ارائه‌ی چهارچوبی برای خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها در شبکه‌های هوشمند انرژی با استفاده از دایره‌ی آپولونیوس

شهین پوربهرامی[۱]، دکتر؛ لیلی محمدخانلی[۲]، دانشیار؛ هادی مرادفام[۳]، کارشناس ارشد؛ بهنام محمدی ایواتلو[۴]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران- sh.pourbahrami@tabrizu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران-l-khanli@tabrizu.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران - moradfam@tabrizu.ac.ir
۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران - bmohammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده: امروزه تأمین منابع انرژی و انتقال آن به‌صورت سنتی مقرون‌به‌صرفه نیست. لذا شبکه‌های هوشمند به معنی مدیریت هوشمندانه مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی برای مصرف‌کنندگان می‌باشد. از ویژگی‌های بارز شبکه‌های هوشمند انرژی، قابلیت مقیاس‌پذیری، قابلیت خود بازیابی شبکه توزیع، هزینه‌ی کمتر شبکه توزیع، انعطاف‌پذیری شبکه و تحمل‌پذیری خطا می‌باشد. تمامی این ویژگی‌ها در مفهومی به نام ریز شبکه نمایان می‌شود. به‌کارگیری تولیدات پراکنده در ریز شبکه‌های انرژی، مزایای زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی بسیار زیادی را به دنبال دارد. بهینه‌سازی مکان و اندازه مولدها در ریز شبکه‌ها در کاهش تلفات انرژی نقش مهمی دارد. همچنین خوشه‌بندی بهینه‌ی ریز شبکه‌ها چالشی اساسی در این زمینه می‌باشد. در این مقاله چارچوبی برای خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس ارائه می‌شود. دایره‌ی آپولونیوس با کمک ساختار هندسی و دقت بالا باعث افزایش دقت خوشه‌بندی می‌شود. کارایی برابر با ۵/۳۸ درصد ازنظر معیار فاصله و۱۵/۱۶ درصد ازنظر هزینه‌ی تلفات انرژی سیستم و درنهایت ۱۴/۷۹ درصد ازنظر هزینه‌ی کل سالیانه، نسبت به کارهای همانند k-means انجام‌گرفته، به دست می‌آید. همچنین از الگوریتم شبیه سازی تبرید برای اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها و جبران کمبود توان شبکه استفاده می شود که این موجب کاهش تلفات انرژی به میزان ۲۶/۵۴ کیلووات، در شبکه موردمطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی: دایره‌ی آپولونیوس، ریز شبکه‌ها، خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها.

A Framework for Clustering of Micro Grids in Energy Smart Grids using the Apollonius Circle

Shahin Pourbahrami[1], PhD; Leyli Mohammad khanli[2], Associate professor; Hadi Moradfam[3], MSc; Behnam Mohammadi Ivatloo[4], Associate professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: sh.pourbahrami@tabrizu.ac.ir
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: l-khanli@tabrizu.ac.ir
3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: moradfam@tabrizu.ac.ir
4- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmohammadi@tabrizu.ac.ir

Abstract: Today, energy supplies and transportation are not traditionally affordable. So smart grids mean intelligent energy management and lower energy costs for consumers. Significant features of smart grids, scalability, resilient network distribution capability, lower network cost distribution, network flexibility and fault tolerance. All of these features appear in the concept of a micro-grid. The use of scattered products in micro energy networks has many environmental, economic and technical benefits. Optimization of the location and magnitude of generators in micro-grids plays an important role in reducing energy losses. Optimal clustering of micro-networks is also a major challenge in this regard. In this paper, we present a framework for clustering of small networks using Apollonius circular algorithm. Apollonius circles increase the precision of clustering with the help of geometric structure and high precision. Performance is equal to 5.38% for distance criterion and 16.15% for the system energy losses, and finally, 14.79% of the total annual cost is better than the past work done. Then, we have used the simulated annealing algorithm to compensate for the lack of power micro-grids and the stability of the entire network, which this action led to reducing energy losses in the amount of 26.54 kw in study grid.

Keywords: Apollonius Circle, Energy Smart grids, Energy micro-grid clustering.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷
نام نویسنده‌ی مسئول: لیلی محمدخانلی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

شبکه الکتریکی به شبکه‌ای از خطوط انتقال برق، ایستگاه‌های فرعی برق، دستگاه‌های مبدل ولتاژ و دیگر اجزایی که برق را از نیروگاه به مصرف‌کننده منتقل می‌کنند، گفته می‌شود. تکنولوژی دیجیتال که امکان ارتباط دوطرفه را بین تولیدکننده‌های برق و مشتریان در طول خطوط انتقال مهیا می‌سازد همان چیزی است که یک شبکه را هوشمند می‌سازد [۱]. شبکه‌های هوشمند به تکامل و به‌روز شدن شبکه‌های موجود نسبت داده می‌شوند و شامل نظارت پیشرفته، اتوماسیون، کنترل تولید برق، انتقال و توزیع آن هستند [۲]. از مزایای شبکه‌های هوشمند انرژی نسبت به شبکه‌های سنتی، قابلیت خود بازیابی شبکه توزیع، هزینه‌ی کمتر شبکه توزیع با استفاده از پاسخ به درخواست مشتری، مقیاس‌پذیری، قابلیت استفاده از مولدهای پراکنده در شبکه، افزایش امنیت شبکه، پیک‌سایی و کاهش تلفات شبکه توزیع، امکان خرده‌فروشی و بازار مجازی برق، بالا بردن پایداری، کاهش افت ولتاژ و خاموشی شبکه می‌باشد که هرکدام از این موارد می‌تواند به‌عنوان چالشی درزمینه‌ی هوشمندتر کردن شبکه مطرح شود [۳-۵].

یکی از مقدمات هوشمند سازی شبکه‌های توزیع، تقسیم آن‌ها به ریز شبکه‌هایی با خودکفایی و قابلیت اعتماد بالا برای تحقق ویژگی‌های شبکه هوشمند، ازجمله، ویژگی خودترمیمی آن است. ریز شبکه مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید پراکنده و در برخی اوقات تجهیزات ذخیره می‌باشد که می‌تواند به‌صورت مستقل یا وابسته به شبکه اصلی، برق یک ناحیه‌ی محلی را تأمین کند. یافتن مکان و اندازه‌ی بهینه مولدهای پراکنده در ریز شبکه‌ها، با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، ازجمله روش‌های کاهش تلفات توزیع است [۸-۶]. بازپیکربندی ریز شبکه‌ها و یافتن مکان و اندازه‌ی مناسب بانک‌های خازنی در ریز شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و با توابع هدف متفاوت نیز از دیگر روش‌های کاهش تلفات می‌باشد [۱۰-۹,۱۲].

استفاده از عامل‌های هوشمند در ریز شبکه‌ها یکی دیگر از روش‌های مورداستفاده در کاهش تلفات انرژی مطرح‌شده است. خوشه‌بندی مناسب ریز شبکه‌ها، به‌عنوان چالشی اساسی درزمینه‌ی کاهش میزان تلفات شبکه توزیع، عنوان می‌شود [۱۳-۱۸].

شبکه‌های هوشمند برق به‌منظور از بین بردن معایب شبکه‌های موجود تعریف شدند. یکی از بزرگ‌ترین معایب شبکه‌های، تلفات بسیار زیاد شبکه توزیع می‌باشد که می‌تواند با استفاده از تقسیم شبکه اصلی به ریز شبکه‌ها تا حدود زیادی قابل‌کنترل باشد. استفاده از مولدهای پراکنده انرژی در شبکه، از مواردی است که می‌تواند در راستای پاسخگویی به چالش‌های عنوان‌شده، مؤثر واقع شود. استفاده از این مولدها، اگر با برنامه‌ریزی و محاسبات صحیح همراه باشد، می‌تواند پایداری و امنیت شبکه‌های انرژی را بالاتر و میزان تلفات انرژی را کاهش دهد[۱۹, ۲۰].

هدف در این مقاله کاهش میزان تلفات توزیع شبکه و درنتیجه‌ی آن کاهش هزینه کل سالیانه می‌باشد. در این روش پیشنهادی چارچوبی ارائه می‌شود که در آن ابتدا با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس، ریز شبکه‌ها را به‌صورت مستقل خوشه‌بندی و سپس برای پایداری نسبی کل شبکه و جبران کمبود توان ریز شبکه‌ها، با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری شبیه سازی تبرید، این ریز شبکه‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. درنهایت برای ارزیابی چارچوب پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده باکارهای قبلی انجام‌گرفته، مقایسه می‌شود.

