Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 13, Number 3, Autumn 2024, pp. 1-11
Received: 08/11/2023, Revised: 12/06/2024, Accepted: 12/17/2024

A Clustering Method for Load Balancing and Energy Consumption Optimization 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- Energy consumption is one of the most serious challenges to maximize the lifetime and stability in the design of wireless sensor networks. Clustering as one of the methods of control of connectivity to maintain the stability of these networks can significantly reduce energy consumption. Using different methods to select cluster heads is an important challenge in this research area. Clustering with workload balancing for nodes that do not normally have the same workload is also a challenge. Hence, an efficient clustering method can lead to stability, load balancing and increased lifetime in wireless sensor networks. In this paper, a node clustering method for wireless sensor networks is presented with the aim of balancing workload and energy consumption and, as a result, increasing the network lifetime. By considering the effective parameters in the load balancing of nodes, such as the energy of the cluster head and cluster nodes, cluster stability and data transmission distance, we perform clustering in such a way that this balance in the network causes balanced energy consumption of the nodes and increases the network lifetime. The results of various evaluations show the efficiency of the proposed method in comparison with other methods in increasing and balancing the lifetime of the nodes.

Keywords- Wireless sensor networks, Load balancing, Lifetime optimization, Clustering.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۳، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۳، صفحه ۱-۱۱
دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

یک روش خوشه‌بندی برای متوازن‌سازی بار و بهینه‌سازی مصرف انرژی 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 - مصرف انرژی یکی از جدی ترین چالش‌ها برای به حداکثر رساندن طول عمر و پایداری در طراحی شبکه های حسگر بی سیم می‌باشد. خوشه بندی به عنوان یکی از روش های کنترل همبندی برای حفظ پایداری این شبکه‌ها می تواند به طور قابل توجهی کاهش مصرف انرژی را در پی داشته باشد. استفاده از روش های مختلف برای انتخاب سرخوشه‌ها یک چالش مهم در این حوزه تحقیقاتی به شمار می‌رود. خوشه‌بندی همراه با متوازن‌سازی بار کاری برای گره‌هایی که به طور معمول بار کاری یکسانی ندارند، نیز به عنوان یک چالش مطرح می‌باشد. از این رو، یک روش خوشه‌بندی کارآمد می‌تواند موجب پایداری، تعادل بار و افزایش طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم شود. در این مقاله، یک روش خوشه‌بندی گره‌ها برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با هدف متوازن‌سازی بارکاری و مصرف انرژی و درنتیجه، افزایش طول عمر شبکه، ارائه می‌شود. با لحاظ نمودن پارامترهای مؤثر در توازن بار گره‌ها، از قبیل انرژی سرخوشه و گره‌های خوشه، پایداری خوشه و مسافت انتقال داده، خوشه‌بندی را به نحوی انجام می‌دهیم که این توازن در شبکه باعث مصرف متعادل انرژی گره‌ها و افزایش طول عمر شبکه شود. نتایج ارزیابی‌های مختلف، کارآمدی روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های دیگر، در افزایش و متوازن‌سازی طول عمر گره‌ها، نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، متوازن‌سازی بار کاری، بهینه‌سازی طول عمر، خوشه‌بندی.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی مخابرات بی‌سیم، توانایی طراحی و ساخت حسگرهایی با توان مصرفی پایین، اندازه کوچک، قیمت مناسب و کاربردهای متنوع را فراهم نموده است. این حسگرهای کوچک توانایی انجام اعمالی چون دریافت اطلاعات مختلف محیطی، پردازش و ارسال اطلاعات را دارند که موجب پیدایش شبکه‌های حسگر بی‌سیم شده‌اند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی از دستگاه‌های بسیار کوچک هستند که گره‌های حسگر نامیده می‌شوند. گره‌های حسگر، دستگاه‌های کوچک و هوشمند باقابلیت ارتباط بی‌سیم هستند که می‌توانند داده‌های مختلفی نظیر نور، صوت، دما و غیره را دریافت و پردازش کنند و در نهایت، به سایر گره‌ها انتقال دهند. وظیفه‌ی اصلی این گره‌ها، جمع‌آوری داده‌ها در بازه‌های زمانی منظم است. بعد از جمع‌آوری داده‌ها، همه گره‌ها داده‌ها را برای پردازش بیشتر به یک گره مرکزی به نام گره چاهک ارسال می‌کنند [۱-۳].

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در این نوع شبکه‌ها، گره‌های حسگر به دلیل تعداد زیاد، اندازه کوچک و روش قرارگیری، هنوز هم برای تأمین انرژی خود، متکی به باتری‌هایی با توان اندک می‌باشند. همچنین، معمولاً به دلیل به‌کارگیری این نوع شبکه‌ها در محیط‌های غیرقابل‌دسترس، امکان شارژ مجدد یا تعویض گره‌های حسگر وجود ندارد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مسئله محدودیت شدید انرژی است.

همچنین، ازآنجایی‌که کارایی شبکه‌های حسگر به‌شدت به طول عمر شبکه و پوشش شبکه‌ای آنها وابسته است، لحاظ نمودن الگوریتم‌های ذخیره‌ی انرژی در طراحی این شبکه‌ها، امری حیاتی است. امروزه، روش‌های مدیریت پویای توان که به کاهش مصرف انرژی شبکه‌های حسگر بعد از طراحی و قرارگیری آن‌ها می‌پردازند، از بالاترین اهمیت برخوردار می‌باشند [۳-۵].

گاهی موقعیت ویژه یک گره در شبکه، مسأله طول عمر را تشدید می‌کند. به‌عنوان‌مثال گره‌ای که در فاصله یک گامی گره چاهک قرار دارد، ازیک‌طرف به دلیل بارکاری زیاد، خیلی زود انرژی خود را از دست می‌دهد و از طرف دیگر، ازکارافتادن آن باعث تضعیف ارتباط چاهک با کل شبکه می‌شود و لذا، کار شبکه مختل می‌گردد. برخی از راه‌حل‌ها، برای مقابله با این مشکلات به ساختار برمی‌گردد؛ مثلاً در مورد مشکل فوق استفاده از ساختار خودکار، راهکار مؤثری است. به دلیل آن‌که در ساختار خودکار، بیشتر تصمیم‌گیری‌ها به‌طور محلی انجام می‌شود لذا ترافیک انتقال از طریق گره بحرانی کم شده و درنتیجه طول عمر آن گره و نهایتاً طول عمر شبکه افزایش می‌یابد [۶-۸].

مشکل تخلیه زودهنگام انرژی در مورد گره‌های نواحی کم تراکم در توزیع غیریکنواخت گره‌ها نیز صدق می‌کند، در این‌گونه موارد، داشتن یک مدیریت توان در داخل گره‌ها و ارائه راه‌حل‌های مطلع از توان به‌طوری‌که از گره‌های بحرانی کمترین استفاده را بکند مناسب خواهد بود. این در حقیقت نوعی به اشتراک‌گذاری منابع محسوب می‌شود، لذا در صورت داشتن مدیریت وظیفه و مدیریت توان مناسب بر روی توزیع با چگالی زیاد گره‌ها در میدان حسگر، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. ارائه الگوهای ساختاری مناسب و ارائه روش‌های مدیریتی و الگوریتم‌های مطلع از توان باهدف افزایش طول عمر شبکه حسگر ازجمله مباحث مهم تحقیقاتی است[۹و۱۰].

برای افزایش طول عمر شبکه، نه تنها ذخیره انرژی و افزایش طول عمر در گره‌ها اهمیت فراوانی دارد، بلکه متوازن‌سازی مصرف انرژی در شبکه نیز بسیار مهم است. زیرا، مصرف نامتوازن انرژی در گره‌ها، موجب ناهمگونی در طول عمر آنها می‌شود و در نتیجه، گره‌هایی از شبکه، به این دلیل زودتر از بقیه می‌میرند و حفره‌هایی در شبکه ایجاد می‌گردد. از این رو، بسیاری از اتصالات شبکه قطع می‌شوند و لذا، طول عمر شبکه را کاهش می‌یابد. برای متوازن‌سازی مصرف انرژی، بار کاری گره‌ها را باید متوازن نمود. چرا که، بار کاری گره، تعیین کننده میزان مصرف انرژی در گره می‌باشد. به همین دلیل، موضوع بهینه‌سازی مصرف انرژی و متوازن‌سازی بار به صورت توأم، در طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تعیین کننده می‌باشند [۱۱و۱۲].

