JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 12/ No. 47/ Autumn 2021
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

20.1001.1.23223871.1400.12.3.3.3
Research Article

Wireless Sensor Networks Routing Using Clustering Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

Seyed Reza Nabavi, *Ph.D. Student,* Nafiseh Osati Eraghi, *Assistant Professor*, Javad Akbari Torkestani, *Associate Professor*

Department of Computer Engineering- Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
sr.nabavi95@iau-arak.ac.ir, n-osati@iau-arak.ac.ir, j-akbari@iau-arak.ac.ir

Abstract
With the spread of applications of wireless sensor networks, in recent years, the use of this type of network in order to monitor the environment and analyze data collected from specific environments in a variety of ways has become very common. Wireless sensor networks are one of the best options for collecting data from the environment due to their easy configuration and no need for expensive equipment. The energy of sensors in wireless sensor networks is limited, which is a major challenge due to the lack of a fixed charge source. Because most of the sensors' energy is wasted during data transmission, a sensor that transmits more data than others and transmits data over long distances with packets will run out of energy sooner than others. When a sensor in the network runs out of energy, the network process may be disrupted. Therefore, due to the dynamic topology and distributed nature of wireless sensor networks, designing energy efficient routing protocols is one of the main challenges. Therefore, in this article, energy-aware routing protocol based on multi-objective particle swarm optimization algorithm is presented. In the proposed approach, the fitness function of the particle swarm optimization algorithm for selecting the optimal cluster head based on quality-of-service goals including residual energy, link quality, end-to-end delay and delivery rate. The simulation results show that the proposed approach has less energy consuming and extend network lifetime due to balancing the goals of quality-of-service criteria than other approaches.

Keywords: multi-objective particle swarm optimization algorithm, wireless sensor networks, energy-aware routing

Received: 23 December 2020
Revised: 14 March 2021
Accepted: 15 March 2021

Corresponding Author: Dr. Nafiseh Osati Eraghi

Citation: S.R. Nabavi, N. Osati-Eraghi, J. Akbari-Torkestani, "Wireless sensor networks routing using clustering based on multi-objective particle swarm optimization algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 47, pp. 57-76, December 2021 (dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.3.3.3) (in Persian).

20.1001.1.23223871.1400.12.3.3.3
مقاله پژوهشی

مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

سید رضا نبوی، دانشجوی دکتری، نفیسه اوسطی عراقی، استادیار، جواد اکبری ترکستانی، دانشیار

گروه مهندسی کامپیوتر- واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
sr.nabavi95@iau-arak.ac.ir, n-osati@iau-arak.ac.ir, j-akbari@iau-arak.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، با گسترش کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهره‌برداری از این نوع شبکه‌ها به‌منظور رسیدگی بر محیط و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از محیط‌های خاص و متنوع بسیار رواج یافته است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توجه به سهولت پیکربندی و عدم نیاز به تجهیزات گران‌قیمت، یکی از بهترین گزینه‌ها برای جمع‌آوری داده‌ها از محیط هستند. انرژی گره‌های حسگر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم محدود است که با توجه به عدم وجود منبع شارژ ثابت یکی از چالش‌های اساسی است که با آن مواجه می‌شویم. از آن‌جایی که بیشترین مقدار انرژی گره‌ها در طی انتقال داده‌ها اتلاف می‌شود، گره‌ای که بیشتر از بقیه به انتقال داده‌ها بپردازد و یا بسته‌های داده‌ای را در فواصل طولانی انتقال دهد، انرژی آن زودتر از بقیه به اتمام می‌رسد. با اتمام انرژی یک حسگر در شبکه ممکن است در روند کار شبکه اختلال ایجاد شود. بنابراین، با توجه به توپولوژی پویا و طبیعت توزیع‌شده شبکه‌های حسگر بی‌سیم، طراحی پروتکل‌های انرژی کارآمد برای مسیریابی یکی از چالش‌های اصلی است. ازاین‌رو در این مقاله پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده است. در رویکرد پیشنهادی تابع شایستگی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای انتخاب گره سرخوشه بهینه براساس هدف‌های کیفیت خدمات شامل انرژی باقیمانده، کیفیت پیوند، تأخیر انتها به انتها و نرخ تحویل استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی با توجه به ایجاد توازن در اهداف معیارهای کیفیت خدمات، نسبت به سایر روش‌های موجود اتلاف انرژی کمتر و طول عمر بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مسیریابی آگاه از انرژی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر نفیسه اوسطی عراقی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: اراک– میدان امام خمینی (ره)– بلوار امام خمینی (ره)- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی کامپیوتر

۱- مقدمه

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم[1] (WSNs) با توجه به اینکه زیرساخت‌هایی مانند روتر وجود ندارند، گره‌های حسگر علاوه بر دریافت داده‌هایی از محیط، به‌عنوان روتر برای انتقال بسته‌های داده نیز استفاده می‌شوند [۱]. گره حسگر انرژی مورد نیاز خود را از باتری متصل شده برای حس‌کردن داده‌های محیط و انتقال و دریافت این داده‌ها دریافت می‌کند که قابل شارژ مجدد نیست. عمر حسگر براساس مدت زمان استفاده از شبکه و انرژی محدود منبع شارژ مشخص می‌شود، بنابراین، انرژی موجود باید به‌صورت نیمه بهینه مصرف شود [۲].

بهره‌وری انرژی یک شبکه حسگر بی‌سیم عمدتاً با متوسط مقدار مصرف انرژی توسط گره‌های حسگر در شبکه تعیین می‌شود، که این طول عمر شبکه را معین می‌کند (طول عمر شبکه دوره‌ای است که شبکه برای عملکرد در دسترس است). شبکه‌های حسگر بی سیم باید با توجه به معیارهای کیفیت خدمات قابلیت کنترل طول عمر کلی شبکه را برای اطمینان از انتقال داده‌ها داشته باشد. کیفیت خدمات به مدیریت تأخیر، از بین رفتن بسته‌ها و مصرف انرژی در شبکه اشاره دارد و در پی ارائه روش‌های مسیریابی مناسب برای کسب نتایج بهینه برای این معیارها است [۳]. می‌توان گفت مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بالاترین نقش را در تعیین معیارهای کیفیت خدمات و عملکرد کلی شبکه بر عهده گرفته است. با توجه به اینکه در حسگرها، انرژی لازم برای دریافت داده‌ها و سنجش بسته‌های داده دارای مقدار ثابتی است، ازاین‌رو عمده‌ی مصرف انرژی به نیروی مورد نیاز مربوط به فرستادن داده‌ها بین گره‌های حسگر است که روش‌های مسیریابی آگاه از انرژی می‌توانند متوسط انرژی مصرفی و طول عمر شبکه را مدیریت کنند [۳].

ارائه روش مسیریابی بهینه در شبکه‌های حسگر بی سیم به‌طوری‌که محدودیت‌های موجود را بهبود بخشد، به اندازه مسائل بهینه سازی NP-Hard دشوار و پیچیده است. بنابراین الگوریتم‌های قطعی و جستجوی سنتی در زمان مناسب توانایی ارائه راه‌حل‌های نزدیک به بهینه برای مسیریابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ندارند. اخیراً، الگوریتم‌های فراکتشافی براساس بهینه‌سازی محدودیت‌ها که معیارهای کیفیت خدمات در شبکه را هدف‌گذاری می‌کنند، توانسته‌اند راه‌حل‌های نزدیک به بهینه‌ای را برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم برآورده کنند [۴].

ازاین‌رو در این پژوهش پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده است. در روش پیشنهادی ذرات به‌عنوان گره‌های سرخوشه در نظر گرفته می‌شوند که تابع شایستگی آن‌ها براساس اهداف کیفیت خدمات شامل انرژی باقیمانده، کیفیت پیوند، تأخیر انتها به انتها و نرخ تحویل داده برای آن حسگری است که بیشترین مقدار را داشته باشد. در واقع در هر خوشه از گره‌های حسگر که در مناطق تحت رسیدگی تشکیل می‌شود، گره‌ای که دارای بیشترین مقدار تابع هدف باشد را به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌کند و وظیفه انتقال بسته‌های داده را بر عهده می‌گیرد. کیفیت پیوند به‌صورت انرژی مصرفی برای انتقال بسته‌ها از حسگر مبدأ تا حسگر کنونی به‌علاوه هزینه تخمین انتقال بسته‌ها از حسگر بعدی تا مقصد تعریف می‌شود. در این روش از روش مسیریابی چندگامه استفاده می‌شود که در آن در هر گام گره بعدی به‌صورت پویا انتخاب می‌شود. به‌منظور انتخاب گره بعدی در شبکه علاوه بر مقدار تابع شایستگی، فاصله بین گره‌های حسگر و فاصله تا گره سینک نیز در نظر گرفته می‌شود. انتظار می‌رود که روش پیشنهادی با توجه به ایجاد توازن در اهداف معیارهای کیفیت خدمات به‌منظور انتخاب گره بهینه محلی در هرگام، مسیریابی آگاه از انرژی بهینه سراسری را ارائه نماید.

