Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 9, Number 3, Fall 2020, pp. 229-243
Received: 11/10/2019, Revised: 05/26/2020, Accepted: 07/25/2020

A Distributed Fuzzy-based Clustering Scheme to Optimize Energy Consumption and Data Transmission in Wireless Sensor Networks

Mohammad Alaei*, Fahimeh Yazdanpanah
Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
*alaeim@vru.ac.ir, yazdanpanahf@vru.ac.ir

Corresponding author address: Mohammad Alaei, Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Imam Khomeini Square, Rafsanjan, Iran.

Abstract: Due to importance of energy conservation in wireless sensor networks, clustering algorithms and then cluster-based routing schemes are widely designed and utilized in this kind of network. To collect data in the base station, each sensor node sends the sensed data toward the cluster head via single or multi hops. Multi-hop data transmission in the clusters yields unbalanced load of the cluster members. The nodes around the cluster heads have to forward all the received packets from the cluster area; thus, the rate of energy consumption of cluster members is unbalanced. Accordingly, the lifetime of network is shortened by dying the high load nodes. In this paper, a distributed fuzzy-based clustering scheme is proposed to optimize energy consumption and data transmission of wireless sensor networks. In the proposed scheme, the remaining energy and degree of the nodes, transfer time of packets, the hops to the base station, average distance to neighboring nodes and residual energy of the neighboring nodes are considered as the criteria for cluster head selection. Each node calculates its probability of becoming cluster head via a distributed fuzzy inference system. The evaluations show DEEFCA compared to EEDCF, DFLC and EADEEG schemes, enhances network lifetime respectively by 12.8%, 21.5% and 25.8%, also, the amount of data transferred by the network is increased by 19.7%, 71% and 167%.

Keywords: Wireless sensor networks, Clustering, Fuzzy logic, Energy conservation, Data transfer.

مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۹، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۹ ، صفحه ۲۲۹-۲۴۳
دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

یک روش خوشه‌بندی توزیع‌شده مبتنی بر منطق فازی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و انتقال‌داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

محمد علائی*، فهیمه یزدان‌پناه
گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
*alaeim@vru.ac.ir, yazdanpanahf@vru.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: محمد علائی، رفسنجان، میدان امام خمینی، دانشگاه ولی‌عصر (عج)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر

چکیده- بنا به اهمیت بالای بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، الگوریتم‌های خوشه‌بندی و سپس مسیریابی خوشه‌ای به‌طور گسترده‌ای در این شبکه‌ها طراحی و استفاده می‌شوند. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات در ایستگاه پایه، هر گره حسگر، داده‌ها را به سرخوشه‌ای که به آن تعلق دارد با ارتباط یک یا چندگامی، انتقال می‌دهد. ارتباط چندگامی در خوشه، مسأله عدم تعادل بار و درنتیجه، مصرف انرژی زیاد گره‌های میانی را که نزدیک به سرخوشه می‌باشند، دربردارد. انرژی این گره‌ها سریع‌تر از گره‌های دورتر مصرف می‌شود و درنتیجه، این موضوع، موجب مرگ زودهنگام این گره‌ها و نیز، کاهش طول‌عمر شبکه می‌گردد. در این مقاله، الگوریتمی توزیع‌شده برای خوشه‌بندی با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود. در انتخاب سرخوشه‌ها در روش پیشنهادی که DEEFCA نامیده می‌شود، انرژی و درجه گره مورد بررسی و انرژی باقیمانده گره‌های همسایه آن گره، فاصله بین سرخوشه‌های انتخابی، مدت زمان ارسال بسته و تعداد گام‌ها از گره مورد بررسی تا ایستگاه پایه و پراکندگی، به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. در این الگوریتم، هر گره احتمال سرخوشه شدن خود را با استفاده از سیستم استنتاج فازی به شیوه‌ای توزیع‌شده محاسبه می‌کند. نتایج حاصل و ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که DEEFCA در مقایسه با روش‌های مشابه EEDCF، DFLC و EADEEG طول‌عمر شبکه (با در نظر گرفتن زمان مردن نیمی از گره‌ها) را به‌ترتیب، به‌میزان ٪۱۲/۸، ٪۲۱/۵ و ٪۲۵/۸ بهبود می‌بخشد و نیز، مقدار انتقال‌داده در شبکه به میزان ٪۱۹/۷، ٪۷۱ و ٪۱۶۷ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، خوشه‌بندی، منطق فازی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، انتقال‌داده.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توسعه ارتباطات بی‌سیم و فرکانس رادیویی کم‌مصرف که به‌طور گسترده‌ای در گره‌های حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌دلیل استفاده گسترده از آن‌ها در نظارت بر محیط، حمل‌ونقل، رهایی از حادثه و امنیت داخلی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این شبکه‌ها از تعداد زیادی گره‌های حسگر تشکیل شده‌اند که به جمع‌آوری داده‌ها و ارسال آن‌ها می‌پردازند. گره‌ها از واحدهای پردازش، ارسال و دریافت، حافظه و منبع تغذیه تشکیل می‌شوند. منبع تغذیه یک باتری با میزان محدودی انرژی می‌باشد. بنابراین، در این شبکه‌ها مصرف انرژی سیاست‌های صرفه‌جویانه زیادی را همراه خود دارد. برای افزایش طول‌عمر شبکه نیاز به تدابیری داریم که با حفظ کارایی، مصرف انرژی را بهینه سازند. خوشه‌بندی یکی از تکنیک‌های بارز در این راستا می‌باشد. در این تکنیک، روش انتخاب سرخوشه و سپس روش مسیریابی شبکه بر اساس خوشه‌های تشکیل‌شده، در رسیدن به هدف نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند [۱-۴].

در مسیریابی خوشه‌ای، گره‌های سرخوشه انرژی بیشتری نسبت به بقیه گره‌ها مصرف می‌کنند. در طول ارتباطات چندگامی درون

خوشه‌ای، گره‌هایی که نزدیک به سرخوشه هستند، مجبورند وظایف بیشتری از قبیل دریافت داده‌ها و ارسال به سرخوشه را نسبت به گره‌های دورتر بر عهده داشته باشند، که منجر به مصرف انرژی بیشتری می‌شود. درنتیجه، عمر گره‌های همسایه سرخوشه نسبت به گره‌های دیگر کاهش می‌یابد. مرگ زودهنگام این گره‌ها، انتقال داده‌ها به سرخوشه‌ها را مختل می‌کند [۴-۶].

هنگام طراحی الگوریتم‌های خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر، معیارهای زیادی مانند انرژی گره، درجه گره و وضعیت انرژی گره‌های همسایه اطراف آن به‌صورت لحظه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب سرخوشه مناسب تأثیر زیادی بر پایداری شبکه‌های خوشه‌ای می‌گذارد. یک سیستم بر اساس منطق فازی می‌تواند یک راه‌حل مناسب برای این نوع مسائل چندمعیاری مانند انتخاب سرخوشه‌ها ارائه دهد. به عبارت دیگر، سیستم منطق فازی می‌تواند معیارهای گوناگون انتخاب سرخوشه‌ها را در کنار هم به‌کار گیرد. برای غلبه بر برخی ضعف‌ها مانند عدم صحت در هنگام مدل‌سازی برخی از سیستم‌های پیچیده و با ابعاد بزرگ، امروزه، به‌طور گسترده‌ای از بخش‌های فازی توزیع‌شده به‌جای روش‌های مرکزی در شبکه‌های کلاسیک استفاده می‌گردد [۷و۶].

در این مقاله، یک الگوریتم خوشه‌بندی توزیع‌شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با هدف‌های: الف) بهینه‌سازی طول‌عمر از طریق کاهش مصرف انرژی و نیز، متوازن‌سازی سطح انرژی در گره‌ها و ب) افزایش میزان انتقال‌داده در طول‌عمر شبکه، پیشنهاد می‌شود. به این منظور، در روش پیشنهادی که DEEFCA[1] نامیده می‌شود، به‌عنوان اولین سهم پژوهش، در رویه انتخاب سرخوشه‌ها، برای دخیل نمودن همه خصوصیات و ابعاد کاری گره‌ها و درنتیجه، انتخابی بهینه، پارامترهای همه‌جانبه و گوناگونی از هر گره به‌کار گرفته می‌شوند. این پارامترها عبارتند از انرژی باقیمانده گره، درجه گره، متوسط انرژی باقیمانده گره‌های همسایه‌ی گره، فاصله بین سرخوشه‌ها، مدت زمان ارسال بسته و تعداد گام‌ها از گره تا ایستگاه پایه[2] و پراکندگی. لذا، با به‌کارگیری و بررسی پارامترهای همه‌جانبه ورودی، برای تعیین گره‌های سرخوشه، موضوع انتخاب گره‌های مناسب به‌عنوان سرخوشه، با در نظر گرفتن جنبه‌های تعیین‌کننده بیشتری برای هر گره، بهینه‌سازی می‌شود.

انتخاب سرخوشه‌های مناسب‌تر توسط روش پیشنهادی، موجب توزیع متعادل بار کاری در خوشه‌ها و شبکه و درنتیجه، موجب بهبود و تعادل مصرف انرژی در گره‌ها می‌گردد. از طرفی، تعداد زیاد پارامترهای ورودی در سیستم‌های فازی، تعداد حالات زیادی در آن‌ها را در پی خواهد داشت؛ روش پیشنهادی، به‌عنوان دومین سهم پژوهش، با وجود تعداد زیاد پارامترهای ورودی، تعداد حالات فازی و نیز، سربار سیستم استنتاج فازی را کاهش می‌دهد. برای نیل به این مقصود، در این روش، خروجی فازی در دو مرحله، توسط سه مدول محاسبه امتیاز، محاسبه جریمه و محاسبه شانس تولید می‌شود؛ ابتدا، سیستم فازی به‌طور همزمان امتیاز و جریمه را تعیین می‌کند. سپس، خروجی نهایی سیستم فازی (شانس) بر اساس امتیاز، جریمه و انرژی باقیمانده گره مورد بررسی، مشخص می‌شود. امتیاز گره بر اساس پارامترهای فاصله بین سرخوشه‌ها، درجه گره و متوسط انرژی باقیمانده گره‌های همسایه‌ی آن گره تعیین می‌شود. جریمه گره بر اساس مدت زمان ارسال بسته، تعداد گام‌ها از گره تا ایستگاه پایه و پراکندگی مشخص می‌شود. در روش پیشنهادی، انرژی باقیمانده هر گره تأثیرگذارترین پارامتر در انتخاب سرخوشه می‌باشد.