با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی، می‌توان در مدیریت انرژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بهبود ایجاد نمود. خوشه‌بندی علاوه بر ایجاد مقیاس‌پذیری در شبکه، می‌تواند ایجاد مسیر درون و بین خوشه‌ها را امکان‌پذیر سازد و بنابراین، مسیریابی در شبکه را آسان‌تر کند. همچنین، خوشه‌بندی می‌تواند با انتخاب سرخوشه‌های مناسب، پهنای باند ارتباطی را حفظ کند، چون ارتباط بین خوشه‌ای را به سرخوشه‌ها محدود می‌کند و از انتقال اضافه بسته‌ها بین گره‌های حسگر جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، خوشه‌بندی می‌تواند همبندی شبکه را به صورت درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای، تثبیت کند [۹-۱۳].

در این مقاله، با توازن بار گره‌های شبکه و مصرف متوازن انرژی گره‌ها، یک روش خوشه‌بندی طرح و پیشنهاد شده است که با متوازن‌سازی بار کاری گره‌ها، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. در روش پیشنهادی، برای تشکیل خوشه‌ها و انتخاب گره‌های سرخوشه، رویه محاسباتی جدیدی طرح می‌کنیم. علاوه بر این، تمام پارامترهای مهم و اطلاعات گره‌های حسگر، به منظور انتخاب بهینه سرخوشه‌ها، در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، عمده نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱) ایجاد توازن بار کاری در گره‌های حسگر شبکه
۲) پایداری خوشه‌های تشکیل شده به روش پیشنهادی برای افزایش طول عمر شبکه
۳) طرح یک روش چندهدفی-فازی خوشه‌بندی و انتخاب سرخوشه مبتنی بر توازن بار و پایداری، برای افزایش طول‌عمر شبکه

ساختار بقیه این مقاله به این صورت است که در بخش دوم به مرور سابقه تحقیق می‌پردازیم. در بخش سوم، روش پیشنهادی با جزئیات توصیف می‌شود. ارزیابی‌های روش پیشنهادی و نتایج مقایسه با روش‌های دیگر، در بخش چهارم مورد بحث واقع می‌شوند و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری انجام می‌گردد.

۲- سابقه تحقیق

به طور کلی، در شبکه‌ها و سیستم های توزیع شده برای بهبود عملکرد کلی خوشه‌ها، از فناوری متعادل‌سازی بار استفاده می‌شود. اغلب از توزیع متعادل بار در سطح نرم افزاری و نیز در تجهیزات فیزیکی استفاده می‌شود. برای توزیع بار می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد؛ این روش‌ها می‌توانند پویا، ایستا و یا

ترکیبی از هر دو باشند. در روش ایستا قوانین توزیع بار به طور مستقیم برنامه ریزی می شود، دلیل این امر این است که نمی‌توان رفتار کاربر را پیش بینی نمود. نقطه ضعف روش های متعادل سازی بار ایستا این است که در بعضی از انواع شبکه ناکارآمد می‌باشند. روش های توزیع بار پویا نسبت به روش های ایستا کارآمد تر هستند زیرا بار شبکه برطبق برخی از الگوهای برنامه‌ریزی شده و بصورت دینامیکی توزیع می‌شوند. استفاده از یک روش توزیع مناسب بار در به حداکثر رساندن مقیاس پذیری، حداقل زمان پاسخ، به حداکثر رساندن ذخیره توان، به حداقل رساندن مصرف منابع و جلوگیری از اضافه بار بر روی هر منبع کمک می کند [۱-۱۴].

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم روش‌های مسیریابی و خوشه‌بندی به صورت متمرکز و یا توزیع‌شده طرح می‌شوند که هر کدام مزایا و معایبی دارند. از جنبه‌های مهم الگوریتم‌های خوشه‌بندی می‌توان به تجمیع داده، تعداد خوشه، خوشه‌های پویا همپوشانی خوشه‌ها، روش انتخاب سرخوشه، اندازه خوشه و امنیت، اشاره نمود [۵-۱۸]. نویسندگان در [۵]، یک روش خوشه‌بندی با استفاده از تجمیع داده‌ها و استقرار چاهک متحرک در شبکه ارائه داده‌اند که از الگوریتم جدیدی برای انتخاب سرخوشه استفاده می‌کند و از چاهک متحرک در جمع‌آوری داده‌ها بهره می‌گیرد. در این روش، فضای تحت پایش به بلوک‌هایی تقسیم می‌شود که در هر بلوک، یک چاهک سیار در یک مسیر تعیین شده بین سرخوشه‌های آن بلوک گردش می‌کند. بعد از هر حرکت، چاهک در مکانی متوقف می‌شود و داده‌های تجمیع شده را از گره‌های سرخوشه‌ای که در برد ارسال سیگنالش قرار دارند، دریافت می‌کند.

در [۶] یک روش خوشه‌بندی توزیع‌شده تحت عنوان HEEL ارائه شده است که عمل انتخاب سرخوشه به صورت توزیع‌شده و بدون حضور یک موجودیت مرکزی انجام می‌شود، لذا با حذف پیام‌های کنترلی اضافی ناشی از انتخاب سرخوشه مصرف انرژی و سربار پیام‌های کنترلی را کاهش داده است. در [۷] یک روش خوشه‌بندی دو مرحله‌ای با استفاده از الگوریتم K-mean و روش تراکم ذرات (PSO) با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ارائه شده است. در این روش خوشه‌بندی که KPSO نام‌گذاری شده است، در مرحله اول، گره‌ها به روش K-mean و بر اساس حداقل فاصله‌ها تا مرکز هندسی خوشه‌ها، خوشه‌بندی می‌شوند و سپس، در مرحله دوم، برای هر خوشه بهترین سرخوشه با بیشترین مقدار برازندگی، با استفاده از روش تراکم ذرات به دست می‌آید. به طور پیوسته، اعضای هر خوشه، داده‌های حس شده را به سرخوشه خود می‌فرستند و سرخوشه‌ها پس از تجمیع داده‌ها، آنها را به یک چاهک ثابت ارسال می‌کنند. ارزیابی‌های انجام شده در مقاله، حاکی از بهبود طول عمر شبکه توسط این روش نسبت به روش‌های قبل از آن، نظیر LEACH و K-mean، می‌باشد.

برای خوشه‌بندی انرژی آگاه از انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم از الگوی متنوع هوش محاسباتی شامل الگوریتم‌های تکاملی، یادگیری تقویتی، سیستم‌های ایمنی مصنوعی و روش فراابتکاری کلونی زنبور عسل استفاده شده است. در [۸-۱۰ و۱۴] از روش‌های فراابتکاری با استفاده از نسخه بهبودیافته معادله جستجوی راه‌حل برای رفع مشکل، بهره‌گیری شده است. در [۱۵]، یک پروتکل مسیریابی بر اساس خوشه‌بندی با ایجاد خوشه‌های ناهمگن و در اندازه‌های مختلف، ارائه شده است. در این روش، ابتدا فقط ناحیه شبکه تقسیم‌بندی می‌گردد و سپس با معیار فاصله بین گره‌ها، خوشه‌ها شکل می‌گیرند. در این پروتکل، نقش سرخوشه‌ها به صورت زمانبندی‌شده، بین گره‌ها جایگزین می‌شود. علاوه بر این، خوشه‌ها با اندازه‌های متفاوت و لحاظ کردن شعاع رقابتی، شکل می‌گیرند. از این رو، از خوشه‌بندی مجدد زود هنگام و مصرف انرژی برای آن، اجتناب می‌شود؛ علاوه بر این، این امر در مصرف متعادل انرژی در گره‌های شبکه مؤثر می‌باشد. برای انتخاب مسیرها در مرحله مسیریابی، به منظور کاهش مصرف انرژی، فاصله تا ایستگاه پایه و درجه اتصال گره‌ها (تعداد همسایگان)، به عنوان معیارهای اصلی لحاظ شده‌اند.

در [۱۶-۲۲] روش‌های ترکیبی برای مصرف بهینه انرژی و افزایش طول عمر شبکه، مطرح شده‌اند. تکنیک‌های کدگذاری و زمان‌بندی، جستجوی هارمونی، پیش‌بینی وضعیت گره‌ها، لبه‌ها و اتصالات، تجمیع داده، منطق فازی و یادگیری ماشین در ترکیب با خوشه‌بندی، برای طرح راهکاری در راستای افزایش طول عمر، به‌کار گرفته شده‌اند. الگوریتم‌ها با استفاده از تکنیک‌های مذکور و تقسیم ناحیه گره‌های حسگر، امکان مدیریت درون‌گروهی را فراهم می‌آورند. بنابراین، بهینه‌سازی به طور جزئی در هر گروه انجام می‌گیرد و این خود، موجب کارایی بالاتر می‌گردد. از طرفی، در تجمیع داده مبتنی بر خوشه‌بندی و درخت، ایستگاه پایه در ابتدا، تعدای خوشه ثابت ایجاد می‌کند. این خوشه‌ها قابل تغییر نیستند و در هر دور تنها سرخوشه تغییر می‌کنند، سرخوشه‌ها به نحوی انتخاب می‌گردند که در هر خوشه، سرخوشه آن در مرکز قرار گیرد. پس از انتخاب سرخوشه‌ها در هر دور، بین سرخوشه‌ها درخت پوشای مینیمم ایجاد می‌گردد.

