلی جدا شوند بصورت جزیره‌ای عمل کنند. همچنین به بررسی تاب‌آوری سیستم توزیع پس از رخدادها با استفاده از ذخیره‌سازی می‌پردازد و در مقایسه ذخیره‌سازهای ساکن و ذخیره‌سازهای قابل حمل به این نتیجه می‌رسد که ذخیره‌سازی قابل حمل از لحاظ هزینه بهتر است. در مرجع [۹]، یک تحلیل حساسیت به منظور تعیین قیود بهره‌برداری و با استفاده از ریزشکه‌ها به عنوان منابع تاب‌آور انجام شده است. در این مرجع با استفاده از یک سیستم تست واقعی، شبیه‌سازی برون خط به منظور کنترل ریزشکه‌ها در دوره بازیابی انجام شده است.

در مرجع [۱۰]، یک تجربه به دست آمده از تاب‌آوری مبتنی بر پاسخگویی تقاضا برای یک شبکه واقعی ارزیابی شده است. با بررسی رخدادهای بحرانی از قبیل طوفان‌های طبیعی، میزان خسارت به وجود آمده بر روی سیستم قدرت، تلفات سیستم، بهترین نوع عملکرد ریزشکه‌ها و همچنین پاسخ‌های بار در زمان پس از رخداد بررسی شده است. در مرجع [۱۱]، رویکردی به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع با استفاده از عملکرد کنترلی ادوات با تاثیرگذاری حداکثر بر تاب‌آوری پیشنهاد شده است. در اهداف این مرجع روش پیشنهادی برای استراتژی‌های پیکربندی مختلفی مقایسه شده و یکی از پیکربندی‌های ممکن با حداکثر تاب‌آوری پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۲]، یک مدل احتمالاتی برای افزایش تاب‌آوری ریزشکه‌های هیبرید، با در نظر گرفتن امکانسنجی جزیره‌بودن ریزشکه‌ها و حفظ بارهای بحرانی پیشنهاد شده است. در این روش با هماهنگ نمودن شرایط عادی و شرایط اضطراری، دو مساله ریاضیاتی مختلف تعریف شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۱۳]، یک مدل بهینه‌سازی قیاسی دو مرحله‌ای برای بهبود تاب‌آوری سیستم در برابر پیشامدهای طبیعی، ارائه شده است. در این مرجع مبتنی بر بازار برق وضعیت اقتصادی منابع تولید پراکنده در روزهای پیش‌رو پیشنهاد شده و سپس در مرحله دوم بارها و منابع سیستم در شبکه به صورت یک مساله ریاضیاتی بهینه شده‌اند. در مرجع [۱۴]، یک برنامه‌ریزی احتمالاتی به منظور کمینه‌نمودن نیازمندی‌های تاب‌آوری سیستم پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از مدلسازی پخش توان، شرایط بهره‌برداری شعاعی سیستم توزیع برای یک شبکه گسترده بررسی شده است. در مرجع



[۱۵]، روشی به منظور مشارکت بارهای انتهایی در سیستم توزیع و با استفاده از کنترل‌کننده‌های (GFA)^۴ به منظور مواجه شدن با شرایط گذرای ناشی از کلیدزنی در حضور ریزشبه‌ها، توصیف شده است. کنترل‌کننده‌های GFA دارای قابلیت جداسازی و اتصال مجدد به شبکه بوده و می‌توانند بدون نیاز به سیستم‌های مخابراتی و به صورت محلی بارهای انتهایی را به شبکه بازگردانند. در مرجع [۱۶]، شکل‌دهی ریزشبه‌ها با حضور منابع تولید پراکنده برای تاب‌آوری سیستم به منظور بازیابی بارهای بحرانی پیشنهادی است. روش شامل یک مساله ریاضیاتی بوده که با کاهش متغیرهای تصمیم‌گیری منجر به بهبود عملکرد محاسباتی شده و می‌تواند برای شبکه‌های گسترده‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۱۷]، یک روش برنامه‌ریزی دو حالت احتمالاتی^۵ برای یافتن زمان‌بندی بهینه در حضور ریزشبه‌ها، پیشنهاد شده است. در این مرجع، تاثیر جزیره‌سازی در حین رخداد، با استفاده از فرآیند برنامه‌ریزی تصادفی مدل شده است. در مرجع [۱۸]، یک مدل برای تاب‌آوری شبکه توزیع به منظور هماهنگی و تخصیص منابع تولید پراکنده با هدف کمینه‌شدن آسیب‌رسانی به سیستم توزیع، پیشنهاد داده است. در مرجع [۱۹]، قابلیت‌های ریزشبه‌ها برای حفظ و پایداری شبکه در برابر پیشامدهای منتج به جزیره‌ای شدن، در نظر گرفته شده است. در این مرجع حفظ و نگهداری سیستم به صورت یک مدل ریاضیاتی بیان شده و به صورت یک مسئله بهینه‌سازی بررسی شده است. تاب‌آوری سیستم توزیع همچنین می‌تواند با استفاده از تصمیمات کنترلی اتخاذ شده توسط اپراتورها، از قبیل روشهای تجدید ساختار، انجام شود. همچنین در مراجع [۲۰، ۲۱]، به بررسی تعدادی از طرح‌های تجدید ساختار برپایه روش‌های بهینه‌سازی پرداخته‌اند. اگرچه اغلب طرح‌ها در بازیابی سیستم و رسیدن به اهداف خود موفق هستند، اما برخی از طرح‌ها در برابر حوادث ناخواسته احتمالاتی، آسیب‌پذیرتر هستند. در [۲۲] یک بهره‌برداری جامع و استراتژی خودترمیم برای یک سیستم توزیع با ژنراتورهای قابل توزیع و غیرقابل توزیع ارائه می‌دهد.

در [۲۳] یک روش چند بازگیره برای مدل‌سازی سیستم مدیریت انرژی در شبکه توزیع هوشمند (SDN)^۶ مبتنی بر چندریزشبه استفاده شده است و تاثیر تلفات توان اکتیو روی مزایای نهاد و برنامه‌ریزی انرژی را نشان دهد و اینکه چگونه می‌تواند روی تجارت انرژی میان آن‌ها تاثیرگذار باشد و همچنین یک روش برای مدیریت انرژی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در تولید انرژی پاک ارائه کرده است. در [۲۴] با استفاده از بهینه‌سازی تبادل و مزایده بهینه‌ای که سود خالص کل شبکه را ماکزیمم می‌کند را تعیین می‌کند و ریزشبه‌ها در ابتدا بصورت انفرادی تابع هدف خود را بهینه کرده و در گام بعد یک تابع هدف نهایی با توجه به کل شبکه بهینه می‌شود. نویسندگان در مرجع [۲۵]، سیستم مدیریت انرژی متمرکز و غیرمتمرکز ریزشبه‌های چندگانه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در [۲۶] مدیریت انرژی هماهنگ دولایه، برای عملکرد ریزشبه‌های چندگانه به صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه ریزشبه‌ها را بررسی کرده است. همچنین یک سیستم مدیریت انرژی بهینه و هماهنگ برای ریزشبه‌های چندگانه به همراه مدل‌سازی عدم قطعیت در [۲۷] معرفی شده است. در مرجع [۲۸] ریزشبه‌های شبکه شده منابع و ظرفیت‌های خود را با هم به اشتراک می‌گذارند تا یک ریزشبه جدید و پچیده‌تر را تشکیل دهند. از طریق یکی از ریزشبه‌ها به شبکه خارجی متصل است. دارای اتصالات انعطاف‌پذیری می‌باشند که در صورت بروز خطا، مدل ممکن است اتصالات تغییر وضعیت دهند.

در مرجع [۲۹] به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه‌های قدرت، یک استراتژی جایابی متمایل به تاب‌آوری را برای ریزشبه‌های چند حامل با استفاده از خطوط انتقال قابل کلیدزنی ارائه می‌کند. شاخص بار تامین نشده (ELNS)^۷ برای ارزیابی تاب‌آوری استفاده می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که وقتی شینه اتصال به شبکه اصلی جدا می‌شود، ریزشبه از واحد ترکیبی حرارت و توان (CHP)^۸ خود برای تولید برق به جهت برآوردن تقاضای محلی استفاده می‌کند که باعث کاهش تقاضای کلی سیستم قدرت و افزایش تاب‌آوری سیستم می‌شود. در مرجع [۳۰] نیز به معرفی یک روش مدیریت انرژی براساس پخش بار پسر-پیشرو احتمالاتی و شبیه‌سازی مونت کارلو، در ریزشبه‌های چندگانه، پرداخته شده است. در مرجع [۳۱، ۳۲] به منظور تامین بارها شبکه توزیع به چندین ریزشبه تغییر ساختار داده و در اثر ایجاد مشکل برای خطوط بارهای هر دسته ریزشبه با تغییر مسیر تغذیه از طریق ریزشبه دیگر از خطر خاموشی جلوگیری می‌کند.



مرجع [۳۳] با حداقل کردن انرژی تامین نشده و حداقل کردن زمان بازیابی بارها در تلاش برای بالابردن تاب‌آوری شبکه و آسایش ساکنین و همچنین کاهش هزینه بار تامین نشده می‌باشد. در مرجع [۳۴] یک استراتژی تقویت تاب‌آوری شبکه‌های توزیع فعال مبتنی بر پتانسیل ریزش‌بکه‌های چندگانه در دو لایه اقدامات پیشگیرانه و اقدامات اصلاحی در چارچوب مدیریت انرژی متمرکز سلسله‌مراتبی ارائه شده است. لایه اقدامات پیشگیرانه مبتنی بر انعقاد قراردادهای دوجانبه ارائه خدمات خروج از خاموشی بین مالک ریزش‌بکه‌های چندگانه و بهره‌بردار شبکه توزیع فعال و همچنین انعقاد قراردادهای پاسخگویی بار بین مالک ریزش‌بکه‌های چندگانه و بارهای پاسخگو و سپس برنامه‌ریزی عملیاتی اقتصادی تاب‌آور شبکه توزیع فعال پس از حادثه به منظور خروج از خاموشی شبکه توزیع می‌باشد. در مرجع [۳۵] به این منظور به توسعه ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل در شبکه‌های توزیع برای تاب‌آور نگه داشتن شبکه‌های توزیع پرداخته شده است. در [۳۶]، یک استراتژی جدید برای بهینه‌سازی مزایده در یک ریزش‌بکه براساس روش تصادفی/مقاوم پیشنهاد شده است. بهینه‌سازی قطعی چنین فرض می‌کند که ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای بوده و یا یک بازار زمان واقعی را در نظر می‌گیرد. به منظور تجزیه و تحلیل بازار روز بعد، یک استراتژی مزایده پیشنهاد شده است.

در مرجع [۳۷، ۳۸] از روش جایابی بهینه منابع پراکنده و بازآرایی شبکه با هدف کاهش هزینه‌های شبکه و تلفات شبکه و همچنین کاهش بارهای تامین نشده استفاده شده است.

در مرجع [۳۹]، باتوجه به اینکه شارژ خودروهای برقی (EVs) در ایستگاه‌های شارژ منجر به افزایش تلفات توان سیستم توزیع و کاهش ولتاژ می‌گردد، با در نظر داشتن بهبود این دو پارامتر بصورت تابع دوهدفه، با استفاده از الگوریتم جستجوی ارگانیسم‌های همزیست (SOS)^{۱۰} به جایابی ایستگاه‌های شارژ و DGها می‌پردازد. در مرجع [۴۰] الگوریتم چندهدفه مبتنی بر هوش جمعی قطرات آب را به منظور بازآرایی شبکه، اندازه و جایابی بهینه DGها با هدف کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و تعادل بارها به کار می‌گیرد. در مرجع [۴۱] با هدف کاهش تلفات و کاهش بارهای حذف شده بعد از حادثه به جایابی DGها و همچنین ذخیره-سازها (ESS)^{۱۱} می‌پردازد. در مرجع [۴۲] با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی گربه (CSO)^{۱۲} و هوش جمعی گروه‌های موازی گربه (PCSO)^{۱۳} با اهداف حداقل کردن هزینه، تلفات توان، آلودگی و بهبود پروفیل ولتاژ به جایابی DGها می‌پردازد. در مرجع [۴۳] با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب با هدف کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ به جایابی و تعیین اندازه DGها می‌پردازد. ریزش‌بکه‌ها می‌توانند در برنامه‌های پاسخگویی بار (DRP)^{۱۴} شرکت کنند. ریزش‌بکه‌ها دو نوع بار دارند، به نام بارهای قابل انعطاف و غیرقابل انعطاف. بارهای قابل انعطاف می‌توانند به سیگنال‌های قیمت پاسخ دهند و در برنامه‌های پاسخگویی بار شرکت کنند [۴۴].

در این مقاله از روش سیگنال قیمت برای DR استفاده شده است.

