

Trust based Fuzzy Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks

Javad Hamidzadeh^{1*}, Mona Moradi²

1- Faculty of Computer Engineering and Information Technology, Sadjad University, Mashhad, Iran.

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

^{1*} J_hamidzadeh@sadjad.ac.ir, ² MMoradi@semnan.ac.ir

Corresponding author address: Javad Hamidzadeh, Faculty of Computer Engineering and Information Technology, Sadjad University, No. 64 Jalal Al Ahmad St, Mashhad, Iran, Post Code : 9188148848.

Abstract- Wireless sensor networks consist of a large number of sensor nodes scattered over a limited geographical area. The main challenge of these networks is energy consumption. Clustering is a well-known way to save energy and extend network's lifetime. Many studies iteratively change the cluster formation to increase the network's lifetime; however, this issue imposes high energy consumption on clusters. Also, some clustering methods select individual cluster heads for near clusters, which leads to more energy consumption. Another major issue is selecting untrusted and unreliable nodes as cluster heads because it leads to unreliable interactions between nodes and reduces the security of the network. The proposed method aims to provide an efficient clustering method that, in addition to having the benefits of energy consumption management, can provide a secure path for interaction and communication between nodes by identifying malicious nodes and not selecting them as cluster heads. Accordingly, each node's chance is calculated using the fuzzy approach, and nodes that have the highest chances are considered cluster heads. Also, the process of cluster formation is done by fuzzy logic by defining the objective function consisting of residual energy, distance to the base station, and the average intra-cluster distance. The efficiency of the proposed method is compared with both baseline and state-of-the-art methods. The statistical analysis indicates that the proposed method on average provides better results than other competitors and the results demonstrate how this method at least improves life time and residual energy by 59.83% and 14.75%, respectively.

Keywords- Wireless Sensor Network, Clustering, Cluster Head Selection, Network Lifetime, Trust Management, Security, Centrality Degree, Fuzzy Logic.

انتخاب سرخوشه فازی مبتنی بر اعتماد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

جواد حمیدزاده^{۱*}، منا مرادی^۲

* ۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران.

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

^{۱*}J_hamidzadeh@sadjad.ac.ir, ^۲MMoradi@semnan.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: جواد حمیدزاده، مشهد، بلوار جلال آل احمد، جلال آل احمد ۶۴، دانشگاه سجاد، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، کد پستی: ۹۱۸۸۱۴۸۸۴۸.

چکیده- شبکه‌های حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی گره حسگر می‌باشند که در یک منطقه محدود جغرافیایی پراکنده شده‌اند. چالش اصلی این شبکه‌ها محدودیت انرژی است. خوشه‌بندی، یک راه‌حل شناخته‌شده برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه است. در اکثر روش‌های ارائه‌شده در هر دوره، آرایش خوشه‌ها و سرخوشه‌ها جهت افزایش طول عمر شبکه تغییر می‌یابد که باعث تحمیل مصرف انرژی بالا به سرخوشه‌ها می‌شود. همچنین برخی از روش‌های خوشه‌بندی منجر به انتخاب سرخوشه‌های مجزا برای خوشه‌های نزدیک به یکدیگر می‌شوند که مصرف انرژی بیشتری در پی دارند. مسئله اساسی دیگر، انتخاب گره‌های نامعتبر و نامطمئن به عنوان سرخوشه است زیرا منجر به عدم اطمینان در تعامل میان گره‌ها و کاهش امنیت کل شبکه می‌شود. هدف از روش پیشنهادی، ارائه یک روش خوشه‌بندی کارا است که علاوه بر برخورداری از مزایای مدیریت مصرف انرژی از طریق راهکارهایی نظیر عدم تغییر آرایش خوشه‌ها و سرخوشه‌ها در هر دور از اجرا و عدم انتخاب سرخوشه‌های مجزا برای خوشه‌های نزدیک، بتواند با تشخیص گره‌های مخرب و عدم انتخاب آن‌ها به عنوان سرخوشه، مسیری امن برای تعامل و ارتباط میان گره‌ها فراهم نماید. در روش پیشنهادی، شانس سرخوشه‌گی هر گره با استفاده از رویکرد فازی محاسبه شده و گره‌های با شانس بیشتر، به عنوان گره مجاز و معتبر برای برقراری ارتباط شناخته می‌شوند. همچنین فرایند تشکیل خوشه به روش فازی و با تعریف تابع هدف متشکل از پارامترهای انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و میانگین فاصله گره‌های درون یک خوشه تا سرخوشه انجام می‌شود. کارایی روش پیشنهادی با روش‌های پایه و مرز دانش مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند روش پیشنهادی به طور میانگین ۵۹.۸۳٪ افزایش طول عمر و ۱۴.۷۵٪ کاهش مصرف انرژی را در پی دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، خوشه‌بندی، انتخاب سرخوشه، طول عمر شبکه، مدیریت اعتماد، امنیت، درجه مرکزیت، منطق فازی.

۱- مقدمه

توانایی پردازش داده‌ها و برقراری ارتباط از طریق رسانه بی‌سیم در فواصل کوتاه را دارند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای محدودیت در تأمین انرژی، محاسبات و حافظه هستند و از آنجا که در بیش‌تر مواقع، حسگرها در مناطقی پراکنده می‌شوند که امکان تعویض و یا شارژ مجدد باتری‌ها غیرممکن است، کاهش مصرف انرژی در این شبکه‌ها بسیار ضروری است.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی حسگر است که به منظور جمع‌آوری اطلاعات در کاربردهایی مانند نظارت بر شرایط محیط، آب‌وهوا، مراقبت‌های بهداشتی و کنترل وضعیت بیمارها، کنترل ترافیک، ره‌گیری و نظارت بر اهداف نظامی و اتوماسیون منازل [۱، ۲] پراکنده شده‌اند. این حسگرها علیرغم کوچکی ابعاد،

نوآوری‌های مقاله بدین شرح است:

- ارائه روشی برای مدیریت مصرف انرژی با در نظر گرفتن عواملی نظیر عدم الزام به تغییر آرایش خوشه‌ها و سرخوشه‌ها در هر دور اجرا، عدم انتخاب سرخوشه مجزا برای خوشه‌های نزدیک و عدم انتخاب گره‌های نامطمئن به عنوان سرخوشه

- انتخاب سرخوشه مناسب به روش فازی و با در نظر گرفتن معیارهای اعتماد رفتار گره، درجه مرکزیت، فاصله تا ایستگاه پایه، انرژی باقی‌مانده و میانگین فاصله اعضا تا سرخوشه

- تغییر توپولوژی شبکه به روش فازی و با تعریف تابع هدف متشکل از پارامترهای انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و میانگین فاصله گره‌های درون یک خوشه تا سرخوشه.

سازمان‌دهی مقاله به صورت زیر است: مطالعات انجام‌شده در حوزه خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم در بخش دوم مرور شده است. روش پیشنهادی و آزمایش‌های انجام‌شده در بخش‌های سوم و چهارم بیان شده‌اند. در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و کارهای آینده ارائه شده‌اند.

۲- مطالعات انجام‌شده

یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش مصرفی انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی با هدف توزیع انرژی در کل شبکه حسگر است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم انجام شده است. در یک دسته‌بندی کلی، روش‌های خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به ۴ دسته کلی سنتی، فرا ابتکاری، فازی و ترکیبی تقسیم می‌شوند [۱۳].

روش‌های سنتی: این روش‌ها خود نیز به دو دسته تک سطحی و چند سطحی تقسیم می‌شوند. در روش‌های سنتی تک سطحی، هر سرخوشه به صورت مستقیم با ایستگاه پایه در ارتباط بوده؛ حال آنکه در روش‌های سنتی چند سطحی، سرخوشه‌ها طبق ساختار سلسله مراتبی به ایستگاه پایه متصل هستند. در روش‌های اولیه این دسته، انتخاب سرخوشه به صورت تصادفی انجام می‌گردد اما به تدریج روش‌های بهبودیافته با هدف ایجاد توازن بار میان گره‌ها ارائه گردید. بدین منظور، نقش سرخوشه‌گی به صورت نوبتی به تمامی گره‌های واجد شرایط محول می‌گردد. روش LEACH [۱۴] به عنوان یکی از قدیمی روش‌های خوشه‌بندی سنتی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم شناخته شده است. در این الگوریتم، هر گره در هر دور اجرای شبکه یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ اختیار می‌کند و این عدد

روش‌های خوشه‌بندی به عنوان یک راه‌حل مؤثر برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سازمان‌دهی شبکه جهت ایجاد توازن بار [۳]، مقاومت در برابر خطا [۴]، حفظ امنیت و قابلیت اطمینان [۵]، تجمیع داده [۶، ۷]، مقیاس‌پذیری [۸] و افزایش طول عمر شبکه [۹] ارائه شده‌اند. در روش‌های مبتنی بر خوشه‌بندی، تعدادی از گره‌های شبکه، به عنوان سرخوشه^۲ انتخاب و سایر گره‌ها، به یکی از این سرخوشه‌ها ملحق شده و داده‌های خود را به سرخوشه خود ارسال می‌کند. سرخوشه‌ها نیز داده‌های جمع‌آوری شده را به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند. از آنجاکه با انتخاب سرخوشه مناسب می‌توان به‌طور قابل‌توجهی از مصرف انرژی کاسته و عمر شبکه را افزایش داد، معیارهای انتخاب یک گره به عنوان سرخوشه بسیار حائز اهمیت است [۱۰]. از آنجاکه معیارهای متعددی در انتخاب یک گره به عنوان سرخوشه نقش دارند، با مسئله عدم قطعیت روبه‌رو هستیم. از دیدگاه عدم قطعیت، استفاده از منطق فازی یک رویکرد مناسب است.