۲- پیشینه پژوهش

برخلاف مسئله‌ها و محدودیت‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مزیت‌های بسیار زیاد این شبکه‌ها نسبت به سیستم‌های رسیدگی متعارف، سبب افزایش گرایش به استفاده آن‌ها شده است. رسیدگی بدون توقف و عدم استفاده از نیروی‌انسانی، باعث افزایش تمایل به کاربرد این شبکه‌ها شده است. از این مزیت‌ها می‌توان به هزینه کم، آسانی و سرعت پیاده سازی، تنظیم خودکار و توسعه‌پذیری نام برد. از این رو با توجه به مشکلات ناشی از افزایش کاربرد این نوع شبکه‌ها، پژوهش‌های زیادی در راستای ارائه روش‌های بهینه انجام شده است.

جاری و همکاران در سال ۲۰۲۱، به جایگذاری حفره و مسیریابی هرگونه کانال برای افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی سیم چند حفره‌ای می‌پردازد. دو الگوریتم پیشنهاد شده است: جایگذاری چند سینک و مسیریابی تک‌پخشی[۲] (MPAR) و جایگذاری چند سینک و مسیریابی تک‌پخشی توسعه‌یافته[۳] (EMPAR)، تا به‌طور مشترک مشکلات خوشه‌بندی، جایگذاری چند سینک و تعادل بار را برطرف کنند. الگوریتم‌های مسیریابی تک‌پخشی و تک‌پخشی توسعه‌یافته به معماری دو سطحی متکی هستند که در آن حسگرها در سطح پایین جمع می شوند. هر حسگر از طریق یک درخت مسیریاب تجمیع داده با بار متعادل، داده‌های خود را به سرخوشه مربوطه منتقل می‌کند. در سطح بالا، هر دو طرح از الگوریتم بهینه سازی ذرات اصلاح شده برای تعیین بهترین مکان حفره‌ها استفاده می‌کنند. برای هر حفره، یک درخت مسیریابی سطح بالا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه ایجاد می‌شود. هر درخت با استفاده از روش ترکیبی حسگر فشاری برای انتقال داده‌های جمع شده از سرخوشه به حفره‌ها استفاده می‌کنند. شبیه سازی‌های گسترده‌ای برای نشان دادن کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی از نظر مصرف انرژی، واریانس مصرف انرژی و طول عمر شبکه انجام شده است [۵].

تیان و همکاران در سال ۲۰۲۱، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش[۴] (JPSO) و الگوریتم جلوگیری از مانع شکاف ایمنی[۵] (SGOA) را پیشنهاد داده‌اند. در مقایسه با الگوریتم متعارف بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش دارای سه استراتژی بهبود است: تابع ارزیابی ارزش تناسب، نمونه یادگیری جدید و استراتژی پرش. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش، پرش ذرات را با کیفیت جامع ضعیف به‌روز و وزن اینرسی را به‌صورت سازگار با توجه به عملکرد ارزیابی ارزش تناسب تنظیم می‌کند. با همکاری نمونه‌های یادگیری جدید، می‌توان توانایی جستجوی جهانی و دقت الگوریتم را بهبود بخشید. الگوریتم جلوگیری از مانع شکاف ایمنی عمدتاً با این مسئله روبرو می شود که ربات‌های دارای اولویت کم، در انتظاری طولانی گیر افتاده و هنگام جلوگیری از موانع نمی‌توانند به راه رفتن ادامه دهند. با اجرای الگوریتم جلوگیری از مانع شکاف ایمنی، می‌توان مسیر ایمنی جدید بدون برخورد را برای ربات با اولویت کم بهینه‌سازی کرد. به‌منظور بررسی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش و جلوگیری از مانع شکاف ایمنی، آزمایشات زیادی انجام شده است. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش با دو الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه بهبود یافته و با ۶ عملکرد آزمون استاندارد مقایسه شده است. برنامه‌ریزی مسیر و آزمایشات جلوگیری از مانع شش ربات با استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش و جلوگیری از مانع شکاف ایمنی محقق شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات با مکانیسم پرش از دقت و سرعت همگرایی بالاتری نسبت به دو الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بهبود یافته دیگر برخوردار است و الگوریتم جلوگیری از مانع شکاف ایمنی می‌تواند مشکل اجتناب از مانع پویا در برنامه‌ریزی مسیر چندین ربات را به‌خوبی حل کند [۶].

تیرانی و همکاران در سال ۲۰۲۰، به مشکلات انرژی و تأخیر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مجهز به حفره پرداختند. آنها به‌طور مشترک تئوری سنجش فشاری، مسیریابی خوشه‌ای و تحرک حفره را در نظر گرفتند و یک روش جمع‌آوری داده به نام درخت تجمیع داده وزن‌دار با حفره‌های مطلوب متحرک[۶] (WDAT-OMS) را پیشنهاد داده‌اند. طرح پیشنهادی متکی به معماری دو سطحی است که در آن حسگرها در سطح اول جمع می‌شوند. درخت تجمیع داده وزن‌دار با حفره‌های مطلوب متحرک از تئوری سنجش فشاری به همراه درختان تجمع داده متعادل با بار برای مسیریابی بسته‌ها از حسگرها به سرخوشه‌های مربوطه استفاده می‌کند. در این راستا، آنها معیاری کارآمد به نام انتخاب سرخوشه با انرژی و فاصله آگاه را برای توزیع عادلانه مصرف انرژی بین حسگرهای مختلف ارائه داده‌اند. در سطح دوم، یک یا چند حفره در شبکه حرکت می‌کنند تا داده‌های جمع شده سرخوشه‌ها را گردآوری کنند. به‌عنوان یک مزیت، درخت تجمیع داده وزن‌دار با حفره‌های مطلوب متحرک نه تنها مصرف انرژی را در بین حسگرهای مختلف متعادل می‌کند بلکه مقیاس‌پذیری شبکه را نیز افزایش می‌دهد [۷].

پریتی و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک رویه جدید با نام یادگیری اتوماتای محدود پویای قطعی[۷] (LD2FA) پیشنهاد کرده‌اند تا طبیعت پویای شبکه شبیه‌سازی شود. به نوبه خود، این رویه اطلاعات مربوط به گره، بسته و بازرسی مسیر را برای شناسایی و حذف مزاحمان فراهم می‌کند تا انتقال داده‌ها از طریق مسیر بهینه به روش کارآمد انرژی انجام شود. مسیریابی از طریق مسیر

بهینه عملکرد کلی شبکه حسگر را بهبود می‌بخشد و از طریق معیارهای مختلف مانند مصرف انرژی، توان عملیاتی، طول عمر شبکه و گره‌های زنده و مرده مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۸].

ویجای آلاکشمی و همکاران در سال ۲۰۱۹، به انتخاب مسیر مطلوب در مسیریابی پرداخته‌اند که باعث افزایش طول عمر شبکه و همچنین بهره‌وری انرژی شبکه می‌شود. تکنیک‌های فراکتشافی متنوعی به ویژه بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌طور مؤثری استفاده شده‌اند اما با مسئله بهینه محلی ضعیف روبرو است. روش پیشنهادی مبتنی بر بهینه سازی ازدحام ذرات و همچنین الگوریتم جستجوی ممنوعه است و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که کارایی جستجوی ممنوعه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در این مقاله با افزایش تعداد خوشه‌های ایجاد شده، تعداد حسگرهای زنده بیشتر می‌شود [۹].

فانگ گائو و همکاران در سال ۲۰۱۹، به‌منظور کاستن مؤثر مصرف انرژی شبکه‌های حسگر بی سیم، یک روش جدید برای مسیریابی خوشه‌بندی محدود انرژی براساس بهینه سازی ازدحام ذرات ارائه کرده‌اند. شبکه‌های حسگر بی سیم از تعداد زیادی گره حسگر تشکیل شده‌اند که برای حس پارامترهای موجود در محیط مانند دما، سطح رطوبت، فشار، شدت نور، لرزش و غیره استفاده می شوند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند عملکرد کلی بهتری در مصرف انرژی و طول عمر شبکه داشته باشد [۱۰].