برای سازمان‌دهی این مقاله در بخش دوم کارهایی که درگذشته برای بهینه‌سازی و کاهش تلفات انرژی در شبکه‌های هوشمند انجام‌گرفته است را موردبررسی قرار می‌دهیم. در بخش سوم راه‌کار پیشنهادی ما ارائه داده می شود. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی و ارزیابی عملکرد روش ارائه شده موردبررسی قرارگرفته و در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاد پژوهش‌های آینده در این راستا، ارائه داده می‌شود.

۲- کارهای مرتبط

شبکه هوشمند به معنی مدیریت هوشمندانه مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی برای مصرف‌کنندگان می‌باشد [۳]. از ویژگی‌های بارز شبکه‌های هوشمند انرژی، قابلیت مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری شبکه و تحمل‌پذیری خطا می‌باشد [۵،۴]. تمامی این ویژگی‌ها در مفهومی به نام ریز شبکه نمایان می شود. لذا ریز شبکه‌ها، از ملزومات شبکه‌های هوشمند انرژی محسوب می شوند. شبکه‌های هوشمند انرژی از سه بخش کلی تولید، انتقال و توزیع انرژی تشکیل می‌شود [۲۱-۲۳]. با توجه به اینکه بیشتر تلفات انرژی در شبکه‌های هوشمند، مربوط به بخش توزیع انرژی می‌باشد، لذا یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و اهداف در شبکه‌های هوشمند انرژی کاهش تلفات توزیع و درنتیجه‌ی آن کاهش هزینه برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی است [۲۴،۱۸]. خوشه‌بندی مناسب ریز شبکه‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از راه‌کارهای پیشنهادی در تحقق این امر باشد.

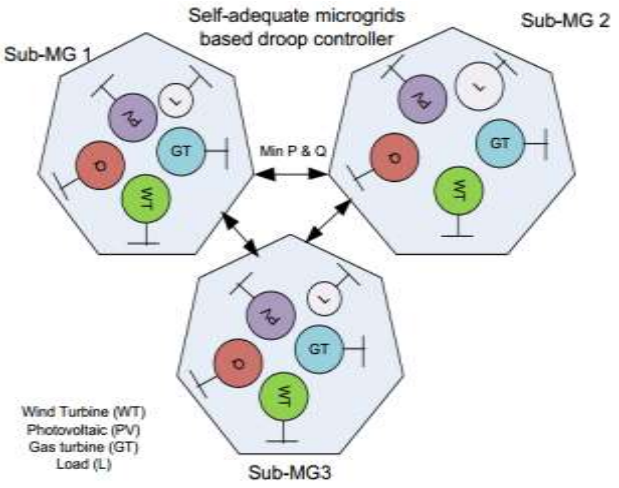
در خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها، مراکز خوشه به‌عنوان ایستگاه‌های مبدل فشار متوسط به فشار ضعیف (MV/LV) و اعضای خوشه به‌عنوان مراکز ثقل بار مصرف‌کننده در نظر گرفته‌شده است که مکان این ایستگاه‌ها قابل‌تغییر و تعداد و ظرفیت آن‌ها ثابت است. مولدهای پراکنده که به‌عنوان اصلی‌ترین تولیدکننده‌های انرژی در ریز شبکه‌ها محسوب می‌شوند، قبل از طرح‌ریزی کل شبکه و با استفاده از الگوریتم های فرا مکاشفه‌ای مکان یابی و اندازه‌ی بهینه آن ها نیز مشخص‌شده است [۱۷]. مهم‌ترین معیارها در خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها تراکم مصرف‌کنندگان انرژی فاصله می‌باشد، چراکه با کاهش فاصله‌ی تراکم مصرف‌کنندگان از مرکز هر خوشه، میزان تلفات توزیع انرژی کاهش نمایی داشته و درنتیجه‌ی آن میزان هزینه‌ی کل نیز کاهش می یابد.

یکی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها درزمینه‌ی هوشمند سازی شبکه، مکان‌یابی و اندازه یابی بهینه منابع تولید پراکنده در ریز شبکه‌ها با توابع هدف متفاوت می‌باشد [۲۵،۷]؛ بنابراین، ارائه روش‌های مناسب برای پوشش دادن به این اصل همچنان به‌عنوان یک نیاز مهم به‌حساب می‌آید. مشخص شدن تابع هدف به‌عنوان اولین گام در حل این مسائل بهینه‌سازی عنوان‌شده است که می‌تواند به‌صورت تک‌هدفه یا چندمنظوره باشد. این تابع هدف، اغلب می‌تواند کاهش هزینه اقتصادی یا کاهش تلفات اکتیو و راکتیو و یا بهبود پروفیل ولتاژ باشد. گام دوم حل این مسائل فرمول‌بندی مسئله و تابع هدف می‌باشد. سومین گام، تعیین قیود و محدودیت‌های مسئله می‌باشد. در گام چهارم ابزارهای بهینه سازی که شامل روش‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک، روش جستجوی فاخته، الگوریتم ازدحام ذرات، به‌منظور یافتن مکان بهینه DG ها استفاده می‌شوند [۳۰، ۲۹-۲۶]. به‌منظور یافتن مکان بهینه DG ها برای کاهش تلفات و افزایش قابلیت بارپذیری از مکان‌یابی بهینه DSTATCOM ها و مدیریت اکتیو در شبکه نیز استفاده می‌شود [۳۰، ۲۹].

یکی دیگر از روش‌های بهینه سازی ریز شبکه‌های هوشمند انرژی، بازپیکربندی ریز شبکه‌ها باهدف کاهش تلفات، یا بهبود پروفیل ولتاژ و یا بالا بردن پایداری و امنیت شبکه‌ی توزیع، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، کلونی مورچگان و در حضور مولدهای پراکنده در شبکه می‌باشد [۲۳،۲۰]. در این روش نیز ابتدا تابع هدف مسئله مشخص می شود. در مرحله‌ی بعدی فرموله کردن مسئله و تابع هدف برای سادگی محاسبات انجام می‌گیرد. سپس محدودیت‌های مسئله، اعمال و بازپیکربندی شبکه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و با در نظر گرفتن حضور مولدهای پراکنده در شبکه انجام می‌گیرد.

الگوریتم‌های خوشه‌بندی با توجه به کاربرد و تنوع مسائل مرتبط با آن، بسیار زیادند. ازجمله‌ی این روش‌ها، الگوریتم خوشه‌بندی با استفاده از دایره آپولونیوس می‌باشد [۳۱]. این روش جزو روش‌های مبتنی بر چگالی و هندسه محسوب می‌شود. با توجه به اینکه، اساس این روش بر مبنای فاصله اقلیدسی نقاط پراکنده از مراکز خوشه‌ها می‌باشد لذا این روش ازنقطه‌نظر معیار فاصله، می‌تواند نتیجه‌ای بهتر از الگوریتم k-means داشته باشد. از ویژگی‌های بارز الگوریتم‌های مبتنی بر چگالی، تشخیص خوشه‌ها با شکل دلخواه، مقاومت در برابر نویز و امکان تعریف مقدار آستانه برای جداسازی خوشه‌ها از یکدیگر است [۳۳،۳۲]. الگوریتم k-means از متداول‌ترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی است. سادگی پیاده سازی و سرعت از مزیت‌های این الگوریتم است. روش k-means به دلیل سادگی و پایه بودن آن برای روش‌های دیگر و قابلیت تعیین تعداد مراکز خوشه، انتخاب‌شده است. ولی این روش لزوماً همیشه دارای بهترین پاسخ نبوده و معایبی نیز دارد. ازجمله معایب این روش، حساسیت نسبت به نویز و داده‌های غیر محدب، انتخاب نقاط اولیه‌ی تصادفی و درنتیجه‌ی آن جواب‌های متفاوت به‌دست‌آمده در هر تکرار می‌باشد [۳۵،۳۴].

خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها یکی از مهم‌ترین کارهای انجام‌گرفته درزمینه‌ی بهینه سازی ریز شبکه‌ها می‌باشد. این خوشه‌بندی می‌تواند در قالب طراحی خوشه قبل از پیاده‌سازی کل شبکه و یا بعدازآن انجام بگیرد [۱۶،۱۴]. در این مورد نیز ابتدا باید تابع هدف مسئله را مشخص کرد. خوشه‌بندی غالباً باهدف کاهش تلفات انرژی، بالا بردن پایداری و امنیت شبکه توزیع و یا بهبود پروفیل ولتاژ، انجام می‌گیرد. شکل (۱) فرم کلی خوشه‌بندی ریز شبکه را نمایش می‌دهد. خوشه‌بندی می‌تواند بر روی ریز شبکه یا خود شبکه توزیع انجام گیرد. در خوشه‌بندی ریز شبکه، ابتدا یک ریز شبکه انتخاب و به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود که این بخش‌ها می‌توانند به‌صورت مستقل یا وابسته به شبکه اصلی انرژی باشند [۲۳،۱۶].



شکل ۱: نمونه‌ای از خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها به‌صورت مستقل [۲۳]

خوشه‌بندی بهینه‌ی ریز شبکه‌ها در شبکه اصلی از روش‌هایی است که می‌تواند تا حدود زیادی در کاهش تلفات انرژی مؤثر باشد [۱۴]. اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها، پس از خوشه‌بندی، از مواردی است که می‌تواند در جبران کمبود انرژی ریز شبکه‌ها و مستقل شدن هر چه بیشتر شبکه‌ی هوشمند انرژی از شبکه‌ی سنتی، مؤثر واقع شود. این اتصال، با عنوان تعیین حدود در شبکه‌های انرژی شناخته می شود. در این روش ابتدا مکان مصرف‌کنندگان انرژی در شبکه مشخص می‌شود. سپس با توجه به مکان و اندازه‌ی مصرف انرژی مصرف‌کنندگان، نوع و اندازه‌ی بهینه‌ی مولدهای پراکنده‌ی انرژی در شبکه مشخص می‌گردد. تعیین مکان و اندازه‌ی بهینه‌ی مولدها، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی انجام می‌گیرد.

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی در فضاهای جستجوی بزرگ است [۳۲،۲۷]. این الگوریتم بیشتر زمانی استفاده می شود که فضای جستجوی مسئله، گسسته باشد. برای مسائلی که

پیدا کردن یک پاسخ تقریبی برای بهینه کلی مهم‌تر از پیدا کردن یک پاسخ دقیق برای بهینه محلی در زمان محدود و مشخصی است، تبرید شبیه سازی شده نسبت به باقی الگوریتم‌های بهینه سازی در ارجحیت می‌باشد. از مزایای الگوریتم شبیه سازی تبرید، مصرف حافظه‌ی بسیار پایین آن، تمرکز بر جستجوی محلی و مهم‌تر از همه توانایی گذر از بهینه‌ی محلی به دلیل وجود روند تصادفی هدایت‌شده‌اش می‌باشد.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده و مجموعه داده‌های موردمطالعه‌ی ما، در چارچوب پیشنهادی ارائه شده در این مقاله برای خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها، ابتدا مراکز خوشه‌ها را تعیین کرده و سپس با استفاده از روش دایره آپولونیوس خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها را انجام می‌دهیم.

۳- روش پیشنهادی

در یک شبکه‌ی هوشمند، اگر هر ریز شبکه تا حد امکان، بتواند به‌صورت مستقل از شبکه‌ی اصلی و تنها با استفاده از مولدهای پراکنده‌ای که در خود ریز شبکه مکان‌یابی شده‌اند نیاز انرژی خود را تأمین کند کارایی بالا خواهد رفت. مستقل شدن ریز شبکه از شبکه‌ی اصلی هدفی است که در این مقاله دنبال خواهد شد. در این میان، چیدمان هر ریز شبکه از مسائلی است که در مستقل شدن ریز شبکه بی‌تأثیر نیست. اگر هرکدام از ریز شبکه‌ها را به‌عنوان یک خوشه در نظر بگیریم، خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها، نحوه ساختار هر ریز شبکه را تعیین می‌کند. اهدافی همچون دقت و هزینه‌ی ساخت خوشه‌بندی، از چالش‌های اساسی در خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها در شبکه‌های هوشمند انرژی می‌باشد [۳۰, ۳۱].

روش کار به این صورت می‌باشد که در یک شبکه انرژی، اطلاعات مربوط به مکان و اندازه‌ی انرژی تعدادی مصرف‌کننده و تعدادی تولیدکننده (منابع تولید پراکنده) انرژی که از قبل، مکان‌یابی شده‌اند راداریم. با توجه به این‌که در خوشه‌بندی شبکه‌های هوشمند انرژی، هرچه مراکز خوشه به نقاط با تراکم مصرف‌کننده بالا نزدیک‌تر باشد، تلفات انرژی در شبکه کاهش می‌یابد، لذا در فاز اول مقاله، خوشه‌بندی شبکه‌ها را با استفاده از الگوریتمی با استفاده از دایره‌ی آپولونیوس که یک الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی می‌باشد، انجام داده و اندازه‌ی تولید، مصرف و تلفات انرژی هر خوشه را محاسبه می کنیم .بدین ترتیب خوشه‌ها یا همان ریز شبکه‌های محاسبه‌شده‌ی ما در شبکه، به‌گونه‌ای می‌باشد که تلفات انرژی کمتری خواهد داشت. اکنون، هر خوشه با توجه به میزان تولید، مصرف و تلفات انرژی دارای یک وزن میانگین می‌باشد که این وزن در حالت کلی نمایش‌دهنده وضعیت کلی خوشه ازنظر سه معیار اشاره شده می‌باشد. پس خوشه‌ای که دارای میانگین وزن بالاتری باشد خوشه‌ای قوی محسوب می شود که نسبت تولید انرژی آن خوشه به مصرف و تلفات انرژی بیشتر است و نه‌تنها خوشه می‌تواند انرژی موردنیاز خود را تأمین کند، بلکه دارای مقداری انرژی بیشتر نیز می‌باشد. همچنین خوشه‌ای که دارای میانگین وزن پایین‌تری می‌باشد، خوشه‌ی ضعیف محسوب شده و نسبت تولید انرژی به مصرف و تلفات انرژی در آن خوشه پایین‌تر می‌باشد و این خوشه در اکثر مواقع، برای تأمین انرژی مصرف‌کنندگان خود، نیازمند دریافت انرژی از بیرون از ریز شبکه می‌باشد. حال برای بهینگی بیشتر مصرف انرژی در شبکه اصلی و مستقل شدن هرچه بیشتر ریز شبکه‌ها، در فاز دوم روش پیشنهادی اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها به یکدیگر، به‌گونه‌ای که ریز شبکه‌های ضعیف‌تر بتوانند انرژی موردنیاز خود را از ریز شبکه‌های قوی‌تر دریافت کنند و نیازی به تأمین انرژی از خارج از شبکه نداشته باشند، مطرح می‌گردد. با توجه به این‌که نحوه‌ی اتصال بهینه، جزو مسائل NP-hard محسوب می‌شود، برای حل این مسئله از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره گرفته می‌شود [۳۶].

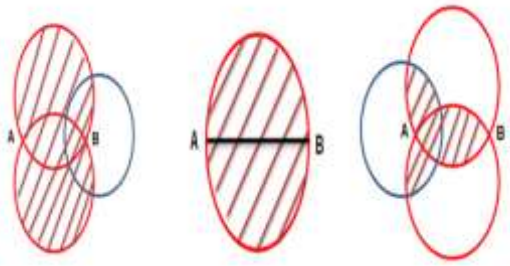
در بررسی ویژگی‌های این مسئله ماهیت گسسته‌ی متغیرها از مواردی می‌باشد که می‌تواند در انتخاب الگوریتم مناسب کمک فراوانی داشته باشد. ازجمله‌ی الگوریتم‌های هوش مصنوعی که در فضای جستجوی گسسته کارایی بالایی دارد، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد. لذا در بخش دوم مقاله، از این الگوریتم برای اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها استفاده می‌کنیم. از ویژگی‌های اصلی این الگوریتم توانایی گذر از بهینه‌ی محلی می‌باشد. اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها در قالب تعیین حدود ریز شبکه‌ها عنوان می‌شود.

۳-۱- علامت‌گذاری و تعاریف

تعریف دایره‌ی آپولونیوس: دایره آپولونیوس مکان هندسی نقاطی از صفحه است که از دونقطه‌ی داده‌شده، نسبت فاصله‌ی معینی داشته باشد. با فرض نقاط A و B به‌عنوان دو سرخوشه و نقاط M به‌عنوان عضو خوشه باشند، همسایگی و ساخت خوشه‌ها بررسی می‌شود [۳۱].