در [۲۳]، مشابه با [۷]، روشی دو مرحله‌ای برای خوشه بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود طول عمر شبکه، پیشنهاد شده است. در مرحله اول، از الگوریتم جستجوی هارمونی برای تعیین مجموعه اولیه گره‌های سرخوشه کارآمد، که به اندازه کافی با فاصله معینی از دیگری جدا شده اند، استفاده می‌شود. در مرحله دوم، گره‌های سرخوشه‌ای که در مرحله اول انتخاب شده‌اند، توسط الگوریتم کرم شب‌تاب با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند چگالی گره، فشردگی خوشه و انرژی مورد نیاز، به منظور انتخاب بهینه، پالایش می‌شوند. گره‌های معمولی بر اساس فاصله تا سرخوشه و نیز، انرژی باقیمانده سرخوشه، امتیاز پیوستن به هر سرخوشه ممکن را می‌یابند و به سرخوشه با بالاترین امتیاز می‌پیوندند. این فرآیند تشکیل خوشه، موجب کاهش مصرف انرژی در سرخوشه‌ها و گره‌ها می‌شود. به منظور ارزیابی نتایج، پروتکل ارائه شده با برخی از پروتکل های خوشه بندی شناخته شده مانند LEACH، LEACHC، EOICHD و پروتکل ساده مبتنی بر کرم شب‌تاب بر اساس معیارهای ارزیابی مانند میزان انرژی گره‌ها، تعداد گره های زنده و مصرف انرژی شبکه، مقایسه شده است. نتایج مقایسه، حاکی از تأثیر مثبت سیاست دو مرحله‌ای پیشنهادی می‌باشند.

در کارهای [۲۴-۲۹]، محققان معماری‌ها و نیز همبندی‌هایی را برای خوشه‌ها ارائه داده‌اند که عملکرد آگاه از انرژی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تقویت می‌کنند. برای جلوگیری از اتلاف زودرس انرژی سرخوشه نزدیک به ایستگاه پایه، اندازه خوشه‌ها بر اساس پارامترهایی نظیر فاصله سرخوشه از ایستگاه پایه، بار گره سرخوشه و انرژی باقیمانده در سرخوشه محاسبه می‌شود. در نتیجه، نزدیکترین سرخوشه به ایستگاه پایه دارای سربار ارتباطی درون خوشه‌ای کم و سربار ارتباطی بین خوشه‌ای بالا خواهد بود. این روش‌ها به صورتی که گفته شد، یک توازن نسبی برای بار کاری در خوشه‌ها ایجاد می‌کنند و موجب افزایش طول عمر در شبکه می‌شوند. این الگوریتم‌ها، توسعه یافته الگوریتم‌های ارائه شده در روش‌های گذشته می‌باشند که سربار عملیاتی در آنها نسبت به روش‌های اصلی کاهش یافته و در مقابل، میزان بهره‌وری افزایش پیدا کرده است.

در روش‌های [۳۰-۳۲]، با مدیریت پروتکل‌های لایه کاربرد یا پروتکل‌های دسترسی به کانال و کنترل ازدحام، حسب پارامترهای کیفیت سرویس، بار کاری مرتبط با کاربرد تعریف شده برای شبکه، در سطوح شبکه توزیع و متعادل می‌گردد. لذا، این روش‌ها، در ابتدا متوسط مصرف انرژی در شبکه را کاهش می‌دهند و علاوه بر آن، به دلیل نظارتی که بر پروتکل‌های مذکور دارند، موجب کاهش دوباره ارسالی‌های بسته‌های داده و ارسال‌های بسته‌های کنترلی برای اصلاح خطاها، می‌شوند. از این رو، از اتلاف انرژی پیشگیری می‌کنند و لذا، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهند.

در روش پیشنهادی این مقاله، همانند روش‌های طرح شده در [۲۳و۷]، هدف اصلی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در گره‌های شبکه، اعم از گره‌های معمولی و سرخوشه‌ها، و لذا، افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، می‌باشد. مشابه با روش‌های مذکور، روش خوشه‌بندی پیشنهادی به شکل دو مرحله‌ای طرح می‌شود. دلیل این امر در این موضوع نهفته است که گاهی اوقات تکنیک‌های بهینه‌سازی ممکن است به همگرایی زودهنگام ختم شوند؛ برای جلوگیری از چنین مشکلی، انتخاب سرخوشه‌های بهینه، در دو مرحله انجام می‌شود. آنچه که روش پیشنهادی را با کارهای مرتبط پیشین متفاوت می‌سازد، تعریف و به کار گیری شاخص پایداری خوشه، تلاش در متوازن‌سازی مصرف انرژی در کنار کمینه‌سازی آن، و نیز استفاده از روش fuzzy c-mean در مرحله اول و روش تاپسیس فازی در مرحله دوم فرایند خوشه‌بندی پیشنهادی، می‌باشد. در بخش ارزیابی روش پیشنهادی، تأثیر بالاتر روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه مذکور، مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، ابتدا با استفاده از روش fuzzy c-mean، شبکه به صورت موقت به تعدادی ناحیه تقسیم می‌شود. ملاک انتخاب ناحیه‌ها در این روش، چگالی گره است؛ از آنجایی که توزیع گره‌ها در سطح شبکه به شیوه تصادفی صورت می‌گیرد، چگالی گره در شبکه به صورت محلی، متفاوت می‌باشد. از این رو، روش مذکور هر تجمعی از گره‌ها را یک ناحیه از سطح شبکه تعریف می‌کند. به این ترتیب، ناحیه‌ها، گروه‌هایی با چگالی نسبتاً بالا از گره‌های حسگر می‌باشند. تعداد ناحیه‌های تشکیل شده در ابتدا تعیین نمی‌گردد بلکه وابسته به گروه‌بندی انجام شده توسط الگوریتم که خود، تابعی از مکان‌های استقرار گره‌ها و فاصله آنها می‌باشد، تعیین می‌شود. این ناحیه‌ها موقت می‌باشند و هدف از ایجاد آنها، تشخیص و تعیین نقاط شروع اجرای روش پیشنهادی در شبکه، می‌باشد. دو موضوع حائز اهمیت اصلی در روش پیشنهادی، نحوه تعیین سرخوشه‌ها و ایجاد خوشه‌های بهینه و نهایی می‌باشد که در ادامه، مراحل آنها شرح داده می‌شود.

سپس، گره‌های سرخوشه با معیارها و جزئیاتی که در ادامه خواهیم دید، به صورتی چندهدفه، به روش تاپسیس فازی معین می‌شوند. در مرحله بعد، سرخوشه‌ها اقدام به گرفتن عضو و تشکیل

خوشه‌ها می‌کنند. خوشه‌ها چنان شکل می‌گیرند که ترکیب اعضای خوشه به گونه‌ای باشد که مسافت انتقال داده و در نتیجه مصرف انرژی گره‌های عضو خوشه، کمینه باشد و از طرف دیگر شرایطی مهیا شود که گره‌ها تا زمانی متصدی نقش سرخوشه باشند که ادامه کار باعث کاهش شدید میزان انرژی گره نشود و نیز، مصرف انرژی گره‌ها در شبکه، متوازن باشد. بدین ترتیب خواهیم توانست با توازن بار کاری گره‌ها، مرگ گره‌ها را به تعویق انداخته و طول عمر شبکه را افزایش دهیم.