اساس شبکه‌های حسگر، مشارکت میان گره‌ها در ارسال و دریافت داده‌ها است. بدرفتاری گره‌ها به دلیل وجود اهداف مخرب، آسیب‌پذیری‌های امنیتی در برابر حملات مختلف به دلیل ارتباطات آزاد و حفاظت نشده، انتقال غیرقابل‌اعتماد و همه‌پخشی^۳ و وجود محیط‌های باز و خصمانه از عواملی هستند که منجر به کاهش کارایی این شبکه‌ها می‌شوند. بنابراین، امنیت نیاز اساسی دیگری است که باید به آن توجه شود. سیستم‌های مدیریت اعتماد^۴ با محاسبه میزان اعتماد گره‌ها، گره‌های مخرب را شناسایی و آن‌ها را از فرآیندهای شبکه حذف می‌کنند. این سیستم‌ها، به‌واسطه قابلیت شناسایی گره‌های غیرقابل‌اعتماد، ابزارهایی قدرتمند برای بهبود همکاری بین گره‌ها، بهبود عملکرد شبکه و افزایش امنیت هستند [۱۱].

یک مسئله کلیدی در تجزیه و تحلیل روابط بین موجودیت‌ها در شبکه، مفهوم درجه مرکزیت^۵ است که میزان ارتباط و تعامل یک گره با گره‌های همسایه را نشان می‌دهد. موقعیت مرکزی سرخوشه منجر به کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی شده و تأثیر مستقیم بر عملکرد کل خوشه دارد. بنابراین، می‌توان از درجه مرکزیت به عنوان معیاری مناسب در انتخاب سرخوشه بهره برد [۱۲].

هدف از روش پیشنهادی، ارائه یک روش خوشه‌بندی کارا با رویکرد فازی است که علاوه بر برخورداری از مزایای مدیریت مصرف انرژی روش‌های خوشه‌بندی، با شناسایی گره‌های غیرمجاز و عدم انتخاب آن‌ها به عنوان سرخوشه، مسیری امن برای ارتباط میان گره‌ها ارائه نماید.

خوشه انجام شده است. در [۲۵] روش مبتنی بر منطق فازی با هدف افزایش طول عمر شبکه و برقراری توازن بار میان گره‌های حسگر ارائه شد. معیارهای مؤثر در انتخاب سرخوشه توسط این روش عبارتند از: فاصله تا ایستگاه پایه، چگالی گره، انرژی باقی‌مانده، میزان آسیب‌پذیری گره، فاصله میان سرخوشه‌ها و مرکزیت. در HQCA-WSN [۲۶] با در نظر گرفتن فواصل درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای و نرخ خطای خوشه‌بندی، روش مبتنی بر منطق فازی با استفاده از معیارهای مقدار انرژی باقی‌مانده، مقدار کمینه/بیشینه انرژی در هر خوشه، مقدار کمینه/بیشینه فواصل میان گره‌ها در هر خوشه و ایستگاه پایه پیشنهاد گردید که از قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری مطلوبی برخوردار است. در [۲۷] نیز روش خوشه‌بندی فازی با در نظر گرفتن انرژی باقی‌مانده و مرکزیت به عنوان راهکاری برای کاهش مصرف انرژی معرفی گردید. به طور خلاصه، محدودیت روش‌های فازی، نیاز به توجه ویژه به مسئله مسیریابی و پیچیدگی بیشتر آن‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی است، هرچند برای غلبه بر این مشکل، رویکردهای توزیع‌شده پیشنهاد شده‌اند. بررسی پارامترهای انتخاب سرخوشه به روش فازی نشان می‌دهد میزان انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و درجه گره پرکاربردترین ورودی‌های فازی بوده، همچنین، سیستم استنتاج فازی ممدانی و غیرفازی سازی به روش مرکز ثقل پرکاربردترین روش‌ها هستند [۲۸-۳۱].

روش‌های فرا ابتکاری: از آنجا که برای n گره حسگر، $2^n - 1$ راه‌حل وجود دارد، پس خوشه‌بندی شبکه حسگر بیسیم و انتخاب سرخوشه، مسئله NP -Hard بوده؛ بنابراین روش‌های ابتکاری می‌توانند به عنوان رویکردی مناسب جهت رسیدن به جواب بهینه تلقی شوند. در [۳۲] دو الگوریتم بهبودیافته LEACH ارائه شد. روش‌های مذکور توانستند با استفاده از الگوریتم ژنتیک و میزان انرژی باقیمانده و فاصله به عنوان پارامترهای انتخاب سرخوشه، انتخاب سرخوشه مناسب را انتخاب نمایند. در [۳۳] از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب سرخوشه‌های بهینه استفاده گردید. تابع هدف طراحی‌شده در این روش شامل پارامترهای میانگین انرژی گره‌های غیر سرخوشه و میانگین انرژی گره‌های سرخوشه است. در [۳۴] تابع هدف با در نظر گرفتن پارامترهای انرژی باقی‌مانده، کیفیت خوشه، انرژی خوشه و میزان تأخیر در ارسال طراحی گردید و سرخوشه‌های بهینه توسط الگوریتم ژنتیک انتخاب شدند. بررسی پارامترهای دخیل در تابع بهینه الگوریتم‌های ابتکاری نشان می‌دهد که دو عامل انرژی باقیمانده و فاصله (درون و بیرون خوشه‌ای) در تابع هدف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت مهم روش‌های ابتکاری، پیچیدگی محاسباتی آن‌ها بوده و به دلیل محدود بودن توان

تصادفی با یک مقدار حد آستانه مقایسه می‌شود. اگر این عدد تصادفی از مقدار حد آستانه کم‌تر باشد گره به‌عنوان سرخوشه در نظر گرفته می‌شود. روش T-LEACH [۱۵] شامل دو ماژول اصلی مدیریت اعتماد و مسیریابی مبتنی بر اعتماد است. در مقایسه با الگوریتم LEACH، T-LEACH در برابر گره‌های مخرب مقاوم‌تر است. باین‌حال، روش T-LEACH در مواجهه با حملات تبانی آسیب‌پذیر است. در [۱۶] روشی برای خوشه‌بندی و مسیریابی بهینه گره حسگر ارائه گردید. ایراد این روش عدم ارائه راه‌حلی بهینه برای تحویل داده‌ها به بلادرنگ است. به‌طور کلی، روش‌های سنتی با بهره‌گیری از داده‌های محلی نظیر توزیع حسگرها، در انتخاب سرخوشه موفق بوده اما در عین حال دارای محدودیت‌هایی نظیر عدم توجه به پارامترهای مؤثر در انتخاب سرخوشه متناسب با میزان تأثیر آن‌ها هستند.

روش‌های فازی: این روش‌ها در دو مرحله انتخاب سرخوشه مناسب و خوشه‌بندی، با بهره‌گیری از منطق فازی توانسته‌اند بر مسئله عدم قطعیت در محیط حسگرهای بیسیم و همپوشانی پارامترهای دخیل در انتخاب سرخوشه غلبه نمایند. در [۱۷] نسخه فازی روش LEACH ارائه گردید. در این روش، انتخاب سرخوشه توسط پارامترهای میزان انرژی باقیمانده، فاصله تا ایستگاه پایه و درجه گره انجام می‌گیرد. روش ارائه شده در [۱۸] شانس سرخوشه‌گی را با توجه به پارامترهای انرژی سرخوشه، فاصله سرخوشه تا ایستگاه پایه و تعداد اتصالات سرخوشه و با بهره‌گیری از منطق فازی محاسبه می‌کند. در الگوریتم خوشه‌بندی فازی EAUCF [۱۹]، فاصله تا ایستگاه پایه و انرژی باقی‌مانده سرخوشه‌های به عنوان پارامترهای مهم انتخاب سرخوشه در نظر گرفته شده‌اند. انتخاب سرخوشه در الگوریتم خوشه‌بندی فازی FUCA [۲۰] توسط پارامترهای انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و چگالی گره انجام می‌شود. در [۲۱] با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد LEACH، روش فازی با ارائه گردید که در آن از سه پارامتر کارایی مورد انتظار، فاصله تا ایستگاه پایه و انرژی باقی‌مانده در تشکیل خوشه استفاده شد. در [۲۲]، ابتدا ناحیه دربرگیرنده حسگرها با استفاده از رویکرد خوشه‌بندی به چند بخش تقسیم شده و انتخاب سرخوشه به صورت پویا به گونه‌ای انجام می‌شود که بتواند انتقال بار توسط گره حسگرها را متعادل کند. [۲۳] روش فازی به‌منظور انتخاب سرخوشه مناسب ارائه نمود. در این روش، باقی‌مانده انرژی هر حسگر، قابلیت جابه‌جایی ایستگاه پایه و مرکزیت خوشه به عنوان ورودی‌های مدل فازی ممدانی در نظر گرفته شده‌اند. در [۲۴]، انتخاب سرخوشه توسط منطق فازی و با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر فاصله تا ایستگاه پایه، چگالی گره حسگر و میزان انرژی باقی‌مانده در تشکیل

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل سه مرحله اصلی (۱) خوشه‌بندی و تعیین سرخوشه‌های اولیه، (۲) انتقال داده و (۳) انتخاب سرخوشه مناسب است که در الگوریتم ۱ نشان داده شده است.

الگوریتم ۱: روش پیشنهادی.