مدیریت عدم قطعیت یکی از مسائل عمده تصمیم‌گیران است که باید به آن رسیدگی کرد. با روش‌های مختلفی از جمله تئوری تصمیم‌گیری فازی، تصادفی و اطلاعات شکاف (IGDT)^{۱۵} در [۴۵-۵۰] پیشنهاد شده است. در [۴۵] یک چارچوب استراتژی پیشنهادی با ریسک براساس تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی (IGDT) برای MGهای هوشمند، با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و هزینه، پیشنهاد می‌کند. به طور مشابه، [۴۷] عدم قطعیت‌های توان خروجی سلول‌های فتوولتائیک و بار تقاضا را به طور همزمان، با استفاده از IGDT برای حل یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بررسی می‌کند. در [۴۸]، پخش بار اقتصادی با مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به منابع باد و پاسخ بار با استفاده از IGDT انجام می‌شود. علاوه بر این، [۴۹] از IGDT برای توسعه راه‌حلی قوی برای کنترل ولتاژ/حفاظت/تصحیح ولتاژ سیستم قدرت استفاده می‌کند. با این حال، هیچ یک از این مطالعات به مساله عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر نمی‌پردازد. همچنین در مرجع [۵۰] به جایابی بهینه منابع تجدیدپذیر با هدف حداقل تلفات و بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید و مصرف براساس روش IGDT می‌پردازد.



در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری توجه زیادی را در حوزه‌های مختلف به خود جلب کرده‌اند. در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مرسوم، اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در اصل ساده و آسان است. همچنین، این الگوریتم‌ها نیازی به اطلاعات گرادین ندارند و از مزیت دورزدن بهینه‌سازی محلی برخوردار هستند و بنابراین به طور گسترده‌ای برای حل مسائل بهینه‌سازی در رشته‌های مختلف و کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند.

الگوریتم شاهین هریس بهبودیافته (MHHO)^{۱۶} از رفتار شکار شاهین هریس در طبیعت الهام گرفته شده است. هدف این الگوریتم با شبیه‌سازی تعاملات مشارکتی و رقابتی در یک گروه شاهین هریس در طول شکار، ایجاد تعادلی بین اکتشاف و بهره‌برداری در جستجوی راه‌حل‌های بهینه است که به طور بالقوه منجر به بهینه‌سازی کارآمد و مؤثر می‌شود. الگوریتم MHHO به دلیل توانایی خود در ایجاد تعادل مؤثر بین اکتشاف و بهره‌برداری، پتانسیلی برای همگرایی به سمت بهینه جهانی نشان می‌دهد و آن را برای کارهای بهینه‌سازی پیچیده و با ابعاد بالا مناسب می‌کند. این الگوریتم با الگوریتم‌های فراابتکاری مشابه خودش مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تکاملی و ... تفاوت‌هایی دارد. برخی مزایای الگوریتم شاهین هریس نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری مشابه عبارتند از:

سادگی: الگوریتم MHHO به دلیل سادگی و کارایی بالای خود، برای مسائل بهینه‌سازی مختلف و حتی بدون نیاز به تنظیم پارامترهای پیچیده، مناسب است.

سرعت همگرایی: الگوریتم MHHO به دلیل رفتار دقیق شکارچیان شاهین در جستجوی غذا، معمولاً به سرعت همگرایی بالا و یافتن جواب بهینه منجر می‌شود.

عدم وابستگی به تابع هدف: الگوریتم MHHO به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی مستقل از مدل، قادر است با توجه به رفتار شکارچیان شاهین، بدون نیاز به اطلاعات دقیق در مورد تابع هدف، جواب بهینه را پیدا کند.

توانایی در مسائل چند بعدی: الگوریتم MHHO به دلیل رفتار چندبعدی شکارچیان شاهین، برای مسائل با فضای جستجو چندبعدی مناسب است و معمولاً به جواب‌های خوب در این نوع مسائل منجر می‌شود.

این مزایا در مجموع الگوریتم MHHO را به‌عنوان ابزاری امیدوارکننده برای مقابله با مسائل چالش‌برانگیز بهینه‌سازی قرار می‌دهند که پتانسیل جستجوی کارآمد و کشف راه‌حل‌های باکیفیت بالا را در حوزه‌های مختلف ارائه می‌دهد. در حال حاضر، برای مسائل مختلف طراحی و بهینه‌سازی مهندسی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۵۱].

۱-۲- نوآوری‌های مقاله

در این مقاله، تاب‌آوری شبکه توزیع ۳۳ شینه به همراه ریزشکه‌های متصل به آن به هنگام قطع ارتباط از شبکه اصلی در نظر گرفته می‌شود که در این مدت انرژی از سوی منابع محلی و ریزشکه‌های آن تامین خواهد شد. بنابراین، توان از طریق خطوط کوتاه‌تر منتقل شده و تلفات سیستم کاهش می‌یابند. از سوی دیگر، برای افزایش استقلال، منابع محلی انرژی بیشتری تولید می‌کنند و به علت میزان پایین انتشار آلودگی از منابع محلی، آلودگی کلی کاهش می‌یابد.

نوآوری‌های مقاله به شرح موارد زیر هستند:

- باهدف افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع و کاهش تلفات محل اتصال ریزشکه‌ها به شبکه توزیع با روش بهینه‌سازی جایابی می‌شود، همچنین محل منابع موجود در شبکه و ذخیره‌ساز نیز به روش جایابی با اهداف فوق‌الذکر تعیین می‌گردند.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و منابع مبتنی بر IGDT در مسئله چندهدفه
- استفاده از الگوریتم فراابتکاری شاهین هریس بهبودیافته
- در نظر گرفتن توابع هدف مختلف شامل: هزینه، آلاینده‌گی و قابلیت اطمینان
- بررسی شاخص تاب‌آوری در سناریوهای مختلف

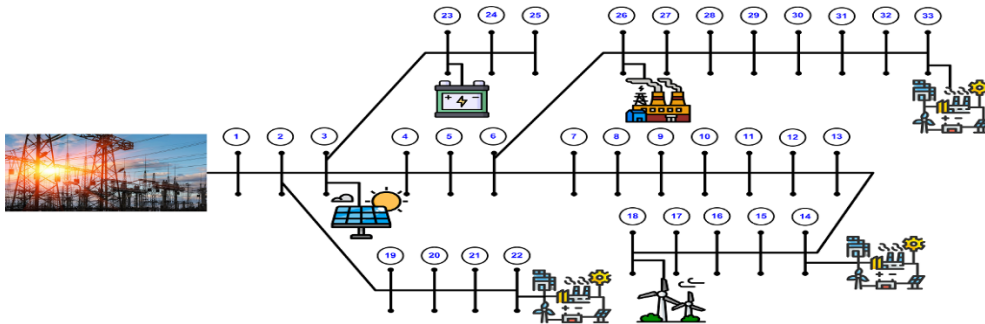


سازماندهی ادامه مباحث به این صورت می‌باشد که در بخش دوم مدل‌سازی ریزشبکه چندگانه به همراه توابع هدف و فرمول‌بندی عدم قطعیت پرداخته می‌شود و در بخش سوم مروری بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام شده است و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی‌ها استخراج و مقایسه می‌شوند و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- فرمول‌بندی مدیریت و برنامه‌ریزی ریزشبکه

۱-۲- ساختار سیستم

شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی نمای کلی سیستم ۳۳ شینه اصلاح شده به همراه ریزشبکه‌ها را طبق مرجع [۲۳] نشان می‌دهد. شبکه توزیع دارای ساختار شعاعی با انواع تولیدات پراکنده و ریزشبکه مدنظر است. به همین ترتیب، ساختار ریزشبکه‌ها به صورت شعاعی در نظر گرفته می‌شود. مالک ریزشبکه عملیات هر ESS ، DG و مشارکین پاسخ تقاضا را کنترل می‌کند. یک مدل زمان گسسته با افق ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. فواصل زمانی برابر ۱ ساعت در نظر گرفته می‌شوند و براین اساس افق برنامه‌ریزی دارای ۲۴ بخش است.



شکل (۱): شبکه توزیع ۳۳ شینه [۲۳]

۱-۱-۲ واحدهای قابل برنامه‌ریزی

واحدهایی چون دیزل ژنراتورها، پیل‌های سوختی و غیره واحدهای تولید قابل‌برنامه‌ریزی هستند که دارای توان خروجی کنترل‌پذیر می‌باشند. در این مقاله دیزل ژنراتورها واحدهای قابل‌برنامه‌ریزی فرض شده‌اند که می‌توانند انرژی الکتریکی را بر اساس مقدار مرجع تولید کنند. معادلات زیر نشان‌دهنده‌ی قیود تولید برای یک دیزل ژنراتور هستند:

$$0 \leq P_{gen}(t) \leq U_{gen}(t) P_{gen}^{max} \quad U_{gen}(t) \in \{0, 1\} \quad (1)$$

$$|P_{gen}(t) - P_{gen}(t-1)| \leq r_{gen} \times P_{gen}^{max} \quad (2)$$

$$P_{gen}^2(t) + Q_{gen}^2(t) \leq S_{r,gen}^2 \quad (3)$$

تابع هزینه‌ی دیزل ژنراتور از یک معادله‌ی درجه دوم به صورت معادله‌ی (۴) تبعیت می‌کند. همچنین یک هزینه‌ی راه‌اندازی به فرم معادلات (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است.

$$C_i(P_{gen}) = \alpha_1 P_{gen}^2(t) + \alpha_2 P_{gen}(t) + \alpha_3 \quad (4)$$

$$C_{startup} = y(t) \times C^{SU} \quad (5)$$

$$y(t) = \max[(U_{gen}(t) - U_{gen}(t-1)), 0] \quad (6)$$





میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای متکی به مقدار سوخت مورد استفاده در واحدهای سنتی تولید توان به صورت معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{gen}(t) = EmCoef_{gen} \cdot \frac{C_t(P_{gen})}{\lambda_{f,gen}} \quad (7)$$

در معادله‌ی فوق، $E_{gen}(t)$ میزان تولید CO_2 بوده، $C_t(P_{gen})$ هزینه‌ی تولید است که در معادله‌ی (۴) نشان داده شده است و $\lambda_{f,gen}$ قیمت سوخت مولد gen بوده و $EmCoef_{gen}$ ضریب انتشار مولد است. این رابطه نشان می‌دهد که چه میزان سوخت در تولید برق استفاده شده است و با ضرب آن در $EmCoef_{gen}$ میزان CO_2 تولیدی حاصل می‌شود. ضریب انتشار به مقدار حرارتی خالص ($NthV$) سوخت، ضریب انتشار (EmF)، و ضریب اکسیداسیون (OxF) مولد با استفاده از معادله‌ی زیر وابسته است:

$$EmCoef_{gen} = NthV_{gen} \cdot EmF_{gen} \cdot OxF_{gen} \quad (8)$$

ضرایب فوق بسته به نوع سوخت و ویژگی‌های ژنراتور می‌باشند که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. میزان CO_2 باید محدود به شرط زیر باشد:

$$\sum_t E_{gen}(t) \leq Emission_{Max} \quad (9)$$

۲-۱-۲- واحدهای غیرقابل برنامه‌ریزی

سیستم‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی جزء واحدهای غیرقابل برنامه‌ریزی هستند؛ چون توان خروجی آن‌ها تصادفی است. توان تولیدی آن‌ها به شرایط محیطی مثل تابش خورشید و سرعت باد وابسته است که دارای ماهیت تصادفی هستند. در ادامه، مدل‌سازی احتمالاتی برای هر دوی توربین‌های بادی و واحدهای فتوولتائیک ارائه شده است که روابط مربوط به توربین بادی و سیستم فتوولتائیک را می‌توان از مرجع [۵۲] مشاهده نمود.

۳-۱-۲- سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS)

در این بخش، مدل‌سازی ESS بحث می‌شود.

معادلات (۱۱) تا (۱۹) قیود فنی یک ESS را نشان می‌دهند و معادلات (۱۱) و (۱۲) حداکثر مقدار دشارژ/شارژ توان یک ESS را نشان می‌دهند. معادله‌ی (۱۳) قید اجتناب از شارژ و دشارژ همزمان است. معادله‌ی (۱۴) که نشان دهنده‌ی سطح انرژی ذخیره شده در باتری در زمان t می‌باشد که به سطح انرژی فاصله‌ی زمانی قبل و توان شارژ یا دشارژ در فاصله‌ی زمانی کنونی مربوط می‌شود. معادله‌ی (۱۵) نشان دهنده‌ی حدود SOC است: ۱ و ۰ به ترتیب بیانگر شارژ کامل و شارژ صفر باتری هستند. همچنین، معادلات (۱۶) و (۱۷) نشان دهنده‌ی سطح SOC در شروع و پایان روز هستند. معادله (۱۸) نشان دهنده میزان توان باقی مانده در باتری پس از دشارژ می‌باشد و معادله (۱۹) سطح انرژی ESS که باید در محدوده خاص باشد را نشان می‌دهد [۵۳].

$$0 \leq P_{i,t}^{SD} \leq P_{i,max}^{SD} \times u_{i,t}^{SD} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{SC} \leq P_{i,max}^{SC} \times u_{i,t}^{SC} \quad (12)$$

$$u_{i,t}^{SD} + u_{i,t}^{SC} \leq 1 \quad (13)$$

$$E_{i,t}^S = E_{i,t-1}^S - \frac{1}{\eta_i^{SD}} P_{i,t}^{SD} \Delta T + \eta_i^{SC} P_{i,t}^{SC} \Delta T \quad (14)$$



$$0 \leq SOC(t) \leq 1 \quad (15)$$

$$SOC(t_0) = SOC_{initial} \quad (16)$$

$$SOC(T) = SOC_{final} \quad (17)$$

$$P_{bat,t} = P_{i,t}^{SC} - P_{i,t}^{SD} \quad (18)$$

$$E_{i,min}^S \leq E_{i,t}^S \leq E_{i,max}^S \quad (19)$$

در معادلات فوق، $P_{bat_{cap}}$ ظرفیت پردازش توان مبدل برای شارژ و دشارژ ESS است. $P_{bat_{ch}}(t)$ و $P_{bat_{disch}}(t)$ متغیرهای شارژ و دشارژ ESS در زمان t هستند. همچنین $U_{bat_{ch}}(t)$ و $U_{bat_{disch}}(t)$ متغیرهای باینری موده‌های شارژ یا دشارژ ESS را نشان می‌دهند و $SOC(t)$ نشان دهنده‌ی SOC برای باتری در زمان t است که میزان انرژی ذخیره شده در آن را نشان می‌دهد.