در مرحله تعیین گره‌های سرخوشه، هر بار گره‌هایی که انرژی آنها بیشتر یا مساوی میانگین انرژی همه گره‌ها است، به عنوان کاندیدای سرخوشه شدن انتخاب می‌شوند و مشخصات آنها شامل انرژی باقیمانده، درجه اتصال گره، مرکزیت گره در ناحیه، مسافت تا ایستگاه پایه (چاهک) و نیز شاخص پیشنهادی ما به نام میزان پایداری، به عنوان ورودی به فرایند تاپسیس فازی داده می‌شوند تا بهترین ترکیب سرخوشه‌ها توسط این فرایند، حاصل شود. شاخص پیشنهادی، میزان پایداری خوشه، که آن را در این روش پیشنهادی، ارائه کرده‌ایم، نشان می‌دهد که در صورت سرخوشه شدن هر کاندیدا و تشکیل خوشه توسط آن، چه تعداد از گره‌های خوشه همچنان زنده می‌مانند و در آستانه مرگ قرار نمی‌گیرند. همان‌گونه که می‌دانیم مسافت درون خوشه‌ای (مرکزیت سرخوشه) بر مصرف انرژی گره‌های عضو خوشه مؤثر است و مسافت بین سرخوشه و چاهک بر انرژی مصرفی گره سرخوشه تأثیر دارد. ما این هدف را دنبال می‌کنیم که هیچ گره‌ای در آستانه اتمام انرژی قرار نگیرد. لذا، با پارامتر پایداری، میزان صلاحیت هر کاندیدا برای سرخوشه شدن، محک زده می‌شود. میزان پایداری خوشه حاصل از انتصاب یک گره به عنوان سرخوشه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$TL(i) = \sum_{j=1}^{|N_i|} live(j) \qquad (۱)$$

$$where: \quad live(j) = \begin{cases} 1 & \Delta(j) > 0 \\ 0 & else \end{cases} \qquad (۲)$$

$$where: \quad \Delta(j) = E_{rem}(j) - (h * E_{con}(j)) \qquad (۳)$$

که $E_{rem}(j)$ مقدار انرژی باقیمانده گره j و $E_{con}(j)$ معادل میزان انرژی مصرفی گره با توجه به نقش آن (گره پایش کننده یا گره سرخوشه) می‌باشد. پارامتر h نیز یک ثابت می‌باشد و تضمین می‌نماید که گره مذکور، انرژی لازم برای h دور بعدی را دارا می‌باشد. مجموعه شاخص‌های نامبرده در فوق، در روش خوشه‌بندی پیشنهادی لحاظ شده و به تاپسیس فازی وارد می‌شوند. در ادامه، روش تعیین گره‌های سرخوشه به صورتی چندهدفه، با استفاده از تاپسیس فازی، با جزئیات شرح داده می‌شود.

تاپسیس فازی، روشی برای مسائل تصمیم‌گیری چند معیاری است. منطق تاپسیس، در ابتدا، تعریف پاسخ بهینه می‌باشد. پاسخ بهینه راه‌حلی است که معیارهای سود را ماکزیمم و معیارهای هزینه را مینیمم می‌کند. به عبارت دیگر، پاسخ بهینه شامل بهترین مقادیر معیارهای بهینگی مورد نظر است. حالت مطلوب، حالتی است که کمترین فاصله را از پاسخ بهینه دارد. به عبارت دیگر، در رتبه‌بندی حالات به روش تاپسیس، حالاتی که بیشترین تشابه را با پاسخ بهینه داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند.

در روش پیشنهادی، در مرحله انتخاب سرخوشه‌های بهینه، روش فازی تاپسیس شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- تشکیل ماتریس تصمیم: با استفاده از پارامترهای مقدار انرژی باقیمانده گره کاندیدا برای سرخوشه شدن، پایداری خوشه کاندیدا، درجه اتصال آن گره، مرکزیت آن گره در ناحیه و مسافت آن گره تا ایستگاه پایه، به ارزیابی m کاندیدای سرخوشه در هر ناحیه می‌پردازیم. بنابراین، به هر کاندیدا بر اساس هر کدام از پارامترهای مذکور امتیاز داده می‌شود و جمع این امتیازات، به عنوان امتیاز کل آن گره کاندیدا لحاظ می‌گردد. سپس، یک ماتریس تصمیم با ابعاد m×n تشکیل می‌شود.

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \tilde{x}_{13} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \tilde{x}_{23} \\ \tilde{x}_{31} & \tilde{x}_{32} & \tilde{x}_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \tilde{x}_{m3} \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

۲- نرمال کردن ماتریس تصمیم: نظیر دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاری، ماتریس تصمیم تشکیل شده، باید نرمال شود. برای نرمال‌سازی مقادیر، حسب رابطه (۵) از روش برداری استفاده می‌شود.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_1^m x_{ij}^2}} \qquad (۵)$$

۳- تشکیل ماتریس تصمیم نرمال وزن‌دار: در این مرحله، ماتریس نرمال وزن‌دار بر اساس وزن پارامترها تشکیل می‌شود. بنابراین، برای هر پارامتر، بنا به کاربرد مورد نظر، وزنی (w_i) در نظر گرفته می‌شود و در عناصر مربوط به آن پارامتر ضرب می‌شود (رابطه ۶). جمع وزن‌های در نظر گرفته شده برای پارامترها، یک می‌باشد، $\sqrt{\sum_1^m wj} = ۱$.

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} w_1*n_{11} & w_2*n_{12} & w_3*n_{13} \\ w_1*n_{21} & w_2*n_{22} & w_3*n_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1 * n_{m1} & w_2 * n_{m2} & w_3 * n_{m3} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

۴- محاسبه حدهای بهینه مثبت و منفی: مرحله بعد، محاسبه حد بهینه مثبت و حد بهینه منفی است. برای هر پارامتر، یک حد بهینه مثبت (رابطه ۷) و یک حد بهینه منفی (رابطه ۸) حساب می‌شود. برای پارامترهایی که بار مثبت دارند، حد بهینه مثبت، بیشترین مقدار آن پارامتر است و حد بهینه منفی، کمترین مقدار آن پارامتر است. برای پارامترهایی که بار منفی دارند، حد بهینه مثبت، کمترین مقدار آن پارامتر است و حد بهینه منفی، بیشترین مقدار آن پارامتر است. بنابراین، می‌توان گفت هم برای پارامترهایی که بار مثبت دارند و هم برای پارامترهایی که بار منفی دارند، فاصله پارامترهای هر کاندیدای سرخوشه شدن از حدهای بهینه مثبت هر چه کمتر باشد مطلوب تر است و نیز فاصله هر کاندیدا از حدهای بهینه منفی هر چه بیشتر باشد، مطلوب تر است.

$$L^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+\} = \{(Max_i \tilde{v}_{ij} \mid i = 1,2,\dots,m), j = 1,2,3\} \quad (۷)$$

$$L^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} = \{(Min_i \tilde{v}_{ij} \mid i = 1,2,\dots,m), j = 1,2,3\} \quad (۸)$$

۵- مرحله نهایی محاسبه پاسخ بهینه است. در این مرحله، با توجه به حدهای بهینه مثبت و منفی، میزان نزدیکی نسبی هر حالت به پاسخ بهینه حساب می‌شود. فاصله هر کاندیدای سرخوشه شدن، از حدهای بهینه مثبت و منفی محاسبه می‌شود؛ به این صورت که ابتدا فاصله هر کاندیدا با حالت بهینه هر پارامتر به صورت تک تک محاسبه می‌شود. سپس مجموع این فواصل طبق روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند. مقدار G (محاسبه شده در رابطه ۱۱) بین صفر و یک است. هر چه این مقدار به یک نزدیکتر باشد، کاندیدا به پاسخ بهینه نزدیکتر است و لذا، کاندیدای بهتری می‌باشد. رابطه (۱۱) به این صورت تعریف شده است که وقتی مقدار G به سمت عدد یک میل می‌کند، حاکی از میل کردن d_i^+ به سمت صفر می‌باشد؛ یعنی مجموع فاصله ها از حدهای مثبت به صفر میل می‌کند. اگر G برابر با یک باشد، به معنی صفر بودن d_i^+ است که حالت بهینه می‌باشد.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (۹)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (۱۰)$$

$$G_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (۱۱)$$

پس از تعیین سرخوشه در هر ناحیه، در فاز دوم (تشکیل خوشه)، گره سرخوشه اقدام به عضوگیری و تشکیل خوشه خود می‌نماید. بدین ترتیب، در هر ناحیه، یک خوشه تشکیل می‌شود؛ به این منظور، سرخوشه شناسه خود را در پیام‌های beacon به گره‌های ناحیه ارسال می‌کند و گره‌های ناحیه، با پاسخ به این پیام، به خوشه می‌پیوندند. گره‌های حسگری که احتمالاً از گره‌های سرخوشه مقیم در نواحی مجاور نیز پیام دریافت کنند، بر اساس قدرت سیگنال دریافتی که نسبت مستقیمی با مجذور فاصله دارد، خوشه خود را انتخاب می‌کنند؛ به این صورت که به سرخوشه‌ای که سیگنال با قدرت بیشتری از آن دریافت می‌کنند، می‌پیوندند. الگوریتم ۱، شبه کد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