<p>مقداردهی اولیه: تعداد گره‌ها، مقدار انرژی اولیه گره‌ها، مختصات مکانی گره‌ها، تعیین مکان ایستگاه پایه، تعیین تعداد خوشه‌ها. گام ۱: خوشه‌بندی k-میان و تعیین سرخوشه‌های اولیه گام ۲- برای هر گره داریم: الف- ارسال اطلاعات به ایستگاه پایه و کاهش سطح انرژی گره (رابطه (۱)) ب- در هر خوشه تشکیل شده، محاسبه شانس هر گره برای سرخوشه‌گی با استفاده از رویکرد فازی و معیارهای انرژی باقی‌مانده، مرکزیت، اعتماد، فاصله تا سرخوشه (رابطه (۴)) تا (۷) و با در نظر گرفتن الگوریتم (۲) گام ۳- انتخاب سرخوشه: انتخاب گره با بیش‌ترین شانس به عنوان سرخوشه جدید (رابطه (۴)) تا (۷) و با در نظر گرفتن الگوریتم (۲) گام ۴- برو به گام ۲. تا زمانی که تعداد گره‌ها با سطح انرژی بیش‌تر از E_{thr} بیش‌تر از حد آستانه N_{thr} است این حلقه تکرار شود؛ در غیر این صورت: گام ۵- تشکیل خوشه: تشکیل خوشه‌های جدید با استفاده از رویکرد فازی و معیارهای انرژی باقی‌مانده، فاصله تا سرخوشه، فاصله تا ایستگاه پایه (رابطه (۴)) تا (۷) و با در نظر گرفتن الگوریتم (۲) گام ۶- برو به گام ۲. تا زمانی که تعداد خوشه‌های متشکل از گره‌های با سطح انرژی بیش‌تر از E_{thr} بیشتر از حد آستانه C_{thr} است این حلقه تکرار شود؛ در غیر این صورت: گام ۷- خاتمه الگوریتم.</p>
--

۳-۱- خوشه‌بندی و تعیین سرخوشه‌های اولیه

از آنجاکه فرایند ساخت خوشه از حسگرهای بی‌سیم همانند بخش‌بندی فضای نمونه توسط الگوریتم‌های خوشه‌بندی بوده و از آنجاکه شرایط قرارگیری حسگرها ناپایدار است بنابراین در روش پیشنهادی، با استفاده از الگوریتم k -میان [۴۲]، خوشه‌بندی اولیه گره‌های حسگر انجام و سپس سرخوشه‌های اولیه انتخاب می‌شوند. الگوریتم k -میان علاوه بر همگرایی سریع و عدم نیاز به محاسبات پیچیده حساسیت کمتری نسبت به نویز و داده‌های پرت در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه نظیر k -means دارد. از آنجاکه حسگرهای بی‌سیم در شرایط کنترل نشده محیطی پراکنده می‌شوند، به راحتی در معرض خطاها و حملاتی قرار می‌گیرند که باعث غیرقابل اعتماد بودن و نادرست بودن داده‌های حسگر می‌شوند. در این شرایط، داده‌های حسگرهایی که تفاوت زیادی با رفتارهای سالم داشته باشند، داده‌های پرت یا ناهنجار در نظر گرفته می‌شوند. این الگوریتم، در مرحله اول از بین گره‌های حسگر به صورت تصادفی به تعداد k نماینده خوشه انتخاب می‌کند. مقدار k طبق رابطه (۵) محاسبه شده است [۴۳]. در روش پیشنهادی، این نمونه‌برداری به

پردازشی گره‌های حسگر، تمامی محاسبات در ایستگاه پایه و به صورت متمرکز انجام و سپس اطلاعات لازم به گره‌ها ارسال می‌شود. **روش‌های ترکیبی:** این روش‌ها با ترکیب رویکردهای فازی و فرا ابتکاری از نقاط قوت هر دو روش سود می‌برند. در روش‌های ترکیبی مرحله انتخاب خوشه با استفاده از منطق فازی انجام شده و تابع هدف آن بر مبنای افزایش طول عمر شبکه تعریف می‌گردد. در [۳۵] مسئله خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. این روش با تلفیق الگوریتم تکاملی شیر و منطق فازی و استفاده از معیارهای انرژی باقی‌مانده و فاصله گره از ایستگاه پایه مناسب‌ترین سرخوشه‌ها را انتخاب می‌نماید. در [۲۷] FCHA سرخوشه‌های مناسب با توجه به میزان اهمیت گره در حفظ داده‌ها، مرکزیت میانی و انرژی باقی‌مانده انتخاب می‌شوند. در [۳۶] LEACH-FC از معیارهای انرژی باقی‌مانده، میزان تراکم همسایه‌های هر گره و درجه مرکزیت در انتخاب سرخوشه استفاده شده است. در [۳۷] روش خوشه‌بندی برای پروتکل مسیریابی با مصرف بهینه انرژی ارائه گردید. روش مذکور با ترکیب منطق فازی و الگوریتم تکاملی جستجوی فاخته، سرخوشه مناسب را با در نظر گرفتن پارامترهای انرژی باقی‌مانده، فاصله از ایستگاه پایه، چگالی اطراف گره حسگر و میزان اعتماد انتخاب می‌کند. به‌طور خلاصه، روش‌های ترکیبی به دلیل وجود سربار اطلاعاتی برای مسائل با مقیاس بزرگ مناسب نبوده؛ همچنین به دلیل وجود پیچیدگی محاسباتی، اکثر محاسبات در ایستگاه پایه انجام می‌شود. در روش‌های ترکیبی، پرستفاده‌ترین پارامترهای فازی در انتخاب سرخوشه، انرژی باقیمانده و فاصله تا ایستگاه پایه می‌باشند. دو سیستم استنتاج فازی ممدانی و سوگنو و روش غیرفازی سازی مرکز ثقل از محبوب‌ترین تنظیمات فازی هستند. برخی از روش‌های ترکیبی، برای غلبه از پیچیدگی محاسباتی ناشی از اجرای دوره‌ای الگوریتم‌های فرا ابتکاری، این الگوریتم‌ها را تنها یک بار و به منظور تنظیم سیستم فازی انجام می‌دهند. نکته دیگر آنکه، علیرغم وجود پیچیدگی محاسباتی، این روش‌ها راه‌حل‌های مناسب‌تری ارائه می‌دهند. البته عملکرد روش‌های این دسته به تنظیم صحیح پارامترها وابستگی زیادی دارد [۴۱-۳۸].

ضعف روش‌های مذکور در عدم انتخاب سرخوشه‌ها بر اساس موقعیت‌های مکانی بهینه و عدم مدیریت تعداد خوشه‌ها است که در مراحل با انتخاب تعداد بیش‌تر سرخوشه‌ها نسبت به گره‌های عادی باعث اتلاف مقدار زیاد انرژی می‌شود. همچنین، عدم امکان شناسایی گره‌های مخرب در این روش‌ها عدم برقراری امنیت در شبکه را در پی خواهد داشت.

$$k = \begin{cases} n & d_{toBS} \leq \sqrt[4]{\frac{1}{E_{mp}} \left(\frac{M^2 E_{fs}}{2\pi n} + E_{elec} \right)} \\ \sqrt{\frac{n \cdot E_{fs}}{2\pi \cdot E_{mp}}} \cdot \frac{M}{\sqrt{d_{toBS}^4 - \frac{E_{elec}}{E_{mp}}}} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن k تعداد سرخوشه‌ها، E_{DA} مقدار هزینه برای تجمیع یک بیت داده در هر بار ارسال به ایستگاه پایه و d_{toBS} میانگین فاصله بین سرخوشه و ایستگاه پایه (فاصله بین خوشه‌ای) است. انرژی مصرف‌شده در گره‌های عضو و غیر سرخوشه از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$E_{nonCH} = E_{elec} \times b + b \times E_{fs} \times d_{toCH}^2 \quad (6)$$

که در آن d_{toCH} میانگین فاصله بین گره عضو و سرخوشه مربوطه‌اش (فاصله درون خوشه‌ای) است. انرژی مصرف‌شده در هر خوشه در هر دور، از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$E_{cluster} \approx E_{CH} + \frac{n}{k} E_{nonCH} \quad (7)$$

انرژی کلی مصرف‌شده در شبکه برابر است با:

$$E_{tot} = b \left(2nE_{elec} + nE_{DA} + E_{fs}(kd_{toBS}^2 + nd_{toCH}^2) \right) \quad (8)$$

با محاسبه انرژی مصرفی شبکه برای یک دور انتقال داده از گره‌های حسگر بیسیم به ایستگاه پایه با مقادیر مختلف k ، می‌توان تعداد بهینه سرخوشه‌ها را محاسبه نمود. تعداد بهینه سرخوشه‌ها مقداری است که به ازای آن، انرژی مصرفی شبکه به کمترین مقدار می‌رسد. اهمیت تعداد بهینه سرخوشه به این دلیل است که چنانچه تعداد سرخوشه‌ها بیشتر از تعداد بهینه باشد، انرژی مصرفی گره‌ها و زمان انتخاب سرخوشه افزایش می‌یابد و اگر تعداد سرخوشه‌های انتخابی کمتر از مقدار بهینه باشد، اندازه هر خوشه افزایش و به دنبال آن، سرخوشه‌ها با اضافه‌بار شدید و ترافیک بالا جهت انتقال داده‌ها روبرو می‌شوند که در این حالت احتمال خرابی و از دست رفتن اطلاعات و حتی مرگ سریع گره سرخوشه بسیار بالاست. در هر دو حالت مذکور، عمر شبکه کاهش می‌یابد.

روش بدون جایگذاری انجام می‌شود. به بیانی دیگر، نماینده خوشه تکراری انتخاب نمی‌شود. در مرحله دوم، هر گره به نزدیک‌ترین نماینده خوشه منتسب شده و خوشه‌ها شکل می‌گیرند.

۳-۲- انتقال داده

پس از تشکیل خوشه‌ها، داده‌های حس شده گره‌های غیرسرخوشه از محیط به سرخوشه‌های مربوطه ارسال می‌شود. سرخوشه‌ها پس از دریافت داده‌های تمام اعضای خوشه خود، داده‌ها را تجمیع و به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند. در حین تبادل اطلاعات، انرژی شبکه از طریق حس داده، ارسال داده، دریافت داده و تجمیع داده کاهش می‌یابد. طبق مدل انرژی هینزلمن [۱۴]، هر گره برای ارسال b بیت داده به فاصله d از خود، به اندازه E_T انرژی مصرف می‌نماید که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E_T(b,d) = \begin{cases} E_{elec} \times b + b \times E_{fs} \times d^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ E_{elec} \times b + b \times E_{mp} \times d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن E_{elec} انرژی مصرفی توسط مدار فرستنده، E_{fs} و E_{mp} انرژی فعال‌سازی تقویت‌کننده توان برای دو وضعیت باز و چندمسیره و d_0 حد آستانه محاسبه‌شده توسط رابطه (۲) است.