ادامه مقاله به این صورت ساماندهی شده است: در بخش ۲ کارهای مرتبط و الگوریتم‌های مشابه مرور می‌شوند. روش پیشنهادی با جزئیات در بخش ۳ شرح داده می‌شود. بخش ۴ به ارائه نتایج پیاده‌سازی، انجام مقایسه و ارزیابی روش پیشنهادی می‌پردازد و در نهایت، در بخش ۵، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- کارهای مرتبط

در [۸]، نویسندگان یک روش مسیریابی آگاه از کیفیت سرویس به نام EQGR ارائه نموده‌اند. این روش با ایجاد توازن در بار کاری و نیز، تشکیل دو جدول برای اطلاعات مسیریابی همسایگان و تعریف اولویت برای داده‌های مختلف، تأخیر را کاهش و طول‌عمر شبکه را بهبود می‌دهد. در هر گره، یک زمانبند صف سه‌سطحی برای سرویس‌دهی به بسته‌های داده، استفاده می‌گردد. علاوه‌براین، حسب قابلیت اطمینان، از ارسال مجدد بسته‌ها در چند مسیر استفاده می‌شود. ازاین‌رو، قابلیت اطمینان در دریافت داده‌ها افزایش می‌یابد. برای انتخاب گره‌های میانی، این روش معیارهای انرژی باقیمانده، میزان بافر اشغال‌شده، کیفیت ارتباط و انرژی مورد نیاز برای ارسال بسته را در نظر می‌گیرد. پروتکل آگاه از انرژی جمع‌آوری داده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم (EADEEG[3]) ارائه‌شده در [۹]، روشی توزیع‌شده برای خوشه‌بندی و جمع‌آوری داده ارائه می‌دهد. این الگوریتم، انرژی هر گره و گره‌های همسایه آن را در انتخاب سرخوشه در نظر می‌گیرد. این روش می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و لذا، طول‌عمر شبکه‌ها را بهبود دهد. بااین‌حال، این روش وضعیت چگالی گره‌ها را نادیده می‌گیرد که ممکن است به مشکلاتی از قبیل چندپارگی در شبکه‌ها منجر شود. یک پروتکل خوشه‌بندی و مسیریابی

چندگامی بر اساس بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسأله نقطه کانونی به نام PUDCRP در [۱۰] ارائه شده است. در این پروتکل، توزیع خوشه‌ها به‌منظور ایجاد توازن در انرژی مصرفی و افزایش طول‌عمر شبکه، به‌طور پویا با مردن گره‌ها تغییر می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین ناحیه‌هایی که سرخوشه‌ها در آن‌ها واقع هستند، به‌کار گرفته می‌شود. پروتکل FRRP در [۱۱] یک روش مسیریابی بر اساس منطق فازی است که برای شبکه‌های موردی متحرک پیشنهاد شده است. در این پروتکل، امتیاز اختصاص داده‌شده به هر مسیر، بر حسب چهار معیار پهنای باند در دسترس، مقدار انرژی باقیمانده، تعداد گام‌ها و درجه تحرک گره‌ها محاسبه می‌گردد. گره‌های شبکه به‌عنوان عامل‌هایی هوشمند در نظر گرفته می‌شوند که مسؤول مسیریابی پویا و انتقال‌داده می‌باشند. بهینه‌سازی مصرف منابع شبکه و کاهش هزینه‌های سربار، موجب ارتقای کارایی در این روش شده‌اند.

الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر منطق فازی توزیع‌شده (DFLC[4]) ارائه‌شده در [۱۲] نیز یک الگوریتم خوشه‌بندی توزیع‌شده با استفاده از رویکرد فازی برای شبکه‌های حسگر می‌باشد. این الگوریتم، مکانیسمی شبیه به فیلتر ایجاد می‌کند و تعداد بسته‌های داده غیرضروری را کاهش می‌دهد. در این الگوریتم، انرژی باقیمانده گره، فاصله از ایستگاه پایه و تراکم گره‌ها به‌عنوان پارامترهای ورودی روش فازی به‌کار می‌روند. این روش، مشکل نقاط کانونی[5] در ارتباطات چندگامی را نادیده می‌گیرد که این موضوع باعث عدم تعادل بار کاری و منجر به مرگ زودهنگام گره‌های میانی شود. علاوه‌براین، در نظر گرفتن فاصله فیزیکی بین گره‌ها و ایستگاه پایه در شبکه‌های پویا به‌عنوان یک پارامتر، انتخاب کاملاً مناسبی نیست، زیرا، مکان گره‌ها در شبکه‌های پویا، غیرقطعی است. ضمناً، در صورتی‌که تمام گره‌ها برای به دست آوردن فاصله جاری خود تا ایستگاه پایه مجبور به برقراری ارتباط با ایستگاه پایه در هر دور باشند، انرژی قابل ملاحظه‌ای از شبکه صرف خواهد شد.

روش پیشنهادشده در [۱۳]، (EEDCF[6])، خوشه‌بندی گره‌ها با توزیع غیریکنواخت را به روش فازی اجرا می‌کند. در این روش، سرخوشه‌ها بر اساس تعداد همسایه‌ها، میزان انرژی باقیمانده گره مورد بررسی و نیز، مجموع انرژی گره‌های همسایه با اعمال قوانین فازی تعیین می‌شوند. نویسندگان در این مقاله، با استفاده از مدل استنتاج TSK، سعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه دارند. به‌طور مشابه، روش ارائه‌شده در [۱۴] که FL-EEC/D نامیده شده است انتخاب سرخوشه را براساس منطق فازی با هدف توزیع متعادل بار و کاهش مصرف انرژی در الگوریتم‌های مسیریابی سلسله مراتبی انجام می‌دهد. روش مذکور در بالا بردن کارایی مصرف انرژی مسیریابی‌های با ساختار سلسله مراتبی مفید می‌باشد اما در بقیه روش‌های مسیریابی کارایی چندانی از خود نشان نمی‌دهد.

در [۱۵] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، یک روش مسیریابی آگاه از انرژی بر اساس خوشه‌بندی با نام COARP پیشنهاد شده است. در این روش، چهار معیار برای انتخاب بهترین سرخوشه‌ها در هر دور کاری در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از: انرژی باقیمانده گره‌ها، فاصله تا ایستگاه پایه، فاصله‌های درون خوشه‌ای و فاصله‌های بین خوشه‌ای. این روش، بهینه‌سازی مصرف انرژی و نرخ تحویل داده را دنبال می‌کند.

در [۱۶]، نویسندگان یک الگوریتم خوشه‌بندی با استفاده از ابزار فازی C-Means را برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد داده‌اند. سرخوشه بر اساس موقعیت حسگر در هر خوشه انتخاب می‌شود، محل آن با توجه به مرکز ادغام (FC)، نسبت سیگنال به نویز (SNR) و انرژی باقیمانده آن تعیین می‌شود. در [۱۷]، نویسندگان از C-Means برای خوشه‌بندی شبکه در جهت کاهش خطای کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌های دور استفاده کرده و دقت مکان‌یابی را برای شبکه‌های نامنظم شناختی بهبود داده‌اند. اگرچه استفاده از C-Means می‌تواند نتایج منطقی‌تری در تجزیه و تحلیل فازی به دست دهد، گره‌ها در طول هر انتخاب سرخوشه با این روش انرژی بیشتری مصرف می‌کنند.

نویسندگان در [۱۸]، پروتکل مسیریابی آگاه از فاصله و انرژی FLDEAR را معرفی نموده‌اند. این پروتکل تعداد تکرار پیام‌ها را کاهش می‌دهد و درنتیجه، سربار انتقال‌داده را کاهش می‌دهد. در این پروتکل، از دو سیستم استنتاج فازی در مدیریت مسیریابی و بافر استفاده می‌شود. ازاین‌رو، این روش نرخ تحویل داده را افزایش و میزان تأخیر در تحویل داده را کاهش می‌دهد.

خوشه‌بندی توزیع‌شده غیرقطعی با استفاده از منطق فازی (DUCF)، یک الگوریتم خوشه‌بندی توزیع‌شده بر اساس منطق فازی برای شبکه‌های خوشه‌ای نابرابر است که انرژی پایه گره، درجه گره و فاصله بین گره‌ها و ایستگاه پایه را به‌عنوان ورودی انتخاب می‌کند و خروجی‌های آن، احتمال منتخب شدن گره‌ها به‌عنوان سرخوشه و نیز، اندازه خوشه‌ها می‌باشند [۱۹]. این روش، نه‌تنها مشخصه‌های خود گره، بلکه اندازه خوشه را نیز در نظر می‌گیرد، لذا، کارایی کلی شبکه را افزایش می‌دهد. همانند آنچه در DFLC [۱۲] دیدیم، محاسبه فاصله بین گره‌ها و ایستگاه پایه

در هر دور، منجر به مصرف زیاد انرژی در شبکه‌های پویا می‌شود که تأثیر منفی بر طول‌عمر گره‌های حسگر دارد.

در [۲۰]، به‌منظور کنترل ازدحام، از یک ساختار سلسله مراتبی درختی و توری برای ایجاد همبندی اولیه استفاده می‌شود و الگوریتم پرایم برای انتخاب مناسب‌ترین همسایه‌ها به‌کار گرفته می‌شود. در این روش، صف‌های بسته‌ها به گونه‌ای مدیریت می‌شوند که داده‌های اولویت‌بندی‌شده را ارسال نمایند. وقتی در شبکه ازدحام رخ می‌دهد، گره‌های همسایه هم‌سطح در سلسله مراتب، به‌منظور کاهش ازدحام، انتخاب و جایگزین می‌گردند. این روش، نرخ دریافت داده، میزان مصرف انرژی و نیز، گذردهی شبکه را بهبود می‌بخشد.

در [۲۱]، روشی برای خوشه‌بندی فازی شبکه‌های حسگر غیریکنواخت سلسله مراتبی ارائه شده است. معیارهای مورد استفاده در این خوشه‌بندی، انرژی باقیمانده گره، مرکزیت گره و فاصله تا ایستگاه پایه برای سرخوشه‌ها می‌باشد. در روش مذکور میزان بهره‌وری انرژی به نحوه‌ی قرارگیری گره‌ها در شبکه و چگونگی سلسله مراتب آن‌ها بستگی پیدا می‌کند. لذا، در همه شبکه‌ها با نحوه‌های گوناگون پخش گره‌ها قابل به‌کارگیری نمی‌باشد.

روش PSOBS [۲۲] برای انتخاب نقاط بهینه ملاقات چاهک متحرک بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات معرفی شده است. در این روش، برای هر گره حسگر یک مقدار به‌عنوان وزن بر اساس تعداد بسته‌های داده‌ای که از گره‌های دیگر دریافت می‌کند، محاسبه می‌گردد. اهداف اصلی نویسندگان، کاهش مصرف انرژی و نرخ از دست رفتن بسته‌ها در شبکه می‌باشند. در این مکانیسم، یک روش خوشه‌بندی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور تعیین یک مجموعه نقاط ملاقات بهینه به‌طوری که همه شبکه پوشش داده شود و نیز، تأخیر انتها به انتها کاهش یابد، پیشنهاد شده است.

در روش پیشنهادی در این مقاله، ما در رویه انتخاب سرخوشه‌ها، نسبت به کارهای قبلی، مجموعه جامع‌تری از پارامترهای مرتبط با گره‌ها را به‌عنوان پارامترهای ورودی سیستم فازی به‌کار گرفته‌ایم. با به‌کارگیری پارامترهای همه‌جانبه و گوناگونی از هر گره، همه خصوصیات و ابعاد کاری گره‌ها در انتخاب سرخوشه‌ها مؤثر واقع می‌شوند. این پارامترها عبارتند از انرژی باقیمانده گره، درجه گره، متوسط انرژی باقیمانده گره‌های همسایه‌ی گره، فاصله بین سرخوشه‌ها، مدت زمان ارسال بسته، تعداد گام‌ها از گره تا ایستگاه پایه و پراکندگی. ازاین‌رو، موضوع انتخاب گره‌های مناسب به‌عنوان سرخوشه، با در نظر گرفتن جنبه‌های گوناگون هر گره در سیستم فازی، بهینه‌سازی می‌شود و انتخاب سرخوشه‌های مناسب‌تر، موجب توزیع متعادل بار کاری در خوشه‌ها و شبکه و درنتیجه، موجب کاهش و تعادل مصرف انرژی در گره‌ها می‌گردد. اما، توجه به این نکته مهم است که تعداد زیاد پارامترهای ورودی در سیستم‌های فازی، تعداد حالات زیادی در آن‌ها را در پی خواهد داشت؛ روش پیشنهادی، با وجود تعداد زیاد پارامترهای ورودی، تعداد حالات فازی و نیز، سربار سیستم استنتاج فازی را کاهش می‌دهد که جزئیات آن در بخش ۳ بیان می‌گردد.