الگوریتم ۱: شبه کد روش پیشنهادی

The Proposed Clustering Method for WSNs

// Z_i: The zone number i
// E^i_{avg}: The average energy level of nodes in Z_i
// N_j: The node number j
// E_{Nj}: The remaining energy of N_j
// $N_{neighbores}(N_j)$: The number of neighbores of N_j
// $Dist_{Avg}(N_j)$: The average distance between N_j and its neighbores
// $Dist_{Nj}^{Sink}$: The distance between N_j and the sink
// Stab(Nj): The stability index calculated by Eq.s (1-3)
// RP: The round period

1: Initialize the WSN
2: Set sink location at (100,100)
3: Initialize zones based on fuzzy c-mean algorithm
4: In all the zones ($\square Z_i$), in parallel
5: round=1
6: Calculate (E^i_{avg}) of Z_i
7: **for each** N_j belongs to Z_i
8: **if** ($E_{Nj} \geq E^i_{avg}$) **then**
9: Send ($N_{neighbores}(N_j)$, E_{Nj}, $Dist_{Avg}(N_j)$, $Dist_{Nj}^{Sink}$, $Stab(N_j)$) to TOPSIS module
10: **end for**
11: Perform TOPSIS to determine the CH by Eq.s (4-11)
12: The CH sends Advertisement Packet
13: The receiver nodes join to the (closest) CH
14: During the RP, the CH collects data in the established cluster and sends to Sink
15: At the end of RP, round=round+1, **goto** 6

۴- ارزیابی کارایی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی کارایی و مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، روش پیشنهادی در محیط نرم‌افزار متلب 9.13 R2022b بر روی یک کامپیوتر با پردازنده Intel Core i7 پیاده‌سازی شد. تعداد گره‌های شبکه برابر با ۱۰۰ و به صورت تصادفی در سطح شبکه با ابعاد ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر، توزیع شدند. برد ارتباطی گره‌ها برابر با ۴۰ متر و شعاع حس آنها، ۲۰

متر تنظیم شد. چاهک به طور ثابت، در موقعیت مرکز سطح شبکه یعنی در مختصات (۱۰۰ و ۱۰۰) قرار داده شد. بسته‌های داده ۵۰۰ بایت و بسته های کنترلی ۲۵ بایتی در نظر گرفته شدند. در پیاده‌سازی روش، از مدل ارائه شده در [۳۳] برای انتقال داده و مصرف انرژی مربوط به آن، استفاده شده است. بر اساس این مدل، مقدار انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت l بیت داده در مسافت d (فاصله فرستنده تا گیرنده) را به ترتیب با $E_{Tx}(l,d)$ و $E_{Rx}(l,d)$ نمایش می‌دهیم که با روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند.

جدول ۱: پارامترهای پیاده‌سازی

پارامتر	مقدار
سطح شبکه	۲۰۰×۲۰۰ مترمربع
تعداد گره‌ها	۱۰۰
طول برد ارتباطی (R_C)	۴۰ متر
طول شعاع حس	۲۰ متر
مکان ایستگاه پایه	(۱۰۰ و ۱۰۰)
E_{elect}	۵۰ نانوژول بر بیت
ε_{fs}	۱۰ پیکوژول بر بیت
ε_{mp}	۰/۰۰۱۳ پیکوژول بر بیت
فاصله آستانه – d_{th}	۸۷ متر
انرژی اولیه هر گره	۰.۱ ژول
اندازه بسته داده	۵۰۰ بایت
اندازه بسته کنترلی	۲۵ بایت

$$E_{Tx}(l,d)=\begin{cases} l\cdot E_{elec}+l\cdot\varepsilon_{fs}\cdot d^2 & d<d_{th} \\ l\cdot E_{elec}+l\cdot\varepsilon_{mp}\cdot d^4 & d\geq d_{th} \end{cases} \quad (۱۲)$$

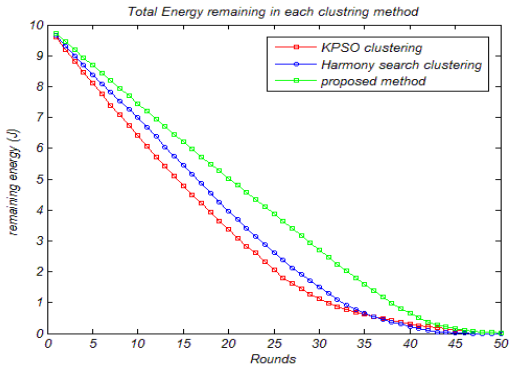
$$E_{Rx}(l.d)=l\cdot E_{elec} \quad (۱۳)$$

در این دو رابطه، E_{elec} انرژی مصرفی به وسیله تجهیزات الکترونیکی برای ارسال یا دریافت یک بیت داده است. ε_{fs} انرژی مورد نیاز برای تقویت یک بیت در فاصله کمتر از آستانه (d_{th}) و ε_{mp} انرژی برای تقویت یک بیت در فاصله بیش از آستانه می‌باشند.

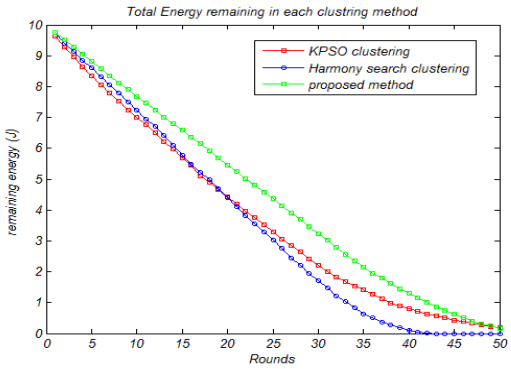
از بین روش‌های ارائه شده اخیر، دو روش طرح شده در [۲۳و۷]، سیاست‌هایی مشابه با روش پیشنهادی ما دارند و هدف‌های مشترکی را نیز دنبال می‌کنند. از این رو، در این بخش، این دو روش برای مقایسه، انتخاب شدند. همانطور که در بخش ۲ گفته شد، روش‌های مذکور، مانند روش پیشنهادی، به شکل دو مرحله‌ای انجام می‌شوند چرا که احتمال دارد در بعضی اوقات، تکنیک‌های بهینه‌سازی به همگرایی زودهنگام ختم شوند؛ برای جلوگیری از این مشکل، انتخاب سرخوشه‌های بهینه، در دو مرحله انجام می‌شود. علاوه بر این، در روش‌های مذکور، هدف اصلی، همانند روش پیشنهادی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در گره‌های شبکه، اعم از گره‌های معمولی و سرخوشه‌ها، و لذا، افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، می‌باشد. آنچه که روش پیشنهادی را با کارهای مرتبط پیشین متفاوت می‌سازد، تعریف و بکارگیری شاخص پایداری خوشه، تلاش در متوازن‌سازی مصرف انرژی در کنار کمینه‌سازی آن، و نیز استفاده از روش fuzzy c-mean در مرحله اول و روش تاپسیس فازی در مرحله دوم فرایند خوشه‌بندی پیشنهادی، می‌باشد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج ارائه شده توسط دو روش مذکور، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، پس از سی بار اجرای مستقل الگوریتم و میانگین‌گیری از خروجی‌ها، به‌دست آمدند و در ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول ۱، پارامترها و فرضیات مورد استفاده در پیاده‌سازی بیان شده‌اند.

در اجرای روش، ابتدا، با روش پیشنهادی، خوشه‌بندی در شبکه انجام می‌شود و سپس، در خوشه‌ها، داده‌های رخدادها در دورهای پی‌درپی توسط سرخوشه‌ها از گره‌های عضو خوشه جمع‌آوری و به چاهک ارسال می‌گردد. ما این روند را برای ۵۰ دور در پیاده‌سازی، در نظر گرفتیم و عملکرد روش پیشنهادی را، از نظر میزان انرژی باقیمانده، میزان مصرف انرژی، تعداد گره‌های زنده و نیز، میزان توازن سطح انرژی در گره‌ها، بررسی و مقایسه نمودیم. ارزیابی، با اجرای روش پیشنهادی با مقادیر مختلف برای تعداد خوشه‌ها انجام شد. در شکل ۱ میزان انرژی باقیمانده شبکه با تعداد خوشه‌های مختلف تشکیل شده، در دورهای پی‌درپی برای روش پیشنهادی و روش‌های مورد مقایسه، نشان داده شده است. همانگونه که شکل نشان می‌دهد، انرژی باقیمانده شبکه در روش پیشنهادی با هر تعداد خوشه، در همه دورها، نسبت به دو روش دیگر، بیشتر است. علاوه بر این، کاهش سطح انرژی شبکه در دورهای پی‌درپی، در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر با شیب کمتری، صورت می‌گیرد. روند مصرف انرژی در شبکه، در دورهای مختلف، با تعداد گوناگون خوشه‌ها، در شکل ۲ نمایش داده شده است. طبیعتاً در همه روش‌ها، در طول زمان، مجموع انرژی مصرف شده، رو به افزایش است. اما، در روش پیشنهادی شیب مصرف انرژی پایین‌تر است و گره‌ها آرامتر انرژی خود را از دست می‌دهند. از همین رو، طول عمر شبکه با روش پیشنهادی، بالاتر از روش‌های دیگر است.