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (2)$$

طبق رابطه (۱)، در صورت بیشتر بودن فاصله از آستانه d_0 با تنظیم تقویت‌کننده توان فرستنده، از مدل چندمسیره می‌توان استفاده نمود؛ در غیر این صورت، از مدل فضای باز برای کانال استفاده می‌شود. همچنین، مقدار انرژی لازم برای دریافت b بیت داده در گره گیرنده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

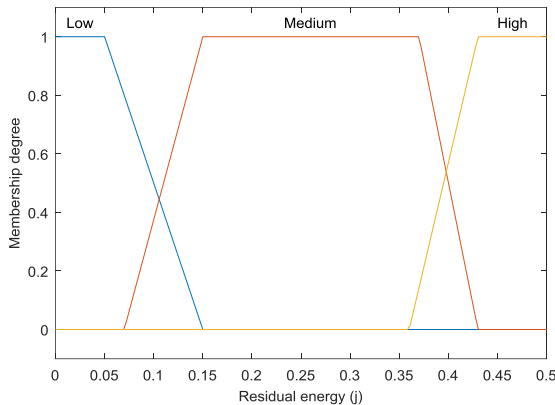
$$E_R(b,d) = E_{elec} \times b \quad (3)$$

با فرض آنکه ناحیه موردنظر مربعی به ابعاد $M \times M$ مترمربع است که n گره زنده در آن به صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند و با این فرض که ایستگاه پایه در مرکز ناحیه قرار دارد، بنابراین فاصله هر گره تا ایستگاه پایه و یا فاصله هر گره تا سرخوشه مربوطه‌اش کمتر از d_0 است. بنابراین، انرژی مصرفی سرخوشه‌ها از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

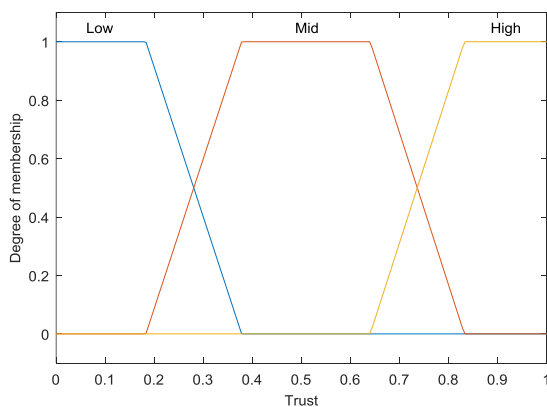
$$E_{CH} = \left(\frac{n}{k} - 1 \right) E_{elec} \times b + \frac{n}{k} E_{DA} \times b + E_{elec} \times b + E_{elec} \times b \times d_{toBS}^2 \quad (4)$$

۳-۳- انتخاب سرخوشه

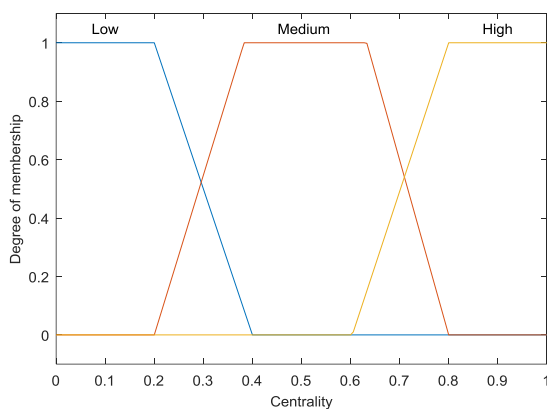
تعریف‌شده فازی (جدول ۱)، برای ارزش‌گذاری بر روی گره‌ها و تسلط بر روی عدم قطعیت استفاده می‌شود. گره‌هایی که ارزش (شانس) بیش‌تری دارند، درنهایت به‌عنوان سرخوشه انتخاب شده و سایر گره‌ها به نزدیک‌ترین سرخوشه پیوسته و به‌این ترتیب خوشه‌ها تشکیل می‌شوند. شکل‌های ۴-۱، مجموعه‌های فازی برای متغیرهای ورودی فازی را نشان می‌دهند.



شکل ۱: مجموعه فازی برای متغیر ورودی فازی انرژی باقی‌مانده.



شکل ۲: مجموعه فازی برای متغیر فازی ورودی اعتماد.



شکل ۳: مجموعه فازی برای متغیر فازی ورودی درجه مرکزیت.

انتخاب سرخوشه معتبر در خوشه‌های شبکه حسگر بی‌سیم مسئله بسیار مهمی به شمار می‌رود. در روش پیشنهادی، از معیارهای زیر برای انتخاب گره سرخوشه استفاده می‌شود:

- انرژی باقی‌مانده: منظور انرژی باقی‌مانده هر یک از گره‌های حسگر شبکه است. هرچه میزان انرژی باقی‌مانده یک گره حسگر بیش‌تر باشد آن گره شانس بیش‌تری برای سرخوشه‌گی دارد.

- اعتماد رفتار: این معیار بر اساس رفتار مثبت (pos) و رفتار منفی (neg) هر گره شبکه تعیین می‌شود. در روش پیشنهادی، ارسال موفق داده توسط گره حسگر به‌عنوان رفتار مثبت و ارسال ناموفق داده توسط گره حسگر به‌عنوان رفتار منفی تلقی می‌شود. مقدار اعتماد رفتار با استفاده از رابطه ریاضی (۹) [۴۴] محاسبه می‌شود:

$$T_i = \frac{pos + 1}{pos + neg + 2} \quad (9)$$

هرچه مقدار اعتماد رفتار یک گره حسگر بیش‌تر باشد، شانس آن گره برای انتخاب شدن به‌عنوان سرخوشه نیز بیش‌تر می‌شود. استفاده از این معیار منجر به تعامل گره‌های قابل‌اعتماد با یکدیگر می‌شود.

- درجه مرکزیت: این معیار میزان مرکزیت سرخوشه C_i را در مقایسه با سایر سرخوشه‌ها $\{C_j\}_{j=1}^k$ در فضایی به ابعاد $M \times M$ محاسبه می‌کند. هرچه میزان یک گره حسگر بیش‌تر باشد، شانس سرخوشه‌گی آن بیش‌تر می‌شود.

$$CD_i = \frac{\sqrt{\sum_{j \in T} d^2(C_{i,j})}}{M} \quad (10)$$

- میانگین فاصله سرخوشه تا گره‌های عضو: هرچه این فاصله برای یک گره حسگر کم‌تر باشد، شانس سرخوشه‌گی بیش‌تر می‌شود.

$$d_i = \frac{1}{N \setminus k} \sum_1^{N \setminus k} d_j \quad (11)$$

که در آن N تعداد گره‌های حسگر و k تعداد سرخوشه است. در روابط (۱۰) و (۱۱)، d از رابطه نرم ۲ (اقلیدسی) محاسبه می‌شود. جهت یادآوری، با فرض آنکه p و q مختصات D -بعدی دو گره حسگر باشند، فاصله دو گره از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^D (p_i - q_i)^2} \quad (12)$$

از آنجاکه انتخاب گره به‌عنوان سرخوشه وابسته به چندین معیار است، بنابراین از روش منطق فازی و قوانین اگر-آن‌گاه^۸ از پیش

صورت تطابق ورودی‌های مسئله با یک قانون، آن قانون فعال شده و محاسبات انجام خواهند شد. شکل ۵ مجموعه فازی متغیر فازی خروجی شانس را نشان می‌دهد. برای این متغیر خروجی، مجموعه مقادیر "خیلی ضعیف، ضعیف، نسبتاً ضعیف، زیر متوسط، متوسط، بالای متوسط، نسبتاً قوی، قوی، خیلی قوی" در نظر گرفته شده است.

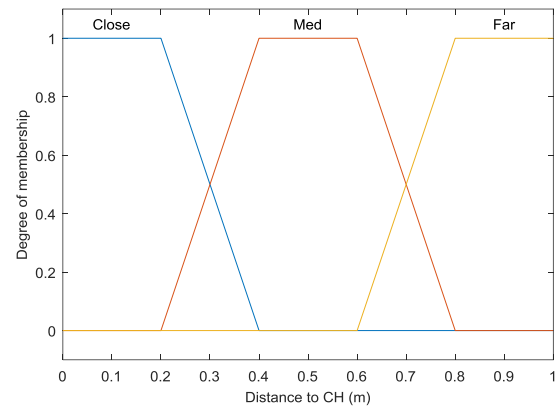
جدول ۱: قوانین اگر-آن‌گاه برای محاسبه شانس سرخوشه‌گی.

ردیف	انرژی باقی‌مانده	درجه مرکزیت	میانگین فاصله اعضا تا سرخوشه	اعتماد	شانس
۱	کم	کم	دور	کم	خیلی ضعیف
۲	کم	کم	متوسط	کم	ضعیف
۳	کم	کم	نزدیک	کم	نسبتاً ضعیف
۴	کم	متوسط	دور	کم	ضعیف
۵	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیر متوسط
۶	متوسط	کم	دور	کم	ضعیف
۷	متوسط	کم	متوسط	متوسط	زیر متوسط
۸	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۹	متوسط	متوسط	نزدیک	متوسط	بالای متوسط
۱۰	متوسط	زیاد	نزدیک	زیاد	قوی
۱۱	زیاد	کم	نزدیک	زیاد	نسبتاً قوی
۱۲	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	بالای متوسط
۱۳	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	قوی
	زیاد	زیاد	نزدیک	زیاد	خیلی قوی

پس از انتخاب سرخوشه‌ها، گره‌های غیرسرخوشه به نزدیک‌ترین سرخوشه منتسب و خوشه‌ها تشکیل می‌شوند. البته در صورتی که تعداد گره‌های با سطح انرژی بیش‌تر از E_{thr} بیش‌تر از حد آستانه N_{thr} باشد، سرخوشه جدید از گره‌های حسگر همان خوشه انتخاب می‌شود در غیر این صورت، نیاز به تشکیل خوشه‌هایی با ساختار جدید است. این مرحله در ادامه توضیح داده شده است.