تعریف ارتباط مستقیم: گوییم A, B ارتباط مستقیم دارند درصورتی‌که در ناحیه‌ی اشتراک ایجادشده بر اساس $\Theta > ۹۰$ یا در اجتماع ایجادشده بر اساس $\Theta < ۹۰$ و ناحیه‌ی همسایگی گابریل بر اساس $\Theta = ۹۰$ نقاط دیگری وجود نداشته باشد، به‌عبارت‌دیگر چگالی نقاط ناحیه‌ی هاشور خورده در شکل (۲) صفر باشد.

تعریف ارتباط غیرمستقیم: گوییم A, B ارتباط غیرمستقیم دارند درصورتی‌که در ناحیه‌ی اشتراک ایجادشده بر اساس $\Theta > ۹۰$ یا در اجتماع ایجادشده بر اساس $\Theta < ۹۰$ و ناحیه‌ی همسایگی گابریل بر اساس $\Theta = ۹۰$ نقاط دیگری وجود داشته باشد، به‌عبارت‌دیگر چگالی نقاط ناحیه‌ی هاشور خورده در شکل (۲) غیر صفر باشد.



شکل ۲: ناحیه‌ی همسایگی بین دونقطه A, B بر اساس زاویه بین‌شان

۳-۲- فاز اول: خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس

این فاز دارای چهار گام می‌باشد که گام اول آن تعیین مصرف‌کنندگان مرکزی، حاشیه‌ای و نویز است. گام دوم تعیین ارتباط بین مصرف‌کنندگان مرکزی است. گام سوم تعیین مراکز خوشه‌ها می‌باشد و آخرین گام این فاز خوشه‌بندی با استفاده از دایره‌ی آپولونیوس است.

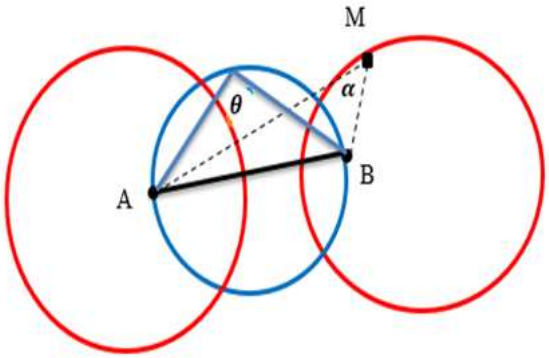
در گام اول الگوریتم برای تک‌تک نقاط داده (مصرف‌کننده)، دایره‌ای به شعاع دلخواه e رسم می‌کنیم. این شعاع قابل‌تغییر است و می‌توان با بزرگ‌تر یا کوچک‌تر کردن آن، فضای جستجو را تغییر داده و مقادیر بهینه‌ی خوشه‌ها را در هر خوشه‌بندی پیدا کرد. اندازه‌ی بهینه‌ی این دایره با توجه به شبکه و با استفاده از آزمون‌وخطا، به‌صورت شهودی به دست می‌آید. در مرحله‌ی بعدی چگالی ناحیه‌ی همسایگی برای هر دایره‌ی رسم شده را ازنظر میزان مصرف انرژی مشخص می‌کنیم.

در گام دوم الگوریتم، با توجه به بالاترین و پایین‌ترین چگالی به‌دست‌آمده، تعداد ۵ کلاس برای چگالی‌های به‌دست‌آمده مشخص می‌کنیم. در کارهای قبلی انجام‌گرفته، با توجه به ۳ نوع داده، یعنی داده‌های مرکزی، داده‌های حاشیه‌ای و داده‌های نویز، تعداد ۳ کلاس در نظر گرفته‌شده بود [۱۵]، ولی در الگوریتم پیشنهادی برای بالا بردن دقت در انتخاب چگالی داده‌ها از ۵ کلاس استفاده‌شده است. توجه داشته باشیم که با بالا بردن تعداد کلاس‌ها دقت خوشه‌بندی بالاتر و پیچیدگی محاسباتی برای انتخاب نقاط مرکزی نیز بیش‌تر می‌شود و باکم شدن تعداد کلاس‌ها دقت خوشه‌بندی پایین‌تر و پیچیدگی محاسباتی نیز کم‌تر می‌شود. محدوده‌ی (R) را برای هرکدام از این ۵ کلاس، به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$R = \left\lfloor \left(\frac{d_{s1} - d_{sn}}{5}\right) + \frac{1}{2} \right\rfloor \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، d_{s1} بالاترین چگالی موجود در بین مصرف‌کنندگان و d_{sn} پایین‌ترین چگالی موجود در بین مصرف‌کنندگان می‌باشد. بدین ترتیب محدوده‌ی ۵ کلاس باید تشکیل شود. در این خوشه‌بندی درمجموع، ۳ نوع داده (مصرف‌کننده)، داریم که داده‌های با چگالی بالا به‌عنوان داده‌ی مرکزی، داده‌های با چگالی متوسط به‌عنوان داده‌ی حاشیه‌ای و داده‌های با چگالی پایین به‌عنوان داده‌ی نویز شناخته می‌شوند. انتخاب ۳ نوع داده از بین این ۵ کلاس از مسائلی است که قابلیت انعطاف‌پذیری دارد و کاربر می‌تواند بسته به این‌که دقت هرکدام از داده‌های مرکزی، یا حاشیه‌ای و یا نویز بالا باشد، کلاس‌های متفاوتی را به‌عنوان نوع داده در نظر بگیرد. مثلاً با انتخاب کلاس اول به‌عنوان تنها داده‌های مرکزی دقت خوشه‌بندی در داده‌های مرکزی بالاتر می‌باشد و در عوض دقت این خوشه‌بندی در داده‌های حاشیه‌ای و نویز پایین‌تر می‌باشد.

در گام سوم الگوریتم، هدف ما تعیین سرخوشه‌ها از میان این داده‌های مرکزی می‌باشد. سرخوشه‌های انتخابی باید دارای فاصله‌ی اقلیدسی مشخصی از همدیگر باشند. به‌عبارت‌دیگر سرخوشه‌های انتخابی، ازنظر فاصله‌ی اقلیدسی، نباید در کنار یکدیگر باشند، هرچند چگالی بالاتری داشته باشند. برای انجام این کار از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس بهره می‌گیریم. دایره آپولونیوس مکان هندسی نقاطی از صفحه است که از دونقطه‌ی داده‌شده، نسبت فاصله‌ی معینی داشته باشد. با فرض نقاط A و B به‌عنوان دو عضو مرکزی خوشه‌ها و نقطه‌ی M به‌عنوان یک عضو نزدیک به عضو B دایره آپولونیوسی به‌صورت زیر رسم می‌شود.