اسماعیل رضایی و همکاران در سال ۲۰۱۸، یک روش مؤثر در کاستن مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم از طریق خوشه‌بندی برای افزایش طول عمر کلی شبکه را ارائه داده‌اند. الگوریتم‌های جمع‌آوری داده عمدتاً با هدف افزایش طول عمر شبکه به دلیل کاستن بسته‌های منتقل شده به حسگرهای دیگر انجام می شود. این الگوریتم‌ها با توجه به طول عمر، زمان تأخیر و دقت داده‌ها مقایسه می‌شوند. روش پیشنهادی در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌کند. تابع شایستگی با توجه به انرژی اولیه، تمرکز، فاصله متوسط و انرژی باقیمانده حسگرها محاسبه می‌شود. ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد بهتری را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد [۱۱].

مانجو چالا و همکاران در سال ۲۰۱۸، موضوع تجمیع داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را با استفاده از طرح بهینه‌سازی ازدحام ذرات که از فرآیند بروزرسانی تکراری استفاده می‌کند، بررسی کردند و نقاط هماهنگی بهینه گره دیگر را برای ارتباط قابل اعتماد فراهم کرده‌اند. علاوه بر این، مصرف انرژی گره حسگر که در آن پارامترهای متنوعی از جمله فاصله از گره سینک، تعداد عوامل و همسایگان برای آموزش شبکه عصبی در نظر گرفته شده است. در نهایت پیش‌بینی می‌شود که به تخمین وضعیت گره کمک می‌کند که آیا می‌تواند برای مرحله بعدی داده‌های تکراری را حمل کند یا نه. این پیش‌بینی‌ها براساس انرژی مصرفی و انرژی لازم برای انتقال داده توسط حسگر انجام می‌شود. یک مطالعه شبیه‌سازی گسترده و مقایسه‌ای ارائه شده است که نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های برتر مسیریابی آگاه از انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم عملکرد بهتری داشته است [۱۲].

رائو و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک الگوریتم انتخاب گره سرخوشه با کارآیی انرژی را پیشنهاد کرده‌اند که مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات است. این الگوریتم براساس یک طرح کارآمد رمزگذاری ذرات و تابع شایستگی توسعه یافته است. برای بهره‌وری انرژی از روش بهینه سازی ازدحام ذرات پیشنهادی، پارامترهای متنوعی از جمله فاصله داخل خوشه‌ای، فاصله تا گره سینک و انرژی باقیمانده گره‌های حسگر در نظر گرفته شده است. همچنین تشکیل خوشه‌ای ارائه شده است که در آن گره‌های حسگر غیر سرخوشه‌ای براساس عملکرد وزن مشتق شده به گره‌های سرخوشه خود می‌پیوندند. این الگوریتم به‌طور گسترده در سناریوهای متنوع شبکه‌های حسگر بی سیم، تعداد متنوع گره‌های حسگر و گره‌های سرخوشه آزمایش شده است. نتایج برای نشان دادن مزایای الگوریتم پیشنهادی با برخی از الگوریتم‌های موجود مقایسه شده است [۱۳].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۶، روشی جدید را برای افزایش طول عمر شبکه بر پایه الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه داده‌اند که روش بهینه‌سازی طراحی شده برای انتخاب گره‌های هدف است. این پروتکل هم بازدهی انرژی و هم فاصله انتقال را در نظر می‌گیرد و از گره‌های رله برای کاهش مصرف بیش از حد انرژی سرخوشه استفاده می‌کند. این پروتکل پیشنهادی به ایجاد توزیع بهتر حسگرها و یک سیستم خوشه‌بندی متعادل شده منجر می‌شود که طول عمر شبکه را افزایش

می‌دهد. پروتکل پیشنهادی با تغییر تعداد پارامترها، مانند تعداد گره‌ها، اندازه منطقه شبکه و موقعیت ایستگاه پایه با پروتکل‌های پیشین مقایسه شده است [۱۴].

بودها سینگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، بر روی به حداکثر رساندن طول عمر شبکه تمرکز کرده‌اند که به یک موضوع مهم در شبکه‌های حسگر تبدیل شده است. سازماندهی خوشه‌ای گره‌های حسگر با جمع‌آوری داده‌ها در گره سرخوشه به یکی از ابزارهای مهم افزایش طول عمر شبکه تبدیل شده است. در این مقاله روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تولید خوشه‌های آگاه از انرژی با انتخاب بهینه گره‌های سرخوشه ارائه شد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نهایت هزینه‌ی موقعیت‌یابی بهینه برای گره‌های سرخوشه در یک خوشه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، روش مبتنی بر بهینه سازی ازدحام ذرات در داخل خوشه به جای ایستگاه پایه پیاده سازی شده است، که این امر روشی نیمه توزیع شده است. معیارهای انتخاب عملکرد هدف براساس انرژی باقیمانده، فاصله درون خوشه، درجه حسگر و تعداد گره‌های سرخوشه احتمالی استوار است. علاوه بر این، تأثیر تعداد مورد انتظار انتقال مجدد بسته در طول مسیر به سمت گره سرخوشه نیز در مدل مصرف انرژی پیشنهادی در این مقاله منعکس شده است. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله با توجه به پروتکل‌های مشهور شبکه حسگر مبتنی بر خوشه انجام می‌شود. سرانجام، شبیه‌سازی اثربخشی کار پیشنهادی در این مقاله را نسبت به مقایسه‌های آن از نظر طول عمر شبکه، متوسط انتقال بسته‌ها، دورهای انتخاب گره سرخوشه که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و متوسط انرژی مصرفی پشتیبانی می‌شود، نشان داده است [۱۵].

۳- روش پیشنهادی

خوشه‌بندی گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم یکی از موثرترین راه‌حل‌ها برای کاستن مصرف انرژی و توزیع وظیفه انتقال داده از طریق گره‌های پرانرژی است. یکی از اولین روش‌های خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی سیم، روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی سازگار با انرژی کم[۸] (LEACH) است که در آن انتخاب تصادفی گره‌های سرخوشه نمی‌تواند موقعیت واقعی گره سرخوشه را تضمین کند. به عبارت دیگر، توزیع نامتعادل گره سرخوشه، سبب می شود گره‌های پرانرژی و بهینه برای انتقال داده‌ها انتخاب نشوند. همچنین ممکن است گره‌های سرخوشه در موقعیت مناسبی نسبت به سایر گره‌های متعلق به خوشه قرار نگیرند و وجود فاصله زیاد، انرژی بیشتری از گره سرخوشه را هدر می‌دهد که بر طول عمر کل شبکه تأثیر خواهند گذاشت. بنابراین اولین گامی که می‌تواند بر بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم سبب شود، انتخاب دقیق موقعیت گره سرخوشه و گره‌های بهینه برای انتقال داده بین خوشه‌ها به سمت گره سینک است.

به این منظور در روش پیشنهادی برای انتخاب گره سرخوشه، چهار هدف مورد بحث قرار می‌گیرد: فاصله گره سرخوشه از سایر گره‌های متعلق به خوشه (فاصله درون خوشه‌ای)، فاصله گره سرخوشه تا گره سینک (فاصله تا مقصد)، کیفیت پیوند و کل انرژی مصرفی شبکه. این فاکتورها در انتخاب گره سرخوشه نقش مهمی دارند و بهینه سازی این فاکتورها سبب بهبود سایر هدف‌های موجود در شبکه خواهد شد. روش پیشنهادی با تنظیم این فاکتورها به‌عنوان الگوریتم‌های بهینه سازی چندهدفی، سعی در بهینه‌سازی هدف‌های کلی شبکه شامل کاستن مصرف انرژی، افزایش طول عمر، کاستن تأخیر و افزایش نرخ تحویل داده در شبکه دارد. در ادامه به مدل‌سازی هر یک از این پارامترها خواهیم پرداخت.