۳- روش پیشنهادی (DEEFCA)

در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، DEEFCA، انتخاب سرخوشه‌ها بر مبنای منطق فازی به‌صورت توزیع‌شده و محلی در گره‌ها، انجام می‌شود؛ معیارهای مورد استفاده در DEEFCA برای انتخاب یک گره به‌عنوان سرخوشه، مقادیر انرژی باقیمانده و درجه گره مورد بررسی، فاصله بین سرخوشه‌های انتخابی، میانگین انرژی گره‌های همسایه گره موردنظر، مدت زمان ارسال یک بسته و تعداد گام‌ها از گره موردنظر تا ایستگاه پایه و پراکندگی در همسایگی گره موردنظر می‌باشند. در ذیل، این معیارها توصیف می‌شوند:

- انرژی باقیمانده گره: با توجه به وظیفه سرخوشه در جمع‌آوری داده‌ها در هر خوشه و ارتباط با ایستگاه پایه، مصرف انرژی سرخوشه به‌مراتب بیشتر از گره‌های دیگر عضو خوشه است. بنابراین، انتخاب گره‌های با انرژی باقیمانده بیشتر به‌عنوان سرخوشه، طول‌عمر شبکه را افزایش می‌دهد.

- میانگین انرژی باقیمانده گره‌های همسایه: با توجه به مدل ارتباط چندگامی برای انتقال‌داده درون خوشه‌ها، گره‌های نزدیک به سرخوشه نسبت به گره‌های دورتر، میزان داده بیشتری را انتقال می‌دهند و بنابراین، به انرژی بیشتری برای انتقال‌داده نیاز دارند. لذا، در نظر گرفتن انرژی گره‌های همسایه به‌عنوان یکی از عوامل تصمیم‌گیری، یک راه‌حل مؤثر برای متعادل‌سازی بار در کل شبکه می‌باشد.

- فاصله بین سرخوشه‌ها: توزیع سرخوشه‌ها در کل سطح شبکه و عدم قرارگیری آن‌ها در نزدیکی یکدیگر برای پوشش یکنواخت شبکه و عضویت گره‌ها در خوشه‌ها امر مهمی می‌باشد.

- درجه گره: عبارت است از تعداد گره‌های واقع در شعاع ارتباطی آن؛ هر چه درجه گره بالاتر باشد، کارایی انتقال داده‌ها در خوشه بالاتر خواهد بود و میزان ارسال داده توسط گره‌های در همسایگی

سرخوشه نیز کاهش می‌یابد که در بهینه‌سازی انتقال‌داده و انرژی کل سیستم مؤثر است.

- مدت زمان ارسال بسته از گره تا ایستگاه پایه: هر چه ارسال یک بسته از گره مورد بررسی و دریافت آن در ایستگاه پایه در مدت زمان کوتاه‌تری انجام شود، آن گره برای سرخوشه شدن مناسب‌تر است. از آنجایی که انتقال تا ایستگاه پایه به‌صورت چندگامی انجام می‌گیرد، زمان انتقال‌داده علاوه بر فاصله و تعداد گام، به وضعیت بار کاری و بافر گره‌های میانی نیز بستگی پیدا می‌کند. هر چه بار کاری و لذا، طول صف بافر هر یک از گره‌های میانی بیشتر باشد، میزان معطلی بسته در بافر آن گره بیشتر می‌باشد و زمان کل انتقال‌داده طولانی‌تر خواهد شد.

- تعداد گام‌ها از گره تا ایستگاه پایه: هر چه گره مورد بررسی از نظر تعداد گام به ایستگاه پایه نزدیکتر باشد، برای سرخوشه شدن مناسب‌تر می‌باشد.

- پراکندگی (میانگین فاصله گره تا گره‌های همسایه): هر چه فاصله گره مورد بررسی با گره‌های واقع در شعاع ارتباطی آن کمتر باشد، برای سرخوشه شدن مناسب‌تر است زیرا اگر مجموع فاصله حسگرها تا سرخوشه کم باشد، مصرف انرژی در تبادل داده کم خواهد بود.

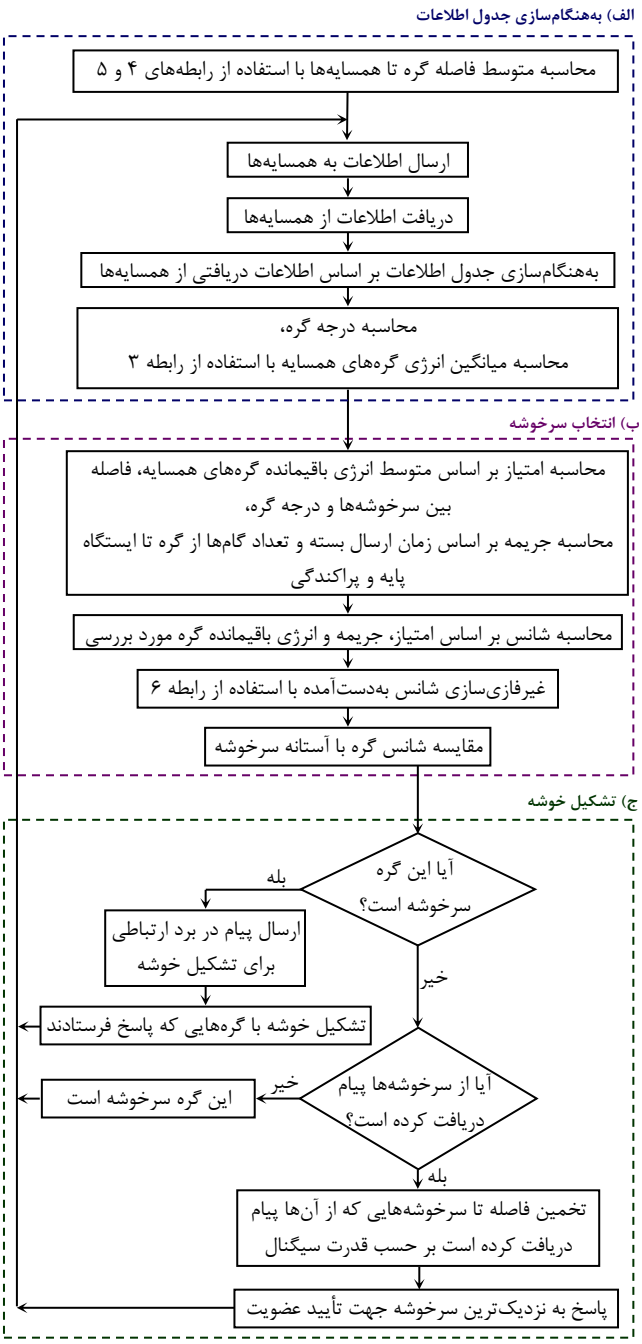
مدل انرژی انتقال‌داده از مرجع [۲۳] مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل، به‌منظور تقویت قدرت انتقال هر گره بر اساس فاصله بین فرستنده و گیرنده، از مدل‌های کانال فضا آزاد و چندمسیری استفاده شده است. اگر فاصله بین فرستنده و گیرنده از یک آستانه مشخص‌شده کمتر باشد، از مدل فضای آزاد استفاده می‌شود و در غیر این صورت، مدل چندمسیری استفاده می‌گردد. برای انتقال l بیت داده با فاصله d، از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$E_{TX}(l,d) = E_{TX-elect}(l) + E_{TX-amp}(l,d) \qquad (۱)$$
$$= \begin{cases} l.E_{elec} + l.\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_{th} \\ l.E_{elec} + l.\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_{th} \end{cases}$$

در این رابطه، E_{elec} انرژی مصرفی برای ارسال یک بیت، ε_{fs} انرژی برای تقویت یک بیت در فاصله کوچک‌تر از آستانه، d فاصله بین فرستنده و گیرنده، l تعداد بیت‌های ارسالی، d_{th} فاصله آستانه و ε_{mp} انرژی برای تقویت یک بیت در فاصله بزرگ‌تر از آستانه است. همچنین برای دریافت l بیت داده، از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$E_{RX}(l) = E_{RX-elect}(l) = l.E_{elec} \qquad (۲)$$

نحوه پخش نمودن گره‌ها در محیط شبکه، تصادفی با توزیع یکنواخت می‌باشد. فرآیند خوشه‌بندی در DEEFCA به‌طور کلی، در سه مرحله انجام می‌گیرد: الف) به‌هنگام‌رسانی جدول اطلاعات، ب) انتخاب سرخوشه و ج) تشکیل خوشه. فلوچارت شکل ۱، مراحل و عملکرد این روش را نمایش می‌دهد. در ادامه، به شرح جزئیات مراحل DEEFCA می‌پردازیم.



شکل ۱: فلوچارت روش پیشنهادی

۳-۱- به هنگام‌سازی جدول اطلاعات

هر گره حسگر یک جدول اطلاعات را که حاوی شناسه گره، انرژی فعلی گره، شناسه گره‌های همسایه و انرژی‌های باقیمانده آن‌ها می‌باشد، ذخیره می‌کند. هر گره به‌صورت دوره‌ای، در شعاع همسایگی خود پیامی را به‌منظور انتقال اطلاعات خود به همسایگان، ارسال می‌کند. درنتیجه، هر گره حسگر اطلاعات

مربوط به گره‌های همسایه را به دست می‌آورد و بلافاصله جدول اطلاعات خود را به‌هنگام می‌سازد. برای هر گره (N_i)، حسب تعداد پیام‌های دریافت‌شده درجه گره، ($D(N_i)$)، به دست می‌آید. میانگین انرژی گره‌های همسایه هر گره به وسیله رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$Avg(E_{N_i}^{N}) = \frac{\sum_{j=1}^{D(N_i)} E_j}{D(N_i)} \quad (۳)$$

متوسط فاصله گره N_i تا گره‌های همسایه با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$Avg(d_{ij}) = \frac{\sum_{j=1}^{D(N_i)} d(N_i,N_j)}{D(N_i)} \quad (۴)$$

فاصله بین گره‌های (N_i, N_j) با استفاده از مختصات مکان آن‌ها، حسب رابطه (۵) حاصل می‌شود.