۲-۱-۴- بارها

دو نوع بار در هر ریزش‌بکه در نظر گرفته می‌شود: بارهای قابل تعویق و قابل حذف، بارهای ثابت. می‌توان یک‌بار قابل تعویق را در زمان جابه‌جا کرد؛ اما لازم است میزان مشخصی از انرژی را در افق برنامه‌ریزی مصرف کند. همچنین، بارهای قابل حذف را می‌توان با پرداخت جریمه حذف کرد. این نوع بارها می‌توانند در برنامه‌های پاسخ تقاضا مشارکت کنند. از سوی دیگر، بارهای ثابت از نوع بارهای بحرانی هستند که مجاز نیستند حذف شده و یا جابه‌جا شوند [۵۱].

۲-۱-۵- مدل‌سازی ریزش‌بکه و شبکه‌ی توزیع

ریزش‌بکه‌ها و شبکه‌های توزیع بالادستی را می‌توان به‌صورت شعاعی مدل کرد. شینه‌ی ۱ شبکه توزیع به شبکه‌ی بالادستی متصل بوده و دارای تزریق توان منعطف است. دیاگرام کلی پخش بار شین j در شکل (۲) نشان شده است.

در ادامه معادلات پخش بار به‌صورت معادلات (۲۰) الی (۲۵) فرمول‌بندی شده‌اند [۵۴]:

توان خالص مختلط در هر شینه از معادلات زیر تبعیت می‌کند:

$$P_{G,t,j} = \sum_{g \in G_j} P_{CDG,t,g} + \sum_{w \in WT_j} P_{WT,t,w} + \sum_{p \in PV_j} P_{PV,t,p} + \sum_{b \in bat_j} P_{bat,t,b} + P_{PS,t,j} \quad (20)$$

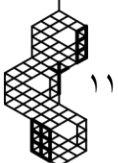
$$Q_{G,t,j} = \sum_{g \in G_j} Q_{CDG,t,g} + Q_{PS,t,j} \quad (21)$$

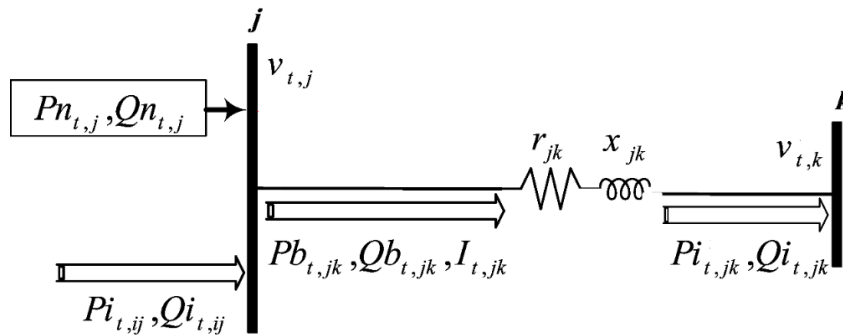
$$P_{bat,t,j} = (P_{dch,t,j} - P_{ch,t,j}) \quad (22)$$

$$P_{Load,n,t,j} = P_{Load,t,j} - P_{LS,t,j} \quad (23)$$

$$Pn_{t,j} = P_{G,t,j} - P_{Load,n,t,j} \quad (24)$$

$$Qn_{t,j} = Q_{G,t,j} - Q_{Load,t,j} \quad (25)$$





شکل (۲): مدل‌سازی سیستم در یک شبکه توزیع شعاعی [۵۴]

$P_{G,t,j}$ در معادله (۲۰) عبارت است توان تولیدی اکتیو تزریق شده به شینه j در زمان t می‌باشد که متشکل از توان منابع متصل شده به این شین شامل: دیزل ژنراتورها ($P_{CDG,t,g}$)، توان پیش‌بینی شده توربین‌های بادی ($P_{WT,t,w}$)، توان پیش‌بینی شده سلول‌های خورشیدی ($P_{PV,t,p}$)، باتری‌ها ($P_{bat,t,b}$) و توان تزریق شده از شبکه بالادست در صورتی که به شین j متصل باشد.

$Q_{G,t,j}$ در معادله (۲۱) عبارت است توان تولیدی راکتیو تزریق شده به شینه j در زمان t می‌باشد که متشکل از توان منابع متصل شده به این شین شامل: دیزل ژنراتورها ($Q_{CDG,t,g}$) و توان تزریق شده از شبکه بالادست در صورتی که به شین j متصل باشد. قابل ذکر می‌باشد که توربین بادی و سلول خورشیدی و باتری‌ها فقط تولید کننده توان اکتیو می‌باشند.

$P_{bat,t,j}$ در معادله (۲۲) توان تزریق شده از طریق باتری متصل به شین j می‌باشد که از تفاضل توان دشارژ و شارژ باتری به دست می‌آید.

$P_{Load,n,t,j}$ و $Q_{Load,n,t,j}$ در معادله‌های (۲۴) و (۲۵) میزان بار اکتیو و راکتیو خالص متصل شده به شین j در زمان t با کسر میزان بار اکتیو و راکتیو قطع شده ($P_{LS,t,j}$ و $Q_{LS,t,j}$) می‌باشد و $P_{Load,t,j}$ و $Q_{Load,t,j}$ میزان توان اکتیو و راکتیو مصرفی پیش‌بینی شده متصل به شین j در زمان t می‌باشند.

$Pn_{t,j}$ و $Qn_{t,j}$ در شکل (۲) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خالص در باس j هستند که در معادلات (۲۴) و (۲۵) تعریف شده‌اند.

$$P_{i,t,ij} + Pn_{t,j} = \sum_{k \in Dn_j} Pb_{t,jk} \quad (26)$$

$$Q_{i,t,ij} + Qn_{t,j} = \sum_{k \in Dn_j} Qb_{t,jk} \quad (27)$$

$Pb_{t,jk}$ و $Qb_{t,jk}$ در معادلات (۲۶) و (۲۷) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شاخه jk از شینه j می‌باشند. Dn_j مجموعه زیرشین‌های متصل به شین j می‌باشد.

در شکل (۲)، جریان عبوری از شاخه jk و $V_{t,j}$ مجذور اندازه ولتاژ شین j در زمان t می‌باشد. r_{jk} و x_{jk} به ترتیب مقاومت اهمی و القایی شاخه jk می‌باشند.

$P_{i,t,ij}$ و $Q_{i,t,ij}$ توان اکتیو و راکتیو خالص تزریق شده به شین j از طرف شاخه‌های بالادست متصل به شین آن می‌باشند، به‌عنوان مثال شاخه ij ، در زمان t ، که به ترتیب در معادله‌های (۲۸) و (۲۹) تعریف شده‌اند.

$$P_{i,t,ij} = Pb_{t,ij} - r_{2ij} * I_{t,ij}^2 \quad (28)$$

$$Q_{i,t,ij} = Qb_{t,ij} - x_{ij} * I_{t,ij}^2 \quad (29)$$

$$P_{PS,t}^2 + Q_{PS,t}^2 \leq S_{Max_PS}^2 \quad (30)$$

معادله (30) محدودیت توان تزریق شده از شبکه بالادست به شین j را بیان می‌کند. قابل ذکر می‌باشد که اگر شین j به شبکه بالادست متصل نباشد $S_{Max_PS}^2$ (ج $\neq sl$) صفر می‌باشد.

معادلات (31) الی (35) قیود پخش بار AC مبتنی بر مدل DistFlow را بیان می‌کنند.

روش پخش بار DistFlow یک تکنیک خاص برای تحلیل سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی است که به طور خاص برای شبکه‌های توزیع طراحی شده است. این روش به طور مؤثر و کارآمد می‌تواند توزیع توان، ولتاژ و جریان را در شبکه‌های توزیع با ویژگی‌های خاصی مانند تولید پراکنده، بارهای غیرخطی و توزیع غیریکنواخت بررسی کند که می‌تواند اثرات غیرخطی و دینامیکی بارها و منابع تولید را به خوبی مدل‌سازی کند و به دلیل قابلیت‌هایش در تحلیل شبکه‌های غیرخطی، به‌ویژه در شرایطی که بارها و تولیدات متغیر هستند، بسیار مفید است، همچنین به دلیل ساختار ریاضی خود، معمولاً نیاز به محاسبات کمتری نسبت به روش‌های سنتی دارد و می‌تواند به سرعت نتایج را ارائه دهد و به راحتی می‌تواند با فناوری‌های جدید و شبکه‌های هوشمند سازگار شود و اطلاعات دقیق‌تری از وضعیت شبکه ارائه دهد.

معادلات DistFlow شامل معادلاتی برای ولتاژ، جریان و توان است که به صورت زیر بیان می‌شوند:

۱. معادله ولتاژ: تغییرات ولتاژ در طول خطوط توزیع به صورت تابعی از جریان و بارها مدل‌سازی می‌شود.

۲. معادله جریان: جریان‌ها به عنوان تابعی از ولتاژ و بارهای متصل به نقاط مختلف شبکه تعریف می‌شوند.

۳. معادله توان: توان فعال و راکتیو در نقاط مختلف شبکه نیز با توجه به بارها و منابع تولید پراکنده محاسبه می‌شود.

در نتیجه روش پخش بار DistFlow به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای تحلیل و مدیریت سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی شناخته می‌شود. با توجه به ویژگی‌های خاص آن، این روش می‌تواند به مدیران شبکه کمک کند تا عملکرد بهینه‌تری را در شرایط مختلف بار و تولید ارائه دهند.

قید (31) قانون اهم را بر روی شاخه jk در زمان t بیان می‌کند. رابطه (32) ارتباط بین $I_{t,jk}$ و $V_{t,j}$ و $Pb_{t,jk}$ و $Qb_{t,jk}$ می‌باشد. رابطه‌های (33) و (34) محدودیت‌های روی جریان شاخه و ولتاژ گره را به ترتیب بیان می‌کند در حالی که معادله (32) دامنه ولتاژ شین مرجع را نشان می‌دهد.

$I_{Max,jk}$ ماکزیمم دامنه جریان شاخه jk می‌باشد، V_{min} و V_{max} ماکزیمم و مینیمم دامنه ولتاژ شینه‌ها می‌باشند.

$$V_{t,k}^2 = V_{t,j}^2 - 2(r_{jk} \times Pb_{t,jk} + x_{jk} \times Qb_{t,jk}) + (r_{jk}^2 + x_{jk}^2) \times I_{t,jk}^2 \quad (31)$$

$$I_{t,jk}^2 = \frac{P_{t,jk}^2 + Q_{t,jk}^2}{V_{t,j}^2} \quad (32)$$

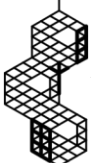
$$0 \leq I_{t,jk} \leq I_{Max,jk} \quad (33)$$

$$V_{min} \leq V_{t,j} \leq V_{max} \quad (34)$$

$$V_{t,sl} = V_{sl} \quad (35)$$

۲-۱-۶- قید شبکه شعاعی

به علت مزایای بهره‌برداری شعاعی شبکه توزیع از قبیل محدودیت جریان‌های اتصال کوتاه و محافظت آسان، نگه‌داشتن ساختار شعاعی سیستم توزیع بعد از بازآرایی بهینه و جایابی واحدهای تولیدی پراکنده حیاتی می‌باشد. بر اساس تئوری گراف، در شبکه





توزیع، اگر تعداد کلیدهای بسته معادل تعداد گره‌ها (شینه‌ها) منهای یک باشد، ساختار شبکه شعاعی خواهد بود. شرط شعاعی مطابق مرجع [۵۲] رعایت گردد

۲-۲-۲- مدیریت انرژی شبکه با استفاده از جایابی بهینه منابع و ریزشکته‌ها

در این بخش، مدل مدیریت انرژی شبکه (MES) برای شبکه توزیع (DN) مبتنی بر چند ریزشکته با در نظر گرفتن تلفات توان و برنامه‌های پاسخ تقاضا توسعه می‌یابد. در عملکرد ریزشکته‌ها، به دلیل ماهیت تصادفی واحدهای تولیدی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر و تغییرات قیمت برق، مفهوم کمبود توان یا توان مازاد، ارائه می‌شود. بهره‌بردار ریزشکته قصد دارد تا توان مازاد خود را به شبکه‌ی بالادستی فروخته و کمبود توان خود را از آن یا ریزشکته دیگر خریداری کند.