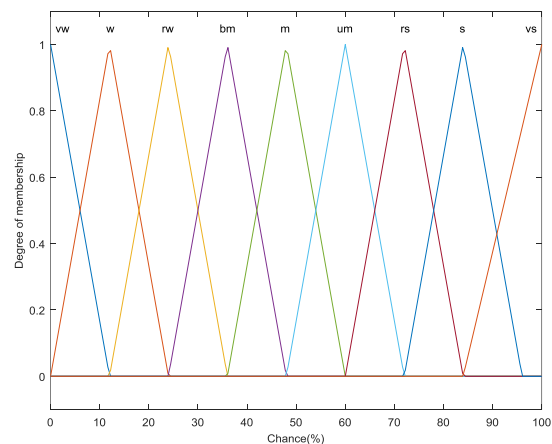
۳-۴- تعیین تعداد خوشه بهینه

همان‌طور که گفته شد، با استفاده از رویکرد فازی سرخوشه‌های بهینه انتخاب می‌شوند. با شناسایی سرخوشه‌ها در هر دور اجرا،



شکل ۴: مجموعه فازی برای متغیر فازی ورودی میانگین فاصله اعضا تا سرخوشه.

همان‌طور که گفته شد، با ترکیب مجموعه‌های فازی و سیستم استنتاج فازی قوانین اگر-آن‌گاه تعریف‌شده، برای هر یک از گره‌های شبکه شانس سرخوشه‌گی محاسبه می‌شود. در روش پیشنهادی، از مدل استنتاج فازی ممدانی^۹ استفاده شده است. مکانیزم استنتاج بدین ترتیب است که پس از استفاده از پارامترهای انتخاب سرخوشه، فازی سازی ورودی‌ها و تعیین درجه عضویت ورودی‌ها و خروجی، به هریک از مجموعه‌های فازی از طریق توابع عضویت، قوانین از پیش تعیین‌شده اعمال می‌شود. سپس فرآیند دلالت^{۱۰} به ازای هر قاعده پیاده‌سازی می‌شود. در این مقاله از روش کمینه (عملگر "AND" فازی) که مجموعه فازی خروجی را برش می‌دهد استفاده شده است. جهت تصمیم‌گیری، خروجی‌های تمام قواعد با استفاده از روش بیشینه (عملگر "OR" فازی) تجمیع می‌شوند. در انتها، خروجی با استفاده از روش مرکز ثقل غیرفازی شده و به مقدار عددی تبدیل می‌شود و به این ترتیب، مقدار شانس گره برای انتخاب به عنوان سرخوشه به دست می‌آید. تمامی قوانین فازی در یک سیستم فازی به صورت هم‌زمان و موازی پردازش شده و در



شکل ۵: مجموعه فازی برای متغیر فازی خروجی شانس سرخوشه‌گی.

• تعداد گره‌های با سطح انرژی بیش‌تر از E_{thr} هر خوشه کمتر از حد آستانه N_{thr} باشد.

توپولوژی شبکه مشخص شده و عملکرد شبکه با تابع هدف تعریف‌شده زیر ارزیابی می‌شود.

$$f(C) = f(C_1) + f(C_2) + f(C_3) \quad (13)$$

که در آن $f(C_1)$ به انرژی باقی‌مانده، $f(C_2)$ فاصله تا ایستگاه پایه و $f(C_3)$ به میانگین فاصله گره‌های درون یک خوشه تا سرخوشه اشاره می‌کند. مناسب‌ترین سرخوشه‌ها و به تبع آن مناسب‌ترین توپولوژی شبکه منجر به کمینه شدن تابع هدف فوق می‌گردند. الگوریتم ۲ روال انتخاب تعداد خوشه‌های بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۲: قوانین اگر-آن‌گاه برای محاسبه تشکیل خوشه.

ردیف	انرژی باقی‌مانده	فاصله تا ایستگاه پایه	میانگین فاصله اعضا تا سرخوشه	شانس
۱	کم	دور	دور	خیلی ضعیف
۲	کم	دور	متوسط	ضعیف
۳	کم	دور	نزدیک	نسبتاً ضعیف
۴	کم	متوسط	دور	ضعیف
۵	کم	متوسط	متوسط	نسبتاً ضعیف
۶	کم	متوسط	نزدیک	زیر متوسط
۷	کم	نزدیک	دور	نسبتاً ضعیف
۸	کم	نزدیک	متوسط	زیر متوسط
۹	کم	نزدیک	نزدیک	متوسط
۱۰	متوسط	دور	دور	نسبتاً ضعیف
۱۱	متوسط	دور	متوسط	نسبتاً متوسط
۱۲	متوسط	دور	نزدیک	متوسط
۱۳	متوسط	متوسط	دور	زیر متوسط
۱۴	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۵	متوسط	متوسط	نزدیک	بالای متوسط
۱۶	متوسط	نزدیک	دور	متوسط
۱۷	متوسط	نزدیک	متوسط	بالای متوسط
۱۸	متوسط	نزدیک	نزدیک	نسبتاً قوی
۱۹	زیاد	دور	دور	متوسط
۲۰	زیاد	دور	متوسط	بالای متوسط
۲۱	زیاد	دور	نزدیک	نسبتاً قوی

الگوریتم ۲: تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها.

ورودی: تعداد گره‌های زنده
خروجی: تعداد k خوشه

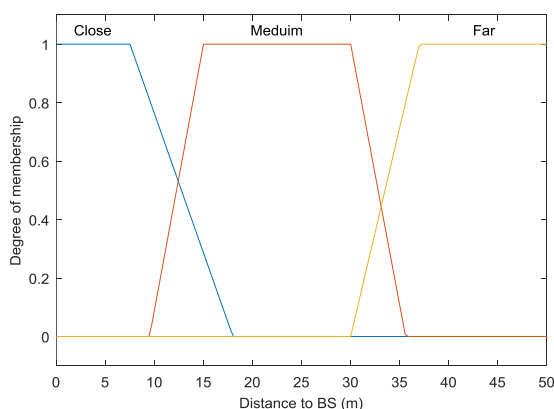
تا زمانی که دور جاری t معتبر است:
 سرخوشه‌های مناسب را طبق الگوریتم ۱ پیدا کن
 اگر فاصله گره تا نزدیک‌ترین سرخوشه $>$ فاصله گره تا ایستگاه پایه است
 گره را به نزدیک‌ترین سرخوشه تخصیص بده
 در غیر این صورت
 گره به‌طور مستقیم با ایستگاه پایه ارتباط برقرار می‌کند.
 پایان
 طبق رابطه (۱۳) مقدار تابع هدف در هر دور را محاسبه کن
 اگر $f(C^t) < f(C^{opt})$
 توپولوژی شبکه را با در نظر گرفتن سرخوشه‌های جدید به‌روز کن،
 به‌عبارتی دیگر $f(C^{opt}) \leftarrow f(C^t)$
 پایان
 پایان

۳-۵- تشکیل خوشه

در این مرحله از معیارهای انرژی باقی‌مانده گره، میانگین فاصله اعضا تا سرخوشه و فاصله تا ایستگاه پایه در تشکیل خوشه استفاده می‌شود. برای محاسبه فاصله گره حسگر تا ایستگاه پایه از فاصله اقلیدسی استفاده شده است. هرچه فاصله یک گره حسگر تا ایستگاه پایه کم‌تر باشد، آن گره شانس بیش‌تری برای انتخاب به عنوان سرخوشه به‌دست خواهد آورد. شکل ۶ مجموعه فازی متغیر فازی ورودی فاصله تا ایستگاه پایه را نمایش می‌دهد. با ترکیب مجموعه‌های فازی متغیرهای ورودی و سیستم استنتاج فازی قوانین اگر-آن‌گاه تعریف‌شده (جدول ۲)، ارزش تشکیل خوشه محاسبه می‌شود (شکل ۷).

تشکیل خوشه در شرایطی انجام می‌شود که:

• ساختار خوشه‌ها در دو دور متوالی یکسان نباشد.



شکل ۶: مجموعه فازی برای متغیر فازی ورودی فاصله تا ایستگاه پایه.

(طبق رابطه (۱۵)) برای بیان ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده شده است. به‌عنوان مثال، در روش پیشنهادی برای متغیر انرژی باقی‌مانده، ۳ تابع عضویت دوزنقه‌ای و برای محاسبه شانس سرخوشه‌گی، ۹ تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شده است.

$$\mu_{tri}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{b_1 - a_1} & a_1 \leq x \leq b_1 \\ \frac{c_1 - x}{c_1 - b_1} & b_1 \leq x \leq c_1 \\ 0 & c_1 \leq x \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{trap}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_2 \\ \frac{x - a_2}{b_2 - a_2} & a_2 \leq x \leq b_2 \\ 1 & b_2 \leq x \leq c_2 \\ \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} & c_2 \leq x \leq d_2 \\ 0 & d_2 \leq x \end{cases} \quad (15)$$

با استفاده از سیستم استنتاج فازی، مقدار عددی شانس به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. فرض کنید با در اختیار داشتن مقدار انرژی باقیمانده $J = 0.1$ ، مقدار مرکزیت 0.7 ، میزان اعتماد 0.3 و میانگین فاصله تا ایستگاه پایه 0.7 می‌خواهیم شانس سرخوشه‌گی را برای یک گره حسگر محاسبه نماییم. در این حالت با در نظر گرفتن اشکال ۱ تا ۵، متغیرهای زبانی (کم، متوسط) برای انرژی باقیمانده، (متوسط، زیاد) برای مرکزیت، (متوسط، دور) برای میانگین فاصله تا ایستگاه پایه و (کم، متوسط) برای اعتماد وجود خواهند داشت. طبق جدول ۱، قوانین فازی ۴، ۵ و ۸ فعال صادق خواهند بود.