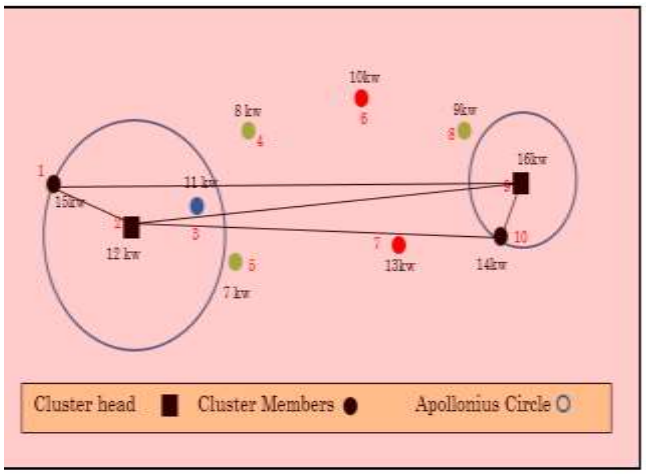


شکل ۳: دایره‌ی آپولونیوس و کمان درخور

در شکل (۳) از پارامتر k برای تعیین زاویه‌ی θ برای رسم کمان درخور و مشخص کردن فاصله بین دونقطه استفاده می‌شود. در ادامه‌ی پیاده‌سازی الگوریتم، ابتدا ماتریس فاصله‌ی تمام داده‌های مرکزی را به دست می‌آوریم. بدین ترتیب فاصله‌ی اقلیدسی تمام داده‌های مرکزی از یکدیگر مشخص می‌شود. حال در این مجموعه نقاط مرکزی، اگر دونقطه رابطه‌ی مستقیم، داشته باشند جزو نقاط نزدیک به هم و از اعضای مرکزی یک خوشه می‌باشند. در غیر این صورت اگر دونقطه رابطه‌ی غیرمستقیم داشته باشند، جزو اعضای مرکزی خوشه‌های متفاوت می‌باشند. لذا از بین نقاط پشت سرهمی که ارتباط مستقیم دارند، فقط یکی به‌عنوان سرخوشه انتخاب خواهد شد. تعیین ارتباط مستقیم و غیرمستقیم، با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس انجام می‌گیرد. در این الگوریتم برای مشخص کردن ارتباط بین دونقطه، ابتدا بین دونقطه نسبت به نزدیک‌ترین داده، دایره‌ی آپولونیوسی رسم و پارامتر k تعیین می‌گردد. سپس بین دونقطه، کمان درخوری با زاویه‌ی θ رسم می‌گردد. اندازه‌ی زاویه‌ی θ می‌تواند از طریق پارامتر k تعیین گردد، ولی برای سادگی پیاده‌سازی، در الگوریتم پیشنهادی، اندازه‌ی θ را برابر اندازه‌ی ثابت ۳۰ درجه در نظر گرفته‌ایم. البته می‌توان از زاویه‌های ثابت ۴۵ یا ۶۰ نیز استفاده کرد ولی به دلیل کم کردن ناحیه‌ی جستجو و بالا بردن دقت در جستجوی نقاط، اندازه‌ی زاویه‌ی کمان درخور را برابر اندازه‌ی ثابت ۳۰ درجه در نظر گرفته‌ایم. بر اساس اندازه‌ی پارامتر k، دونقطه‌ی موردبررسی یکی از شرایط گام چهار را خواهد داشت.

پس از مشخص شدن مکان مبدل‌های ولتاژ (MV/LV) در شبکه، در گام چهارم الگوریتم از دایره‌ی آپولونیوس برای مشخص کردن تک‌تک اعضای هر خوشه به‌صورت بهینه، استفاده می‌کنیم. در این قسمت تعدادی داده داریم که تنها مراکز آن‌ها مشخص می‌باشد و این‌که هر داده به کدام خوشه‌ی نزدیک، تعلق یابد از مسائلی است که با استفاده از دایره آپولونیوسی تعیین می‌شود. در تعریف دایره‌ی آپولونیوس، با فرض نقاط A و B به‌عنوان دو سرخوشه و نقطه‌ی M به‌عنوان یک عضو خوشه، این بار دایره آپولونیوسی برای دو سرخوشه، نسبت به داده‌ی سوم که مصرف‌کننده می‌باشد، رسم شده و پارامتر k برای هر داده، تعیین می‌شود.

در این مرحله ابتدا برای هر مرکز خوشه، ماتریس فاصله تشکیل داده و فاصله‌ی هر مرکز از تمامی مراکز خوشه را تعیین می‌کنیم. سپس برای هر دو مرکز خوشه‌ی نزدیک به هم نسبت به داده‌ی سومی که یکی از اعضای مرکزی یا حاشیه‌ای دو خوشه است، دایره‌ی آپولونیوسی را رسم و پارامتر k را تعیین می‌کنیم. برای هر داده اگر $(k>1)$ باشد، داده متعلق به خوشه‌ی A می‌باشد. در غیر این صورت اگر $(k<1)$ بود داده متعلق به خوشه‌ی B می‌باشد. درصورتی‌که $(k=1)$ باشد، داده به‌صورت تصادفی به یکی از دو خوشه تعلق می‌گیرد. شکل (۴) نمونه‌ای از عملکرد این الگوریتم برای دو خوشه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴: نحوه پیدا کردن اعضای هر خوشه با استفاده از دایره‌ی آپولونیوس

در شکل (۴) داده‌ی شماره ۱ و ۱۰ موردبررسی قرارگرفته است. برای داده‌ی شماره ۱، $(k>1)$ می‌باشد. پس داده‌ی ۱ متعلق به خوشه‌ی A می‌باشد. برای داده‌ی شماره ۱۰، $(k<1)$ می‌باشد لذا داده‌ی شماره ۱۰ متعلق به خوشه‌ی B می‌باشد. برای هر داده‌ی نویز نیز مانند نقاط حاشیه‌ای، این بررسی انجام می‌گیرد. این کار را برای تمامی جفت خوشه‌ها تکرار می‌کنیم. این خوشه‌بندی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هیچ داده‌ی بررسی نشده وجود نداشته باشد.

۳-۳- فاز دوم: تعیین محدوده‌ی ریز شبکه‌ها

این فاز نیز دارای چهار گام می‌باشد که در گام اول آن مشخص کردن شاخص برای هر ریز شبکه صورت می‌پذیرد. در گام دوم تعیین همسایگی جواب با استفاده از توابع انتقال و معکوس سازی است. در گام سوم تعیین هزینه هر محدوده با استفاده از تابع ارزیابی انجام می‌شود و در گام چهارم شبیه‌سازی سازی تبرید اعمال می‌شود.

در فاز دوم روش پیشنهادی برای بالا بردن میزان مستقل بودن و مقیاس‌پذیری شبکه و درنتیجه‌ی آن بالا بردن میزان پایداری شبکه، روشی برای اتصال بهینه‌ی ریز شبکه‌ها معرفی می‌شود. پس از خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها و مشخص‌شده ساختار هر ریز شبکه، ایستگاه‌های (MV/LV) هر ریز شبکه به نزدیک‌ترین منابع تولید پراکنده انرژی متصل می‌شود. پس هر خوشه دارای مقداری تولید انرژی می‌شود که این مقدار برای هر خوشه متفاوت است. همچنین هر ریز شبکه با توجه به تعداد مصرف‌کنندگان خود دارای مقداری مصرف انرژی می‌باشد. تلفات انرژی هر ریز شبکه، مهم‌تر و تأثیرگذارتر از تولید و مصرف انرژی، می‌باشد که کاملاً بستگی به الگوریتم خوشه‌بندی دارد که در فاز اول روش پیشنهادی اشاره‌شده است و اگر خوشه‌بندی ریز شبکه به‌صورت بهینه انجام بگیرد، میزان تلفات هر خوشه به‌شدت کاهش می‌یابد و کاهش تلفات، معادل با تولید انرژی بیشتر یا همان مصرف انرژی کم‌تر است.

با توجه به اینکه هر ریز شبکه به‌صورت مستقل عمل می‌کند، در این میان ممکن است بعضی از ریز شبکه‌ها دارای تولید انرژی بیشتری نسبت به مصرف و تلفات انرژی خودشان باشند که چنین ریز شبکه‌هایی به نام خوشه‌های قوی شناخته می‌شوند. یا برعکس آن، ممکن است خوشه‌ای دارای میزان مصرف انرژی بیشتری نسبت به تولید خود ریز شبکه باشد که با عنوان ریز شبکه‌های ضعیف شناخته می‌شوند. در این بررسی دو شبکه‌داریم که یکی از آن‌ها شبکه‌ی اصلی انرژی می‌باشد که به‌صورت سنتی و با استفاده از سوخت‌های فسیلی، انرژی خود را تأمین می‌کند. شبکه‌ی موردبررسی ما شبکه‌ای است که هوشمند است و انرژی موردنیاز خود را از طریق مولدهای پراکنده‌ی انرژی تأمین می‌کند. هدف ما در این فاز این است که شبکه‌ی هوشمند انرژی، بتواند انرژی موردنیاز خود را تا حد ممکن به‌تنهایی و بدون نیاز به شبکه اصلی و تنها با استفاده از تبادل انرژی بین ریز شبکه‌های خود تأمین کند. در شبکه‌ی هوشمند انرژی، پس از خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها، خوشه‌های ضعیف مجبورند برای تأمین نیاز انرژی مصرف‌کنندگان خود از خارج از ریز شبکه، انرژی دریافت کنند. در همین شبکه، خوشه‌هایی داریم که قوی هستند و انرژی اضافی خود را باید به‌جایی تحویل دهند، چون این انرژی زیاد موجب خرابی در ریز شبکه می‌شود. حال برای حل این مسئله‌ی بهینه‌سازی و استقلال هر چه بیشتر شبکه‌ی هوشمند، بهتر است ریز شبکه‌های قوی را به ریز شبکه‌های ضعیف وصل کنیم تا هم ریز

شبکه‌های قوی انرژی اضافی خود را تخلیه کنند و هم خوشه‌های ضعیف، کمبود انرژی خود را تأمین کنند.