۲-۲-۲-۱- تابع هدف بهینه‌سازی هزینه ریزشکته

در این بخش هدف بهره‌بردار کمینه‌سازی کل هزینه‌ی بهره‌برداری هر ریزشکته در هر سناریو است. معادله‌ی (۳۶) تابع هدف را نشان می‌دهد که متشکل از هزینه‌ی تولید منابع پراکنده، قیمت تبادل توان با شبکه توزیع، هزینه‌ی جابه‌جایی بار قابل تعویق و حذف بار می‌باشد.

$$\text{Min: } \sum_t \left\{ \sum_{g=1}^{NDGx} [C_t(P_{gen}^g) + C_{startup,t}^g] + [pr_t^{buy,DN} P_t^{shortage} - pr_t^{sell,DN} P_t^{surplus}] + [C_{defload,t} + C_{shedload,t}] + [pr_t^{buy,DN} P_t^{loss}] \right\} \quad (36)$$

۲-۲-۲-۲- تابع هدف شبکه توزیع

۲-۲-۲-۱- تابع هدف: بهینه‌سازی هزینه شبکه توزیع

در این بخش هدف بهره‌بردار شبکه توزیع کمینه‌سازی کل هزینه‌ی بهره‌برداری در هر سناریو است. معادله‌ی (۳۷) تابع هدف F را نشان می‌دهد که متشکل از هزینه‌ی تولید منابع پراکنده، باطری، قیمت تبادل توان با شبکه بالادست، قیمت تبادل توان با ریزشکته‌ها، هزینه‌ی جابجایی بار قابل تعویق و حذف بار و قیمت تلفات توان است. X در اینجا شماره ریزشکته می‌باشد.

$$\text{Min: } \sum_t \left\{ \sum_{g=1}^{NDG_{DN}} [C_t(P_{gen_{DN}}^g) + C_{startup_{DN,t}}^g] + [pr_t^{buy,utility} P_t^{buy_{DN}} - pr_t^{sell,utility} P_t^{sell_{DN}}] + [C_{defload,DN,t} + C_{shedload,DN,t}] + \left[\sum_{\chi \in MGs} pr_t^{buy,DN} P_{t,\chi}^{surplus_{MG}} + \sum_{\chi} pr_t^{sell,DN} P_{t,\chi}^{shortage_{MG}} \right] + pr_t^{buy,utility} P_t^{loss} \right\} \quad (37)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{surplus_{MG}} \leq P_t^{surplus_{MG,\chi},max} \quad (38)$$



۳-۲- قابلیت اطمینان شبکه توزیع

مطابق فرمول (۳۹) شاخص قابلیت اطمینان، فاکتورهای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم توزیع می‌باشند که برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط IEEE بطور ویژه برای ارزیابی سیستم توزیع ارائه گردیده است. براساس شاخص‌های پایه‌ای نقطه بار و مصرف انرژی در نقاط بار و مصرف انرژی در نقاط بار انرژی تامین نشده ENS (kWh) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ENS(kWh) = \sum_{i=1}^{Nd} (\lambda a(i) \times U_i) \quad (39)$$

در رابطه فوق، N_d بیانگر تعداد کل نقاط بار، U_i عدم دسترس‌پذیری نقطه بار i و $\lambda a(i)$ متوسط بار متصل شده در نقطه بار است.

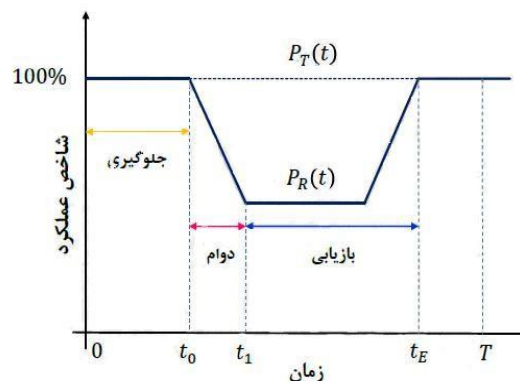
۴-۲- تاب‌آوری

خاموشی‌های گسترده با احتمال بسیار پایینی امکان رخ دادن دارند اما هزینه‌های اقتصادی اجتماعی سنگینی در بردارد تاب‌آوری عبارت است از: تحمل در برابر خطا، پاسخگویی سریع، ترمیم و پایایی. شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک شبکه توزیع، نیازمندی شبکه توزیع به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به تبع آن می‌توان یک شبکه توزیع تاب‌آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود شبکه توزیع بخشی از توان مورد نیازش را تأمین نماید. با توجه به اینکه تاب‌آوری به معنای فراتر از قابلیت اطمینان است، اگر بتوان قابلیت اطمینان را بالاتر از حد نرمال برد، به این معنا است که به سیستمی تاب‌آورتر دست خواهند یافت. در مفهوم تاب‌آوری، وابستگی شدید به عواقب یک حادثه، تطبیق‌پذیری سیستم و سرعت بازبازی آن به زمان، فاکتورهای مهمی هستند که باید در بررسی به آن‌ها توجه شود.

در شکل ۳ روند تاب‌آوری در یک سیستم قدرت مشخص شده است. مشاهده می‌شود که دو تابع $P_T(t)$ و $P_R(t)$ مشخص شده‌اند که به ترتیب تابع مقدار شاخص عملکرد در حالت عادی و در حالت خطا می‌باشد. در رابطه (۴۰)، $R(t)$ شاخص اندازه‌گیری تاب‌آوری می‌باشد [۵۴].

$$R(T) = \frac{\int_0^T P_R(t) dt}{\int_0^T P_T(t) dt} \quad (40)$$

شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک شبکه توزیع، نیازمندی شبکه توزیع به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به تبع آن می‌توان یک شبکه توزیع تاب‌آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود شبکه توزیع بخشی از توان مورد نیازش را تأمین نماید؛ این بدین معنا است که $P_T(t)$ به $P_R(t)$ نزدیک می‌شود، پس $R(t)$ افزایش می‌یابد.



شکل (۳): نمودار مربوط به شاخص تاب‌آوری [۵۴]





۲-۵- فرمول‌بندی روش IGDT

IGDT به عنوان یک روش رسیدگی به عدم قطعیت، به دنبال یافتن یک پاسخ بهینه است که انتظار خاصی از هدف سیستم را تضمین کرده و در همان حال انحرافات مقادیر پیش‌بینی‌شده مربوط به متغیرهای عدم قطعی کمینه می‌شوند. همچنین، در صورت محدود بودن اطلاعات موجود، IGDT تصمیمات لازم مدیریت ریسک را فراهم می‌کند. برای مدل کردن منابع مختلف عدم قطعیت ریزشکده شکاف میان مقادیر تحقق‌یافته (ϑ) و پیش‌بینی‌شده ($\bar{\vartheta}$) متغیرهای عدم قطعی ریزشکده را می‌توان به راحتی به صورت زیر توضیح داد [۴۵]:

$$H_{mg}(\zeta, \bar{\vartheta}) = \left\{ \vartheta \mid -\zeta \cdot \bar{\vartheta} \leq \vartheta - \bar{\vartheta} \leq \zeta \cdot \bar{\vartheta} \right\}; \zeta \geq 0 \quad (41)$$

رفتار تصادفی متغیرهای غیرقطعی ریزشکده با استفاده از $H_{mg}(\cdot)$ نشان داده می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با بهینه‌سازی مقدار ζ به عنوان متغیر کنترل ریسک مدل (افق عدم قطعیت) مدیریت کرد. مقدار ζ مشروط به تضمین یک مقدار امید از تابع هدف سیستم به صورت (۴۲)، بهینه می‌شود.

$$OF_{mg}^{IGDT}(X, \delta) \leq |1 \pm \delta| \cdot OF_{mg}^{DET}(X); \delta \geq 0 \quad (42)$$

که پارامتر δ بودجه عدم قطعیت (UB) است که سطح تابع هدف امید را مشخص می‌کند. OF_{mg}^{DET} و OF_{mg}^{IGDT} نیز مقادیر قطعی و مبتنی بر IGDT تابع هدف سیستم هستند. مجموعه متغیرهای تصمیمی که باید مشروط به قیود عملیاتی بهینه شوند با X نشان داده می‌شوند. شایان ذکر است که براساس جهت هدف (یعنی کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی)، بهم وابستگی میان متغیر غیرقطعی و تابع هدف و رویه ریسک‌گریز (RA) یا فرصت‌طلبانه (OS) ^۹، علائم \pm تغییر خواهد کرد.

در این مقاله با ضرب بودجه عدم قطعیت مثبت ($\delta+1$) در تابع هدف قطعی OF_{mg}^{DET} و با مهندسی معکوس مقدار جدیدی از بارها و منابع تجدیدپذیر در حالت نامشخص بدست می‌آید. همچنین در این مقاله از روش IGDT از رویه RA استفاده می‌شود به گونه‌ای که عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی تاثیر مطلوبی بر تابع هدف ندارد و موجب افزایش هزینه نهایی می‌شود. به این معنی که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به نحوی تعیین می‌شوند که حداکثر شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامترهای غیرقطعی به ازای یک مقدار مشخصی از تابع هدف، به دست‌آید.

۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس

بهینه‌سازی شاهین هریس یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی می‌باشد و رها از گرادیان است؛ لذا، آن را می‌توان به هر مسأله بهینه‌سازی اعمال کرد مشروط بر آنکه یک فرمول مناسبی برای آن ارائه شده باشد. الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO) ^{۲۰} یک روش بهینه‌سازی نوین است که از رفتار شاهین هریس در طبیعت به منظور جستجوی غذا الهام گرفته است که شامل دو مرحله است: جستجوی شکار و حمله به شکار [۵۵]. در مقایسه با برخی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری، اثربخش‌تر بودن HHO در قبال برخی توابع معیارسنجی اثبات شده است. در حال حاضر، از آن در قبال مسائل مختلف طراحی و بهینه‌سازی مهندسی استفاده می‌شود. در این الگوریتم، چندین شاهین به صورت هم زمان به یک طعمه که معمولاً خرگوش است، حمله می‌کنند تا آن را خسته و سردرگم کنند. این مرحله از الگوریتم را فاز اکتشاف می‌نامند. بر اساس رفتار طعمه، شاهین‌ها نوع حمله به سمت طعمه را تغییر می‌دهند تا در نهایت بر آن غلبه کنند. این مرحله نیز فاز استخراج پاسخ نام دارد. مطابق با انرژی طعمه که در رابطه (۴۳) تعریف شده است. این الگوریتم بین فازهای اکتشاف و استخراج، تغییر فاز می‌دهد.

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (43)$$



در این رابطه، این E انرژی طعمه در هر تکرار است، $Iter_{max}$ شرط توقف الگوریتم است، $E0$ انرژی اولیه طعمه است که در بازه $[1, -1]$ تغییر می‌کند و $iter$ نیز شمارنده تکرار الگوریتم است. اگر $|E| \geq 1$ باشد، یعنی شاهین‌ها می‌باید نقاط دیگری را برای یافتن طعمه جستجو کنند، (مرحله اکتشاف). به عبارت دیگر، مطابق با رابطه (۴۴)، موقعیت شاهین به روزرسانی می‌شود، و اگر $|E| < 1$ باشد، یعنی الگوریتم وارد مرحله استخراج می‌شود. در رابطه (۴۴)، اگر q احتمال قرارگیری هر شاهین در موقعیت t نسبت به طعمه باشد، موقعیت بعدی هر شاهین به موقعیت سایر اعضای گروه و موقعیت طعمه بستگی خواهد داشت. به دلیل طولانی بودن مرحله استخراج و روابط به روزرسانی در این فاز، از توضیح آن صرف نظر شد و خوانندگان علاقه‌مند را به مرجع [۵۶] ارجاع داده می‌شوند.

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (44)$$

که $X(t+1)$ بردار موقعیت شاهین‌ها در تکرار بعدی است، $X_{rabbit}(t)$ موقعیت طعمه است، $X(t)$ بردار موقعیت کنونی شاهین‌ها بوده، r_1, r_2, r_3, r_4 و q اعداد تصادفی در محدوده $(0, 1)$ هستند، که در هر تکرار بروزرسان می‌شوند. همچنین، LB و UB کران‌های بالا و پایین متغیرها هستند، $X_{rand}(t)$ یک شاهین انتخاب شده به صورت تصادفی از میان جمعیت فعلی بوده، و X_m نیز میانگین موقعیت شاهین‌ها در جمعیت کنونی است. شبه کد الگوریتم شاهین هریس در الگوریتم ۱ ارائه شده است. در گام نخست، یک مجموعه از پاسخ‌های اولیه (جمعیت اولیه شاهین‌ها) تولید می‌شود. در گام دوم، برای هر شاهین، مقادیر $E0$ و E به روزرسانی و سپس بسته به مقدار E ، مراحل اکتشاف یا استخراج اجرا می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط توقف یا حداکثر تعداد تکرار ادامه یابد. باتوجه به اینکه در مدل HHO به کار رفته در این مقاله، شرط حداکثر تعداد الگوریتم در نظر گرفته شده است، الگوریتم با رسیدن به $Iter_{max}$ متوقف خواهد شد و بهترین موقعیت در تکرار آخر، به‌عنوان پاسخ مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس

```

Inputs: The population size N and maximum number of iterations T
Outputs: The location of the rabbit and its fitness value
Initialize the random population  $X_i(i = 1, 2, \dots, N)$ 
while (stopping condition is not met) do
Calculate the fitness values of Hawks
Set  $X_{rabbit}$  as the location of the rabbit (best location)
for (each hawk ( $X_i$ )) do
Update the initial energy  $E0$  and jump strength  $J \triangleright$ 
 $E0=2rand()-1, J=2(1-rand())$ 
Update the  $E$  using Eq. (43)
if ( $|E| \geq 1$ ) then  $\triangleright$  Exploration phase [55]
```

۷-۲- بهبود الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس

الگوریتم شاهین الهام گرفته از رفتار شاهین‌های هریس در دنبال کردن طعمه و شکار آن است. فرمول‌بندی این گونه رفتارها اکتشاف و دنبال کردن از روابط احتمالی و پارامتر ثابت استفاده شده است. به‌روز شدن موقعیت باتوجه به رفتار احتمالی باعث عبور از مینیمم محلی می‌شود ولی احتمال همگرایی دیر نیز می‌باشد. همچنین داشتن پارامتر تنظیمی E نیز باعث می‌شود که برای هر مساله‌ای نتوان تنظیم درست و جواب دقیق رسید. به‌همین خاطر برای رفع مشکل این‌چنین الگوریتم می‌توان پارامتر تنظیمی را به گونه‌ای



تعریف که اولاً رفتار خطی نداشته باشد و ثانیاً با رفتار و مقدار تابع هدف، مقدار دینامیکی داشته باشد. به همین منظور در این مقاله سعی بر بهبود الگوریتم با توجه به تنظیم پارامتر E و نحوه‌ی بروزرسانی می‌باشد.