۳-۱- فاصله درون خوشه‌ای

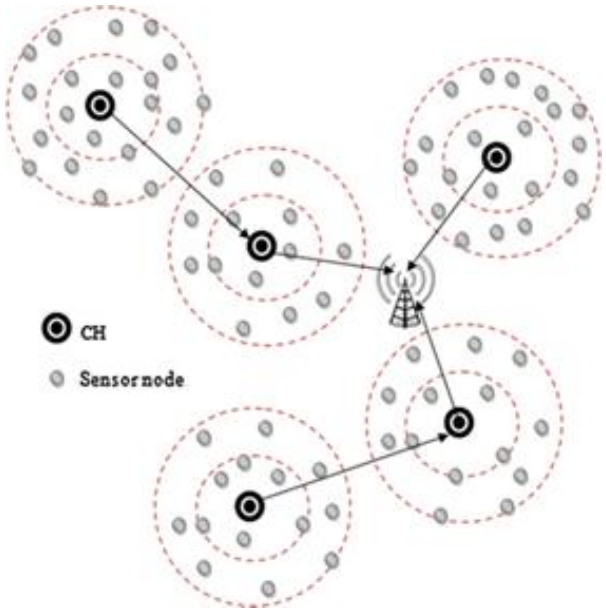
در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌های متعلق به خوشه باید داده‌ها را به گره سرخوشه انتقال دهند. هنگامی که گره‌های متعلق به خوشه در هر خوشه، گره سرخوشه را محاصره می‌کند، بدان معنی است که گره‌های متعلق به خوشه و گره سرخوشه نزدیکترین فاصله را دارند و فاصله انتقال بسته‌های داده‌ای، کوتاه‌ترین است. در واقع زمانی که گره سرخوشه تقریباً در میانه سایر گره‌های متعلق به خوشه قرار گیرد، فاصله آن نسبت به همه گره‌های حسگر تقریباً به یک اندازه و حداقل فاصله خواهد بود. به این ترتیب انتقال داده‌ها در کمترین فاصله مستلزم صرف کمترین مقدار انرژی است. مدل فاصله درون خوشه‌ای در رابطه (۱) بیان شده است [۱۶].

$$D_{nc} = \min(\sum_{m=1}^{M}(\sum_{n=1}^{N} d_{ncluster})) \quad (۱)$$

که در آن M تعداد گره‌های سرخوشه را نشان می‌دهد، N تعداد اعضای هر خوشه را نشان می‌دهد و $d_{ncluster}$ فاصله اقلیدسی گره سرخوشه تا گره‌های عضو خوشه را نشان می‌دهد.

۲-۳- فاصله سرخوشه تا گره سینک

در پروتکل‌هایی که بر مبنای خوشه‌بندی هستند، گره سرخوشه ترکیب داده‌ها را روی داده‌های دریافتی انجام می‌دهد و آن را به گره سینک می‌فرستد. در واقع در گره سرخوشه یک مرحله پردازش روی داده‌ها صورت می‌گیرد تا داده‌های ناقص و تکراری از بین برود. سپس داده‌های باقیمانده را به‌عنوان داده‌های مفید به سمت گره سینک انتقال می‌دهد. در پروتکل‌های اولیه، انتقال داده گره‌های حسگر از گره سرخوشه به سمت گره سینک به‌صورت تک‌گامی انجام شده است و داده‌ها مستقیما از هر گره سرخوشه به سمت گره سینک منتقل می شدند. چنین استراتژی سبب هدر رفتن انرژی بیش از حد یک گره سرخوشه می‌شود. بنابراین یک راه حل برای حل این مسئله استفاده از انتقال داده چندگامی است که در روش پیشنهادی از آن استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) قابل رویت است، گره سرخوشه برای انتقال داده‌ها به گره سینک، داده‌ها را از طریق سایر گره‌های سرخوشه به سمت مقصد منتقل می‌کنند.



شکل (۱): انتقال چندگامه از سرخوشه به گره سینک [۱۷]

Figure (1): Multi-hop transfer from cluster head to the sink sensor [17]

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، گره‌های سرخوشه برای انتقال داده‌ها از روش چندگامه استفاده می‌کنند که در این حالت هر چه فاصله گره سرخوشه نسبت به گره سینک کمتر باشد، انتقال کوتاه‌تر و در نتیجه مصرف انرژی نیز کمتر می‌شود. مدل فاصله گره سرخوشه تا گره سینک در رابطه (۲) بیان شده است [۱۶].

$$d_{cs} = \min(\sum_{m=1}^{M} d_{csink}) \quad (۲)$$

که در آن، d_{csink} فاصله اقلیدسی از گره سرخوشه تا گره سینک را نشان می‌دهد.

۳-۳- مصرف انرژی

مدل مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به دو بخش کلی تقسیم می‌شود که در ادامه به بررسی و مدل‌سازی هر کدام اشاره می‌شود.

مصرف انرژی کلی شبکه در مرحله خوشه‌بندی به شرح زیر است. در مرحله اول، گره سرخوشه پیامی را پخش می‌کند که به بقیه اطلاع می‌دهد، این گره، گره سرخوشه است. همچنین جدول گره‌های خوشه بروزرسانی شده و در بین گره‌های متعلق به خوشه پخش می شود. جدول به گره‌های متعلق به خوشه انتقال داده می شود و مقدار داده انتقالی برابر با t بیت است. مصرف انرژی گره سرخوشه زمانی که داده‌ها را می‌فرستد در رابطه (۳) بیان شده است [۱۶].

$$E_{cn}(t, d_{cn}) = \begin{cases} t(E_{elect} + \tau_f d_{cn}^2), & d_{cn} < d_c \\ t(E_{elect} + \tau_m d_{cn}^4), & d_{cn} \geq d_c \end{cases} \quad (۳)$$

که در این رابطه، E_{elect} مصرف انرژی به‌وسیله گره سرخوشه برای انتقال ۱ بیت از داده‌ها است، τ_f و τ_m به‌ترتیب بیانگر مصرف انرژی تقویت‌کننده سیگنال هنگام انتقال ۱ بیت داده در هر فاصله واحد در فضای آزاد و مدل‌های محو شدن چندگانه است. d_{cm} فاصله اقلیدسی اعضای خوشه فعلی تا گره سرخوشه را نشان می‌دهد. آستانه برای تبدیل بین مدل‌های کانال ارتباطی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$d_0 = \sqrt{\frac{\tau_f}{\tau_m}}) \quad (۴)$$

سپس، گره متعلق به خوشه، داده‌های t بیتی و جدول مربوط به خوشه را از گره سرخوشه دریافت می‌کند و مطابق همان جدول، t بیت داده را به‌منظور تأیید هویت به گره سرخوشه می‌فرستد. در این فرآیند، مصرف انرژی گره‌های متعلق به خوشه با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$E_{non-cn}(t, d_{cn}) \begin{cases} t(E_{elec} + \tau_f d_{cn}^2) + t \times E_{elec}, & d_{cn} < d_c \\ t(E_{elec} + \tau_m d_{cn}^4) + t \times E_{elec}, & d_{cn} \geq d_c \end{cases} \quad (۵)$$

سرانجام، مصرف انرژی فرآیند برای اینکه گره سرخوشه، گره‌های متعلق به خوشه را قبول کند تا بسته‌های داده‌ای را برای آنها منتقل کند با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$E_{cn}(t, d_{cn}) = tE_{elec} \times \left(\frac{N}{M} - 1\right) \quad (۶)$$

به‌طور خلاصه، مصرف انرژی کلی شبکه در مرحله خوشه‌بندی در رابطه (۷) خلاصه می‌شود [۱۵].

$$Energy1 \begin{cases} \min\left(tE_{elec} \times \left(\frac{N+2}{M} - 1\right) + \tau_f d_{cn}^2 \times \left(\frac{N}{M} - 1\right)\right), d_{cn} < d_c \\ \min\left(tE_{elec} \times \left(\frac{N+2}{M} - 1\right) + \tau_m d_{cn}^4 \times \left(\frac{N}{M} - 1\right)\right), d_{cn} \geq d_c \end{cases} \quad (۷)$$

تعادل مصرف انرژی شبکه از دو بخش d_{no} و d_{en} تشکیل شده است. واریانس تعداد گره‌های متعلق به خوشه در هر خوشه d_{no} با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. هرچه مقدار کوچک‌تر باشد، تعداد گره‌های حسگر در هر خوشه به‌طور متوسط بیشتر است، به این معنی که بار در هر سرخوشه متعادل‌تر است [۱۶].

$$D_{no} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(v_i - u)^2}{m} \quad (۸)$$

که در آن v_i تعداد حسگرهای متعلق به خوشه در خوشه i است، u متوسط تعداد گره‌های عضو هر خوشه در شبکه است. واریانس مصرف انرژی حالت‌های متعلق به خوشه ای در هر خوشه d_{en} است. مقدار آن هرچه کوچک‌تر باشد و مصرف انرژی در خوشه‌ها متوسط‌تر است و با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$D_{en} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(E_i - u_e)^2}{m} \quad (۹)$$

که در آن E_i کل انرژی مصرفی در خوشه iام و u_e متوسط انرژی مصرفی هر خوشه است. به‌طور خلاصه، تعادل مصرف انرژی شبکه با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$Energy2 = \min(D_{no} + D_{en}) \quad (۱۰)$$

بدین ترتیب به‌منظور بهینه سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم می‌توان سرخوشه مناسبی را انتخاب کرد که معیارهای کیفیت خدمات و فاکتورهای یاد شده را بهبود بخشد.