۴- نتایج آزمایش‌ها

مجموعه داده‌ی مورداستفاده در شبیه‌سازی این مقاله، مطابق با استاندارد IEEE 1547-2011 می‌باشد که در کارهای گذشته [۱۵]، مورداستفاده قرارگرفته است. تعداد کل مصرف‌کنندگان[۲] در این مجموعه داده برابر ۶۶۷ مصرف‌کننده در نظر گرفته‌شده است. تعداد ایستگاه‌های مبدل ولتاژ MV/LV با توجه به الگوریتم خوشه‌بندی متفاوت می‌باشد که در الگوریتم پیشنهادی ما برابر ۴۱ ایستگاه می‌باشد. همچنین تعداد کل منابع تولید پراکنده پس از مکان‌یابی و تعیین اندازه بهینه، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، برابر ۳۴ عدد در نظر گرفته‌شده است. میزان کل بار پیش‌بینی‌شده‌ی مصرف‌کنندگان برابر ۳۷۷۸/۲ کیلووات است. ضریب بار شبکه‌ی انرژی که از تقسیم بار متوسط به بار پیک شبکه در یک‌زمان مشخص حاصل می‌شود، معادل ۰/۸ و ضریب توان شبکه، معادل ۰/۹ در نظر گرفته‌شده است. نوع ریز شبکه، شعاعی و از نوع ۳۴ با سه در نظر گرفته‌شده است. میزان مقاومت اهمی برابر ۰/۳۴۲ اهم در کیلومتر و راکتانس الکتریکی معادل ۰/۱۲۷ اهم در هر کیلومتر می‌با شد. هزینه‌ی نصب هر متر فیدر ولتاژ پایین، با توجه به نوع شبکه، معادل ۱۳/۰۹ دلار در نظر گرفته‌شده است.

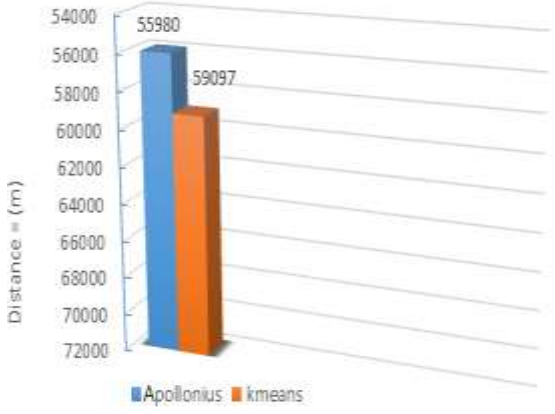
در الگوریتم‌هایی که جواب آن‌ها از طریق تکرار به دست می‌آیند، تحت شرایط مختلف جواب‌های متفاوتی حاصل می‌شوند. برای مثال نقطه‌ی شروع، در الگوریتم‌های بهینه‌سازی تأثیر فراوانی در جواب بهینه‌ی نهایی دارد؛ بنابراین در الگوریتم‌هایی که جواب آن‌ها از طریق تکرار به د ست می‌آیند نمی‌توان به‌یک‌بار اجرای الگوریتم اکتفا کرد. لذا در این مقاله جواب‌هایی که از طریق تکرار به‌د ست‌آمده می‌آیند پس از ۱۰۰ بار اجرا میانگین‌گیری می‌شوند و میانگین ۱۰۰ بار، اجرا به‌عنوان جواب نهایی این الگوریتم‌ها پذیرفته می‌شود. اندازه و نوع پارامترهای مورداستفاده در شبیه‌سازی این مقاله در جدول (۱) قابل‌مشاهده می‌باشد.

با توجه به این‌که تابع هدف ما، در بخش خو شه‌بندی ریز شبکه‌ها، کاهش تلفات انرژی می‌با شد، لذا از معیارهای فا صله، تلفات توان اکتیو ریز شبکه، تلفات توان ظاهری ریز شبکه و میزان هزینه‌های اقت صادی ریز شبکه برای مقایسه‌ی الگوریتم خوشه‌بندی دایره‌ی آپولونیوس و الگوریتم k-means در شبکه‌ی هوشمند انرژی استفاده کرده‌ایم. تمامی این معیارها با کاهش تلفات انرژی در شبکه‌ی هوشمند مرتبط می‌باشد. در ادامه به توضیح معیارهای اشاره‌شده و مقایسه‌ی الگوریتم پیشنهادی باکارهای گذشته‌ی انجام‌گرفته پرداخته‌شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، نتیجه گرفته شد که در این مجموعه داده‌ی موردمطالعه، الگوریتم پیشنهادی توان سته ا ست در حدود ۵/۳۸ در صد ازنظر معیار فا صله از الگوریتم k-means بهتر عمل کند.

با توجه به این‌که در پژوهش‌های گذشته‌ی انجام‌گرفته، تنها یک مورد پیشنهاد چارچوب، برای مستقل سازی شبکه با استفاده از خوشه‌بندی وجود دارد که در این کار، در مرحله‌ی اول، خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم k-means انجام‌گرفته و در مرحله‌ی دوم، تعیین محدوده‌های شبکه‌ی هوشمند با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت ا ستعماری انجام می شود، لذا بر ا ساس ا صول مقایسه در شرایط برابر، مقای سه‌ی روش پی شنهادی تنها با یک کار گذ شته‌ی انجام‌گرفته [۱۵]، صورت گرفته است. درروش پیشنهادی، در فاز اول چارچوب پیشنهادی، خوشه‌بندی کل شبکه‌ی هوشمند انرژی با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس انجام می‌گیرد. در فاز دوم چارچوب پیشنهادی، اتصال ریز شبکه‌ها برای تعیین بهینه‌ی محدوده‌های شبکه هوشمند با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید انجام می‌گیرد.

جدول ۱: اندازه- نوع پارامترها در شبیه‌سازی روش پیشنهادی

پارامتر	اندازه-نوع
مصرف‌کنندگان	۶۶۷
ایستگاه‌های MV/LV(بعد از خوشه‌بندی)	۴۱
منابع تولید پراکنده	۳۴
بار پیش‌بینی‌شده‌ی مصرف-کنندگان	۳۷۷۸/۲
ضریب بار	۰/۸
ضریب توان	۰/۹
ریز شبکه	شعاعی-۳۴ با سه
مقاومت اهمی	۰/۳۴۲
راکتانس الکتریکی	۰/۱۲۷
هزینه‌ی فیدر ولتاژ پایین (۱ متر)	۱۳/۰۹



شکل ۵: مقایسه عملکرد الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس و الگوریتم k-means ازنظر معیار فاصله

تلفات توان اکتیو، یکی از اهدافی اســت که با کاهش فاصــله در سیستم توزیع انرژی رابطه‌ی مستقیمی دارد. تلفات توان اکتیو شبکه با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$P_a = \sum RI^2 \qquad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، P_a، نشانگر میزان تلفات توان اکتیو شبکه می‌باشد. در این رابطه، R برابر مقاومت سطح موردبرر سی و I برابر شدت‌جریان عبوری از سـیم می‌باشـد. همچنین Rبرابر مقاومت سـطح مقطع سـیم است که بسته به جنس سیم به‌کاربرده شده متفاوت است و منظور از L، طول سیم می‌باشد. با توجه به این‌که سطح مقطع سیم، ثابت است بدیهی است که با کاهش L میزان R شبکه نیز کاهش می‌یابد و کاهش R، بیانگر کاهش میزان تلفات توان اکتیو شـبکه می‌باشـد. نتایج عددی به‌دســت‌آمده برای تلفات توان اکتیو شــبکه، با اســتفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس و الگوریتم k-means، در جدول (۲)، قابل‌مشــاهده می‌باشد.