در طبیعت در ابتدا خرگوش شتاب زیادی دارد و سرعت بالایی می‌گیرد و به مرور زمان خسته می‌شود و سرعت و واکنش کمتر می‌شود. ما در الگوریتم بهبودیافته شاهین هریس (MHHO) این مورد را در نظر گرفتیم که به نتایج بهتر و مؤثرتری رسیدیم.

در این الگوریتم اصلاح شده بر عکس الگوریتم اصلی که مقدار $E0$ به صورت تصادفی تغییر می‌کرد ($E0=2*\text{rand}()-1$) در اینجا این مقدار مطابق رابطه (۴۵) به مقدار $E1$ هم وابسته شده است ($E0=(2*\text{rand}()-((E1))))$ که به به‌روزرسانی الگوریتم کمک شایانی می‌کند [۵۱].

$$E0=2*\text{rand}()-E1 \quad (45)$$

در تکرارهای اولیه الگوریتم شتاب بالایی دارد و خیلی سریع اوج می‌گیرد و از مهلکه فرار می‌کند که ما در اینجا ۲۵ درصد تکرارهای کل الگوریتم را جز تکرارهای اولیه منسوب کردیم ($t < 0.25 * T$) که البته می‌شود روی این ۲۵ درصد با توجه به مسئله‌های مختلف مانورهای مختلف داد. در تکرارهای اولیه انرژی فرار خرگوش خیلی بالا است و با رابطه توانی جدید (۴۶) از مهلکه فرار می‌کند و سپس بعد از این تکرارها انرژی مطابق با قانون الگوریتم اصلی پیروی می‌کند:

$$\text{Escaping_Energy} = t^{(1+(t/T))} \quad (46)$$

شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس بهبودیافته

```
Update the location of Harris' Hawks
for i=1:size(X,1)
E0=2*rand()-E1; -1<E0<1
if t<0.25*T
Escaping_Energy= t^(1+(t/T));
Else
Escaping_Energy=(E1)*(E0);
If |E| ≥ 1, repeat the following steps:
Update the position vector based on Eq. (44)
If |E| < 1, execute the exploitation phase [55]
End
```

۳- نتایج شبیه‌سازی

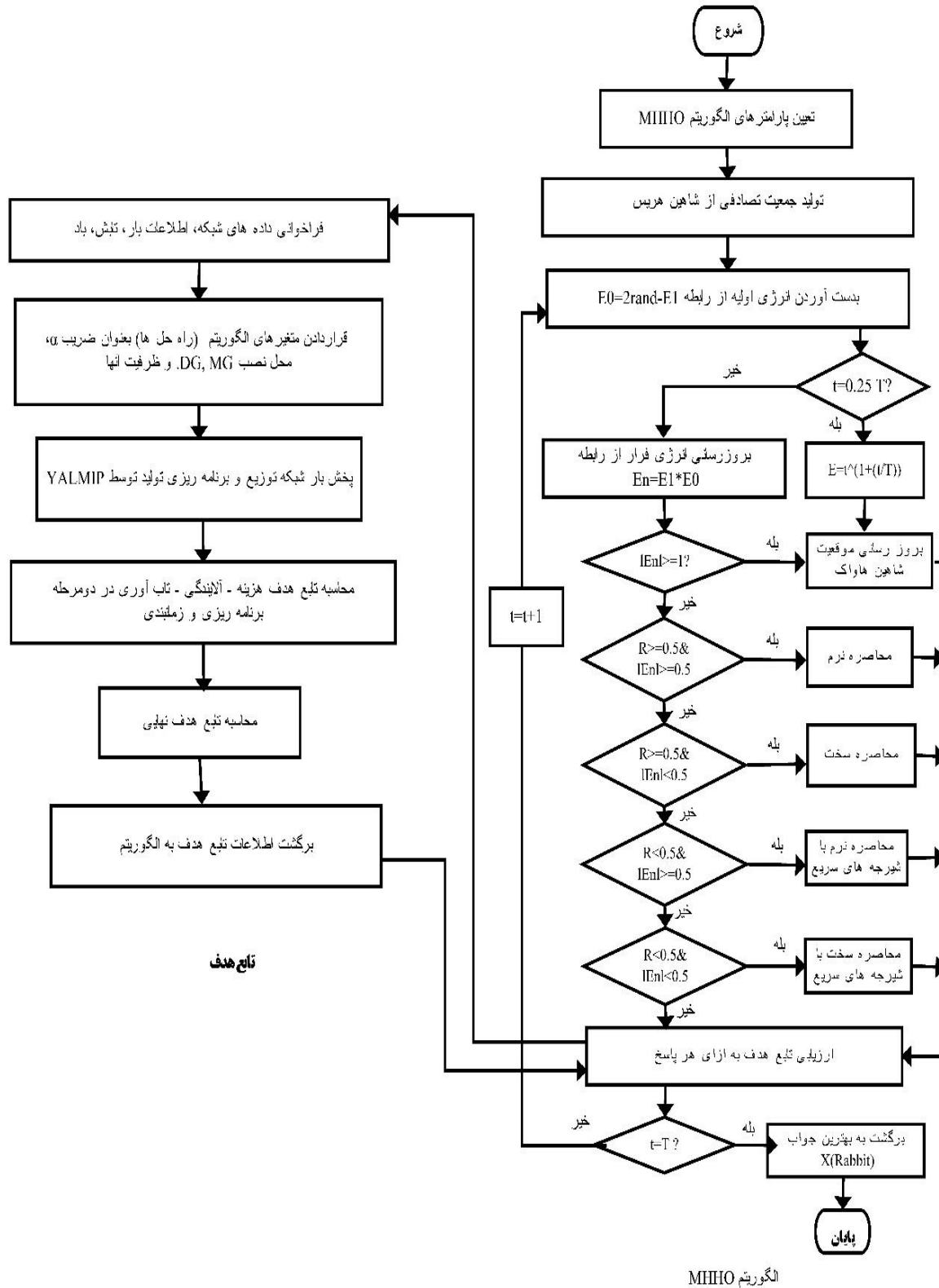
در این بخش، شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه آزمایشی به‌منظور بررسی تاب‌آوری و مدیریت بهینه شبکه توزیع در دو حالت بدون ریزش‌بکه‌ها و به همراه ریزش‌بکه‌ها انجام و مقایسه شده است. حل‌کننده CPLEX در محیط MATLAB برای اجرای این شبیه‌سازی به کار گرفته شده است.

دیگرام تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه در شکل (۱) نشان داده شده است. این شکل دارای ۱ فیدر اصلی و ۳ زیرشاخه است. در شبکه ۳۳ شینه، مجموع بار مصرفی این شبکه برابر ۳۷۲۰ کیلو وات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. شبکه ۳۳ شینه دارای ۳۲ شاخه است. اطلاعات سیستم در مرجع [۲۳] ارائه شده است و ساختار داخلی ریزش‌بکه‌ها در این مرجع قابل مشاهده است.

ضرایب مربوط به انتشار آلودگی در جدول (۱) ارائه شده اند [۲۳]. علاوه بر این ضرایب تابع هزینه و هزینه‌های راه‌اندازی و نرخ‌های رمپ بالای دیزل ژنراتور در هر ریزش‌بکه و شبکه توزیع در جدول (۲) ارائه شده‌اند [۲۳]. همانگونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، هیچگونه منبع قابل کنترل (دیزل ژنراتور) در ریزش‌بکه ۳ مشاهده نمی‌شود و تمامی تولید آن انرژی پاک می‌باشد. همچنین پارامترهای مربوط به ذخیره‌ساز انرژی (ESS) ریزش‌بکه‌ها و شبکه توزیع در جدول (۳) ارائه شده‌اند [۲۳].

در شکل ۴ فلوجارت برنامه قابل مشاهده می‌باشد.





شکل (۴): فلوجارت پیشنهادی برنامه

شکل ۵ نمودار مقادیر پیش بینی شده سه پارامتر متغیر منابع توربین بادی و سلول خورشیدی و توان اکتیو و راکتیو مصرف کننده‌ها را طی ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. شکل ۶ مقایسه پروفیل توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی و توان مصرفی بارها در حالت پیش‌بینی شده و حالت غیرقطعی مدل‌سازی شده به روش IGDT را نشان می‌دهد.





جدول (۱): ضرایب تابع هزینه، هزینه راه‌اندازی و نرخ رمپ بالای دیزل ژنراتورها در ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع [۲۳]

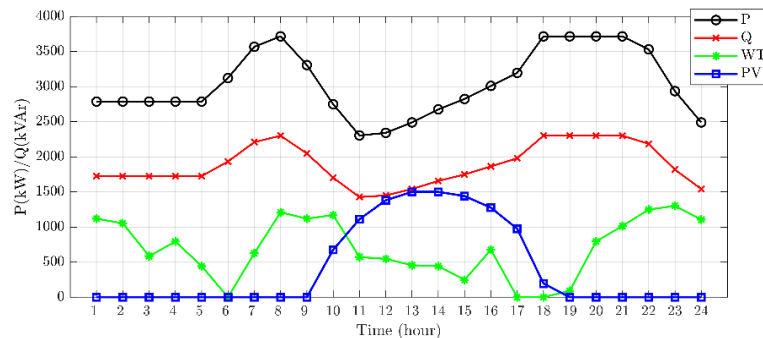
پارامتر	MG1	MG2	DN
α_1	۱۵	۲۰	۱۲
α_2	۸۰	۸۵	۷۵
α_3	۰	۰	۰
هزینه راه‌اندازی (\$)	۱۰	۱۳	۱۵
نرخ رمپ بالا	۰.۳	۰.۲	۰.۲

جدول (۲): ضرایب انتشار آلودگی [۲۳]

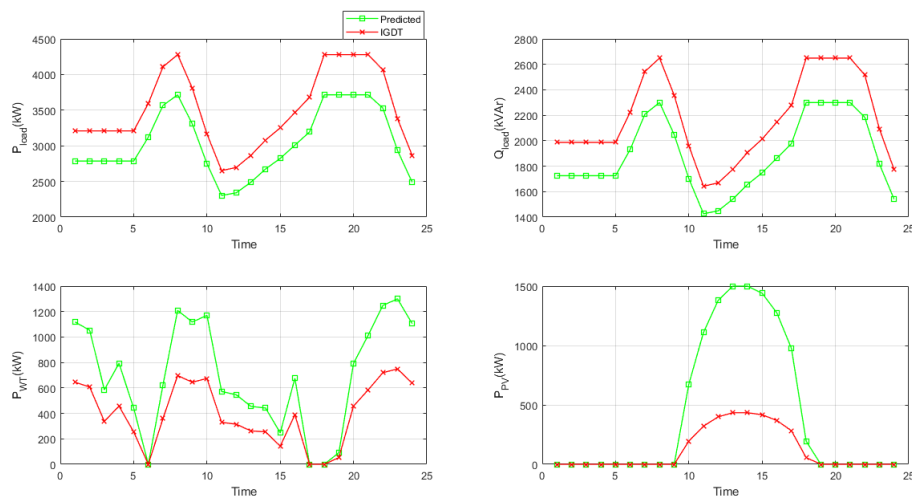
نوع سوخت	NthV (KJ/Kg)	EmF (tCO ₂ /TJ)	OxF(%)	EmCoef(tCO ₂ /m ³ or tCO ₂ /tFuel)
Oil	۴۸	۷۴	۹۹	۳.۵۱
Coal	۲۷	۹۵.۵	۹۹	۲.۵۸
Gas	۴۳	۵۳.۱	۹۹	۲.۲۵

جدول (۳): مقادیر مربوط به باتری‌ها در ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع [۲۳]

پارامتر	MG ₁	MG ₂	MG ₃	DN
ظرفیت (MWh)	۳	۶	۵	۵
انرژی اولیه (MWh)	۱.۵	۱.۲	۱	۱.۵
انرژی نهایی (MWh)	۱	۱	۱	۱



شکل (۵): پروفیل توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی و توان مصرفی بارها در حالت پیش‌بینی شده



شکل (۶): توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی و توان مصرفی بارها در حالت پیش‌بینی شده و حالت غیرقطعی مدل‌سازی شده به

روش IGDT



۳-۱- نتایج روش‌های قطعی و غیرقطعی مدل IGDT

ابتدا مقدار هزینه کل شبکه، میزان انتشار آلودگی، قابلیت اطمینان شبکه (ENS)، تلفات شبکه و تبادل با ریزش‌بکه‌ها در حالت قطعی در شبکه اولیه بدون حضور ریزش‌بکه‌ها، شبکه اولیه با حضور ریزش‌بکه‌ها، شبکه جایابی شده منابع و ریزش‌بکه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های GA و HHO و الگوریتم پیشنهادی بهبودیافته MHHO حل شده و مقدار هزینه کل و پایه از الگوریتم MHHO با توجه به نتایج بهتر در نظر گرفته می‌شود. از روش IGDT با راهبرد ریسک‌گریز استفاده شده است به گونه‌ای که عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی اثر نامطلوبی بر روی تابع هدف مساله دارد. بدین معنا که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداکثر شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامتر غیرقطعی به‌ازای یک مقدار مشخصی از افزایش تابع هدف، به دست آید که در این مقاله مقدار افزایشی تابع هزینه ۵ درصد لحاظ شده است که عواملی که می‌تواند باعث افزایش هزینه گردد کاهش تولید سلول خورشیدی، توربین بادی و افزایش بار می‌باشد که با توجه به روابط ذکر شده در مقاله مقدار توان بار اضافه شده ولی مقادیر توان سلول خورشیدی و توربین کاهش یافته تا باعث افزایش تابع هزینه شود، چون بدترین حالت که باعث افزایش تلفات و قابلیت اطمینان شبکه می‌شود کاهش تولید منابع و افزایش بار است.