۳-۴- کیفیت پیوند

کیفیت پیوند در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، به‌عنوان یک معیار برای تخمین هزینه مورد نیاز برای انتقال داده‌ها بین گره‌های حسگر در نظر گرفته می شود. کیفیت پیوند با یک معیار به نام انتقال مورد انتظار[۹] (ETX) برای نشان دادن هزینه تخمین زده شده بین یک گره سرخوشه و گره‌های متعلق به آن خوشه در زمان تجمیع داده و هزینه تخمین زده شده لازم بین گره سرخوشه تا گره سینک، استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، برای یک گره سرخوشه، انتقال مورد انتظار مجموع هزینه تخمین زده شده برای جمع‌آوری داده‌ها از حسگرهای متعلق به آن خوشه و انتقال چندگامه داده‌های تجمیع شده به گره سینک است. در محاسبه انتقال مورد انتظار، تعداد گام‌های لازم برای انتقال بسته‌های داده‌ای از یک گره متعلق به خوشه به یک گره سرخوشه و به دنبال آن به گره سینک و همچنین فاصله بین گره‌های حسگر، مهم است. از آنجایی که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، اصلی ترین منبع هزینه همان مصرف انرژی است و در روش پیشنهادی هدف کاستن مصرف انرژی است، پس از یک پارامتر جدید با عنوان انتقال مورد انتظار آگاه از انرژی[۱۰] (EETX) برای سنجش کیفیت پیوند بین گره سرخوشه انتخابی استفاده می‌کنیم و آن را به‌عنوان مقدار تخمین انرژی لازم برای جمع آوری داده از گره‌های متعلق به خوشه و انتقال آن به گره سینک می نامیم. بدیهی است هرچه انتقال مورد انتظار آگاه از انرژی برای یک گره سرخوشه کمتر باشد، کیفیت پیوند آن بهتر است. مدل سازی کیفیت پیوند در رابطه (۱۱) قابل رویت است [۱۶].

$$ETX(k,d) = \min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{K} (\varepsilon_e * n_i * d_{ij}^2) + (K - 1 * D_{jK}^2) \quad (۱۱)$$

که در رابطه، ε_e ثابت مصرف انرژی برای انتقال داده‌ها، n_i تعداد اعضای خوشه iام، d^2_{ij} فاصله درون خوشه‌ای، K تعداد خوشه‌ها و D^2_{jK} فاصله تخمین زده شده گره سرخوشه از سایر سرخوشه‌ها است.

در روش پیشنهادی گره‌های سرخوشه با توجه به پارامترهای ذکر شده به‌عنوان معیارهای ارزیابی در تابع شایستگی مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه استفاده می شوند. در ادامه به توضیح الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده در این مقاله خواهیم پرداخت.

۳-۵- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت پیشنهاد شد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات رفتار دسته‌های پرندگان دانشکده فیشز را تقلید می‌کند. هدف بهینه‌سازی ازدحام ذرات یافتن راه‌حل بهینه در فضای جستجوی یک تابع هدف است، همانطور که ازدحام پرندگان به جستجوی بهترین منبع غذایی می پردازند. در بهینه سازی ازدحام ذرات، مجموعه‌ای از ذرات تولید شده به‌طور تصادفی، بهترین راه‌حل‌ها را جستجو می‌کنند. ذرات با تنظیم جهت و سرعت پرواز خود، به ترتیب با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳)، جستجو می‌کنند [۱۸].

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (۱۲)$$

$$v_{id}(t+1) = w * v_{id}(t) + r_1 * c_1 * [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + r_2 * c_2 * [g_d(t) - x_{id}(t)] \quad (۱۳)$$

که در آن d تعداد ابعاد است. w وزن اینرسی است که اکتشاف ذره را کنترل می‌کند، r_1 و r_2 عددی تصادفی بین ۰ و ۱ هستند، c_1 و c_2 ثابت‌های شتاب هستند که برای کنترل تأثیر ذرات شخصی و سراسری بهترین ذرات استفاده می شوند. p_{id} بهترین موقعیت شخصی را برای یک ذره نشان می‌دهد و g_d بهترین موقعیت سراسری را که توسط همسایگان یافت می شود نشان می‌دهد.

مطمئناً، بهینه سازی ازدحام ذرات توانایی همگرایی با سرعت بالا را در مسئله‌های تک‌هدفه نشان می‌دهد، که این امر انتخاب مطلوبی برای چندین هدف نیز محسوب می‌شود. در طراحی بهینه‌سازی ازدحام ذرات از قوت پارتو برای تولید مجموعه‌ای از رهبران استفاده می‌شود که جهت پرواز ذرات را کنترل می‌کنند و فرآیند جستجو را به سمت بهینه هدایت می‌کنند. علاوه براین، راه‌حل‌های غالب یافت شده در حافظه سراسری خارجی (به نام مخزن) ذخیره می شود، که بعداً توسط ذراتی به‌عنوان رهبران سراسری استفاده می شوند. راهنمای سراسری با استفاده از انتخاب چرخ رولت و براساس امتیازات فرامکعبی انتخاب

می‌شـود. علاوه براین، بهینه‌سـازی ازدحام ذرات چندهدفه برای حفظ تنوع راه‌حل‌ها، یک اسـتراتژی مبتنی بر جغرافیا اتخاذ می‌کند.

در اصل، مخزن خارجی بایگانی شامل دو بخش است: کنترل‌کننده و شبکه. هدف از کنترل‌کننده، تصمیم‌گیری در مورد راه‌حل جدید است که به بایگانی اضافه شود یا نه؛ بروزرسانی یا هرس کردن بایگانی وابسته به رابطه غالب است. با این حال، هر زمان که بایگانی پر باشـد، یک روش شـبکه تطبیقی فراخوانی شـده و در مقابل، از شـبکه برای ارتقاء تنوع بین راه‌حل‌ها اسـتفاده می‌شود. در اصل، فضای هدف به مناطقی که فرامکعبی گفته می‌شود، تقسیم می‌شوند. فرامکعبی مناطق جغرافیایی هستند که از تعدادی راه‌حل‌هایی تشکیل شده است که با توجه به توابع هدف ایجاد می‌شوند. به هر فرامکعب براساس تعداد ذرات موجود در آن، یک تابع شـایسـتگی اختصـاص داده می‌شـود. بنابراین، فرامکعب‌هایی با تعداد زیاد ذرات از ارزش شـایسـتگی کمتری برخوردار هستند.

مراحل زیر به تشریح خلاصه فرآیند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه می‌پردازد [۱۹]:

۱) مقداردهی اولیه جمعیت $P\ O\ P_i$، که در آن $i = [1,2,\ldots,N]$ و N اندازه جمعیت است
۲) مقدار دهی اولیه سرعت هر ذره $V\ E\ L_i$
۳) ارزیابی هر ذره و اختصاص آن به یک مقدار تابع شایستگی
۴) ذخیره موقعیت‌های ذرات که نشان دهنده راه حل‌های غالب در بایگانی خارجی هستند
۵) ایجاد فرامکعب‌ها و تنظیم ذرات با استفاده از فرامکعب‌ها به‌عنوان مختصات سیستم
۶) مقدار دهی اولیه حافظه هر ذره و ذخیره موقعیت‌های اولیه به‌عنوان بهترین موقعیت‌های ذرات موجود
۷) محاسبه سرعت هر ذره با استفاده از رابطه (۸)
۸) محاسبه موقعیت‌های جدید هر ذره را با استفاده از رابطه (۶)
۹) حفظ ذرات در محدوده محدودیت‌های فضای جستجو
۱۰) ارزیابی ذرات
۱۱) بروزرسـانی انرژی باقیمانده مسـیر[11] (REP) و فرامکعب‌ها با وارد کردن راه‌حل‌های جدید غالب، که راه‌حل‌های غیر غالب قبلی حذف می‌شـوند. با این حال، هنگامی که انرژی باقیمانده مسـیر پر اسـت، ذرات در مناطق خلوت، اولویت بالاتری دارند
۱۲) بروزرسانی حافظه بهترین موقعیت‌های شخصی هر ذره در صورتی که موقعیت فعلی بهتر از موقعیت موجود در حافظه با استفاده از قوت پارتو باشد
۱۳) اگر شرط توقف برآورده شد، متوقف شوید، در غیر این صورت به مرحله ۷ برگردید

$$v_{id}(t+1) = w * v_{id}(t) + r_1 * c_1 * [p_{id}(t) - x_{id}(t)] + r_2 * c_2 * [REP(h) - x_{id}(t)] \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، REP(h) یک راه‌حل غالب برای انتخاب از مخزن اسـت که در آن شـاخص h براسـاس ارزش تابع شـایسـتگی فرامکعب‌ها انتخاب می‌شود.