جدول ۲: نتایج عددی تلفات توان اکتیو شبکه موردمطالعه با استفاده از الگوریتم دایره آپولونیوس و الگوریتم k-means

میزان تلفات توان اکتیو (کیلووات ساعت)	الگوریتم
۲۱۸/۸۸	دایره آپولونیوس
۲۳۱/۲۸	k-means

معیار مهم بعدی که موردبررسـی قرارگرفته اسـت محاسـبه میزان تلفات توان ظاهری شـبکه می‌باشـد. میزان تلفات توان ظاهری شـبکه، برابر با مجموع مربعات توان اکتیو و راکتیو شبکه می‌باشد و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$P_s = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sum ZI^2 = \sum \left(R + JX\right) I^2 \qquad (۳)$$

در رابطه‌ی (۳)، منظور ازP_s، تلفات توان ظاهری شبکه می‌باشد. در این رابطه، Z به‌عنوان امپدانس الکتریکی شبکه، I به‌عنوان شدت‌جریان الکتریکی شــبکه، R به‌عنوان مقاومت الکتریکی شــبکه، $J=\sqrt{-1}$ و X به‌عنوان راکتانس الکتریکی، برحسـب اهم در نظر گرفته‌شـده اسـت. با توجه به نمایی بودن این تابع در صورت افزایش فاصله در خوشه، میزان تلفات به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. برای محاسبه میزان جریان در هر شاخه نیز از رابطه‌ی زیر استفاده‌شده است.

$$P = VI\cos\varphi \quad ; \quad I = \frac{P}{V\cos\varphi} \qquad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)، P برابر توان مصــرفی مصــرف‌کننده، V برابر ولتاژ شبکه، $\cos\varphi$ برابر ضریب توان شبکه و I برابر شدت‌جریان الکتریکی می‌باشـد. اندازه‌ی P، برای هر مصـرف‌کننده مشـخص اسـت و اندازه‌ی ولتاژ، نیز با توجه به اســتاندارد IEEE1547-2011 برای شــبکه‌ی موردمطالعه برابر ۲۶ کیلوولت در نظر گرفته‌شــده اســت. نتایج عددی به‌دست‌آمده برای معیار تلفات توان ظاهری، در شبکه‌ی موردمطالعه، با اســتفاده از الگوریتم پیشــنهادی و الگوریتم k-means در جدول (۳)، قابل‌مشاهده می‌باشد.

جدول ۳: نتایج عددی تلفات توان ظاهری شبکه موردبررسی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم k-means

میزان تلفات توان ظاهری (کیلووات)	الگوریتم
۲۰۷/۷۳	دایره آپولونیوس
۲۴۴/۵۴	k-means

معیار بعدی که در این مقاله موردبررســی قرارگرفته اســت میزان هزینه‌ی اقتصادی شبکه می‌باشد. در این پژوهش، هزینه‌ی اقتصادی کل شبکه را در قالب میزان هزینه کل سالیانه موردبررسی قرار داده‌ایم و از رابطه‌ی زیر برای محاسبه میزان هزینه استفاده کرده‌ایم.

$$Cost\ (total) = Cost\ (loss) + Cost\ (LV\ Feeder) \qquad (۵)$$

در رابطه‌ی (۵)، Cost (total) برابر میزان هزینه‌ی کل ســالیانه‌ی شبکه‌ی هوشمند انرژی می‌باشد که از مجموع هزینه‌های تلفات انرژی شــبکه Cost (loss) و هزینه‌های ســرمایه‌گذاری اولیه‌ی فیدرهای ولتاژ پایین شبکه Cost (LV Feeder) به دست می‌آید. تلفات انرژی شبکه موردبررسی قرارگرفته است و هزینه‌های این تلفات انرژی Cost (loss) برابر هزینه‌ی اقتصادی می‌باشد که برای تولید مقدار تلفات انرژی نیاز است. Cost (loss) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$Cost\ (loss) = Cost(P_s) \qquad (۶)$$

هزینه‌ی ســرمایه‌گذاری اولیه فیدرهای ولتاژ پایین شــبکه برابر حاصل ضرب هزینه‌ی احداث یک متر فیدر ولتاژ پایین شبکه و میزان طول کل شبکه می‌باشد.

$$Cost\ (LV\ Feeder) = Cost\ (1\ meter\ LV\ Feeder) * Distance(grid) \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، Cost (LV Feeder) برابر هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه‌ی فیدرهای ولتاژ پایین شبکه می‌باشد. Cost (1 meter LV Feeder) هزینه‌ی احداث ۱ متر فیدر می‌باشد که در این پژوهش با توجه به نوع شبکه، برابر ۱۳/۰۹ دلار در نظر گرفته‌شده است. Distance (grid) برابر فاصله‌ی مصرف‌کنندگان تا ایستگاه‌های MV/LV در هر شبکه می‌باشد که در الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس برابر ۵۵۹۸۰ متر و در الگوریتم k-means برابر ۵۹۰۹۷ متر می‌باشد. نتایج عددی به‌دست‌آمده برای معیار هزینه کل سالیانه، در شبکه موردمطالعه، با استفاده از دو الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس و k-means به‌صورت جدول (۴)، می‌باشد. جدول (۵)

مقایسه الگوریتم دایره آپولونیوس با الگوریتم k-means، ازنظر معیارهای مختلف را موردبررسی قرار می‌دهد. مدت‌زمان لازم برای همگرایی الگوریتم پیشنهادی برابر ۲۴ ثانیه هست.

جدول ۴: مقایسه معیار هزینه کل سالیانه با استفاده از دو الگوریتم k-means و دایره آپولونیوس در شبکه موردمطالعه

میزان بهبود	الگوریتم دایره آپولونیوس	الگوریتم k-means	
۲۹۸۸۵۱۸/۵۹ دلار	۱۶۸۶۵۰۵۰/۸۶ دلار	۱۹۸۵۳۵۶۹/۴۵ دلار	هزینه تلفات انرژی سالیانه
۴۰۸۰۱/۵۳ دلار	۷۳۲۷۷۸/۲۰ دلار	۷۷۳۵۷۹/۷۳ دلار	هزینه نصب فیدر ولتاژ پایین
۳۰۲۹۳۱۹/۲۸ دلار	۱۷۵۹۷۸۲۹/۰۶ دلار	۲۰۶۲۷۱۴۹/۱۸ دلار	هزینه کل سالیانه

جدول ۵: مقایسه عملکرد دو الگوریتم ازنظر تمامی معیارهای در نظر گرفته‌شده

درصد بهبود	میزان بهبود	الگوریتم دایره آپولونیوس	الگوریتم k-means (۱۰۰ تکرار)	
۵/۳۸	۳۱۱۷ متر	۵۵۹۸۰ متر	۵۹۰۹۷ متر	فاصله
۵/۳۸	۱۲/۴ کیلووات	۲۱۸/۸۸ کیلووات	۲۳۱/۲۸ کیلووات	تلفات توان اکتیو
۱۵/۱۶	۳۶/۸۱ کیلووات	۲۰۷/۷۳ کیلووات	۲۴۴/۵۴ کیلووات	تلفات توان ظاهری
۱۵/۱۶	۲۹۸۸۵۱۸/۵۹ دلار	۱۶۸۶۵۰۶۰/۸۶ دلار	۱۹۸۵۳۵۶۹/۴۵ دلار	هزینه تلفات انرژی سالیانه
۵/۳۸	۴۰۸۰۱/۵۳ دلار	۷۳۲۷۷۸/۲۰ دلار	۷۷۳۵۷۹/۷۳- دلار	هزینه نصب فیدر ولتاژ پایین
۱۴/۷۹	۳۰۲۹۳۱۹/۲۸ دلار	۱۷۵۹۷۸۲۹/۰۶ دلار	۲۰۶۲۷۱۴۹/۱۸ دلار	هزینه کل سالیانه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بهبود میزان کاهش تلفات انرژی در شبکه‌های هوشمند انرژی پیشنهاد چارچوبی برای خوشه‌بندی بهینه ریز شبکه‌ها ارائه‌شده است. این چارچوب از دو بخش اصلی تشکیل‌شده است. در فاز اول چارچوب پیشنهادی خوشه‌بندی ریز شبکه‌ها در شبکه‌های هوشمند انرژی با استفاده از الگوریتم دایره‌ی آپولونیوس مطرح‌شده است که برای ارزیابی میزان کارایی الگوریتم پیشنهادی مقایسه‌ای بین این الگوریتم و کارهای گذشته که با استفاده از الگوریتم k-means پیاده‌سازی شده بود، انجام گرفت. در این مقایسه مشخص شد که در بخش خوشه‌بندی، الگوریتم دایره آپولونیوس ۵/۳۸ درصد ازنظر معیار فاصله، ۵/۳۸ درصد ازنظر معیار تلفات توان اکتیو، ۱۵/۱۶ درصد ازنظر معیار تلفات توان ظاهری و ۱۴/۷۹ درصد ازنظر معیار هزینه کل سالیانه، بهتر از الگوریتم k-means عمل می‌کند. در فاز دوم مقاله پس از انجام خوشه‌بندی، برای بهینه‌سازی میزان تلفات انرژی پیشنهاد اتصال ریز شبکه‌های با میزان انرژی پایین به سایر ریز شبکه‌ها برای جبران کمبود انرژی با استفاده از الگوریتم هوش مصنوعی شبیه‌سازی تبرید مطرح شد. برای ارزیابی کارایی این الگوریتم نیز، مقایسه‌ای بین الگوریتم پیشنهادی با سایر کارهای قبلی که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری پیاده‌سازی شده بود، انجام شد و نتیجه گرفته شد که الگوریتم پیشنهادی میزان تلفات انرژی در ریز شبکه‌ها را به مقدار ۲۶/۵۴ کیلووات نسبت به الگوریتم رقابت استعماری، کاهش داده است.