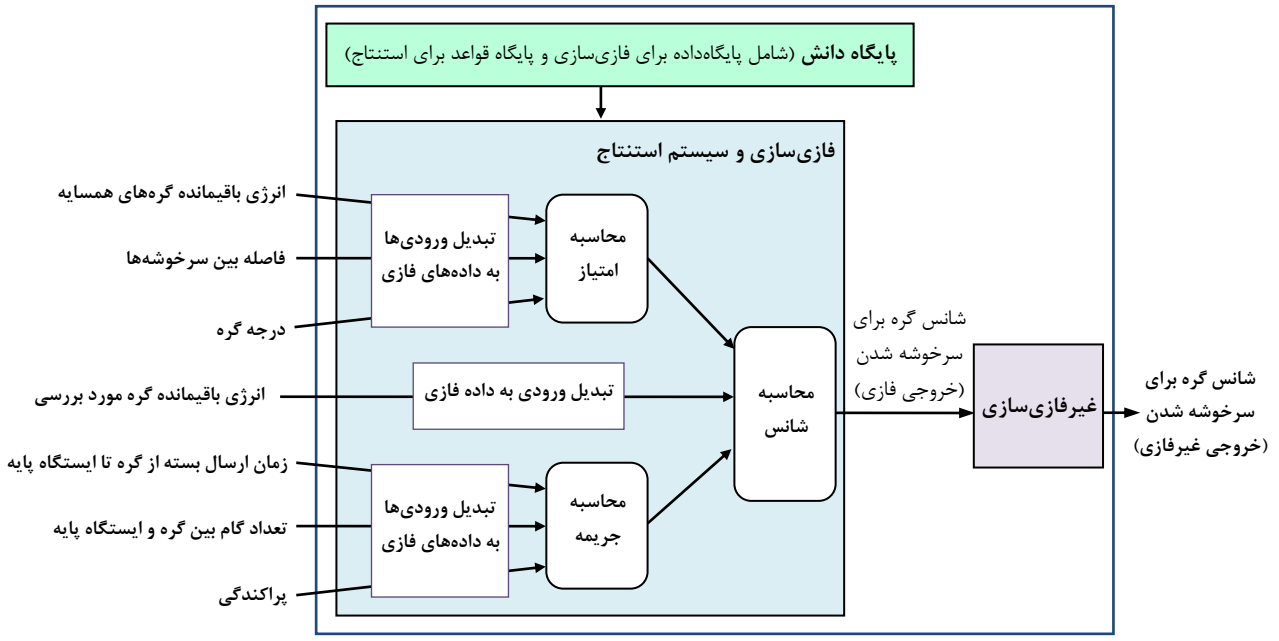
$$d(N_i, N_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (۵)$$

۳-۲- انتخاب سرخوشه

شکل ۲ ساختار سیستم فازی DEEFCA را نشان می‌دهد. این سیستم فازی دارای سه بخش ۱) فازی‌سازی و سیستم استنتاج[۷]، ۲) پایگاه دانش[۸] و ۳) غیرفازی‌سازی[۹] می‌باشد.

در فرآیند فازی‌سازی، داده غیرفازی ورودی بر اساس توابع عضویت به داده فازی تبدیل می‌گردد. سیستم فازی DEEFCA بر اساس روش ممدانی طرح شده است؛ ازاین‌رو، موتور استنتاج آن، ورودی فازی‌شده را می‌گیرد و با توجه به قوانین موجود در پایگاه دانش، خروجی فازی را تولید می‌کند. سیستم فازی ممدانی با دانش و تجربه انسان سازگاری بالایی دارد و به‌دلیل طبیعت بصری و تفسیری بالا، به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهای مبتنی بر تصمیم-گیری از جمله انتخاب سرخوشه بسیار کارآمد است.

تعداد زیاد پارامترهای ورودی در سیستم‌های فازی، تعداد حالات زیادی را به‌عنوان قوانین فازی در پایگاه دانش آن‌ها ایجاد می‌کند که به‌طور معمول، می‌تواند موجب افزایش پیچیدگی محاسباتی، حجم حافظه مورد نیاز و نیز، افزایش تأخیر عملیات سیستم استنتاج فازی شود. در روش DEEFCA، به‌منظور کاهش تعداد حالات در پایگاه دانش، کاهش پیچیدگی محاسباتی و نیز، تسریع عملیات سیستم، عملیات سیستم استنتاج در دو مرحله به‌صورت مدولار، انجام می‌گیرد. در مرحله اول، امتیاز و جریمه هر گره به-طور همزمان (موازی) در مدول‌های مربوط، محاسبه می‌شوند و در مرحله دوم، شانس سرخوشه شدن گره مورد بررسی، در مدول محاسبه شانس، محاسبه می‌گردد.

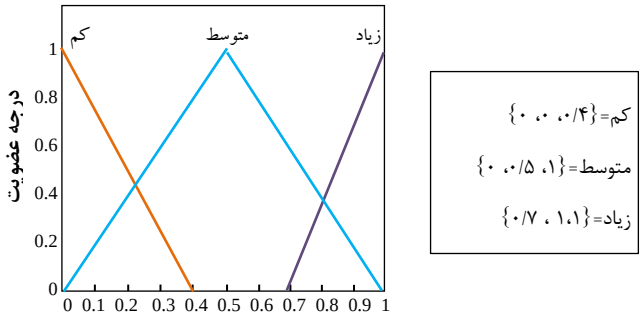


شکل ۲: ساختار سیستم فازی روش پیشنهادی (DEEFCA)

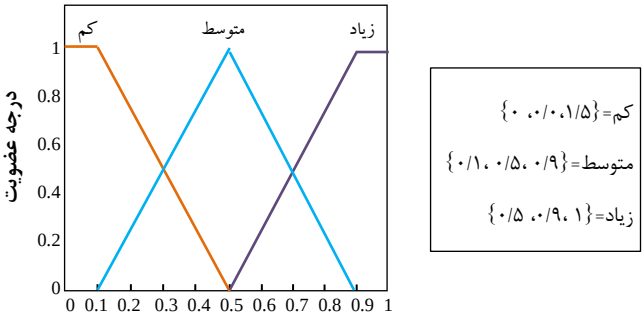
مدول محاسبه امتیاز، بر اساس پارامترهای فاصله بین سرخوشه‌ها، درجه گره و متوسط انرژی باقیمانده گره‌های همسایه، امتیاز هر گره را تعیین می‌کند. مقادیر فازی و توابع عضویت پارامترهای ورودی واحد محاسبه امتیاز در شکل ۳ و قوانین فازی مربوط به محاسبه امتیاز در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جریمه هر گره بر اساس مدت زمان ارسال بسته از گره مورد نظر تا ایستگاه پایه، تعداد گام‌ها از آن گره تا ایستگاه پایه و پراکندگی پیرامون گره، توسط واحد جریمه مشخص می‌شود. بدیهی است که هر چه این پارامترها بیشتر باشند، میزان جریمه بیشتر خواهد بود. مقادیر فازی و توابع عضویت مربوط به واحد محاسبه جریمه در شکل ۴ و قوانین فازی آن در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

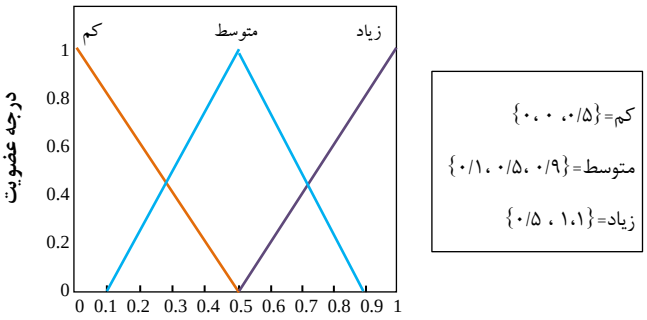
همان‌طور که شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند، در سیستم فازی DEEFCA متغیر زبانی فازی برای همه پارامترهای ورودی با مقادیر "کم، متوسط و زیاد" تعریف شده است. محور افقی در توابع عضویت به‌صورت نرمال‌شده بین صفر تا یک برای پارامترهای مختلف تنظیم شده است.



(الف) مقادیر فازی و تابع عضویت متوسط انرژی باقیمانده گره‌های همسایه



(ب) مقادیر فازی و تابع عضویت فاصله بین سرخوشه‌ها

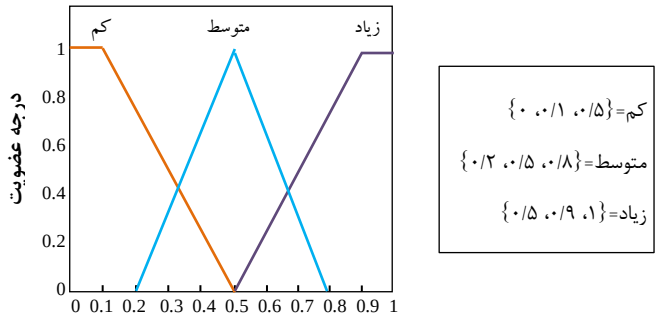


(ج) مقادیر فازی و تابع عضویت درجه گره مورد بررسی

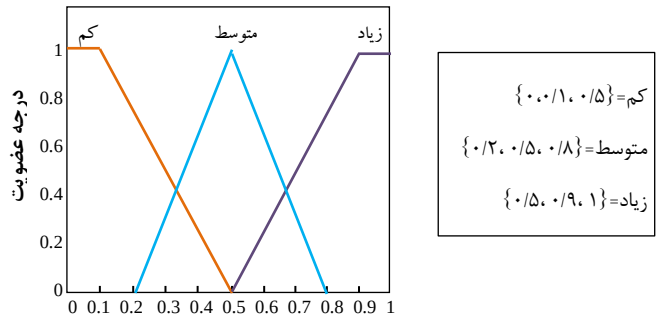
شکل۳: مقادیر فازی و توابع عضویت تعریف‌شده برای محاسبه امتیاز

جدول ۱ : قوانین فازی DEEFCA در تعیین امتیاز

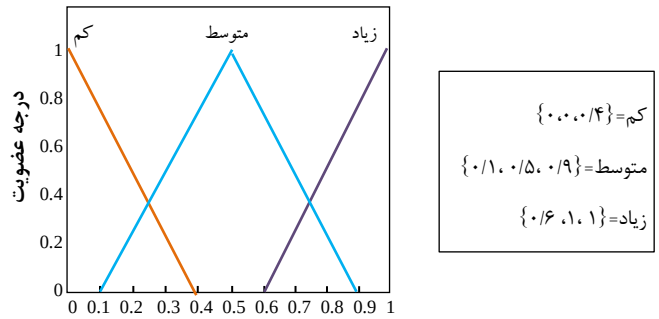
	متوسط انرژی گره‌های همسایه	درجه	فاصله سرخوشه‌ها	امتیاز
۱	کم	کم	کم	کم
۲	کم	کم	متوسط	کم
۳	کم	کم	زیاد	کم
۴	کم	متوسط	کم	کم
۵	کم	متوسط	متوسط	متوسط
۶	کم	متوسط	زیاد	متوسط
۷	کم	زیاد	کم	کم
۸	کم	زیاد	متوسط	متوسط
۹	کم	زیاد	زیاد	متوسط
۱۰	متوسط	کم	کم	کم
۱۱	متوسط	کم	متوسط	متوسط
۱۲	متوسط	کم	زیاد	متوسط
۱۳	متوسط	متوسط	کم	متوسط
۱۴	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۵	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد
۱۶	متوسط	زیاد	کم	متوسط
۱۷	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد
۱۸	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
۱۹	زیاد	کم	کم	کم
۲۰	زیاد	کم	متوسط	متوسط
۲۱	زیاد	کم	زیاد	متوسط
۲۲	زیاد	متوسط	کم	متوسط
۲۳	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
۲۴	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد
۲۵	زیاد	زیاد	کم	متوسط
۲۶	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد
۲۷	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد



(الف) مقادیر فازی و تابع عضویت مدت زمان ارسال بسته از گره مورد نظر تا ایستگاه پایه



(ب) مقادیر فازی و تابع عضویت تعداد گام بین گره مورد نظر و ایستگاه پایه



(ج) مقادیر فازی و تابع عضویت پراکندگی

شکل۴: مقادیر فازی و توابع عضویت تعریف‌شده برای محاسبه جریمه

جدول ۲: قوانین فازی DEEFCA در تعیین جریمه

	تعداد گام‌ها	مدت زمان ارسال یک بسته	پراکندگی	جریمه
۱	کم	کم	کم	کم
۲	کم	کم	متوسط	کم
۳	کم	کم	زیاد	کم
۴	کم	متوسط	کم	کم
۵	کم	متوسط	متوسط	متوسط
۶	کم	متوسط	زیاد	متوسط
۷	کم	زیاد	کم	کم
۸	کم	زیاد	متوسط	متوسط
۹	کم	زیاد	زیاد	زیاد
۱۰	متوسط	کم	کم	کم
۱۱	متوسط	کم	متوسط	متوسط
۱۲	متوسط	کم	زیاد	متوسط
۱۳	متوسط	متوسط	کم	متوسط
۱۴	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۵	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد
۱۶	متوسط	زیاد	کم	متوسط
۱۷	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد
۱۸	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
۱۹	زیاد	کم	کم	کم
۲۰	زیاد	کم	متوسط	متوسط
۲۱	زیاد	کم	زیاد	زیاد
۲۲	زیاد	متوسط	کم	متوسط
۲۳	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
۲۴	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد
۲۵	زیاد	زیاد	کم	زیاد
۲۶	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد
۲۷	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد

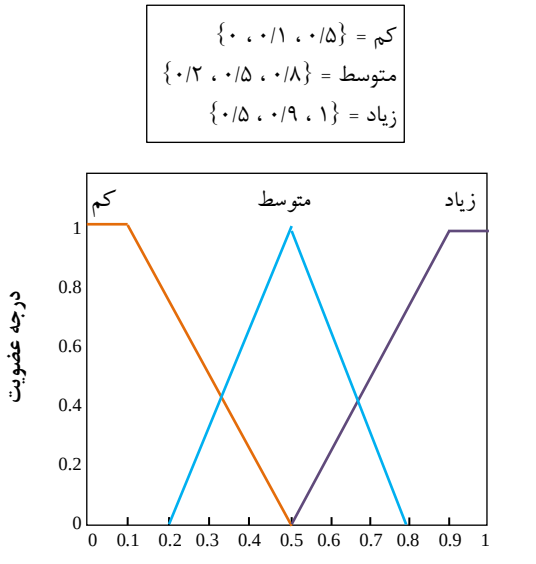
در مرحله دوم سیستم استنتاج، خروجی فازی که میزان شانس سرخوشه شدن گره مورد بررسی می‌باشد، توسط واحد محاسبه شانس، بر اساس امتیاز، جریمه و انرژی باقیمانده گره، حسب جدول ۳ به دست می‌آید.

در شکل ۵، مقادیر فازی و تابع عضویت انرژی باقیمانده گره مورد بررسی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این پارامتر ورودی بیشتر از سایر پارامترهای ورودی در تعیین یک گره به‌عنوان سرخوشه تأثیر دارد. بنابراین، به‌طور مجزا با مقادیر امتیاز و جریمه در محاسبه شانس، درنظر گرفته می‌شود.

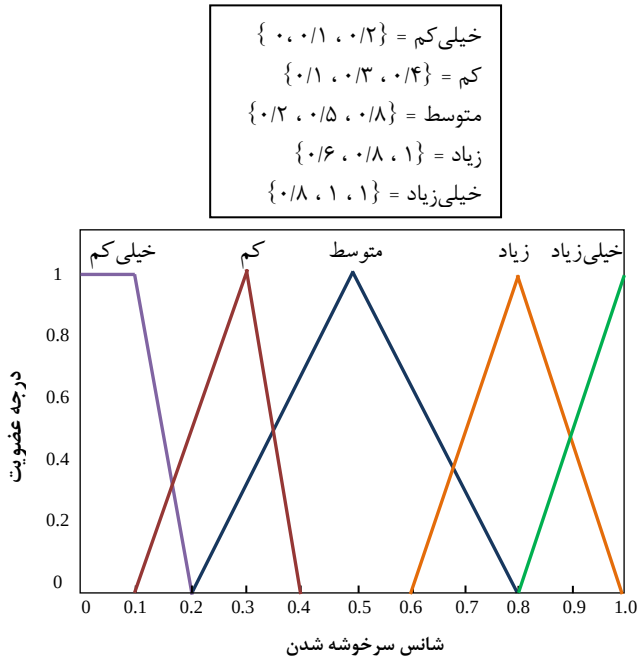
خروجی واحد محاسبه شانس یک داده فازی با پنج مقدار فازی "خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد" می‌باشد. هر چه انرژی باقیمانده گره و امتیاز بیشتر باشد و نیز، میزان جریمه کمتر باشد، شانس گره برای سرخوشه شدن بیشتر است. شکل ۶ تابع عضویت خروجی سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: قوانین فازی DEEFCA برای تعیین شانس سرخوشه شدن یک گره بر اساس میزان انرژی باقیمانده، امتیاز و جریمه آن

	انرژی باقیمانده گره	امتیاز	جریمه	شانس
۱	کم	کم	زیاد	خیلی‌کم
۲	کم	کم	متوسط	خیلی‌کم
۳	کم	کم	کم	کم
۴	کم	متوسط	زیاد	خیلی‌کم
۵	کم	متوسط	متوسط	خیلی‌کم
۶	کم	متوسط	کم	کم
۷	کم	زیاد	زیاد	کم
۸	کم	زیاد	متوسط	متوسط
۹	کم	زیاد	کم	زیاد
۱۰	متوسط	کم	زیاد	خیلی‌کم
۱۱	متوسط	کم	متوسط	کم
۱۲	متوسط	کم	کم	متوسط
۱۳	متوسط	متوسط	زیاد	کم
۱۴	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۵	متوسط	متوسط	کم	زیاد
۱۶	متوسط	زیاد	زیاد	کم
۱۷	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط
۱۸	متوسط	زیاد	کم	خیلی‌زیاد
۱۹	زیاد	کم	زیاد	خیلی‌کم
۲۰	زیاد	کم	متوسط	متوسط
۲۱	زیاد	کم	کم	متوسط
۲۲	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط
۲۳	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
۲۴	زیاد	متوسط	کم	خیلی‌زیاد
۲۵	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
۲۶	زیاد	زیاد	متوسط	خیلی‌زیاد
۲۷	زیاد	زیاد	کم	خیلی‌زیاد



شکل۵: مقادیر فازی و تابع عضویت انرژی باقیمانده گره مورد بررسی



شکل ۶: مقادیر فازی و تابع عضویت خروجی سیستم استنتاج فازی

پایگاه دانش شامل پایگاه‌داده مقادیر فازی برای فازی‌سازی و نیز، پایگاه قوانین فازی مورد استفاده در سیستم استنتاج، می‌باشد. معمولاً، در یک سیستم فازی به تعداد حاصلضرب تعداد عناصر مجموعه‌های فازی ورودی‌ها، قانون فازی وجود دارد اما در روش DEEFCA با انجام عملیات سیستم استنتاج به‌صورت دو مرحله‌ای، تعداد قوانین فازی به میزان قابل‌توجهی کاهش داده شده است. به‌طوری که با توجه به مجموعه‌های سه عضوی ورودی، به‌جای تعریف 3^7 قانون فازی، تعداد ۲۷×۳ قانون فازی تعریف شده است (جدول‌های ۱ تا ۳).

برای تبدیل شکل خروجی فازی به یک مقدار غیرفازی (غیرفازی‌سازی) در روش DEEFCA از روش محاسبه مرکز ثقل[۱۰]، استفاده شده است. خروجی نهایی یا به عبارتی، شانس هر گره (به‌صورت غیرفازی) برای سرخوشه‌شدن، $(Chance(N_i))$، در فرآیند غیرفازی‌سازی، حسب رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه، n تعداد حالات مختلف بدست آمده برای شانس، C_i شانس به دست آمده iام، MD_i درجه عضویت شانس iام می‌باشند. برای به دست آوردن $Chance(N_i)$، به ازای ترکیب‌های مختلف فازی انرژی باقیمانده، امتیاز و جریمه گره مورد بررسی، مجموع حاصلضرب هر

کدام از شانس‌های به‌دست آمده در درجه عضویت آن بر مجموع درجه‌های عضویت آن‌ها تقسیم می‌شود. درجه عضویت هر شانس، اشتراک نواحی فازی ورودی‌های واحدهای محاسبه امتیاز، جریمه و شانس می‌باشد. چنانچه شانس به دست آمده برای گره، بیشتر یا مساوی با آستانه شانس تعریف‌شده برای سرخوشه شدن باشد، گره، خود را به‌عنوان سرخوشه می‌شناسد.

$$Chance(N_i) = \frac{\sum_{i=1}^{n} MD_i \times C_i}{\sum_{i=1}^{n} MD_i} \quad (۶)$$

۳-۳- تشکیل خوشه

سرخوشه‌های انتخاب‌شده، پیامی حامل شناسه خود را در برد ارتباطی خود ارسال می‌کنند. گره‌های دریافت‌کننده پیام، فاصله خود تا سرخوشه را بر حسب قدرت سیگنال دریافتی، تخمین می‌زنند. روش تخمین فاصله گره‌ها تا سرخوشه، حسب روش مورد استفاده در [۲۴] انجام می‌گیرد. هر گره به نزدیک‌ترین سرخوشه پاسخ می‌دهد. سرخوشه نیز با ارسال پیامی به گره، عضویت آن را تصدیق می‌کند. اگر گره‌ای هیچ پیامی از سرخوشه‌ها دریافت نکند، خود را به‌عنوان سرخوشه می‌شناسد.

الگوریتم ۱، بیانگر شبه‌کد روش پیشنهادی می‌باشد.