۶-۳- تابع شایستگی

به‌منظور تعریف رسمی تابع ارزیابی در روش پیشنهادی، فرض می‌کنیم گره سرخوشه با اندیس i و گره‌های عضو با اندیس j نشـان داده می‌شـود. بدین منظور با توجه به مدل‌سـازی روش‌های بهینه‌سـازی چندهدفه در شـبکه‌های حسـگر بی‌سـیم، محدودیت‌های زیر را در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده در این مقاله، در نظر می‌گیریم.

- مجموع فواصل درون خوشه‌ای نباید از یک مقدار ثابت بیشتر باشد. این محدودیت بدین منظور وضع می شود که اندازه خوشه‌ها بسیار بزرگ نباشد. اگر آستانه فواصل درون خوشه‌ای بسیار بزرگ انتخاب شود، ممکن است کل گره‌های موجود در شبکه، در یک خوشه قرار گیرند که این مورد عملکرد روش پیشنهادی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

- فاصله گره‌های سرخوشه از یکدیگر نباید از یک مقدار آستانه کمتر باشد. با توجه به وضع این محدودیت، روش پیشنهادی سعی دارد از ایجاد بیش از یک گره سرخوشه درون یک خوشه پرهیز نماید.
- انرژی اولیه گره‌های حسگر با هم برابر بوده و از یک مقدار ثابتی بیشتر نباشد. با توجه به اینکه در روش پیشنهادی تمرکز اصلی بر روی کاستن مصرف انرژی گره‌های حسگر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است، از این رو گره‌های حسگر باید انرژی اولیه ثابت و یکسانی به‌منظور مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده داشته باشند.
- تعداد گام‌های انتقال داده‌ها در بین گره‌های سرخوشه از تعداد گره‌های سرخوشه بیشتر نباشد. این محدودیت از ایجاد حلقه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم جلوگیری کرده و تضمین می‌کند روش پیشنهادی کوتاه‌ترین مسیر موجود در شبکه را برای انتقال داده‌ها از گره‌های حسگر به گره سینک را پیدا کنند.
- مجموع تأخیر انتقال بسته‌ها در مسیر نباید بیشتر از یک مقدار ثابت باشد. پیام‌های بحرانی در شبکه باید در طی مهلت زمانی که دارند به گره سینک برسند. در غیراینصورت ممکن است در کاربردهای مورد نظر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم خلل ایجاد شود.

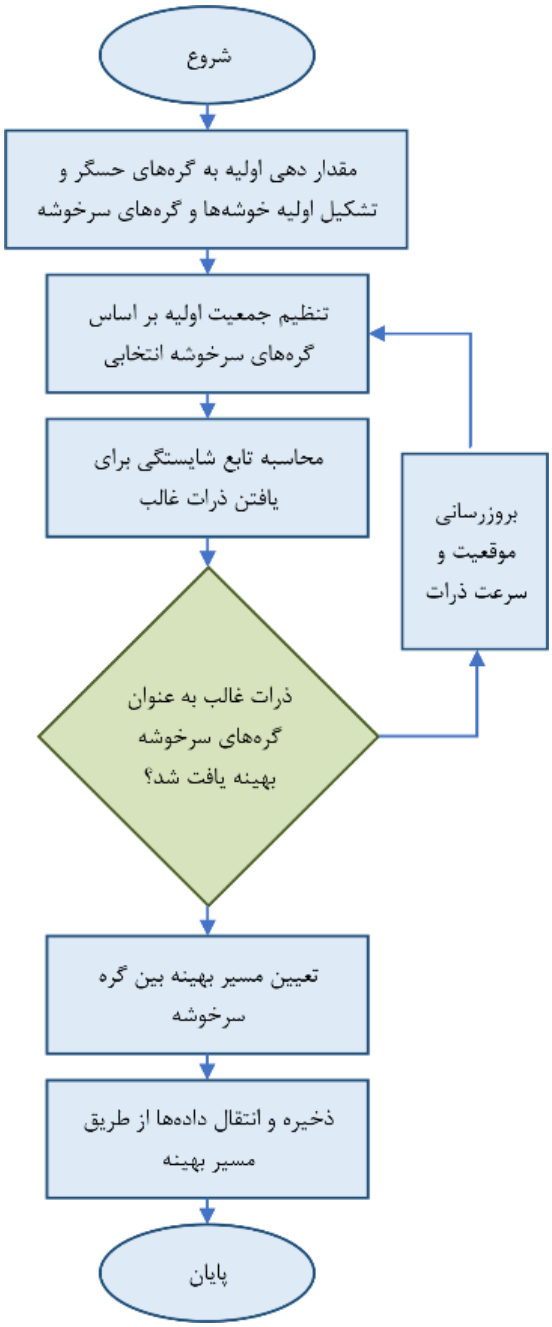
از آنجایی که اهداف موجود در شبکه ممکن است با هم متناقض باشند و بهبود یک هدف سبب کاستن بهینگی هدف دیگر باشد، معیارهای معمولی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ناکافی هستند. بنابراین معیارهای چندهدفی برای یافتن مسیر مناسب از گره مبدأ تا گره سینک در نظر گرفته می‌شوند. از سوی دیگر با توجه به اینکه مقادیر مربوط به پارامترهای مورد استفاده در تابع شایستگی با هم همخوانی ندارد و مقیاس مربوط به این پارامترها با همدیگر متفاوت است، از این رو ترکیب این پارامترها در قالب یک تابع می‌تواند نتایج نادرستی به دست آورد. به عبارت دیگر، از آنجایی مقادیر پارامترها در محدوده‌های مختلفی نسبت به مقیاس‌های متفاوت است، پارامتری که مقدار بیشتری دارد می‌تواند بیشتر از پارامترهایی با مقادیر کمتر، در تعیین وزن مربوط به ذرات دخیل باشد. بنابراین باید پارامترها و نگاشت مقادیر مربوط به پارامترهای یک محدوده مشخص تبدیل شوند که به اصطلاح به این فرآیند، نرمال سازی می‌گویند. نرمال سازی مقادیر مربوط به پارامترهای مختلف را در محدوده بین [۰،۱] نگاشت می‌کند تا علاوه بر این که مقدار پارامترها تأثیر منفی بر نتایج نداشته باشند، مشکلات مربوط به مقیاس این پارامترها نیز از بین برود. در واقع پس از نرمال‌سازی مقادیر همه پارامترها به‌صورت نسبی بین صفر و یک قرار می‌گیرند و واحدهای متنوع برای پارامترهای مختلف تأثیری بر نتایج تعیین وزن برای ذرات نخواهند داشت. روش‌های نرمال‌سازی متنوعی در نشریات معرفی شده است که از معروف‌ترین این روش‌ها می‌توان به نرمال‌سازی Z-Score [۲۰] اشاره کرد. در روش پیشنهادی به‌منظور از بین بردن تأثیرات منفی مقادیر و مقیاس پارامترها از نرمال‌سازی گاوسی استفاده شده است. رابطه مربوط به نرمال‌سازی گاوسی در رابطه (۱۵) معرفی شده است:

$$\text{Normalized data} = \frac{\text{data}-\text{mean(data)}}{\text{std(data)}} \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، normalized data مقادیر پارامترها بعد از فرآیند نرمال سازی، data مقادیر پارامترها قبل از اعمال نرمال سازی، mean(data) میانگین مربوط به مقادیر هر پارامتر و std(data) انحراف معیار مربوط به مقادیر هر پارامتر است. خروجی حاصل از مرحله نرمال سازی به‌عنوان ورودی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده خواهد گرفت. در روش بهینه سازی ازدحام ذرات ارائه شده در این مقاله با معیارهای چندهدفی سعی می‌شود بین هدف‌های موجود در شبکه که ممکن است با هم متناقض و یا سازگار باشند، موازنه‌ای ایجاد شود که بهینگی کلیه اهداف در نظر گرفته شود. بنابراین، پارامترهای ذکر شده برای عملکرد چندهدفه در نظر گرفته می شوند تا بتوانند مطلوب‌ترین مسیر بین گره مبدأ و گره سینک را پیدا کنند. در نهایت تابع ارزیابی تجمیعی در رابطه (۱۶) قابل رویت است.