نتایج شبیه‌سازی در مرحله اول به جهت تعیین بهترین ساختار شبکه با جایابی در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشند و در ادامه به مقایسه نتایج پرداخته شده است. در مرحله دوم به بررسی تاب‌آوری شبکه برتر به ازای قطع ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادست پرداخته شده است.

۳-۱-۱- هزینه

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول (۴)، مشاهده می‌شود که هزینه نهایی سناریوی E نسبت به سناریوی A، ۱۷ درصد، نسبت به سناریوی B، ۱۰ درصد، نسبت به سناریوی C، ۲.۵ درصد، نسبت به سناریوی D، ۲ درصد و ۵ درصد در مقایسه با سناریوی F کاهش هزینه دارد. در سناریوی F با وجود هم مدل بودن شبکه پس از جایابی با کمک الگوریتم MHHO، با توجه به ضریب بودجه‌ای که اپراتور طبق روش IGDT به هزینه نهایی می‌دهد، هزینه افزایش می‌یابد تا ریسک قطع بار کاهش یابد.

۳-۱-۲- انتشار آلودگی

در مقایسه درآمد خالص شبکه توزیع ناشی از تبادل نیرو با MG ها، از جدول (۴) مشاهده می‌شود که درآمد حاصل در سناریوی E نسبت به سناریوهای A، ۱۰۰٪، سناریو B، ۷۱٪، سناریو C، ۵٪، سناریو D، ۱۵٪ افزایش یافته است و با سناریوی F (وضعیت غیرقطعی) که MGها مکان یکسانی دارد میزان آلودگی منتشر شده تقریباً به میزان مشابه هستند.

۳-۱-۳- تبادل با ریزش‌بکه‌ها

با مقایسه درآمد خالص شبکه توزیع ناشی از تبادل نیرو با MGها، از جدول (۴) مشاهده می‌شود که درآمد حاصل در سناریوی E نسبت به سناریوهای A، ۱۰۰٪ و سناریو B، ۷۱٪ و سناریو C، ۵٪ و سناریو D، ۱۵٪ و نسبت به سناریوی غیرقطعی F، ۴۲٪ افزایش دارد.

۳-۱-۴- تلفات

در مقایسه تلفات ناشی از مسیر انتقال نیرو به بارها چه از طریق منابع محلی و چه از طریق توان دریافتی از MGها، با توجه به جدول ۴ که سناریوی E به دلیل ایجاد شبکه مناسب در مقایسه با سناریوهای A، ۵٪، B حدود ۲۳٪، C، ۴٪، D، ۱۳٪ و حالت غیرقطعی F، ۵٪ کاهش تلفات مشاهده می‌شود. سناریوی F با وجود ساختار مشابه سناریوی A، به دلیل اینکه منابع تجدیدپذیر باد و خورشید در حالت غیرقطعی توان بیشتری تزریق کرده‌اند، طبیعتاً تلفات بیشتری برای آن حاصل شده است.





۳-۱-۵- قابلیت اطمینان

به جهت کاهش تأمین انرژی یا کاهش هزینه‌ها اپراتور شبکه مجبور به حذف بارهایی که از اولویت کمتری برخوردار هستند می‌باشد که در مقایسه سناریوهای انجام شده نسبت به سناریو E مشاهده می‌شود که سناریو A، ۱۷۰۷۳٪ افزایش، سناریو B، حدود ۱۱۳٪، سناریو C، حدود ۱۷۰۸٪ کاهش و سناریو D، ۱۸۶٪ افزایش در میزان بار قطع شده داشته‌اند و در مدل غیرقطعی سناریو F به دلیل افزایش در ضریب میزان بار تأمین شده این قطعی به حد ۰ کاهش می‌یابد.

باتوجه به نتیجه به‌دست‌آمده از جدول (۴) و مقایسه هزینه نهایی با ردیف قبل یعنی حالت قطعی شبکه جایابی شده با کمک الگوریتم MHHO، مشاهده می‌شود که مقدار بودجه عدم قطعیت برابر ۵٪ در نظر گرفته شده تا به‌ازای آن میزان افزایش بار شبکه و همچنین کاهش تولید منابع تجدیدپذیر برآورد شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود به‌ازای افزایش ۵٪ هزینه کل در حالت قطعی، ماکزیمم شعاع عدم قطعیت بار شبکه (افزایش بار نسبت به حالت قطعی) ۱۵ درصد، کاهش تولید نسبت به حالت قطعی در پیل خورشیدی ۷۱ درصد و برای توربین بادی ۴۲ درصد به‌دست‌آمده است. به عبارتی مقدار بودجه عدم قطعیت ۵٪، کاهش تولید به‌اندازه مقادیر ذکر شده (ماکزیمم شعاع عدم قطعیت تولید) را پوشش می‌دهد.

جدول (۴): نتایج بدست آمده در ۲۴ ساعت شبکه توزیع در سه حالت (۱) بدون MGs، (۲) با MGs، (۳) با MGs جایابی شده با استفاده از

الگوریتم‌های GA، HHO، MHHO و (۴) حالت غیرقطعی مدل شده به روش IGDT

سناریو	A	B	C	D	E	F
الگوریتم	Cplex	Cplex	Cplex, GA	Cplex, HHO	Cplex, MHHO	Cplex, MHHO (Uncertain/IGDT)
W_MGs	Without MGs	With MGs (شبکه اولیه)	With MGs	With MGs	With MGs	With MGs
هزینه کل (\$)	۱۸۹۶۰	۱۷۸۹۸	۱۶۶۰۷	۱۶۵۰۵	۱۶۱۹۴	۱۷۰۰۴
آلودگی (kg/MMh)	۱۶.۱۱۱۳	۱۵.۷۹۵	۱۵.۱۱۹۳	۱۵.۷۲۹۵	۱۴.۵۴۵۷	۱۴.۴۹۶۳
ENS (KWh)	۲۱.۸۴۴۸	۰.۲۷۱۴	۰.۱۴۹۸	۰.۱۵۰۸	۰.۱۲۷۲	۰
ESS(\$)	۱۲۲	۶۲.۸۸	۱۰۸.۱۸۸۴	۸۱.۹۴۲۶	۷۵.۷۶	۹۵.۷۲۷۷
CDG (\$)	۶۲۴۵	۶۱۲۲	۵۸۶۰.۲	۶۰۹۶.۷	۵۶۲۸	۵۶۱۸.۷
Ps (\$)	۱۱۷۶۵	۱۱۸۳۴	۱۲۵۸۸	۱۲۸۰۱	۱۳۲۲۸	۱۳۱۹۸
MG(\$)	۰	-۱۱۹۶.۳۲	-۳۹۵۶.۰۸	-۳۵۶۱.۵۲	-۴۱۸۲.۲۳	-۲۴۳۰.۲۲
تلفات (KW)	۱۳۰۹	۱۶۰۱.۲	۱۲۹۰	۱۴۱۹.۶	۱۲۳۸.۶	۱۳۱۰
Buss MG1	۱	۲۲	۳۰	۲۳	۲۱	۲۱
Buss MG2	۱	۱۴	۲۱	۱۷	۱۴	۱۴
Buss MG3	۱	۳۳	۲	۷	۲۲	۲۲
CDG Buss	۲۶	۲۶	۵	۷	۲۶	۲۶
ESS Bus	۲۳	۲۳	۱۰	۲۵	۱۲	۱۲
WT Buss	۱۸	۱۸	۲۹	۱۲	۱۵	۱۵
PV Buss	۳	۳	۱۱	۱۹	۲۲	۲۲

۳-۲- تاب‌آوری

شاخص تاب‌آوری را باتوجه به نمودار پروفیل بار بر اثر سانحه قطع ارتباط با شبکه بالادست در سه بازه زمانی و بازیابی شبکه طی این بازه‌های زمانی بررسی کرده‌ایم و نتایج تابع هدف به ترتیب در جداول ۵ الی ۷ به‌صورت مقایسه هزینه و تاب‌آوری نشان داده شده است، و نمودار شبکه بازآرایی شده در حالت جایابی شده با الگوریتم MHHO جهت بازیابی بارهای دچار خاموشی در شکل‌های ۷



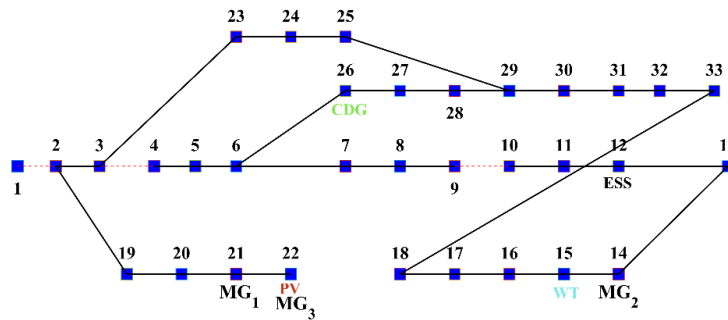
الی ۹ نشان داده شده‌اند. باتوجه به ظرفیت محدود ریزشبه، برق‌رسانی به بارهای حساس در اولویت می‌باشد. در ادامه به تحلیل بازیابی سیستم توزیع در سه بازه زمانی مختلف که منابع خورشیدی و بادی و میزان تقاضا در شرایط متفاوت می‌باشد پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۱- بازه زمانی ۱: ساعت ۱ الی ۲ بامداد

طوفان شدید در ساعت ۱:۰۰ رخ می‌دهد: خروجی توربین بادی در سطح نسبتاً بالایی می‌باشد، خروجی سلول خورشیدی ۰ می‌باشد. با توجه به جدول (۵) و همکاری ریزشبه‌ها در سناریوهای ارائه شده، در سناریو ۱ (عدم حضور ریزشبه‌ها) حداقل میزان تاب‌آوری پس از قطعی شبکه به میزان ۸۳ درصد مشاهده می‌شود و در سناریوهای دیگر به ترتیب از پایین به بالا مربوط به ریزشبه چندگانه پیش فرض با درصد تاب‌آوری ۹۲.۵، ریزشبه چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم اولیه HHO با درصد تاب‌آوری ۹۱.۵۱ و ریزشبه چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم بهبودیافته MHHO با درصد تاب‌آوری ۹۳.۱ می‌باشد. از لحاظ هزینه سناریو ۴ نسبت به سناریو ۱، ۱۲ درصد، نسبت به سناریو ۲، ۱۶.۶۴ درصد و نسبت به سناریو ۳، ۰.۱۶ درصد کاهش هزینه دارد. شکل ۷ بازآرایی شبکه جایابی شده توسط الگوریتم MHHO را پس از قطعی از شبکه بالادست نشان می‌دهد.

جدول (۵): نتایج به ازای بازیابی شبکه طی ساعت ۱ الی ۲ بامداد بر اثر قطع ارتباط با شبکه بالادست (WT=1116 KW و PV=0)

سناریو	W_MGs	هزینه (\$)	MG (kW)	بارهای بازیابی شده (KW)	بارهای تامین شده در حضور شبکه بالادست (KW)	%R
۱	Without MGs (First – Network)	۱۲۰۲۸۵	۰	۲۳۱۲۵۹	۲۷۸۶۲۵	۸۳
۲	MGs With (First-Network)	۱۰۹۰۶۴	۳۰	۲۵۵۰۵۳	۲۷۸۶۲۵	۹۱.۵۱
۳	With MGs, HHO	۱۰۷۴۰۱	۴۹.۵۹	۲۵۸۹۸۱	۲۷۸۶۲۵	۹۲.۹۵
۴	With MGs, MHHO	۱۰۷۲۳۶	۳۴۰.۷۲	۲۵۹۴	۲۷۸۶۲۵	۹۳.۱



شکل (۷): بازآرایی شبکه به ازای بازیابی شبکه طی ساعت ۱ الی ۲ نیمه شب

۳-۲-۲- بازه زمانی ۲: ساعت ۱۴ الی ۱۵

بر اثر حمله سایبری در ساعت ۱۴:۰۰ ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادست قطع می‌گردد: خروجی توربین بادی در سطح نسبتاً پایین می‌باشد، در مقابل خروجی سلول خورشیدی در سطح بالایی می‌باشد. با توجه به همکاری ریزشبه‌ها در سناریوهای ارائه شده، باتوجه به جدول ۶ در سناریو ۱ (عدم حضور ریزشبه‌ها) حداقل میزان تاب‌آوری را پس از قطعی شبکه با درصد ۷۳.۲۱ مشاهده می‌کنیم و در سناریوهای دیگر به ترتیب از پایین به بالا مربوط به ریزشبه چندگانه پیش فرض با درصد تاب‌آوری ۸۲.۳۴، ریزشبه

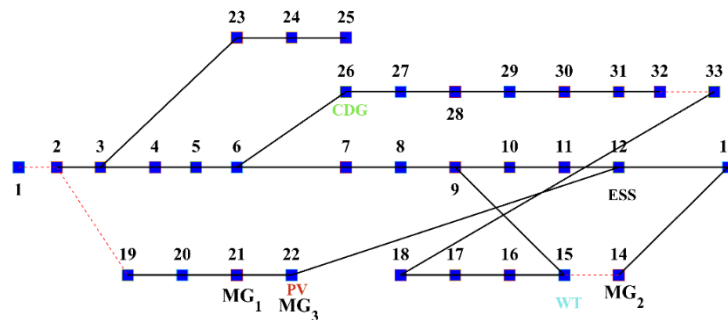




چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم اولیه HHO با درصد تاب‌آوری ۹۱.۸۸ و ریزش شبکه چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم بهبودیافته MHHO با درصد تاب‌آوری ۹۷ می‌باشد. از لحاظ هزینه سناریو ۴ نسبت به سناریو ۱، ۳۸ درصد، نسبت به سناریو ۲، ۲۱ درصد و نسبت به سناریو ۳، ۹.۵ درصد کاهش هزینه دارد. شکل ۸ بازآرایی شبکه جایابی شده توسط الگوریتم MHHO را پس از قطعی از شبکه بالادست نشان می‌دهد.