۴- ارزیابی روش پیشنهادی (DEEFCA)

۴-۱- سربار الگوریتم

در ابتدای هر بار اجرای رویه انتخاب سرخوشه، با فرض اینکه تعداد گره‌های زنده در دور فعلی شبکه N باشد، تعداد بسته‌های ارسالی از گره‌ها به‌منظور انتقال اطلاعات خود به همسایگان (بخش ۱.۳)، نیز برابر با N می‌باشد. درنتیجه، اجرای الگوریتم، M گره به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند، سپس، در مرحله تشکیل خوشه‌ها، هر سرخوشه‌ها انتخاب‌شده، پیامی را به‌منظور عضوگیری به همسایگان خود در برد ارتباطی، ارسال می‌کنند (P·M پیام)، که P متوسط درجه گره‌ها در شبکه در دور جاری می‌باشد. تعداد گره‌های غیرسرخوشه عبارت است از N-M؛ بنابراین، تعداد پیام‌های اعلام عضویت در خوشه‌ها و نیز، تعداد تصدیق‌های مربوطه از سوی سرخوشه‌ها، برابر با N-M خواهد بود. ازاین‌رو، پیچیدگی از لحاظ تعداد پیام در DEEFCA، حسب رابطه (۷) از درجه O(N) می‌باشد.

$$N_M = N + P.M + 2(N - M) \quad (۷)$$

الگوریتم ۱: شبه کد روش پیشنهادی (DEEFCA)

DEEFCA: Distributed Energy Efficient Fuzzy-based Clustering Algorithm

1: Calculate $Avg(d_{ij}) = \frac{\sum_{j=1}^{D(N_i)} (\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2})}{D(N_i)}$
2: Send information to the neighboring nodes
3: Receive information from the neighboring nodes
4: Update the information table
5: Calculate $D(N_i)$, $Avg(E_{N_i}^N) = \frac{\sum_{j=1}^{D(N_i)} E_j}{D(N_i)}$
6: Determine the score according to Table 1 and the penalty according to Table 2
7: Determine the chance according to Table 3
8: Calculate $Chance(N_i) = \frac{\sum_{i=1}^{n} MD_i \times C_i}{\sum_{i=1}^{n} MD_i}$
9: Compare the obtained chance with the threshold
10: **if** (the node is cluster head)
11: Send a message within RC for advertisement
12: Create cluster with the nodes which replied
13: Go to Line 2
14: **else**
15: **if (**the node received messages from cluster heads)
16: Calculate the distances to the cluster heads from which the node receives advertisements based on signal strength
17: Reply to the closest cluster head for membership confirmation
18: Go to Line 2
19: **else**
20: The node is cluster head
21: Go to Line 2
22: **end if**
23: **end if**

۴-۲- مقایسه DEEFCA با روش‌های مشابه اخیر

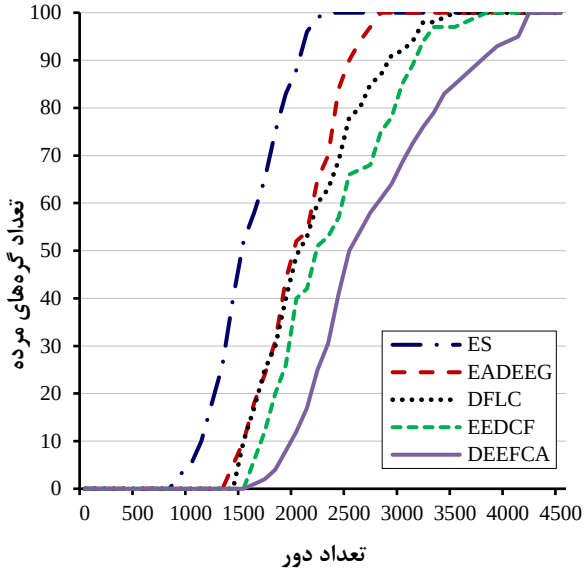
در این بخش، روش DEEFCA با سه الگوریتم EADEEG، DFLC وEEDCF که در بخش ۲ (کارهای مرتبط) معرفی شده‌اند، از لحاظ مصرف توان، طول‌عمر گره‌ها و شبکه، و میزان انتقال‌داده در شبکه، با حالات مختلف ابعاد شبکه و چگالی گره در آن، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به این منظور، الگوریتم DEEFCA در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد؛ جدول ۴، پارامترهای مربوط به پیاده‌سازی را نشان می‌دهد. پارامترهای انتقال‌داده برای پیاده-سازی، حسب مدل انرژی مورد استفاده [۲۳] و مطابق با استاندارد به‌کار برده‌شده در آن تنظیم شده‌اند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش DEEFCA پس از سی بار اجرای مستقل الگوریتم و میانگین‌گیری از خروجی‌های آن‌ها، به دست آمدند و در ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۴: پارامترهای پیاده‌سازی

پارامترها	مقدار
ناحیه شبکه	۲۰۰×۲۰۰ ~ ۱۰۰×۱۰۰ مترمربع
تعداد گره‌ها (N)	۱۰۰ ~ ۲۲۵
مکان ایستگاه پایه	(۵۰،۵۰)، (۷۵،۷۵)، (۷۵،۱۵۰)
انرژی اولیه هر گره	۰/۷۵ ژول
برد ارتباطی (R_C)	۲۰ متر
تعداد سرخوشه‌ها	۱۵٪N
برد حسی	۱۰ متر
دور	۴۵۰۰
اندازه بسته داده	۵۰۰ بایت
E_{elec}	۵×۱۰^{-۸} ژول
ξ_{fs}	$۱۰^{-۱۱}$ ژول
ξ_{mp}	$۱/۳\times۱۰^{-۱۳}$ ژول
E_{DA}	۵×۱۰^{-۹} ژول

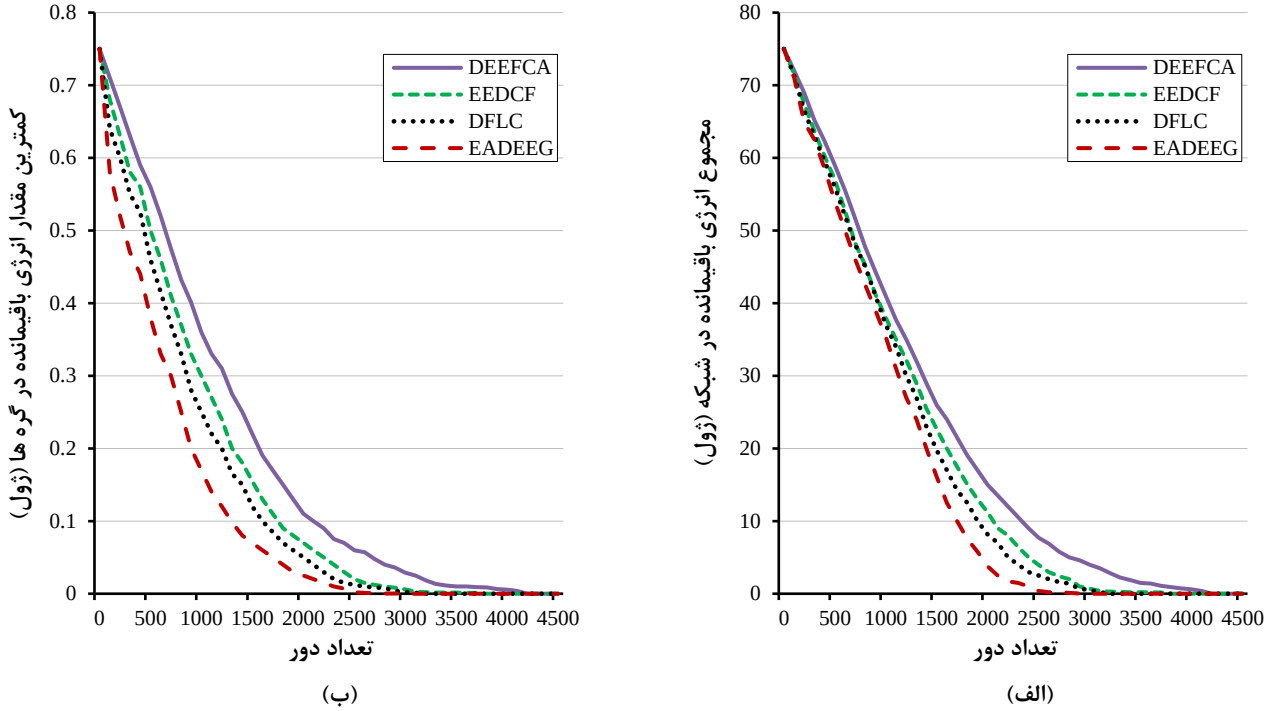
در شکل ۷ روند اتمام انرژی و مردن گره‌ها بر حسب تعداد دورهای کاری شبکه، برای الگوریتم‌های EADEEG، DFLC، EEDCF و DEEFCA و نیز، روش جستجوی فراگیر[۱۱] (ES) تعیین سرخوشه، نشان داده شده است. روش ES، در این ارزیابی به‌عنوان روش پایه برای مقایسه روش‌های مذکور در بالا، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، در هر دور، دسته‌های نامزدهای سرخوشه شدن (هر دسته به تعداد آنچه در جدول ۴ ذکر شده است)، از لحاظ معیارهای معرفی‌شده در ابتدای بخش ۳، مورد آزمون قرار می‌گیرند و اولین دسته موفق در آزمون، به‌عنوان مجموعه سرخوشه‌ها انتخاب می‌گردد و سپس، هر سرخوشه برای عضوگیری، مشابه با روش DEEFCA پیامی را در برد ارتباطی خود ارسال می‌کند و مرحله تشکیل خوشه را ادامه می‌دهد.

زمان اولین مرگ گره (FND[۱۲])، یا زمانی که نیمی از کل گره‌ها می‌میرند (HND[۱۳])، و یا هنگامی که تمام گره‌ها (AND[۱۴]) در شبکه می‌میرند، به‌عنوان شاخص‌های طول‌عمر شبکه مورد توجه می‌باشند. مرگ اولین گره در الگوریتم‌های ES، EADEEG، DFLC وEEDCF به ترتیب، در دورهای ۸۷۶، ۱۳۸۲، ۱۴۲۹و ۱۵۰۵ رخ می‌دهد درحالی‌که در DEEFCA، مرگ اولین گره در دور ۱۶۲۰ اتفاق می‌افتد (شکل ۶). با افزایش تعداد دور، تعداد گره‌های باقیمانده کاهش می‌یابد؛ مرگ نصف گره‌ها در روش‌های ES، EADEEG، DFLC و EEDCF به ترتیب، در دورهای ۱۴۶۹، ۱۹۴۳، ۲۰۱۳ و ۲۱۶۸ اتفاق می‌افتد در حالیکه در DEEFCA تا دور ۲۴۴۵ بیش از نیمی از گره‌ها فعال می‌باشند.



شکل ۷: روند مردن گره‌های شبکه بر حسب تعداد دور برای DEEFCA و چهار روش مورد مقایسه

روش ES توانایی کمتری در ذخیره‌سازی انرژی و به‌خصوص در مصرف متوازن انرژی در گره‌ها دارد. چرا که در این روش، در هر دور، یک مجموعه از سرخوشه‌های نامزد که انتخاب آن‌ها مغایرتی با معیارهای سرخوشه شدن عنوان‌شده در بخش ۳ ندارد، انتخاب می‌شود و بنابراین، انتخاب، بهینه نمی‌باشد. ازاین‌رو، تمام گره‌های شبکه با این روش تا دور ۲۲۰۷ انرژی خود را از دست می‌دهند، (AND). با الگوریتم EADEEG همه انرژی شبکه در دور ۲۷۹۳ به آخر می‌رسد؛ زیرا، این روش فقط انرژی‌های باقیمانده گره‌ها و فاصله گره‌ها تا ایستگاه پایه را در مرحله انتخاب سرخوشه بررسی می‌کند. روش DFLC انرژی گره، چگالی گره و فاصله تا ایستگاه پایه را به‌عنوان پارامترهای خوشه‌بندی به‌کار می‌برد. لذا، می‌تواند به‌طور مؤثری از مسأله گره‌های جداافتاده جلوگیری کند و همچنین، مصرف انرژی اضافی را کاهش دهد و مرگ همه گره‌ها را تا دور ۳۴۰۷ به تأخیر می‌اندازد. با الگوریتم EEDCF همه انرژی سیستم در دور ۳۷۸۳ به آخر می‌رسد؛ الگوریتم EEDCF نه‌تنها انرژی و درجه گره را در نظر می‌گیرد، بلکه انرژی‌های باقیمانده گره‌های همسایه را به‌عنوان پارامتر ورودی جدید نیز به‌کار می‌گیرد. در DEEFCA، با در نظر گرفتن اثر هفت پارامتر نامبرده در بخش ۳ برای گره مورد بررسی، شانس سرخوشه شدن با در نظر گرفتن جوانب بیشتری در سیستم فازی تعیین می‌گردد. علاوه‌براین، وظایف انتقال‌داده به‌طور متوازن به گره‌ها اختصاص می‌یابد. درنتیجه، با این روش، تا دور شماره ۴۱۵۰، هنوز شبکه شامل گره‌های زنده می‌باشد.