بر اساس سیستم استنتاج فازی ممدانی، و با در نظر گرفتن روابط (۱۴) و (۱۵)، توابع عضویت دوزنقه‌ای به متغیر زبانی "کم" ورودی انرژی باقی‌مانده اعمال می‌شوند.

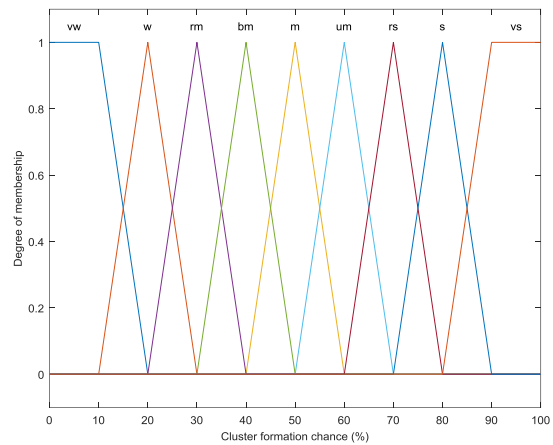
$$X = 0.1 \text{ (کم)}$$

$$\begin{aligned} f(X; a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.1 - (-0.15)}{-0.05 - (-0.15)}, 1, \frac{0.15 - 0.1}{0.15 - 0.05} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(2.5, 1, 0.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

همچنین، توابع عضویت دوزنقه‌ای به متغیر زبانی "متوسط" ورودی انرژی باقیمانده اعمال می‌شوند.

$$X = 0.1 \text{ (کم)}$$

$$\begin{aligned} f(X; a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.1 - 0.05}{0.15 - 0.05}, 1, \frac{0.45 - 0.1}{0.45 - 0.35} \right), 0 \right) \end{aligned}$$



شکل ۷: مجموعه فازی برای متغیر فازی خروجی شانس تشکیل خوشه.

۴- آزمایش‌ها

پیاده‌سازی روش پیشنهادی با توجه به فرضیات زیر انجام می‌شود:

- گره‌های حسگر شبکه به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در فضای شبکه حسگر پراکنده شده‌اند.
- گره‌های حسگر پس از استقرار ثابت هستند و موقعیت مکانی آن‌ها بدون تغییر است.
- گره‌های حسگر به‌صورت همگن^{۱۱} هستند، یعنی از نظر توان محاسباتی و پردازشی مشابه یکدیگر بوده و از همان ابتدای شروع کار شبکه، میزان انرژی تمامی این گره‌ها با هم برابر است.
- گره‌های حسگر از لحاظ انرژی، قدرت محاسباتی و حافظه دارای محدودیت هستند و به‌مرور در طی فرآیندهای شبکه، انرژی آن‌ها تمام می‌شود.
- ایستگاه پایه ثابت است و از نظر انرژی، قدرت محاسباتی و حافظه هیچ‌گونه محدودیتی ندارد.
- ایستگاه پایه تمامی اطلاعات مربوط به گره‌های حسگر شبکه را در اختیار دارد.
- کلیه محاسبات مربوط به خوشه‌بندی شبکه توسط ایستگاه پایه انجام می‌شود.

۴-۱- نمایش عملکرد سیستم استنتاج فازی

همان‌طور که در بخش ۳ بیان گردید، دو مرحله انتخاب سرخوشه و تشکیل خوشه بر اساس مدل فازی پیاده‌سازی شده است. بر اساس اشکال ۱ تا ۷، از توابع عضویت مثلثی (طبق رابطه (۱۴)) و دوزنقه‌ای

برای متغیر زبانی "متوسط" ورودی اعتماد داریم:

$$X = 0.3 \text{ (متوسط)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.3 - 0.2}{0.4 - 0.2}, 1, \frac{0.8 - 0.3}{0.8 - 0.6} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(0.5, 1, 2.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

با اعمال مقادیر در قوانین ۴، ۵ و ۸ داریم:

$$R_{4,5,8}: \min(0.5, 0.5, 0.5, 0.5) = 0.5$$

به عبارتی دیگر، با ورودی‌های معلوم، طبق قانون ۴، بیشینه شانس سرخوشه‌گی "ضعیف" در بازه ۰ تا ۰.۲۵٪ برابر با مقدار عددی ۰.۵ بوده، طبق قانون ۵، بیشینه شانس سرخوشه‌گی "زیر متوسط" در بازه ۰.۲۵٪ تا ۰.۴۹٪ برابر با مقدار عددی ۰.۵ است. همچنین، طبق قانون ۸، بیشینه شانس سرخوشه‌گی "متوسط" در بازه ۰.۳۷۵٪ تا ۰.۶۱۵٪ برابر با مقدار عددی ۰.۵ است. با انجام مرحله فازی زدایی خروجی توسط روش مرکز ثقل، مقدار عددی شانس سرخوشه‌گی گره برابر با ۰.۳۱۵٪ است.

۴-۲- تنظیمات آزمایش

شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و مطابق با مقادیر مندرج در جدول ۳ انجام شده است.

جدول ۳: پارامترهای شبیه‌سازی.

مقدار	پارامتر
$100 \times 100 \text{ m}^2$	$M \times M$
۱۰۰	تعداد گره‌های ایجاد شده تصادفی
(۵۰ و ۵۰)	مختصات مکانی ایستگاه پایه
0.5 J	انرژی اولیه حسگرها
$50 \frac{\text{nJ}}{\text{bit}}$	E_{elec}
$10 \frac{\text{pJ}}{\text{bit}} / \text{m}^2$	E_{fs}
$0.0013 \frac{\text{pJ}}{\text{bit}} / \text{m}^4$	E_{mp}
$5 \frac{\text{nJ}}{\text{bit}} / \text{signal}$	E_{DA}
۱۰۰۰ bit	b

تعداد اولیه خوشه‌ها با مقایسه انرژی مصرفی شبکه با تعداد خوشه‌های ۱ تا ۲۰ به دست آمده است. برای صحت‌سنجی، آزمایش‌ها ۱۰ مرتبه تکرار گردید. طبق نتایج به دست آمده در جدول ۴، میانگین انرژی مصرفی مصرفی با تعداد خوشه ۱۰ به کم‌ترین میزان می‌رسد.

$$\begin{aligned} &= \max(\min(0.5, 1, 3.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

برای متغیر زبانی "متوسط" ورودی مرکزیت داریم:

$$X = 0.7 \text{ (متوسط)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.7 - 0.2}{0.4 - 0.2}, 1, \frac{0.8 - 0.7}{0.8 - 0.6} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(2.5, 1, 0.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

برای متغیر زبانی "زیاد" ورودی مرکزیت داریم:

$$X = 0.7 \text{ (زیاد)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.7 - 0.6}{0.8 - 0.6}, 1, \frac{1.2 - 0.7}{1.2 - 1} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(0.5, 1, 2.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

برای متغیر زبانی "متوسط" ورودی میانگین فاصله تا ایستگاه پایه داریم:

$$X = 0.7 \text{ (متوسط)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.7 - 0.2}{0.4 - 0.2}, 1, \frac{0.8 - 0.7}{0.8 - 0.6} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(2.5, 1, 0.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

برای متغیر زبانی "دور" ورودی فاصله تا ایستگاه پایه داریم:

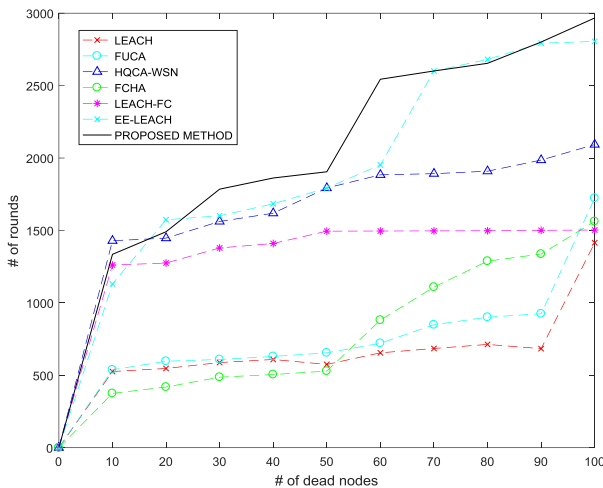
$$X = 0.7 \text{ (زیاد)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.7 - 0.6}{0.8 - 0.6}, 1, \frac{1.2 - 0.7}{1.2 - 1} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(0.5, 1, 2.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

برای متغیر زبانی "کم" ورودی اعتماد داریم:

$$X = 0.3 \text{ (کم)}$$

$$\begin{aligned} f(X: a, c, d) &= \max \left(\min \left(\frac{x - a_2}{b_2 - a_2}, 1, \frac{d_2 - x}{d_2 - c_2} \right), 0 \right) \\ &= \max \left(\min \left(\frac{0.3 - (-0.4)}{-0.2 - (-0.4)}, 1, \frac{0.4 - 0.3}{0.4 - 0.2} \right), 0 \right) \\ &= \max(\min(3.5, 1, 0.5), 0) \\ &= \max(0.5, 0) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

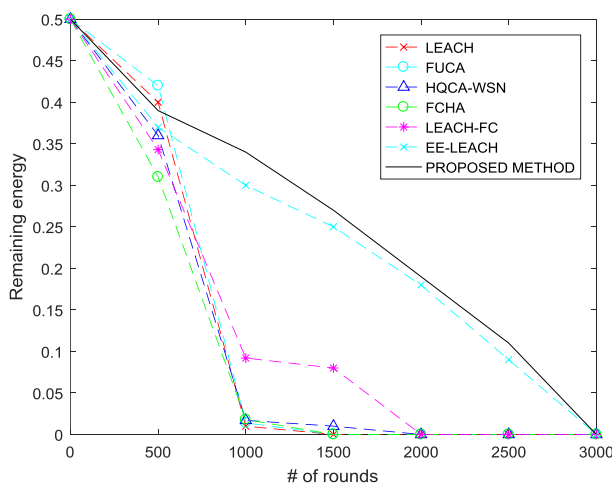


شکل ۸: مرگ گره‌های حسگر در دوره‌های مختلف اجرا.