$$\begin{aligned}
&F = \text{Min} \sum_i^n \sum_j^k D_j - d_i + \left(tE_{elec_i} \times \left(\frac{N+2}{M} - 1\right) + \tau_f d_{cn_j}^2 \times \left(\frac{N}{M} - 1\right)\right) + \left(D_{no_j} + D_{en_j}\right) + \\
&\left(\left(\varepsilon_e * n_i * d_{ij}^2\right) + \left(K - 1 * D_{jK}^2\right)\right) \\
&\sum_{j=1}^k D_j \geq \alpha \qquad (۱۶) \\
&\sum_{i=1}^n D_i \leq \beta \\
&\sum_{i=1}^k E_{cn} + D_{no_i} + D_{en_i} \leq \gamma \\
&\sum_{i=1}^k ETX_i \leq \delta
\end{aligned}$$

با توجه به رابطه (۱۶)، در هر دور از بروزرسانی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده در این مقاله در مرحله انتخاب مسیر، گره‌ای که درون خوشه مقدار تابع F را کمینه می سازد، به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب شده و فرآیند انتقال داده‌ها از گره‌های متعلق به خوشه به گره سینک را بر عهده می‌گیرد. ممکن است در طی چندین مرحله از بروزرسانی، مقدار تابع هدف برای یک گره کمینه باشد و گره سرخوشه در طی چندین مرحله تغییر نکند ولی با گذشت زمان و انتقال بسته‌های داده، انرژی گره‌های سرخوشه کمتر شده و به ناچار باید گره سرخوشه تعویض شود. مسیر انتخاب شده براساس ایجاد توازن بین اهداف شبکه‌های حسگر بی سیم، کوتاه‌ترین مسیری است که کمترین فاصله بین گره‌های حسگر را با کمترین مقدار تأخیر ایجاد خواهد کرد. فلوچارت مربوط به روش پیشنهادی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی

Figure (2): Flowchart of the proposed method

۶-۳- اثبات بهینگی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

به‌منظور اثبات بهینگی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه[۱۲] (MOPSO) ابتدا به تعریف دو متغیر $A^{(t)}$ به‌عنوان مقادیر ذرات بهینه پیدا شده توسط الگوریتم و Λ به‌عنوان مقادیر بهینه و ایده آل برای پارامترهای مورد نظر، تعریف می‌شود. در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه ا صلی، بایگانی $A^{(t)}$ در تکرار t راه‌حل‌های غالبی را که تاکنون پیدا شده‌اند، حفظ می‌کند و $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ توالی بایگانی نامیده می‌شود. با توجه به تصادفی بودن الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی، توالی بایگانی $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ یک فرآیند تصادفی است. همگرایی توالی بایگانی $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ به مجموعه بهینه در جبهه پارتو، همگرایی سراسری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی را تعیین می‌کند.

از آنجا که $A^{(t)}$ و Λ مجموعه ه ستند، همگرایی سرا سری الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه ا صلی مربوط به تنظیم همگرایی توالی است که تجزیه و تحلیل مستقیم آن دشوار است، یعنی اثبات اینکه آیا $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ مستقیماً به Λ همگرایی می‌یابد، دشوار است. برای ساده‌سازی مطالعه در مورد همگرایی سراسری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی، لازم است همگرایی $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ به یک همگرایی سری تبدیل شود. بنابراین، یک معیار همگرایی براساس تفاوت اندازه‌گیری بین $A^{(t)}$ و Λ برای تجزیه و تحلیل اینکه آیا $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ می‌تواند به همگرایی Λ کند.

فرض کنید بایگانی $A^{(t)}$ شامل K راه‌حل غالب در تکرار t باشد. تصویر $F(A^{(t)})$ جبهه پارتو با K نقاط گسسته در فضای هدف S_y است، که در آن K یک عدد صحیح مثبت است. طبق روش درون‌یابی [۲۱]، با استفاده از K نقطه گسسته، یک ابَر سطح درون‌یابی براساس جبهه پارتو وجود دارد. در مسائل کمینه سازی، ابر سطح درون‌یابی و مرز فضای عینی در پایین سمت چپ ابر سطحی درون‌یابی، دامنه‌ای را نشان می‌دهد که شامل ذرات غالب به‌عنوان (t) نشان داده می شود. بدیهی ا ست که بایگانی $A^{(t)}$ با (t) مطابقت دارد. با توجه به توضیحات بالا، برخی از تعاریف را می‌توان به شرح زیر ارائه داد.

تعریف ۱. اجازه دهید A بایگانی تولید شده تو سط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه ا صلی با شد و اجازه دهید $\mathfrak{I}$ دامنه‌ای توسط ابر سطح درون‌یابی F(A) و مرز فضای عینی در پایین سمت چپ ابر سطحی درون‌یابی احاطه شده باشد. معیار لبسگو دامنه $\mathfrak{I}$ که به‌عنوان ρ_A نشان داده می‌شود، معیار بایگانی A نامیده می‌شود.

براساس تعریف ۱، ρ_A مساحت فضای هدف است اگر $m = 2$ باشد. ρ_A در فضای هدف دو بعدی و اگر $m = 3$ و $m > 3$ باشد، ρ_A ابر حجم در فضای هدف سه بعدی است. m تعداد توابع هدف است.

تعریف ۲. اجازه دهید $A^{(i)}$، $A(j) \in \{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ بایگانی دو بعدی دلخواه ایجاد شده تو سط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی باشند، $i,j \in \{1,2,...\}$. اجازه دهید $\rho_A^{(i)}$ و $\rho_A^{(j)}$ به ترتیب معیارهای $A^{(i)}$ و $A^{(j)}$ باشند. اختلاف اندازه‌گیری بین $A^{(i)}$ و $A^{(j)}$ به‌صورت $|\rho_A^{(i)} - \rho_A^{(j)}|$ تعریف می‌شود. طبق تعریف ۲، معیار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی به شرح زیر تعریف شده است.

تعریف ۳. اجازه دهید Λ مجموعه بهینه پارتو از یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه باشد و اجازه دهید $A^{(t)}$ بایگانی تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی در تکرار t باشد. معیار همگرایی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه ا صلی به صورت رابطه (۱۷) تعریف می شود که در آن $|\rho_A^{(j)} - \rho_A|$ تفاوت معیار بهینگی بین $A^{(t)}$ و Λ است. ρ_A معیار و Λ ثابت است.

$$D(A^{(t)}) = |\rho_{A^{(j)}} - \rho_\Lambda| \qquad (۱۷)$$

از آنجا که $\{A^{(t)}; t = 1,2,\dots\}$ یک فرآیند ت صادفی ا ست، برای یک م سئله بهینه سازی چندهدفه، مجموعه بهینه پارتو Λ ثابت است، با تعریف ۳، $\{D(A^{(t)}); t = 1,2,\dots\}$ نیز یک فرآیند تصادفی است. طبق استراتژی بروزرسانی بایگانی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی، $A^{(t)}$ به تدریج با افزایش تکرارها در طی فرآیند جستجو به مجموعه بهینه پارتو Λ نزدیک می شود و به همین ترتیب جبهه پارتو $F(A^{(t)})$ به تدریج به جبهه پارتو بهینه PF نزدیک می شود. از این رو، مقدار معیار همگرایی $D(A^{(t)})$ با تعریف ۳، افزایش نمی‌یابد. علاوه بر این، همگرایی سراسری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه اصلی را می‌توان با همگرایی $\{D(A^{(t)}); t = 1,2,\dots\}$ تعیین کرد.

تعریف ۴. اجازه دهید $\{D(A^{(t)}); t = 1,2,\dots\}$ توالی بایگانی تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه است. گفته می‌شود الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در سطح سراسری با احتمال یک به Λ همگرایی می‌کند اگر و فقط اگر رابطه (۱۸) باشد.

$$P\left\{\lim_{\infty} D(A^{(t)}) = 0\right\} = 1 \qquad (۱۸)$$

با اثبات همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه به سمت مقادیر بهینه Λ می‌توان نتیجه گرفت در روش پیشنهادی در هر گام مقادیر پارامترهای مربوط به شبکه به سمت مقادی بهینه نزدیک می‌شود. بدین ترتیب روش پیشنهادی با بهینه‌سازی پارمترهای شبکه در هر گام از انتقال اطلاعات به سمت بهینه سراسری همگرا می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

پیشنهادی با پیکربندی اولیه گره‌های حسگر بی سیم و توزیع گره‌های حسگر در محیط نرم افزار MATLAB نسخه ۲۰۲۰، شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی شبکه حسگر بی‌سیم از جعبه ابزار آماده روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی سازگار با انرژی کم استفاده شده است. محیط تحت نظارت را یک فضای ۱۰۰×۱۰۰ در نظر می‌گیریم که ۱۰۰ گره حسگر به صورت تصادفی در آن پراکنده شده است. تعداد گره‌های حسگر با توجه به سناریوهای متنوع قابل تنظیم است و به‌منظور مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود در پژوهش‌ها می‌توان این تعداد را تغییر داد. سایر پارامترهای مربوط به پیکربندی شبکه با توجه به استانداردهای ذکر شده در پژوهش‌ها در نظر گرفته شده‌اند. شبکه ارائه شده در این مقاله در یک محیط ۱۰۰×۱۰۰ شبیه‌سازی شده است. پارامترهای مربوط به شبکه حسگر بی‌سیم ارائه شده در این مقاله در جدول (۱) قابل بیان شده‌اند.