شکل ۸: (الف) مجموع انرژی باقیمانده در گره‌های شبکه بر حسب دور و (ب) کمترین مقدار انرژی باقیمانده در گره‌های شبکه، برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه

شکل ۸، به ترتیب، مجموع انرژی باقیمانده در گره‌های شبکه و کمترین مقدار انرژی باقیمانده در گره‌ها را بر حسب دور برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه، نشان می‌دهد. مجموع انرژی بیشتر در گره‌ها با روش پیشنهادی در همه دورها، بیانگر صرفه‌جویی بیشتر DEEFCA در مصرف انرژی نسبت به روش‌های مورد مقایسه می‌باشد. از طرفی، سطح بالاتر کمترین مقدار انرژی در گره‌ها (شکل ۸-ب)، نشان می‌دهد که سطح انرژی گره‌ها با روش DEEFCA نسبت به روش‌های دیگر، به هم نزدیک‌تر می‌باشند. دلیل این امر، مصرف متوازن‌تر انرژی گره‌ها در DEEFCA نسبت به بقیه روش‌ها، می‌باشد.

به‌دلیل ذخیره بیشتر انرژی در گره‌ها با DEEFCA، نسبت به روش‌های دیگر، تا دورهای بیشتری گره‌ها زنده می‌مانند. از آنجایی که مصرف انرژی گره‌ها در DEEFCA نسبت به بقیه روش‌ها، متوازن‌تر می‌باشد، اختلاف سطح انرژی باقیمانده در گره‌ها در طی دورها اندک می‌باشد؛ لذا، گره‌ها برای مدت بیشتری و با جمعیت بیشتری زنده می‌مانند. در دورهای آخر، که انرژی گره‌ها رو به اتمام است، فاصله زمانی زیادی بین مرگ گره‌ها وجود ندارد.

جدول ۵ خلاصه وضعیت تعداد دور متناظر با مرگ اولین گره، نیمی از گره‌ها و همه گره‌های شبکه را نشان می‌دهد.

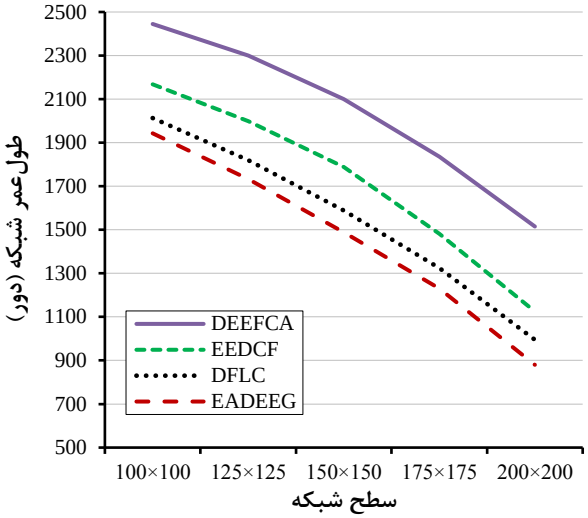
جدول ۵: تعداد دورها تا مردن اولین، نیمی و همه گره‌ها در DEEFCA و چهار روش مورد مقایسه

	ES	EADEEG	DFLC	EEDCF	DEEFCA
مرگ اولین گره بر دور	۸۶۷	۱۳۸۲	۱۴۲۹	۱۵۰۵	۱۶۲۰
مرگ نصف گره‌ها بر دور	۱۴۶۹	۱۹۴۳	۲۰۱۳	۲۱۶۸	۲۴۴۵
مرگ همه‌ی گره‌ها بر دور	۲۲۰۷	۲۷۹۳	۳۴۰۷	۳۷۸۳	۴۱۵۰

با در نظر گرفتن تعداد دور تا مردن نیمی از گره‌ها به‌عنوان طول‌عمر شبکه، تأثیر مساحت شبکه بر طول‌عمر شبکه، مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، با تغییر اندازه ابعاد شبکه و با تعداد ثابت گره برابر با ۱۰۰، پیاده‌سازی‌ها تکرار شد. بدیهی است که هر چه چگالی گره در شبکه کمتر شود، متوسط فاصله گره‌ها در توزیع یکنواخت تصادفی بیشتر می‌شود. درنتیجه، متوسط طول گام انتقال‌داده بزرگتر می‌گردد و لذا، انرژی مصرفی برای انتقال بسته‌های داده و نیز، سربارهای کنترلی روش‌های مورد مقایسه افزایش پیدا می‌کند. علاوه‌براین، به‌دلیل افزایش پراکندگی گره‌ها در شبکه، تعداد گره‌های عضو در خوشه‌ها به‌طور متوسط کاهش می‌یابد و نیز، تعداد خوشه‌ها افزایش پیدا می‌کند. تعداد بیشتر خوشه، سربار کنترلی بیشتری در شبکه ایجاد می‌کند و درنتیجه، منجر به مصرف انرژی بیشتری می‌گردد.

در شکل ۹ طول‌عمر شبکه با تعداد ثابت گره برابر با ۱۰۰، و با مساحت‌های مختلف برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه

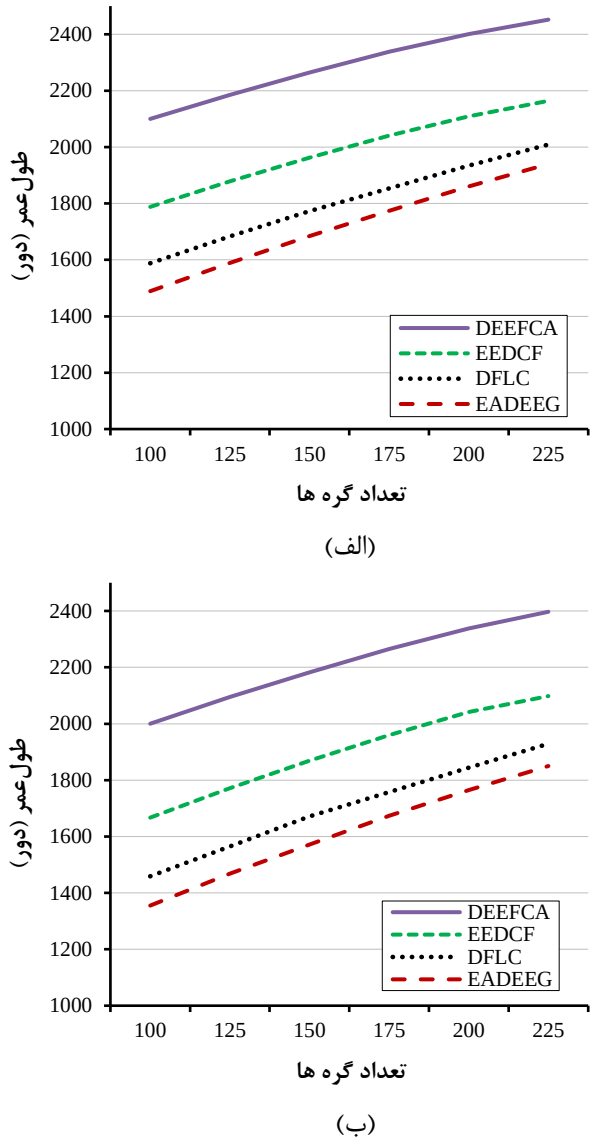
نشان داده شده است. همانگونه که شکل نشان می‌دهد، طول‌عمر شبکه بنا به دلایلی که در بالا ذکر شد، در هر چهار روش، با کاهش چگالی شبکه، کاهش می‌یابد. در روش DEEFCA، به‌دلیل مصرف کمتر و خصوصاً مصرف متوازن‌تر انرژی گره‌ها (شکل‌های ۷ و ۸)، همواره طول‌عمر شبکه از روش‌های دیگر بیشتر است.



شکل ۹: طول‌عمر شبکه با تعداد گره ثابت (۱۰۰ گره) بر حسب مساحت شبکه برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه

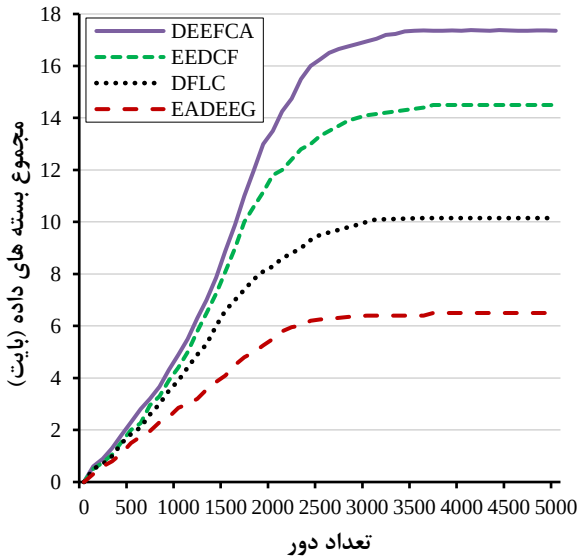
شکل ۱۰ طول‌عمر شبکه را بر حسب تعداد گره‌های شبکه نشان می‌دهد. در این ارزیابی، سطح شبکه ۱۵۰×۱۵۰ مترمربع در نظر گرفته شد و تعداد گره‌ها از ۱۰۰ تا ۲۲۵ تغییر داده شد. آزمایش‌ها برای دو موقعیت چاهک، یکبار در مکان (۷۵,۷۵) و یکبار در مکان (۷۵,۱۵۰) انجام شدند که نتایج متناظر با آن‌ها به ترتیب در قسمت‌های الف و ب شکل، نشان داده شده‌اند. با افزایش تعداد گره‌های شبکه، متوسط فاصله گره‌ها و نیز، طول گام انتقال‌داده کوتاه‌تر می‌گردد و از طرفی، تعداد اعضای خوشه‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع، سبب افزایش امکان جانشینی گره‌ها نسبت به یکدیگر در مسیریابی و نیز، کاربردهای شبکه می‌گردد. لذا، سیاست‌های کاهش و متوازن‌سازی مصرف انرژی در گره‌ها با قابلیت و کارایی بیشتری عمل می‌کنند. همانگونه که شکل‌ها نشان می‌دهند، هنگامی که چاهک در مرکز شبکه قرار دارد (حالت الف)، به‌دلیل تقارن فاصله‌ها تا چاهک، مصرف انرژی در شبکه نسبت به حالتی که در آن، چاهک در بالای شبکه قرار دارد (حالت ب)، متعادل‌تر و کمتر می‌باشد. روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه، به‌طور مؤثرتری در کاهش مصرف و متوازن‌سازی سطح انرژی در گره‌ها و لذا، افزایش طول‌عمر شبکه، نقش دارد.

ارزیابی‌های تأثیر اندازه سطح شبکه، چگالی و تعداد گره‌ها در شبکه و موقعیت چاهک، بر مقیاس‌پذیری و کارایی بیشتر روش پیشنهادی در نگهداری انرژی، نسبت به روش‌های مورد مقایسه دلالت دارند.