کارهای آتی

۱) در آینده می‌توان از سایر الگوریتم‌های مبتنی بر هندسه و گراف همانند گراف گابریل یا گراف نزدیک‌ترین همسایه برای خوشه‌بندی استفاده نمود.

۲) از الگوریتم‌های همانند جنگل و الگوریتم ژنتیک برای بهینه-سازی میزان تلفات انرژی می‌توان بهره برد.

۳) اضافه کردن قابلیت اطمینان به‌عنوان تابع هدف و مدل‌سازی انرژی تأمین نشده و هزینه خاموشی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها می‌تواند به‌عنوان کار تکمیلی انجام گردد.

مراجع

[1] Vehbi C. Güngör, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergüt, Concettina Buccella, Carlo Cecati and Gerhard P. Hancke, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards", IEEE Transaction on indastrial informatics, vol. 7, no. 4, november 2011.

[2] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future, IEEE Power Energy Mag", vol. 7, no. 2, pp. 52–62, Mar.–Apr. 2009.

[3] Ban Al-Omar, A. R. Al-Ali, Rana Ahmed, and Taha Landolsi, "Role of Information and Comunication Technologies in the Smart Grid", Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, vol. 3, no. 5, May 2012.

[4] D. Q. Hung and N. Mithulananthan, "Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction", IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 60, no. 4, pp.1700-1708, April 2013.

[5] M. H. Moradi and M. Aedini, "A Combination of genetic algorithm and partical swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution system", Int. J. Electr. Power Energy Syst. vol. 34, no. 1, pp. 66-74, Jan. 2012.

[6] V. Jagan Mohan and T. Arul Dass Alber, "Optimal sizing and sitting of distributed generation using Particle Swarm Optimization Guided Genetic".

[7] Algorithm, Advances in Computational Sciences and Technology ISSN 0973-6107 Volume 10, Number 5, pp. 709-720, 2017.

[8] M. Kefayat, A. Lashkar Ara, S.A. Nabavi Niaki , "A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources". Energy Conversion and Management 92, 149-161, 2015.

[9] Ashish K Peter, "Modified Shuffled Frog-Leaping Algorithm Based Determination of Optimal Size and Location of Distributed Generation in Radial Distribution System", IJEDR | Volume 5, Issue 3 | ISSN: 2321-9939, 2017.

[10] Arash Lotfipour, Hossein Afrakhte, "A discrete Teaching–Learning-Based Optimization algorithm to solve distribution system reconfiguration in presence of distributed generation", Electrical Power and Energy Systems 82, 264–273, 2016.

[11] Zhu JZ. "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm. Electric" Power Syst Res;62(1):37–42, 2002.

[12] Seyed Abbas Taher, Mohammad Hossein Karimi, "Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems", Ain Shams Engineering Journal 5, 735–749, 2014.

[13] Sarvapali D. Ramchurn, Perukrishnen Vytelingum, Alex Rogers, and Nick Jennings, "Agent-Based Control for Decentralised Demand Side Management in the Smart Grid", May, 2–6, Taipei, Taiwan, pp. 5-12, 2011.

[14] A.A. Aquino and T.J. Overbye, "Distributed Intelligent Agents for Service Restoration and Control Applications", IEEE 40 North American Power Symposium, September 2008.

[15] S. Mojtahedzadeh, S. Najafi Ravadanegh, M. R. Haghifan, "A framework for optimal clustering of a greenfield distribution network area into multiple autonomous microgrids", Journal of Power Technologies 96 (4), 219–228, 2016.

[16] Mahmoud S. Saleh, Ammar Althaibani, YusefEsa, Yassine Mhandi, Ahmed A. Mohamed, "Impact of Clustering Microgrids on Their Stability and Resilience during Blackouts", International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), 15935984, Offenburg, Germany, 20-23 Oct. 2015.

[17] Mohammad Abedinia, Mohammad H. Moradi, S.M. Hosseinian, "Optimal clustering of MGs based on droop controller for improving reliability using a hybrid of harmony search and genetic algorithms", ISA. Published by Elsevier Ltd., 2015.

[18] N. Rugthaicharoencheep, and S. Sirisumrannukul, Feeder Reconfiguration with Dispatchable Distributed Generators in Distribution System by Tabu Search, ieeexplore.ieee.org, 2009.

[19] S. A. Arefifar and Y. A. I. Mohamed, "DG Mix, Reactive Sources and Energy Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1835-1844, July 2014.

[20] S. A. Arefifar, Y. A. -. I. Mohamed and T. H. M. EL-Fouly, "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1567-1575, Sept. 2013.

[21] Ramadoni Syahputr, Rama Okta Wiyagi, Slamet Suripto, Agus Jamal,Karisma Trinanda Putra, Faaris Mujaahid, "A Novel Fuzzy Approach for Multi-objective Optimization of Distribution Network Configuration in Complex System", International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973 -4562 Volume 13, Number 2, pp. 1120-1127, 2018.

[22] Melike Erol-Kantarci, Burak Kantarci, Hussein T. Mouftah, "Cost-Aware Smart Microgrid Network Design for a Sustainable Smart Grid", IEEE International Workshop on Smart Grid Communications and Networks, 2011 IEEE.

[23] C.A. Cortes, S. F. Contreras, and M. Shahidehpour, "Microgrid Topology Planning for Enhancing the Reliability of Active Distribution Networks", 1949-3053 (c) 2016 IEEE.

[24] Seyed Ali Arefifar, Yasser A.-R. I. Mohamed,and Tarek H. M. EL-Fouly, "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security", 1949-3053 © 2013.

[25] Melike Erol-Kantarci, Burak Kantarci, and Hussein T. Mouftah, University of Ottawa, "Reliable Overlay Topology Design for the Smart Microgrid Network", IEEE Network • September/October 2011.

[26] Majid Nayeripoura, Saeed Hasanvand, Eberhard Waffenschmidt, Hossein Fallahzadeh-Abarghouei, "A New Approach to Transform an Existing Distribution Network into a set of Micro-Grids for Enhancing Reliability and Sustainability", S1568-4946(16)30631-7, ASOC 3952, 4-12-2016.

[27] Sandeep Kaur, G. B. Kumbhar, Jaydev Sharma, "Harmony Search and OPF Based Hybrid Approach for Optimal Placement of Multiple DG Units", 978-1-4799-5141-3/14/$31.00 ©2014 IEEE.

[28] Y. Mohamed Shuaib, M. Surya Kalavathi, C. Christober Asir Rajan, "Optimal capacitor placement in radial distribution system using Gravitational Search Algorithm", Elsevier Ltd, 2014.

[۲۹] سعید عباسپور، کاظم زارع و بهنام محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه .» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴ ،شماره ۴ ،صفحات ۳۵-۴۵، ۱۳۹۳ .

[۳۰] حسین کرمی پرزانی، بهروز ذاکر، میالد نصیری و هادی طاریمرادی، « مکان یابی بهینه DSTATCOMها و DGها به‌منظورکاهش تلفات و افزایش قابلیت بارپذیری .» مجله مهندسی برق دانشگاه، جلد ۴۷ ، شماره ۱، صفحات ۳۸-۲۹، ۱۳۹۶.

[31] S. Pourbahrami, L. M. Khanli, and S. Azimpour, "A novel and efficient data point neighborhood construction algorithm based on Apollonius circle," *Expert Systems with Applications,* vol. 115, pp. 57-67, 2019.

[32] https://www.civilica.com/Paper-DCBDP03-DCBDP03_099.html/.3rd National Conference on Distributed Computing and Big Data Processing, Nov 12, 2016.

[33] T. Logenthiran, Dipti Srinivasan and Ashwin M Khambadkone, "Multi-Agent System for Energy Resource Scheduling of Integrated Microgrids in Distributed System", National University of Singapore, 4 Engineering Drive 3, Singapore 117576, Electric Power Systems– Elsevier, 2011.

[34] Dr.gassabi, m.abuie, m.gahremanimanesh, "Statistical identification of the clustering pattern", spring 2014.

[35] Pranav Nerurkar, Archana Shirke, Madhav Chandane, Sunil Bhirud, "Empirical Analysis of Data Clustering Algorithms", Procedia Computer Science 125, 770–779, 2018.

M.nabilu, N.daneshpour, "Provide a clustering algorithm for batch data by combining metrics", soft computing journal, spring 2016.