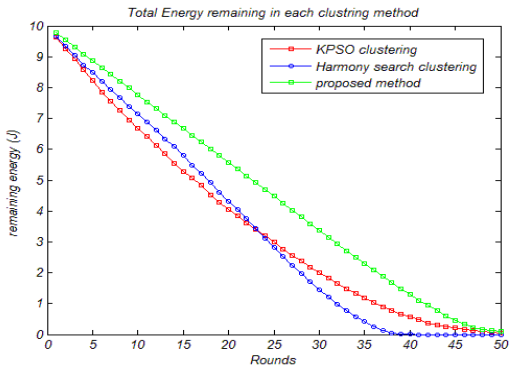
شکل ۳، تعداد گره‌های زنده در شبکه را با تعداد مختلف خوشه، در دورهای مختلف نشان می‌دهد. تعداد گره‌های زنده همواره در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه، بالاتر است. همانطور که در شکل مشهود است، در روش پیشنهادی، نرخ از دست دادن گره‌ها در دورها پایین‌تر است و تعداد گره‌ها تا دور بیشتری در اکثریت می‌ماند و بعد از روش‌های دیگر، تعداد



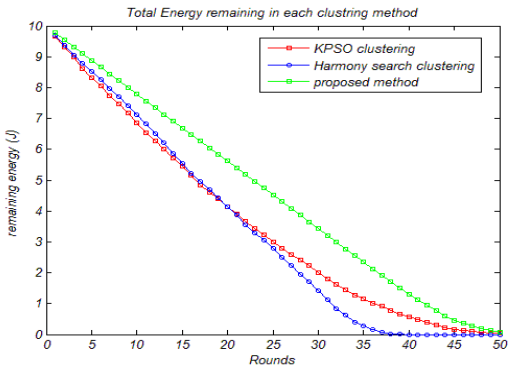
الف) با تعداد خوشه=۳



ب) با تعداد خوشه=۴

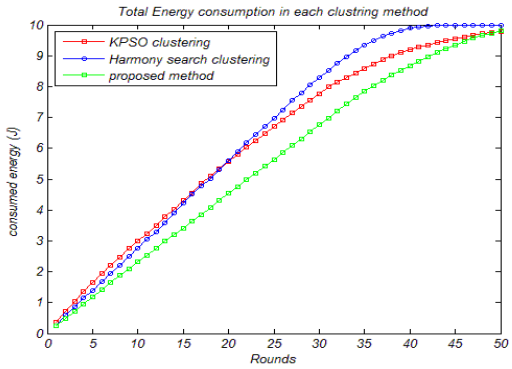


ج) با تعداد خوشه=۵

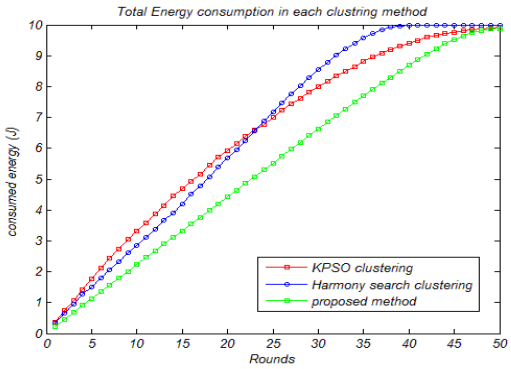


د) با تعداد خوشه=۶

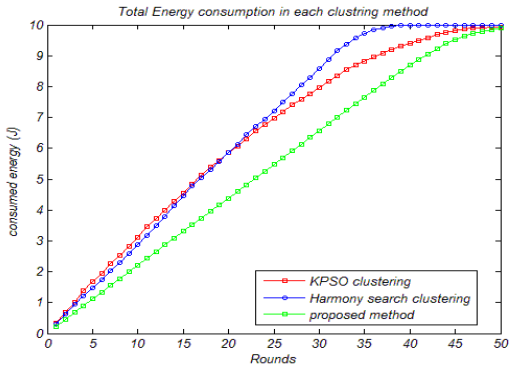
شکل ۱: میزان انرژی باقیمانده گره‌ها در دورهای پی‌درپی برای روش‌های مورد مقایسه با تعداد مختلف خوشه



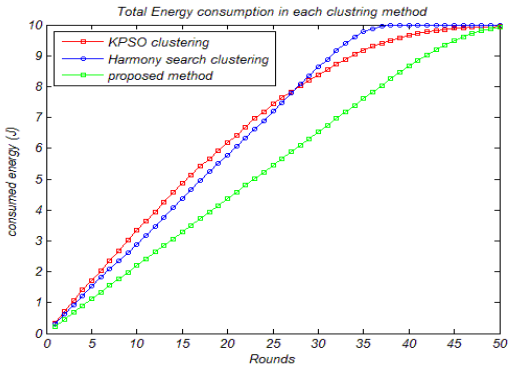
الف) با تعداد خوشه=۳



ب) با تعداد خوشه=۴

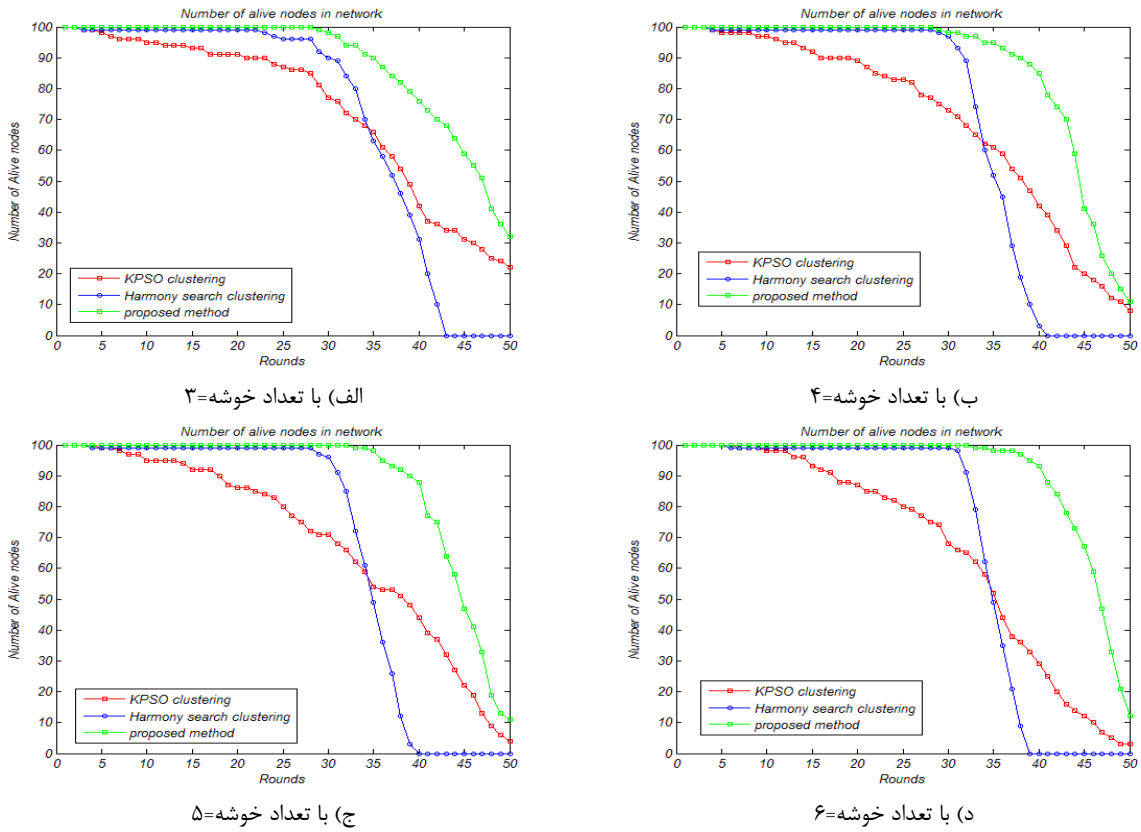


ج) با تعداد خوشه=۵



د) با تعداد خوشه=۶

شکل ۲: میزان انرژی مصرفی گره‌ها در دورهای پی‌درپی برای روش‌های مورد مقایسه با تعداد مختلف خوشه