جدول (۶): نتایج شبکه به ازای بازآرایی شبکه طی ساعت ۱۴ الی ۱۵ (PV= 1440 و WT=247 KW)

سناریو	W_MGs	هزینه (\$)	MG (kW)	بارهای بازآرایی شده (KW)	بارهای تامین شده در حضور شبکه بالادست (KW)	%R
1	Without MGs (First Network)	۱۲۳۲.۶	۰	۱۹۵۸.۲۲	۲۶۷۴.۸	۷۳.۲۱
2	With MGs Network) (First	۱۰۸۲.۵	۶۸۲.۴۶	۲۲۰۲.۴۶	۲۶۷۴.۸	۸۲.۳۴
3	With MGs, HHO	۹۷۵.۹	۹۳۲.۹۶	۲۴۵۷.۶۱	۲۶۷۴.۸	۹۱.۸۸
4	With MGs, MHHO	۸۹۱.۲۶	۹۹۳.۳۷	۲۵۹۴.۵۶	۲۶۷۴.۸	۹۷

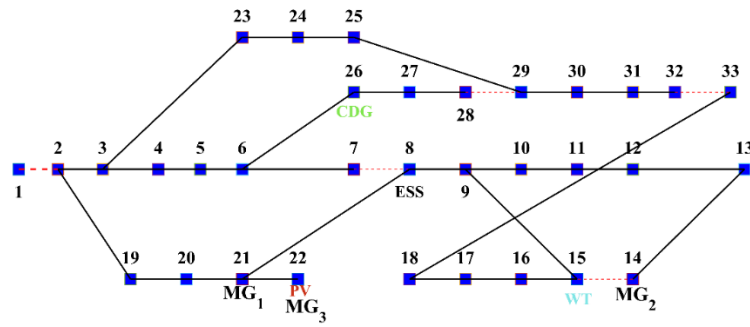


شکل (۸): بازآرایی شبکه به ازای بازآرایی شبکه طی ساعت ۱۴ الی ۱۵

۳-۲-۳- بازه زمانی ۳: ساعت ۱۹ الی ۲۰:

طوفانی در ساعت ۱۹:۰۰ رخ می‌دهد: خروجی توربین بادی در سطح متوسط و خروجی سلول خورشیدی صفر می‌باشد، در مقابل تقاضا در بالاترین سطح خود می‌باشد. با توجه به جدول ۷ و همکاری ریزش شبکه‌ها در سناریوهای ارائه شده، در سناریو ۱ (عدم حضور ریزش شبکه‌ها) حداقل میزان تاب‌آوری را پس از قطعی شبکه با درصد ۵۲.۷۱ مشاهده می‌کنیم و در سناریوهای دیگر به ترتیب از پایین به بالا مربوط به ریزش شبکه چندگانه پیش فرض با درصد تاب‌آوری ۵۹.۲۹، ریزش شبکه چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم اولیه HHO با درصد تاب‌آوری ۸۲.۸۳ و ریزش شبکه چندگانه جایابی شده توسط الگوریتم بهبودیافته MHHO با درصد تاب‌آوری ۸۹.۸۴ می‌باشد. از لحاظ هزینه سناریو ۴ نسبت به سناریو ۱، ۱۶ درصد، نسبت به سناریو ۲، ۱۴ درصد و نسبت به سناریو ۳، ۲۰.۲ درصد کاهش هزینه دارد. شکل ۹ بازآرایی شبکه جایابی شده توسط الگوریتم MHHO را پس از قطعی از شبکه بالادست نشان می‌دهد.





شکل (۹): بازآرایی شبکه به ازای بازیابی شبکه طی ساعت ۱۹ الی ۲۰

جدول (۷): نتایج به ازای بازیابی شبکه طی ساعت ۱۹ الی ۲۰ بر اثر قطع ارتباط با شبکه بالادست (WT=790 KW و PV=0)

سناریو	W_MGs	هزینه (\$)	MG (kW)	بارهای بازیابی شده (KW)	بارهای تأمین شده در حضور شبکه بالادست (KW)	%R
۱	Without MGs (First Network)	۱۰۲۳۲	۰	۱۹۵۸.۲۲	۳۷۱۵	۵۲.۷۱
۲	With MGs Network (First)	۱۰۰۲۹	۵۵	۲۲۰۲.۴۶	۳۷۱۵	۵۹.۲۹
۳	With MGs, HHO	۸۹۵۸	۶۸۲.۴۶	۳۰۷۷.۶۶	۳۷۱۵	۸۲.۸۳
۴	With MGs, MHHO	۸۷۶۶	۱۰۰۰	۳۳۳۷.۷	۳۷۱۵	۸۹.۸۴

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور کاهش هزینه، کاهش آلاینده‌ها و افزایش تاب‌آوری شبکه، شبکه توزیع با سه ریزشبکه ادغام گردید. در مرحله بعد به منظور دستیابی به نتایج بهتر و کاهش تلفات تصمیم به طراحی مجدد این شبکه با روش جایابی طی ۲۴ ساعت گرفته شد. و با توجه به وجود منابع متغیری مثل توربین بادی و سلول خورشیدی و همچنین متغیر بودن مصرف بارها، این شبکه در حالت غیرقطعی با استفاده از روش IGDت نیز بررسی گردید. که مشاهده شد در بخش‌های هزینه، آلودگی، میزان تبادل با ریزشبکه‌ها، تلفات، و قابلیت اطمینان سناریوی ریزشبکه‌ها و منابع جایابی شده با الگوریتم بهبود یافته شاهین هریس (سناریو E) در بالاترین اختلاف به ترتیب نتایج مطلوب ۱۷، ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۳، ۱۷۰۷۳ درصد بالاتر را کسب کرده‌است. در مرحله بعد به بررسی شاخص تاب‌آوری با فرض آسیب دیدن خط اتصال شبکه به شبکه بالادست بررسی گردید و تاثیر حضور ریزشبکه‌های جایابی شده با الگوریتم به همراه بازآرایی شبکه نشان از توانایی برتر این الگوریتم نسبت به سناریوهای دیگر که شامل شبکه توزیع ۳۳ شینه بهبودیافته بدون حضور ریزشبکه‌ها، شبکه توزیع با حضور ریزشبکه‌ها با آرایش پیش فرض و شبکه توزیع به همراه ریزشبکه‌های جایابی شده توسط الگوریتم اولیه شاهین هریس (HHO)، می‌باشد.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده و نتایج شبیه‌سازی نوآوری‌های ذیل در این مقاله ارائه گردید:

- با هدف افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع و کاهش تلفات محل اتصال ریزشبکه‌ها به شبکه توزیع با روش بهینه‌سازی جایابی می‌شود، همچنین محل منابع موجود در شبکه و ذخیره‌ساز نیز به روش جایابی با اهداف فوق‌الذکر تعیین می‌گردند.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و منابع مبتنی بر IGDت در مسئله چندهدفه
- استفاده از الگوریتم فراابتکاری شاهین هریس بهبودیافته
- در نظر گرفتن توابع هدف مختلف شامل: هزینه، آلاینده‌گی و قابلیت اطمینان
- بررسی شاخص تاب‌آوری در سناریوهای مختلف





جدول (۸): واژه نامه

شاخص‌ها			
بالاوند مربوط به حداقل مقدار متغیر	Min	شاخص‌های مربوط به شینه	i, j
بالاوند مربوط به حداکثر مقدار متغیر	Max	شاخص زمان	T
بالاوند برای بار	Load	شاخص سناریو	Ω
بالاوند برای باتری	Bat	شاخص تولیدات پراکندهی (DG) توزیع‌پذیر	G
بالاوند برای تولید پراکنده	Gen	شاخص بارهای شبکه	L
بالاوند برای نشان دادن وضعیت شارژ	SC	شاخص ریزشکده‌ی دارای توان مزاد	K
بالاوند برای نمایش وضعیت تخلیه (دشارژ)	SD	شاخص ریزشکده‌ی دارای کمبود توان	I
دسته شینه‌ها	Ω_b	شاخص ریزشکده	X
پارامترها			
قیمت فروش توان به DN	$P_{r,sell, DN}$	ظرفیت مختلط نامی واحد توزیع‌پذیر	$S_{r,gen}$
قیمت خرید توان از شبکه‌ی بالادستی	$P_{r,buy, utility}$	دامنه‌ی رمپ مولد توزیع‌پذیر	r_{gen}
قیمت فروش توان به شبکه‌ی بالادستی	$P_{r,sell, utility}$	قیمت سوخت مولد توزیع‌پذیر	$\lambda_{f,gen}$
مقاومت اهمی شاخه jk	r_{jk}	ضریب ^{۲۱} آلاینده‌ی	EmCoef
مقاومت القایی شاخه jk	x_{jk}	ضریب ^{۲۲} آلاینده‌ی	EmF
امپدانس شاخه‌ی خاص	Z_{line}	مقدار حرارتی خالص سوخت	NthV
تعداد DGها در ریزشکده‌ی χ ام	$N_{DG\chi}$	ضریب اکسیداسیون	OxF
تعداد DGها در DN	$N_{DG, DN}$	قیمت راه‌اندازی DG	C_{SU}
وضعیت شارژ اولیه‌ی ESS	$SOC_{initial}$	حداقل و حداکثر ظرفیت توان سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS)	$E_{i,max}^S, E_{i,min}^S$
وضعیت شارژ نهایی ESS	SOC_{final}	قیمت خرید توان از DN	$P_{r,buy, DN}$
ضرایب توابع هزینه‌ی DGها	$\alpha_{1,2,3}$	احتمال هر سناریو	prob
بودجه عدم قطعیت	δ	پارامترهای ثابت	ξ, ψ
مجموعه‌ها			
		مجموعه زیرشینه‌های متصل به شین j	Dn_j
متغیرها			
توان اکتیو و راکتیو خالص در باس j	$Qn_{t,j}, Pn_{t,j}$	توان اکتیو تولید شده توسط DG توزیع‌پذیر	P_{gen}
توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شاخه jk	$Qb_{t,jk}, Pb_{t,jk}$	توان راکتیو تولید شده توسط DG توزیع‌پذیر	Q_{gen}
راندمان شارژ و دشارژ ESS	$\eta_i^{SC} / \eta_i^{SD}$	میزان تولید CO_2 توسط DG	E_{gen}
حداقل و حداکثر انرژی ذخیره شده در ESS	$E_{i,max}^S, E_{i,min}^S$	تابع هزینه‌ی واحد توزیع‌پذیر	$C(P_{gen})$
توان مختلط تزریقی به هر گره	S_{line}	هزینه‌ی راه‌اندازی DGها	$C_{startup}$
وضعیت شارژ ESS	SOC	هزینه‌ی حذف بار	$C_{shed load}$
اندازه ولتاژ شین j در زمان t	$V_{t,j}$	هزینه‌ی جابجایی بار	$C_{defload}$
جریان عبوری از شاخه jk	$I_{t,jk}$	توان اکتیو بار قابل وقفه	$P_{defload}$
متغیر باینری نشان دهنده‌ی وضعیت دشارژ و شارژ ESS	$u_{i,t}^{SC} / u_{i,t}^{SD}$	توان اکتیو بار قابل حذف	$P_{shedload}$
متغیر باینری نشان دهنده‌ی وضعیت DG	U_{gen}	توان مزاد هر ریزشکده	$p_{surplus}$
متغیر باینری نشان دهنده‌ی تغییر وضعیت DG	y	کمبود توان هر ریزشکده	$P_{shortage}$
مقدار واقعی متغیر غیر قطعی	\mathcal{G}	تلفات توان اکتیو هر نهاد	p_{loss}



مقدار پیش‌بینی شده متغیر غیر قطعی	\bar{g}	توان اکتیو تزریقی به هر گره	P_{net}
وضعیت شاخه بین شینه‌های اوج	γ_{ij}	توان اکتیو عبوری از خط	P_{line}
شاخص تاب‌آوری	R	توان اکتیو تولیدی توسط توربین بادی	P_{wind}
بهترین و بدترین پاسخها در ناحیه بهینه‌سازی	$f_{i,max}, f_{i,min}$	توان اکتیو تولیدی توسط صفحه‌ی خورشیدی	P_{pv}
مقادیر قطعی و مبتنی بر IGDT تابع هدف	$OF_{mg}^{DET}, OF_{mg}^{IGDT}$	توان اکتیو شارژ/دشارژ مربوط به باتری آم	$P_{i,t}^{SD}, P_{i,t}^{SC}$
توان اکتیو و راکتیو خالص تزریق شده به شین از طرف شاخه‌های بالادست متصل به شین آن	$Q_{i,t,ij}, P_{i,t,ij}$	میزان بار اکتیو و راکتیو خالص متصل شده به شین z در زمان t	$Q_{Load,n,t,j}, P_{Load,n,t,j}$
ماکزیمم دامنه جریان شاخه jk	$I_{Max,jk}$	میزان بار اکتیو و راکتیو قطع شده	$Q_{LS,t,j}, P_{LS,t,j}$
ماکزیمم و مینیمم دامنه ولتاژ باس‌ها	V_{min}, V_{max}	توان اکتیو و راکتیو مصرفی پیش‌بینی شده متصل به شین z در زمان t	$Q_{Load,t,j}, P_{Load,t,j}$

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از اعضای هیئت تحریریه نشریه فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز کمال سپاسگزاری و قدردانی را دارند.