شکل ۱۰: طول‌عمر شبکه با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ بر حسب تعداد گره‌های شبکه برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه با چاهک در موقعیت (الف): (۷۵,۷۵) و (ب): (۷۵,۱۵۰)

شکل ۱۱ میزان مجموع داده انتقال داده‌شده در شبکه را بر حسب تعداد دورها برای DEEFCA و سه روش دیگر نشان می‌دهد. به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای پراکندگی، فاصله سرخوشه‌ها و تعداد گام تا ایستگاه پایه در انتخاب سرخوشه‌ها، میزان ارسال داده در دورها در شبکه با روش DEEFCA نسبت به روش‌های دیگر بیشتر است. مرکزیت موقعیت سرخوشه بین اعضای خوشه باعث جمع‌آوری داده بیشتری از اعضا در زمان، می‌گردد. علاوه‌براین، تعداد گام و فاصله کمتر، موجب کاهش از دست رفتن داده در کانال‌های انتقال‌داده و لذا، افزایش دریافت داده صحیح می‌شود.



شکل ۱۱: میزان مجموع داده منتقل‌شده در شبکه بر حسب دور برای DEEFCA و سه روش مورد مقایسه

جدول ۶، نتیجه مقایسه پیچیدگی محاسباتی DEEFCA و روش‌های دیگر را نشان می‌دهد. همانگونه که در بخش ۳-۲ ذکر شد، روش پیشنهادی، با وجود تعداد زیاد پارامترهای ورودی، پیچیدگی محاسباتی را با کاهش تعداد حالات فازی در پایگاه دانش و نیز، سربار عملیاتی سیستم استنتاج فازی، کم می‌کند. به این منظور، عملیات سیستم استنتاج و تولید خروجی فازی در دو مرحله به‌صورت مدولار انجام می‌گیرند. در مرحله اول، میزان امتیاز و جریمه هر گره، حسب پارامترهای ورودی، به‌طور همزمان محاسبه می‌شوند؛ تقسیم و جداسازی معیارهای محاسبه امتیاز و جریمه و اختصاص آن‌ها به مدول‌های خود، باعث ایجاد دو مجموعه حالت مستقل از هم می‌گردد و تعداد کل حالات فازی و نیز، سربار عملیاتی سیستم استنتاج فازی را با وجود پارامترهای ورودی بیشتر، به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم خوشه‌بندی کاملاً توزیع‌شده بر اساس منطق فازی با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش طول‌عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شد. در مرحله انتخاب سرخوشه، در الگوریتم پیشنهادی (DEEFCA)، انرژی باقیمانده و درجه گره، فاصله بین سرخوشه‌ها، انرژی باقیمانده گره‌های همسایه و نیز، پراکندگی، تعداد گام و مدت زمان ارسال یک بسته از گره مورد نظر تا ایستگاه پایه به‌عنوان پارامترهای ورودی فازی به‌کار گرفته شدند. سیستم فازی DEEFCA با ورودی‌های مذکور و قوانین فازی و توابع عضویت خود، کیفیت رویه انتخاب سرخوشه‌ها را بهینه کرده است. تعادل بار کاری در ارتباطات چندگامی و مصرف متوازن انرژی در گره‌ها، از دستاوردهای این روش می‌باشند. نتایج ارزیابی‌ها نشان دادند که در مقایسه با سه الگوریتم EADEEG، DFLC و EEDCF، روش DEEFCA عمر متوسط گره‌های حسگر و درنتیجه، طول‌عمر شبکه و نیز، میزان انتقال‌داده در شبکه را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، گره‌های حسگر ثابت و همگون در نظر گرفته شدند. برای ادامه این تحقیق در کارهای آینده، قابلیت تحرک برای گره‌ها در نظر گرفته خواهد شد و نیز، گره‌ها می‌توانند از لحاظ کاری متنوع و ناهمگون باشند. علاوه‌براین، به‌کارگیری چاهک متحرک به‌جای چاهک ثابت و استفاده از گره‌های عامل در شبکه خوشه‌بندی‌شده، به‌منظور ارتقای طول‌عمر شبکه، از اهداف آتی هستند.

جدول ۶: پیچیدگی محاسباتی DEEFCA و سه روش مورد مقایسه

عملیات		DEEFCA	EEDCF	DFLC	EADEEG
بهنگام‌سازی جدول اطلاعات		P چرخه	P چرخه	P چرخه	P چرخه
انجام محاسبات لازم برای انتخاب سرخوشه		2P+1 چرخه	2P+4 چرخه	2P+10 چرخه	P+7 چرخه
تعین سرخوشه	استخراج داده‌های فازی	۱۸ چرخه برای تعیین امتیاز و جریمه + ۹ چرخه برای تعیین شانس سرخوشه شدن	۹ چرخه برای تعیین احتمال سرخوشه شدن	۲۲ چرخه برای تعیین احتمال سرخوشه شدن	3P+8 چرخه
	غیرفازی‌سازی	۲۵ چرخه در بدترین حالت	۸۲ چرخه	۹۶ چرخه در بدترین حالت	
	مقایسه برای انتخاب سرخوشه	یک چرخه	3P+1 چرخه	P چرخه	
مجموع چرخه‌های ساعت پردازنده گره برای انتخاب سرخوشه		3P+54 چرخه	6P+96 چرخه	4P+128 چرخه	5P+15 چرخه
درجه پیچیدگی محاسباتی روش		O(N)	O(N)	O(N)	O(N)

مراجع

[1] A.S. Rostami, M. Badkoobe, F. Mohanna, H. Keshavarz, A.A. Hosseinabadi and A. K. Sangaiah, "Survey on Clustering in Heterogeneous and Homogeneous Wireless Sensor Networks," The Journal of Supercomputing, Vol. 74, No. 1, pp. 277-323, 2018.

[2] F. Zhu and J. Wei, "An Energy-efficient Unequal Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 15, Issue 9, pp. 1-15, 2019.

[3] A. Ali, Y. Ming, S. Chakraborty and S. Iram, "A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN," Future Internet, Vol. 9, Issue 4, pp. 1-22, 2017.

[4] R-S. Liu and Y-C. Chen, "Robust Data Collection for Energy-harvesting Wireless Sensor Networks," Computer Networks, Vol. 167, Article 107025, 2020.

[5] A. Ghosal, S. Halder and S.K. Das, "Distributed On-demand Clustering Algorithm for Lifetime Optimization in Wireless Sensor Networks," Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 141, pp. 129-142, 2020.

[6] R. Logambigai and A. Kannan, "Fuzzy Logic Based Unequal Clustering for Wireless Sensor Networks," Wireless Networks, Vol. 22, pp. 945–957, 2016.

[7] S. A. Mary and J.B. Gnanadurai, "Enhanced Zone Stable Election Protocol based on Fuzzy Logic for Cluster Head Election in Wireless Sensor Networks," International Journal *of* Fuzzy Systems, Vol. 19, pp. 799–812, 2017.

[8] A. Ghaffari, A. Rahmani and A. Khademzadeh, "Energy-efficient and QoS-aware Geographic Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," IEICE Electronics Express, Vol. 8, No. 8, pp. 582-588, 2011.

[9] M. Liu, Y. Zheng, J. Cao, G. Chen, L. Chen and H. Gong, "EADEEG: An Energy-Aware Protocol for Data Gathering Applications in Wireless Sensor Networks," Journal of Software, Vol. 18, No. 5, pp. 1092-1109, 2007.

[10] D. Ruan and J. Huang, "A PSO-Based Uneven Dynamic Clustering Multi-Hop Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 19, No. 8, pp. 1-24, 2019.

[11] S. Ghasemnezhad and A. Ghaffari, "Fuzzy Logic Based Reliable and Real-time Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks," Wireless Personal Communications, Vol. 98, Issue 1, pp. 593-611, 2018.

[12] A. Alaybeyoglu, "A Distributed Fuzzy Logic-based Root Selection Algorithm for Wireless Sensor Networks," Computers and Electrical Engineering, Vol. 41, pp. 216–225, 2015.

[13] Y. Zhang, J. Wang, D. Han, H. Wu and R. Zhou, "Fuzzy-Logic Based Distributed Energy-Efficient Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 17, pp. 1-21, 2017.

[14] A. Hamzah, M. Shurman , O. Al-Jarrah and E. Taqieddin, "Energy-Efficient Fuzzy-Logic-Based Clustering Technique for Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," Sensors, Vol. 19, pp. 1-23, 2019.

[15] M. Khabiri and A. Ghaffari, "Energy-aware Clustering-based Routing in Wireless Sensor Networks Using Cuckoo Optimization Algorithm," Wireless Personal Communications, Vol. 98, Issue 3, pp. 2473-2495, 2018.

[16] D.M.S. Bhatti, N. Saeed and H. Nam, "Fuzzy C-Means Clustering and Energy Efficient Cluster Head Selection for Cooperative Sensor Network," Sensors, Vol.16, No. 9, pp. 1-17, 2016.

[17] N. Saeed and H. Nam, "Cluster Based Multidimensional Scaling for Irregular Cognitive Radio Networks Localization," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 64, pp. 2649–2659, 2016.

[18] Z. Mottaghinia and A. Ghaffari, "Fuzzy Logic Based Distance and Energy-aware Routing Protocol in Delay-tolerant Mobile Sensor Networks," Wireless Personal Communications, Vol. 100, Issue 3, pp. 957-976, 2018.

[19] B. Baranidharan and B. Santhi, "DUCF: Distributed Load Balancing Unequal Clustering in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Approach," Applied Soft Computing, Vol. 40, pp. 495–506, 2016.

[20] H.D. Nikokheslat and A. Ghaffari, "Protocol for Controlling Congestion in Wireless Sensor Networks," Wireless Personal Communications, Vol. 95, Issue 3, pp. 3233-3251, 2017.

[21] B. Balakrishnan and S. Balachandran, "FLECH: Fuzzy Logic Based Energy Efficient Clustering Hierarchy for Nonuniform Wireless Sensor Networks," Wireless Communications and Mobile Computing, pp.1-13, 2017.

[22] S. Tabibi and A. Ghaffari, "Energy-efficient Routing Mechanism for Mobile Sink in Wireless Sensor Networks Using Particle Swarm Optimization Algorithm," Wireless Personal Communications, Vol. 104, Issue 1, pp. 199-216, 2019.

[23] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan and H. Balakrish-nan, "An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Transactions on wireless communications, Vol.1, Issue 4, pp. 660-670, 2002.

[24] W. Wang, X. Liu, M. Li, Z. Wang and C. Wang, "Optimizing Node Localization in Wireless Sensor Networks Based on Received Signal Strength Indicator," IEEE Access, Vol. 7, pp. 73880-73889, 2019.

پاورقی‌ها:

[1] Distributed Energy Efficient Fuzzy-based Clustering Algorithm

[2] Base station

[3] Energy-Aware Data Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks

[4] Distributed Fuzzy Logic-based Clustering algorithm

[5] Hot spot

[6] Energy-Efficient Distributed Clustering algorithm based on Fuzzy approach

[7] Fuzzification and Inference system

[8] Knowledge base

[9] Defuzzification

[10] Center of gravity

[11] Exhaustive Search

[12] First Node Die

[13] Half Nodes Die

[14] All Nodes Die