الف) با تعداد خوشه=۳ ب) با تعداد خوشه=۴

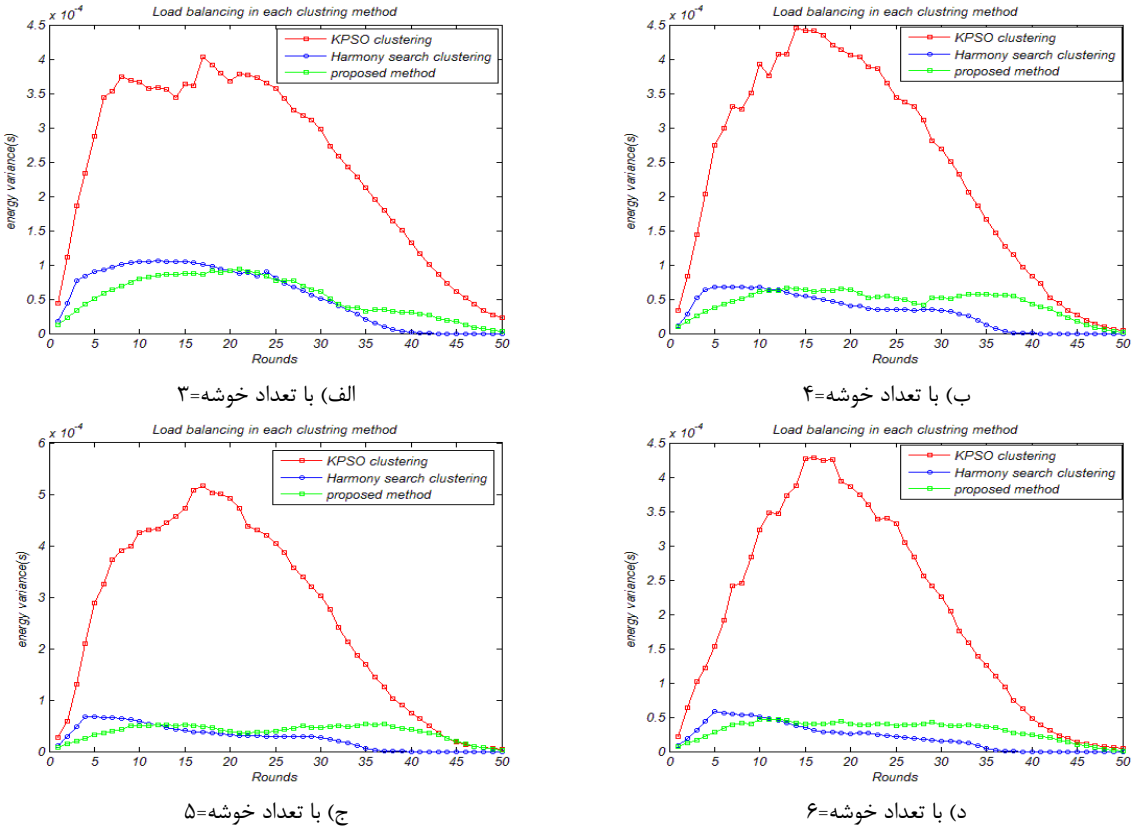
ج) با تعداد خوشه=۵ د) با تعداد خوشه=۶

شکل ۳: روند مردن گره‌ها در دورهای پی‌درپی برای روش‌های مورد مقایسه با تعداد مختلف خوشه

گره‌های زنده شروع به کاهش می‌کند. علاوه بر این، به دلیل مصرف متوازن انرژی در گره‌ها با روش پیشنهادی، تا دورهای زیادی، اغلب گره‌ها زنده هستند و در آخرین دورها، به دلیل همسان بودن سطح انرژی، گره‌ها با فاصله زمانی نسبتاً اندکی از یکدیگر، شروع به مردن می‌کنند و در نتیجه، با شیب نسبتاً بالایی، تعداد گره‌های زنده پایین می‌آید. این موضوع، دلیلی بر کار شبکه با حفظ بیشترین تعداد گره زنده تا واپسین لحظات طول عمر شبکه با روش پیشنهادی می‌باشد. از این رو، با حفظ گره‌های زنده بیشتر، میزان پوشش محیطی شبکه حسگر نیز با روش پیشنهادی، بالاتر خواهد بود و پایش را با دقت بالاتری در محیط انجام می‌دهد.از آنجایی‌که انرژی باقیمانده شبکه (شکل ۱)، مجموع انرژی باقیمانده تمامی گره‌ها می‌باشد، ممکن است در روشی، انرژی تعدادی از گره‌ها بالا باشد اما تعدادی دیگر از گره‌ها، به علت متوازن نبودن مصرف انرژی، سطح انرژی کمی داشته باشند. واریانس انرژی در هر دور به معنای فاصله انرژی گره‌های حسگر نسبت به مقدار میانگین انرژی بین حسگرها در آن دور می‌باشد.

هر چه واریانس انرژی در یک روش کمتر باشد، عملکرد بهتر آن روش را از لحاظ مصرف متوازن انرژی نشان می‌دهد. در این ارزیابی، برای سنجش متوازن بودن مصرف انرژی در روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های دیگر، واریانس انرژی مورد محاسبه قرار گرفت. البته، این نکته بسیار قابل توجه است که مقایسه واریانس انرژی دو روش، تا زمانی معتبر می‌باشد که هر دو روش تعداد گره‌های زنده قابل توجهی داشته باشند و نیز طول عمر هیچکدام، تمام نشده باشد. بدیهی است که انرژی گره‌های مرده، در همه دورهای پس از مرگ، ثابت است و نسبت به یکدیگر هیچ واریانسی ندارند.

در شکل ۴، واریانس انرژی باقیمانده در گره‌ها در طول زمان (دورهای پی‌درپی) برای تعداد خوشه‌های مختلف با روش پیشنهادی و روش‌های مورد مقایسه، نشان داده شده است. با توجه به نکته‌ای که درباره مدت زمان مقایسه واریانس خاطر نشان شد، تا زمانی که هر سه روش تعداد گره زنده بالایی دارند، (شکل ۳)، واریانس انرژی گره‌ها در روش پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر پایین‌تر است. بعد از این زمان، روش پیشنهادی دارای تعداد زیادی گره زنده می‌باشد در حالی که روش HSC تعداد زیادی گره مرده دارد که همین امر واریانس کمتری برای آن در شکل دیده می‌شود. در روش KPSO، از آنجایی که اختلاف سطح انرژی گره‌ها بالاست و حتی در دورهای بالا با وجود گره‌های مرده زیاد،



الف) با تعداد خوشه=۳

ب) با تعداد خوشه=۴

ج) با تعداد خوشه=۵

د) با تعداد خوشه=۶

شکل ۴: واریانس مقدار انرژی باقیمانده گره‌ها در دورهای پی‌درپی برای روش‌های مورد مقایسه با تعداد مختلف خوشه

گره‌های با سطح انرژی بالا نیز در شبکه حضور دارند، واریانس انرژی، بالاتر از هر دو روش دیگر می‌باشد. از آن جایی که انرژی باقیمانده شبکه و نیز تعداد گره‌های زنده در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه در بعد زمان و با پیشرفت دورها، همواره بالاتر می‌باشد و نیز، واریانس انرژی پایین‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی نه تنها مصرف انرژی را در شبکه می‌دهد، بلکه با انتخاب بهینه سرخوشه‌ها و گره‌ها در خوشه‌ها، باعث مصرف متوازن انرژی در گره‌ها می‌گردد. بنابراین، روش پیشنهادی، ضمن افزایش طول عمر شبکه، میزان بالایی از گره‌های شبکه را تا آخر طول عمر شبکه، زنده نگاه می‌دارد که این در افزایش کارایی پوشش محیطی شبکه حسگر نیز تأثیر به‌سزایی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای خوشه‌بندی با هدف متوازن‌سازی بار کاری و نیز بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شد. در روش پیشنهادی، با استفاده از شاخص ابتکاری پایداری خوشه و بکارگیری روش تاپسیس فازی برای انتخاب چندهدفه، خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، انجام می‌گردد. ابتدا محیط شبکه بر اساس موقعیت مکانی گره‌ها به ناحیه‌هایی افراز می‌شود، سپس سرخوشه‌ها با استفاده از تاپسیس فازی چندمعیاری انتخاب می‌شوند و خوشه‌ها شکل می‌گیرند. داده‌های دریافتی از گره‌ها، پس از تجمیع در گره سرخوشه به چاهک ارسال می‌شوند. نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با استفاده از شاخص ابتکاری پایداری خوشه و تاپسیس فازی، توانسته است میزان مصرف انرژی شبکه را برای جمع‌آوری داده‌های شبکه حسگر بی‌سیم کاهش دهد و نیز سطح انرژی گره‌ها را متوازن نگاه دارد. علاوه بر این، با حفظ گره‌های زنده بیشتر، با پوشش بهتر محیط، پایش با دقت بالاتری در محیط استقرار گره‌ها انجام دهد.