مبتنی بر منطق فازی راه‌حل‌های بهینه را با پیچیدگی زمانی بیشتری می‌یابند، عملکرد روش پیشنهادی قابل توجهی است.

جدول ۵. زمان مرگ گره‌ها

روش	مرگ اولین گره (دور)	مرگ نیمی از گره‌ها (دور)	مرگ آخرین گره (دور)	زمان اجرا (ثانیه)
LEACH	۴۰۲	۵۷۵	۱۴۱۵	۸.۱۰
FUCA	۵۰۸	۶۵۵	۱۷۲۳	۱۳.۶۴
HQCA-WSN	۱۲۷۲	۱۷۹۴	۲۰۹۳	۱۲۴۶۸.۶۵
FCHA	۳۰۹	۵۲۹	۱۵۶۲	۶۳.۶۰
LEACH-FC	۱۲۰۴	۱۴۹۵	۱۵۰۳	۶۵.۹۲
EE-LEACH	۱۱۰۱	۱۷۹۳	۲۸۰۵	۱۳۷۳۳.۸۱
روش پیشنهادی	۱۳۲۶	۱۹۰۵	۲۹۶۷	۱۲۶۷۴.۸۵



شکل ۹: میزان انرژی باقی‌مانده شبکه در دوره‌های مختلف اجرا.

همچنین جهت بررسی صحت مقدار به دست آمده، نتایج با شبیه‌سازی مدل انرژی هینزلمن (طبق رابطه (۱۶)) با شرایط اولیه یکسان نیز مقایسه گردید. نتایج حاصل، نزدیکی دو مقدار را نشان می‌دهند.

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \frac{M}{d_{toBS}} \quad (16)$$

جدول ۴. میزان انرژی مصرفی شبکه به ازای خوشه‌های اولیه متفاوت.

تعداد خوشه	میانگین ۱۰ دور اجرا
۷	۰.۳۵۱۴
۸	۰.۰۲۶۵
۹	۰.۰۲۱۱
۱۰	۰.۰۱۵۱
۱۱	۰.۰۱۵۵
۱۲	۰.۰۱۸۲
۱۳	۰.۰۱۸۴
۱۴	۰.۰۱۸۵

۴-۳- نتایج

عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتم‌های LEACH [۱۴]، FUCA [۲۰]، HQCA-WSN [۲۶]، FCHA [۲۷]، LEACH-FC [۳۶] و EE-LEACH [۳۱] تحت شرایط یکسان ارزیابی و مقایسه شده است. به‌منظور ارزیابی، دو سناریو با اهداف (۱) مقایسه مصرف انرژی و (۲) سنجش توانایی روش پیشنهادی در تشخیص گره‌های مخرب طراحی شده است. در ادامه، نتایج به‌دست آمده ارائه شده است.

• سناریوی ۱

در این سناریو برای ارزیابی روش پیشنهادی و مقایسه منصفانه با روش‌های رقیب، فرض می‌شود هیچ گره مخربی در شبکه وجود ندارد. نتایج به‌دست‌آمده بر اساس معیار ارزیابی تعداد گره‌های مرده (شکل ۸) نشان می‌دهد در روش پیشنهادی، مرگ آخرین گره نسبت به سایر روش‌ها دیرتر اتفاق می‌افتد پس تبادل اطلاعات میان گره‌های حسگر و ایستگاه پایه در تعداد دوره‌های بیشتری انجام می‌شود. از این رو، روش پیشنهادی توانسته است عملکرد بهتری را نسبت به سایر روش‌ها داشته باشد.

برای درک بهتر کارایی روش‌های پیاده‌سازی شده، زمان مرگ گره‌ها (اولین گره، نیمی از گره‌ها و آخرین گره) و زمان محاسبات در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین زمان اجرا، متعلق به روش LEACH و بیشترین زمان اجرا، متعلق به روش پیشنهادی است. طبق نتایج این جدول، اجرای روش پیشنهادی بیشترین سربار محاسباتی را دارد. از آنجا که روش‌های

۳۰	۸۰	۸۵	۹۲	۹۵
۳۵	۸۴	۸۷	۹۴	۹۵
۴۰	۸۳	۹۱	۹۵	۹۵

جدول ۸: نرخ تشخیص غلط گره‌های مخرب در دوره‌های مختلف اجرا (%).

تعداد گره مخرب	دور			
	۲۰	۱۵	۱۰	۵
۵	۹	۱۴	۱۹	۲۴
۱۰	۹	۱۳	۱۸	۲۶
۱۵	۸	۱۳	۱۷	۱۸
۲۰	۷	۱۱	۱۶	۱۶
۲۵	۶	۱۱	۱۵	۱۳
۳۰	۵	۷	۱۴	۱۴
۳۵	۵	۶	۱۳	۱۱
۴۰	۴	۵	۱۰	۱۰

همچنین، توانایی روش پیشنهادی در تشخیص غلط گره‌های مخرب در جدول ۸ نشان داده شده است. بر این اساس، با افزایش تعداد تکرار روش پیشنهادی، میزان تشخیص غلط گره‌های مخرب کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این مقاله، با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه و ایجاد ارتباط امن و مطمئن میان گره‌های حسگر بی‌سیم، از روش فازی برای انتخاب سرخوشه و تشکیل خوشه در شبکه‌های حسگر استفاده گردید. بدین منظور، عواملی نظیر انرژی باقی‌مانده، درجه مرکزیت، فاصله درون خوشه‌ای و اعتماد رفتار گره به عنوان عوامل مؤثر در افزایش یا کاهش شانس سرخوشه‌گی یک گره در نظر گرفته شدند. همچنین، انرژی باقی‌مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و فاصله درون خوشه‌ای در تغییر توپولوژی خوشه مؤثر شناخته شده‌اند. روش پیشنهادی بر اساس معیارهای ارزیابی مانند تعداد گره‌های مرده، انرژی باقی‌مانده شبکه و زمان اجرا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی از نظر کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه در مقایسه با روش‌های رقیب است. البته از نظر مدت زمان اجرا، روش پیشنهادی به دلیل رویکرد فازی اتخاذشده، بیشترین سربار محاسباتی را دارد. همچنین، نرخ تشخیص گره‌های مخرب توسط روش پیشنهادی بررسی و مشاهده گردید با افزایش تعداد دوره‌های اجرا، روش پیشنهادی توانایی مناسبی در تشخیص گره‌های مخرب شبکه دارد. از آنجاکه هر گره با ایجاد امنیت در مسیریابی و اعتماد در تبادل داده می‌تواند در برقراری امنیت و اعتماد در کل شبکه مؤثر باشد، روش پیشنهادی

علاوه‌براین، مقایسه میزان انرژی باقی‌مانده شبکه در شکل ۹ نشان می‌دهد روش پیشنهادی توانسته است کمترین مصرف انرژی و در نتیجه بیشترین طول عمر را داشته باشد.

جدول ۶ میزان انرژی مصرفی روش‌های پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد. بر این اساس، بیشترین و کمترین میزان انرژی مصرف‌شده در شبکه به ترتیب متعلق به روش LEACH و روش پیشنهادی است. این مسئله، حاکی از آن است که روش پیشنهادی توانسته است راه‌حل‌های بهینه‌ای برای انتخاب سرخوشه و تغییر توپولوژی شبکه با تغییر ساختار خوشه‌ها ارائه نماید.

جدول ۶: انرژی مصرفی شبکه (j).

روش	انرژی مصرفی
LEACH	۰.۳۵۱۹
FUCA	۰.۰۲۶۵
HQCA-WSN	۰.۰۲۵۱
FCHA	۰.۰۳۰۴
LEACH-FC	۰.۰۲۷۳
EE-LEACH	۰.۰۲۱۴
روش پیشنهادی	۰.۰۱۱۸

• سناریوی ۲

هدف از انجام این سناریو، ارزیابی توانایی روش پیشنهادی در شناسایی گره‌های مخرب و عدم انتخاب آن‌ها به عنوان سرخوشه است. زیرا همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، چنانچه گره مخربی نقش سرخوشه را بر عهده گیرد بخشی از داده‌های دریافتی از گره‌های حسگر عضو خوشه خود را برای ایستگاه پایه ارسال نمی‌کند که این مسئله کاهش کارایی شبکه را به دنبال دارند.

در این سناریو، آزمایش‌ها در ۴ دور مختلف {5,10,15,20} و با تعداد {5,10,...,35,40} گره مخرب در شبکه انجام شده‌اند. بر اساس نتایج نشان داده‌شده در جدول ۷، با افزایش تعداد دوره‌های تکرار، روش پیشنهادی توانسته است عملکرد مطلوبی در تشخیص صحیح گره‌های مخرب شبکه از گره‌های عادی شبکه داشته باشد.

جدول ۷: نرخ تشخیص صحیح گره‌های مخرب در دوره‌های مختلف اجرا (%).