منابع

- [1] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2869–2879, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2558628.
- [2] M. Haghshenas, R. Hooshmand, M. Gholipour, "Stochastic planning to improve the resilience of electric power distribution systems against severe dust storms," *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 108–120, 2022, DOR: 20.1001.1.16823745.1401.20.2.12.8.
- [3] J. Wang, N. Xie, W. Wu, D. Han, C. Wang, and B. Zhu, "Resilience enhancement strategy using microgrids in distribution network," *Global Energy Interconnection*, vol. 1, no. 5, pp. 537–543, Dec. 2018, doi: 10.14171/J.2096-5117.GEI.2018.05.002.
- [4] Y. Bian and Z. Bie, "Multi-Microgrids for Enhancing Power System Resilience in Response to the Increasingly Frequent Natural Hazards," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 61–66, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.11.678.
- [5] Z. Li, M. Shahidehpour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab, and Y. Al-Turki, "Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1289–1310, Jul. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2685558.
- [6] H. Karimi and S. Jadid, "Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework," *Energy*, vol. 195, p. 116992, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.116992.
- [7] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient Distribution System by Microgrids Formation after Natural Disasters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 958–966, Mar. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2429653.
- [8] S. Yao, P. Wang, and T. Zhao, "Transportable Energy Storage for More Resilient Distribution Systems with Multiple Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3331–3341, May 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2824820.
- [9] P. Srikantha and D. Kundur, "Resilient distributed real-time demand response via population games," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2532–2543, Nov. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2526651.



- [10] K. P. Schneider, F. K. Tuffner, M. A. Elizondo, C. C. Liu, Y. Xu, and D. Ton, "Evaluating the Feasibility to Use Microgrids as a Resiliency Resource," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 687–696, Mar. 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2494867.
- [11] J. Chen and Q. Zhu, "A Game-Theoretic Framework for Resilient and Distributed Generation Control of Renewable Energies in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 285–295, Jan. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2598771.
- [12] S. Chanda and A. K. Srivastava, "Defining and Enabling Resiliency of Electric Distribution Systems with Multiple Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2859–2868, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2561303.
- [13] A. Hussain, V. H. Bui, and H. M. Kim, "Optimal operation of hybrid microgrids for enhancing resiliency considering feasible islanding and survivability," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 6, pp. 846–857, May 2017, doi: 10.1049/IET-RPG.2016.0820.
- [14] A. Gholami, T. Shekari, and S. Grijalva, "Proactive Management of Microgrids for Resiliency Enhancement: An Adaptive Robust Approach," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 470–480, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2017.2740433.
- [15] A. Barnes, H. Nagarajany, E. Yamangily, R. Bent, and S. Backhaus, "Tools for Improving Resilience of Electric Distribution Systems with Networked Microgrids", *Center for Nonlinear Studies, Los Alamos National Laboratory, NM, USA*, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1705.08229
- [16] K. P. Schneider, F. K. Tuffner, M. A. Elizondo, C. C. Liu, S. Backhaus, and D. Ton, ., "Enabling resiliency operations across multiple microgrids with grid friendly appliance controllers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4755–4764, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2669642.
- [17] L. Che, M. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Only connect: Microgrids for distribution system restoration," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 70–81, Jan. 2014, doi: 10.1109/MPE.2013.2286317.
- [18] A. Gholami, T. Shekari, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Microgrid Scheduling with Uncertainty: The Quest for Resilience," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2849–2858, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2598802.
- [19] W. Yuan, J. Wang, F. Qiu, C. Chen, C. Kang, and B. Zeng, "Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning Against Natural Disasters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2817–2826, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2513048.
- [20] C. Gouveia, J. Moreira, C. L. Moreira, and J. A. Peças Lopes, "Coordinating storage and demand response for microgrid emergency operation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1898–1908, Dec. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2257895.
- [21] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems under Natural Disasters - A Review," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2429656.
- [22] Z. Wang and J. Wang, "Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization into Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 3139–3149, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2389753.
- [23] F. H. Aghdam, S. Ghaemi, and N. T. Kalantari, "Evaluation of loss minimization on the energy management of multi-microgrid based smart distribution network in the presence of emission constraints and clean productions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 185–201, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.023.
- [24] M. Choobineh and S. Mohagheghi, "Robust optimal energy pricing and dispatch for a multi-microgrid industrial park operating based on just-in-time strategy," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 3321–3330, Jul. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2903182.
- [25] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and J. Kim, "Decentralized Energy Management System for Networked Microgrids in Grid-Connected and Islanded Modes," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1097–1105, Mar. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2427371.
- [26] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380–3389, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2244104.
- [27] S. A. Arefifar, M. Ordóñez, and Y. A. R. I. Mohamed, "Energy Management in Multi-Microgrid Systems - Development and Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 910–922, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2568858.



- [28] A. Rezaee Jordehi, S. A. Mansouri, M. Tostado-Véliz, A. Ahmarinejad, and F. Jurado, "Resilience-oriented placement of multi-carrier microgrids in power systems with switchable transmission lines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 175–185, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.277.
- [29] A. H. Alobaidi, M. E. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Decentralized energy management for unbalanced networked microgrids with uncertainty," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 15, no. 13, pp. 1922–1938, Jul. 2021, doi: 10.1049/GTD2.12145.
- [30] H. Haddadian and R. Noroozian, "Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 650–663, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.10.120.
- [31] T. Ding, Y. Lin, Z. Bie, and C. Chen, "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration," *Applied Energy*, vol. 199, pp. 205–216, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.05.012.
- [32] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient Distribution System by Microgrids Formation after Natural Disasters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 958–966, Mar. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2429653.
- [33] S. Bagheri, H. Talebi, and A. Fereidunian, "Resilient, Comfort and Economic Operation of Smart Nanogrid," *Journal of Control*, vol. 12, no. 3, pp. 1–12, Dec. 2018, doi: 10.29252/JOC.12.3.1.
- [34] S. Salah1, N. Rezaei1, J. Moshtagh, "Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol 3 ·no. 1 ·2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1996973.1094.
- [35] M. R. Sheibani, M. Zeraati, F. Jabbari, E. Heydarian, "Portable Energy Storage Systems Expansion Planning to Improve the Power Systems Resilience," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System* ·vol 3 ·no. 1 ·2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1997267.1097.
- [36] G. Liu, Y. Xu, and K. Tomsovic, "Bidding strategy for microgrid in day-ahead market based on hybrid stochastic/robust optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 227–237, Jan. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2476669.
- [37] E. Kianmehr, S. Nikkhah, and A. Rabiee, "Multi-objective stochastic model for joint optimal allocation of DG units and network reconfiguration from DG owner's and DisCo's perspectives," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 471–485, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2018.08.032.
- [38] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Energy management in distribution systems, considering the impact of reconfiguration, RESs, ESSs and DR: A trade-off between cost and reliability," *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 346–358, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.02.101.
- [39] P. Jamatia, S. Bhattacharjee, and S. Sharma, "Allocation of Electric Vehicle Charging Station in Distribution Network along with Distributed Generation Sources," *Proceedings of 2022 6th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, CATCON 2022*, pp. 196–201, 2022, doi: 10.1109/CATCON56237.2022.10077671.
- [40] H. Bagheri Tolabi, M. H. Ali, and M. Rizwan, "Novel Hybrid Fuzzy-Intelligent Water Drops Approach for Optimal Feeder Multi Objective Reconfiguration by Considering Multiple-Distributed Generation," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 91–102, Dec. 2014, Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: https://joape.uma.ac.ir/article_222.html.
- [41] S. Behzadi, A. Bagheri, and A. Rabiee, "Resilience-Oriented Operation of Micro-Grids in both Grid-Connected and Isolated Conditions within Sustainable Active Distribution Networks," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 38–51, Jan. 2025, doi: 10.22098/JOAPE.2023.12142.1902.
- [42] A. A. A. El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. M. Kinawy, and E. S. Ali, "Optimal placement and sizing of distributed generation units using different cat swarm optimization algorithms," *2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings*, pp. 975–981, Jan. 2017, doi: 10.1109/MEPCON.2016.7837015.
- [43] A. Jalili and B. Taheri, "Optimal Sizing and Sitting of Distributed Generations in Power Distribution Networks Using Firefly Algorithm," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, Dec. 2020, doi: 10.1007/S40866-020-00081-9/FIGURES/18.





- [44] H. Karimi and S. Jadid, "Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework," *Energy*, vol. 195, p. 116992, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.116992.
- [45] N. Rezaei, A. Ahmadi, A. Khazali, and J. Aghaei, "Multiobjective Risk-Constrained Optimal Bidding Strategy of Smart Microgrids: An IGDT-Based Normal Boundary Intersection Approach," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1532–1543, Mar. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2850533.
- [46] N. Rezaei, A. Ahmadi, A. H. Khazali, and J. M. Guerrero, "Energy and Frequency Hierarchical Management System Using Information Gap Decision Theory for Islanded Microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7921–7932, Oct. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2798616.
- [47] M. A. Nasr, E. Nasr-Azadani, A. Rabiee, and S. H. Hosseinian, "Risk-averse energy management system for isolated microgrids considering generation and demand uncertainties based on information gap decision theory," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 6, pp. 940–951, Apr. 2019, doi: 10.1049/IET-RPG.2018.5856.
- [48] X. Dai, Y. Wang, S. Yang, and K. Zhang, "IGDT-based economic dispatch considering the uncertainty of wind and demand response," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 6, pp. 856–866, Apr. 2019, doi: 10.1049/IET-RPG.2018.5581.
- [49] A. Khazali, N. Rezaei, A. Ahmadi, and B. Hredzak, "Information Gap Decision Theory Based Preventive/Corrective Voltage Control for Smart Power Systems With High Wind Penetration," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 10, pp. 4385–4394, Oct. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2797105.
- [50] R. Fathi, B. Tousi, S. Galvani, "Optimal Allocation of Renewable Resources in Distribution Networks Considering Uncertainty Based on Info-Gap Decision Theory Using Improved Salp Swarm Algorithm," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 20, no. 68, pp. 207–223, 2022, doi: 10.22075/jme.2021.23075.2078.
- [51] M. Poshtyafteh, H. Barati, and A. D. Falehi, "Optimal placement of distribution network-connected microgrids on multi-objective energy management with uncertainty using the modified Harris Hawk optimization algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 18, no. 4, pp. 809–833, Feb. 2024, doi: 10.1049/GTD2.13116.
- [52] M. Doostizadeh, M. R. Shakarami, and H. Bastami, "Decentralized energy trading framework for active distribution networks with multiple microgrids under uncertainty," *Scientia Iranica*, vol. 26, no. Special Issue on machine learning, data analytics, and advanced optimization techniques..., pp. 3606–3621, Dec. 2019, doi: 10.24200/SCI.2019.53962.3557.
- [53] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points," *Applied Energy*, vol. 300, p. 117416, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117416.
- [54] M. Ouyang and L. Dueñas-Osorio, "Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems," *Structural Safety*, vol. 48, pp. 15–24, May 2014, doi: 10.1016/J.STRUSAFE.2014.01.001.
- [55] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849–872, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.FUTURE.2019.02.028.

زیر نویس‌ها

¹ Energy Management System

² Demand Response

³ Distributed Generation

⁴ Gas Flow Analyzer

⁵ Stochastic Two Stage Programming

⁶ Smart Distributed Network





- 7 Energy Load Not Supplied
- 8 Combined Heat and Power
- 9 Electric Vehicles
- 10 Symbiotic Organisms Search
- 11 Energy Storage System
- 12 Cat Swarm Optimization
- 13 Parallel Cats Swarm Optimization
- 14 Demand Response Program
- 15 Information Gap Decision Theory
- 16 Modified Harris Hawks Optimization
- 17 Management Energy System
- 18 Risk Averse
- 19 Opportunity Search
- 20 Harris Hawks Optimization
- 21 Coefficient
- 22 Factor