مراجع

[1] M. Abdullahi, A. Usman, A. Momodou, A. Tekanyi, K. Ahmad, A. Abba, I. Yau, and J. Musa, “Schemes for Extending the Network Lifetime of Wireless Rechargeable Sensor Networks,” SLU Journal of Science and Technology, 10.56471/slujst.v6i.373, 2023.

[2] M. Alaei and F. Yazdanpanah, “A Distributed Fuzzy-based Clustering Scheme to Optimize Energy Consumption and Data Transmission in Wireless Sensor Networks,” Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT), vol. 9, no. 3, pp. 229-243, 2020.

[3] A. Shahraki, A. Taherkordi, Ø. Haugen, and F. Eliassen, “Clustering Objectives in Wireless Sensor Networks: A Survey and Research Direction Analysis,” Computer Networks, vol. 180, ID: 07376, 2020.

Using Aquila Optimizer Algorithm," Future Internet, vol. 14. no. 365, 2022.

[21] C. D. Tran, N. Tam, N. Quy, and H. Binh, "An Energy-Efficient Scheme for Maximizing Data Aggregation Tree Lifetime in Wireless Sensor Network," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 14, 2023.

[22] R. Medeiros, J. M. Villanueva, and E. Macedo, "Lifetime Increase for Wireless Sensor Networks Using Cellular Learning Automata, Wireless Personal Communications, vol. 123, 2022.

[23] A. M. Bongale, C. R. Nirmala, Ar. Bongale, "Hybrid Cluster Head Election for WSN Based on Firefly and Harmony Search Algorithms," Wireless Personal Communications, Vol. 106, pp.275-306, 2019.

[24] R. S. Kumaran and P. Suganya, "Network Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks Using Energy Aware Clustering with Fuzzy System," Journal of Physics, 2021.

[25] S. Nanthini, S. Nithya Kalyani, Sudhakar Sengan, "Energy Efficient Clustering Protocol to Enhance Network Lifetime in Wireless Sensor Networks," Computers, Materials & Continua, vol. 68, no. 3, pp. 3595-3614, 2021.

[26] A. J. Yuste-Delgado, J. C. Cuevas-Martinez, A. Triviño-Cabrera, "A Distributed Clustering Algorithm Guided by the Base Station to Extend the Lifetime of Wireless Sensor Networks," Sensors, vol. 20, no. 8, ID: 2312, 2020.

[27] A. M. Jubair, R. Hassan, A. Aman, H. Sallehudin, Z. Al-Mekhlafi, B. Mohammed, M. Alsaffar, "Optimization of Clustering in Wireless Sensor Networks: Techniques and Protocols," Applied Sciences, vol. 11, no. 23, 11448; 2021.

[28] M. Mirzasadeghi and H. Bakhshi, "A New Method for Clustering Wireless Sensor Networks to Improve the Energy Consumption," Journal of Communication Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 136-149, 2016.

[29] L. Zhao, S. Qu, Y. Yi, "A Modified Cluster-Head Selection Algorithm in Wireless Sensor Networks based on LEACH," Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 287, 2018.

[30] R. Marappan, P. Vardhini, G. Kaur, S. Murugesan, M. Kathiravan, N. Bharathiraja, R. Venkatesan, "Efficient Evolutionary Modeling in Solving Maximization of Lifetime of Wireless Sensor Healthcare Networks," Soft Computing, vol. 27, no. 3, 2023.

[31] M. Alaei, P. Sabbagh, and F. Yazdanpanah, "A QoS-aware Congestion Control Mechanism for Wireless Multimedia Sensor Networks, Wireless Networks, vol. 25, no. 7, pp. 4173-4192, 2019.

[32] M. Khan, J. Khan, K. Mahmood, I. Bari, H. Ali, N. Jan, and R. Ghoniem, "Algorithm for Increasing Network Lifetime in Wireless Sensor Networks Using Jumping and Mobile Sensor Nodes," Electronics, vol. 11, no. 2913, 2022.

[33] 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, 2002.

[4] H. Zhou and J. Li, "Sleep Scheduling for Enhancing the Lifetime of Three-Dimensional Heterogeneous Wireless Sensor Networks," In book: Computer Supported Cooperative Work and Social Computing, pp.365-375, 2023.

[5] M. Alaei and F. Yazdanpanah, "ZOGLO: A Scheme of Zoning and Data Gathering for Lifetime Optimization in Wireless Sensor Networks," Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT), vol. 7, Issue 2, pp. 71-80, 2019.

[6] A. Seyyedabbasi, G. Dogan, F. Kiani, "HEEL: A New Clustering Method To Improve Wireless Sensor Network Lifetime," IET wireless sensor systems, vol. 10, no. 3, pp. 130-136, 2020.

[7] Savita Jadhav, Sangeeta Jadhav. "KPSO: K-Mean and PSO Based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network," 6th International Conference On Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA), IEEE, India, 2022.

[8] A. Joseph, R. Asaletha, V. J. Manoj, and R. Nishanth, "Enhancing the Network Lifetime of a Wireless Sensor Network using Modified K-Means Firefly Optimization," Journal of Physics, vol. 2466, no. 012019, 2023.

[9] F. Elfouly, A. Khedr, M. H. Sharif, E. Alreshidi, K. Yadav, H. Kusetogullari, and R. Ramadan, "ERCP: Energy-Efficient and Reliable-Aware Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks," Sensors, vol. 22, 2022.

[10] M. Alaei and F. Yazdanpanah, "EELCM: An Energy Efficient Load-Based Clustering Method for Wireless Mobile Sensor Networks," Mobile Networks and Applications, vol. 24, no. 5, pp.1486-1498, 2019.

[11] B. Sarangi and B. Tripathy, "Outlier Detection Technique for Wireless Sensor Network Using GAN with Autoencoder to Increase the Network Lifetime," International Journal of Computer Network and Information Security, vol. 15, pp. 26-38, 2023.

[12] N. Kumar, V. Kumar, T. Ali, and M. Ayaz, "Prolong Network Lifetime in the Wireless Sensor Networks: An Improved Approach," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 46, pp. 3631–3651, 2021.

[13] D. S. Sultana, D. Bordoloi, C. Singh, D. Srivastava, N. Thiyagarajan, and N. Chinthamu, "A Comparative Approach on Enhancing Lifetime of Wireless Sensor Networks," 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics, IEEE, 2023.

[14] R. Subha and A. Haldorai, "Improved EPOA Clustering Protocol for Lifetime Longevity in Wireless Sensor Network," Sensors, vol. 3. no. 100199, 2022.

[15] G. R. Asha, Gowrishankar, "Energy Efficient Clustering and Routing in a Wireless Sensor Networks," Procedia Computer Science, vol. 134, pp. 178-185, 2018.

[16] L. Jawad and A. Idrees, "Integrated Encoding and Scheduling Protocol for Improving the Lifetime in Wireless Sensor Networks," International Journal of Computer Applications in Technology, vol. 69, no. 334, 2022.

[17] V. Narayan and A. K. Daniel, "Energy Efficient Protocol for Lifetime Prediction of Wireless Sensor Network using Multivariate Polynomial Regression Model," Journal of Scientific and Industrial Research, vol. 81, pp. 1297-1309, 2022.

[18] K. Debasis, L. Sharma, V. Bohat, and R. Bhadoria, "An Energy-Efficient Clustering Algorithm for Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks using Machine Learning," Mobile Networks and Applications, pp. 1-15, 2023.

[19] S. Phommasan, "Cluster Selection Technique with Fuzzy Logic-Based Wireless Sensor Network to Increase the Lifetime of Networks," 5th International Conference on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), 2022.

[20] A. Taha, H. Abouroumia, S. Mohamed, and L. Amar, "Enhancing the Lifetime and Energy Efficiency of Wireless Sensor Networks