تعداد گره مخرب	دور			
	۲۰	۱۵	۱۰	۵
۵	۸۵	۸۰	۷۶	۷۰
۱۰	۸۸	۸۲	۷۴	۶۹
۱۵	۹۲	۸۴	۷۷	۷۶
۲۰	۹۳	۸۳	۸۰	۷۲
۲۵	۹۴	۸۸	۸۱	۷۸

- [12] A. Jain and B. Reddy, "Node centrality in wireless sensor networks: Importance, applications and advances," in 2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC), 2013, pp. 127-131: IEEE.
- [13] F. Fanian and M. Kuchaki Rafsanjani, "Cluster-based routing protocols in wireless sensor networks: A survey based on methodology," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 142, pp. 111-142, 2019/09/15/ 2019.
- [14] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences, 2000, p. 10 pp. vol. 2: IEEE.
- [15] F. Song and B. Zhao, "Trust-based LEACH protocol for wireless sensor networks," in 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking, 2008, vol. 1, pp. 202-207: IEEE.
- [16] S. Sinha and Z. Chaczko, "T-SNIPER: Trust-aware sensor network information protocol for efficient routing," in 2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2010, pp. 686-691: IEEE.
- [17] G. Ran, H. Zhang, S. J. J. o. I. Gong, and C. Science, "Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic," *Journal of Information Computational Science*, vol. 7, no. 3, pp. 767-775, 2010.
- [18] M. Toloueiashtian and H. Motameni, "A new clustering approach in wireless sensor networks using fuzzy system," *The Journal of Supercomputing*, vol. 74, no. 2, pp. 717-737, 2018.
- [19] H. Bagci and A. Yazici, "An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks," *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 4, pp. 1741-1749, 2013.
- [20] D. Agrawal and S. Pandey, "FUCA: Fuzzy-based unequal clustering algorithm to prolong the lifetime of wireless sensor networks," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, no. 2, p. e3448, 2018.
- [21] H. El Alami and A. Najid, "Energy-efficient fuzzy logic cluster head selection in wireless sensor networks," in 2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD), 2016, pp. 1-7: IEEE.
- [22] P. S. Mehra, M. Doja, and B. Alam, "Zonal based approach for clustering in heterogeneous WSN," *International Journal of Information Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 507-515, 2019.
- [23] P. Nayak and A. Devulapalli, "A fuzzy logic-based clustering algorithm for WSN to extend the network lifetime," *IEEE sensors journal*, vol. 16, no. 1, pp. 137-144, 2015.
- [24] S. 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, no. 3, pp. 799-812, 2017.
- [25] Y. K. Tamandani, M. U. Bokhari, and Q. M. Shallal, "Two-step fuzzy logic system to achieve energy efficiency and prolonging the lifetime of WSNs," *Wireless Networks*, vol. 23, no. 6, pp. 1889-1899, 2017.
- [26] A. A. Baradaran and K. Navi, "HQCA-WSN: High-quality clustering algorithm and optimal cluster head selection using fuzzy logic in wireless sensor networks," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 389, pp. 114-144, 2020.
- [27] R. Ranganathan, B. Somanathan, and K. Kannan, "Fuzzy-Based Cluster Head Amendment (FCHA) Approach to Prolong the Lifetime of Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 110, no. 3, pp. 1533-1549, 2020.
- [28] M. Mirzaie and S. M. Mazinani, "Adaptive MCFL: An adaptive multi-clustering algorithm using fuzzy logic in wireless sensor network," *Computer Communications*, vol. 111, pp. 56-67, 2017/10/01/ 2017.

توانسته است با شناسایی صحیح گره‌های مخرب و عدم استفاده از آن‌ها به عنوان سرخوشه، علاوه بر تأمین مسیری امن برای تبادل اطلاعات حسگرها، منجر به برقراری امنیت و اعتماد در کل شبکه شده است.

به عنوان کارهای آینده، استفاده از معیارهای دیگر در مدل فازی، ارائه مدل با انواع مختلف فازی نظیر فازی نوع دوم و ارائه روش خوشه‌بندی در شرایط پویایی ایستگاه پایه یا گره‌های حسگر، پیشنهاد می‌شود. اصلاح عدم قطعیت ناشی از اعمال روش‌های خوشه‌بندی توسط رویکرد فازی نیز به عنوان اقدامات آتی پیشنهاد می‌شود. همچنین، با در نظر گرفتن این مسئله که روش پیشنهادی متمرکز بوده یعنی تشکیل خوشه توسط ایستگاه پایه انجام می‌شود، انطباق روش پیشنهادی در پروتکل‌های خوشه‌بندی توزیع‌شده پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] D. Suhag, S. S. Gaur, and A. Mohapatra, "A proposed scheme to achieve node authentication in military applications of wireless sensor network," *Journal of Statistics and Management Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 347-362, 2019.
- [2] K. K. Khedo, Y. Bissessur, and D. S. Goolaub, "An inland Wireless Sensor Network system for monitoring seismic activity," *Future Generation Computer Systems*, vol. 105, pp. 520-532, 2020.
- [3] N. Munusamy, S. Vijayan, and M. Ezhilarasi, "Role of Clustering, Routing Protocols, MAC protocols and Load Balancing in Wireless Sensor Networks: An Energy-Efficiency Perspective," *CYBERNETICS INFORMATION TECHNOLOGIES*, vol. 21, no. 2, 2021.
- [4] F. Deniz, H. Bagci, and I. Korpeoglu, "Energy-efficient and fault-tolerant drone-BS placement in heterogeneous wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 27, no. 1, pp. 825-838, 2021.
- [5] N. Faruk et al., "A comprehensive survey on low-cost ECG acquisition systems: Advances on design specifications, challenges and future direction," *Biocybernetics Biomedical Engineering*, 2021.
- [6] J. Y. Lu Si, Wuyang Wu, Jun Ma, Qingbo Wu, Shasha Li., "Tree-Based Threshold-Sensitive Energy-Efficient Routing Approach For Wireless Sensor Networks," *Wireless Pers Commun*, vol. 108, pp. 473-492, 2019.
- [7] M. K. Khan et al., "Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Functional and Performance Analysis," *Journal of Sensors*, vol. 2021, 2021.
- [8] A. Alwan, "Data Quality Management in Large-Scale Cyber-Physical Systems," University of East London, 2021.
- [9] A. H. Abdulwahid, "Power grid surveillance and control based on wireless sensor network technologies: Review and future directions," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1773, no. 1, p. 012004: IOP Publishing.
- [10] S. Singh, S. Chand, and B. Kumar, "Energy efficient clustering protocol using fuzzy logic for heterogeneous WSNs," *Wireless Personal Communications*, vol. 86, no. 2, pp. 451-475, 2016.
- [11] H. Jadidoleslami, M. R. Aref, and H. Bahramgiri, "A fuzzy fully distributed trust management system in wireless sensor networks," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, no. 1, pp. 40-49, 2016.

- [37] N. Mittal, S. Singh, U. Singh, and R. Salgotra, "Trust-aware energy-efficient stable clustering approach using fuzzy type-2 Cuckoo search optimization algorithm for wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 27, no. 1, pp. 151-174, 2021.
- [38] S. Gajjar, M. Sarkar, and K. Dasgupta, "FAMACROW: Fuzzy and ant colony optimization based combined mac, routing, and unequal clustering cross-layer protocol for wireless sensor networks," *Applied Soft Computing*, vol. 43, pp. 235-247, 2016.
- [39] Z. M. Zahedi, R. Akbari, M. Shokouhifar, F. Safaei, and A. Jalali, "Swarm intelligence based fuzzy routing protocol for clustered wireless sensor networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 55, pp. 313-328, 2016.
- [40] M. Shokouhifar and A. Jalali, "Optimized sugeno fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks," *Engineering applications of artificial intelligence*, vol. 60, pp. 16-25, 2017.
- [41] F. Fanian and M. K. Rafsanjani, "Memetic fuzzy clustering protocol for wireless sensor networks: Shuffled frog leaping algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 71, pp. 568-590, 2018.
- [42] L. Kaufman and P. J. Rousseeuw, "Partitioning around medoids (program pam)," *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*, vol. 344, pp. 68-125, 1990.
- [43] N. R. Roy and P. Chandra, "A note on optimum cluster estimation in leach protocol," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 65690-65696, 2018.
- [44] G. Han, J. Jiang, L. Shu, J. Niu, and H.-C. Chao, "Management and applications of trust in Wireless Sensor Networks: A survey," *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 80, no. 3, pp. 602-617, 2014.
- [29] N. Mazumdar and H. Om, "Distributed fuzzy approach to unequal clustering and routing algorithm for wireless sensor networks," vol. 31, no. 12, p. e3709, 2018.
- [30] K. Sundaran, V. Ganapathy, and P. Sudhakara, "Fuzzy logic based Unequal Clustering in wireless sensor network for minimizing Energy consumption," in *2017 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (IC CCT)*, 2017, pp. 304-309.
- [31] A. K. Dwivedi and A. K. Sharma, "EE-LEACH: Energy Enhancement in LEACH using Fuzzy Logic for Homogeneous WSN," *Wireless Personal Communications*, pp. 1-21, 2021.
- [32] M. Karimi, H. R. Naji, and S. Golestani, "Optimizing cluster-head selection in Wireless Sensor Networks using Genetic Algorithm and Harmony Search Algorithm," in *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, 2012, pp. 706-710.
- [33] M. O. Oladimeji, M. Turkey, and S. Dudley, "HACH: Heuristic Algorithm for Clustering Hierarchy protocol in wireless sensor networks," *Applied Soft Computing*, vol. 55, pp. 452-461, 2017/06/01/ 2017.
- [34] N. Mittal, U. Singh, and B. S. Sohi, "An energy-aware cluster-based stable protocol for wireless sensor networks," *Neural Computing and Applications*, vol. 31, no. 11, pp. 7269-7286, 2019.
- [35] S. Tabatabaei, A. Rajaei, and A. M. Rigi, "A novel energy-aware clustering method via Lion Pride Optimizer Algorithm (LPO) and fuzzy logic in wireless sensor networks (WSNs)," *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 3, pp. 1803-1825, 2019.
- [36] S. Lata, S. Mehfuz, S. Urooj, and F. Alrowais, "Fuzzy Clustering Algorithm for Enhancing Reliability and Network Lifetime of Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 66013-66024, 2020.

پاورقی‌ها:

⁷ *k*-medoids

⁸ If-then Rules

⁹ Mamdani

¹⁰ Implication

¹¹ Homogeneous

¹ Wireless Sensor Networks

² Cluster Head

³ Broadcast

⁴ Trust Management Systems

⁵ Centrality Degree

⁶ Connections