Table (1): Simulation parameters

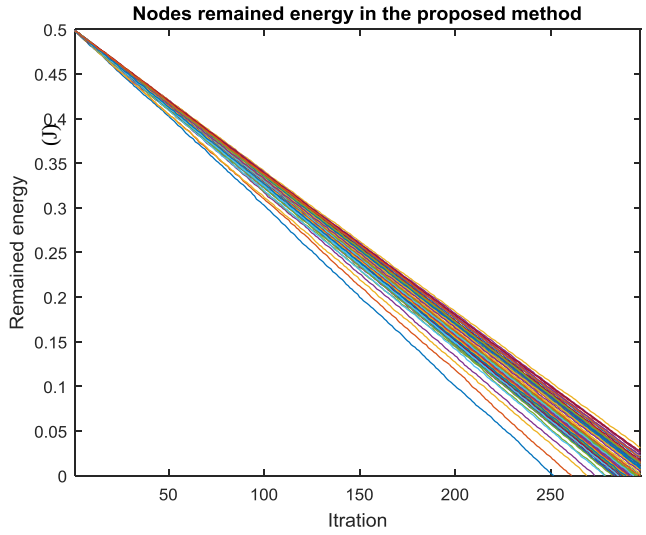
جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
ابعاد شبکه	۱۰۰×۱۰۰m
تعداد گره ها	۱۰۰
مختصات گره سینک	(۵۰،۵۰)
انرژی اولیه گره‌ها	۰/۵ J
انرژی اولیه گره سینک	۱۰ J
ضریب مصرف انرژی در انتقال داده	۵×۱۰^{۸}
ضریب مصرف انرژی در دریافت داده	۵×۱۰^{۸}
ضریب مصرف انرژی در انتقال بسته مسیریابی	۱×۱۰^{۱۰}
ضریب مصرف انرژی در انتقال بسته مسیریابی	۱۳×۱۰^{۱۳}
ضریب مصرف انرژی در تجمیع داده	۵×۱۰^{۹}
احتمال اولیه انتخاب گره به گره سرخوشه	۰/۰۱
حداکثر تعداد دور	۳۵۰۰
طول بسته داده	۴۰۰۰ pkt
تعدا انتقال بسته در هر گام	۱۰ pkt
طول بسته مسیریابی	۱۰۰ pkt
برد رادیویی	۵۰۰ m

ارزیابی روش پیشنهادی به‌منظور بررسی کیفیت و ارائه بهبود ایجاد شده براساس مسئله اولیه طرح شده، انجام می‌گیرد. با توجه به محبوبیت شبکه‌های حسگر بی‌سیم، معیارهای متنوعی به‌منظور ارزیابی شبکه‌های حسگر بی‌سیم وجود دارد. معیارهای

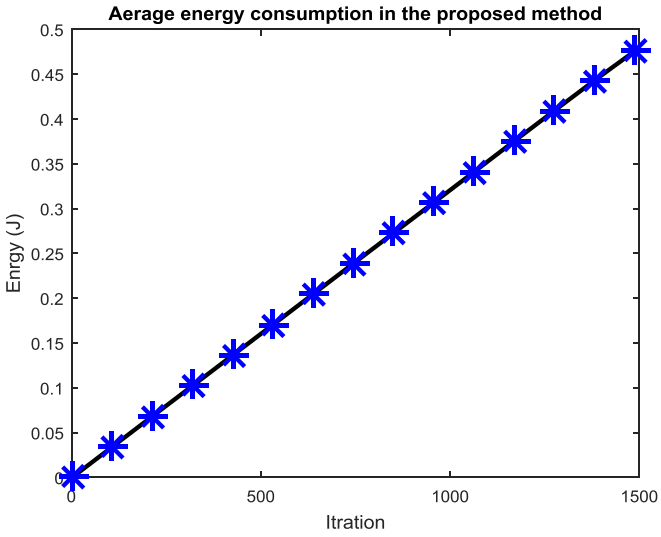
ارزیابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توجه کاربرد این نوع شبکه‌ها متنوع است. بنابراین در این پژوهش با توجه به این که ما در پی کاستن مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه، کاستن تأخیر و افزایش گذردهی شبکه هستیم، بر این چهار معیار بسنده خواهیم کرد. بدین ترتیب ابتدا به ارزیابی انرژی باقیمانده گره‌های حسگر با افزایش گام‌های انتقال داده در شبکه می‌پردازیم. در شکل (۳) انرژی باقیمانده در گره‌های حسگر در شبکه مشاهده می‌شود.

در شکل (۴) متوسط انرژی مصرفی در شبکه برای همه گره‌های حسگر قابل رویت است. در شکل (۵) متوسط انرژی باقیمانده با افزایش مراحل انتقال داده در روش پیشنهادی قابل رویت است.



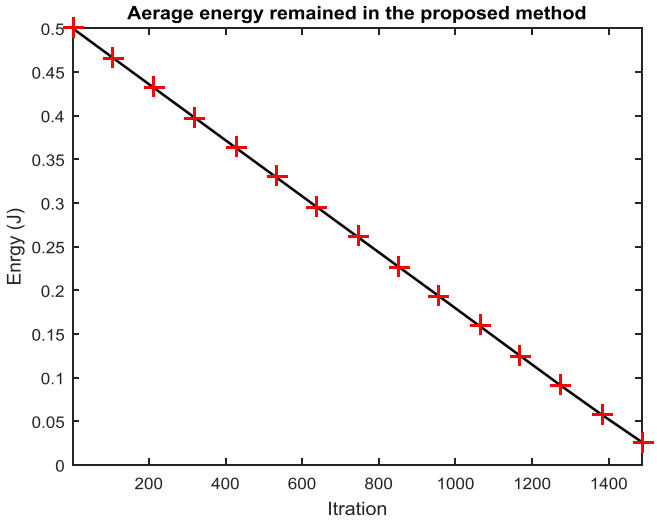
شکل (۳): انرژی باقیمانده گره‌های حسگر

Figure (3): Residual energy of sensor nodes



شکل (۴): متوسط انرژی مصرفی در گره‌های شبکه

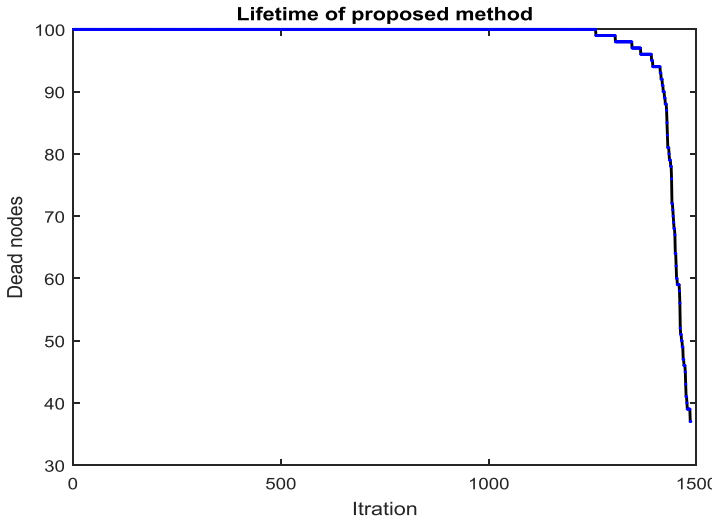
Figure (4): Average energy consumption in network nodes



شکل (۵): متوسط انرژی باقیمانده در کل شبکه

Figure (5): Average residual energy in network

با توجه به شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) می‌توان دید، متوسط انرژی مصرفی در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهادی با توجه به روش بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه، به صورت نیمه بهینه افزایش می‌یابد. حال برای اثبات این ادعا به بررسی طول عمر شبکه می‌پردازیم. طول عمر شبکه به زمان اتمام انرژی تعدادی از گره‌ها در شبکه بستگی دارد، به گونه‌ای که با گره‌های باقیمانده عملکرد شبکه قابل ادامه دادن نباشد. در شکل (۶) نمودار مربوط به روند مرگ گره‌های حسگر نشان داده شده است.

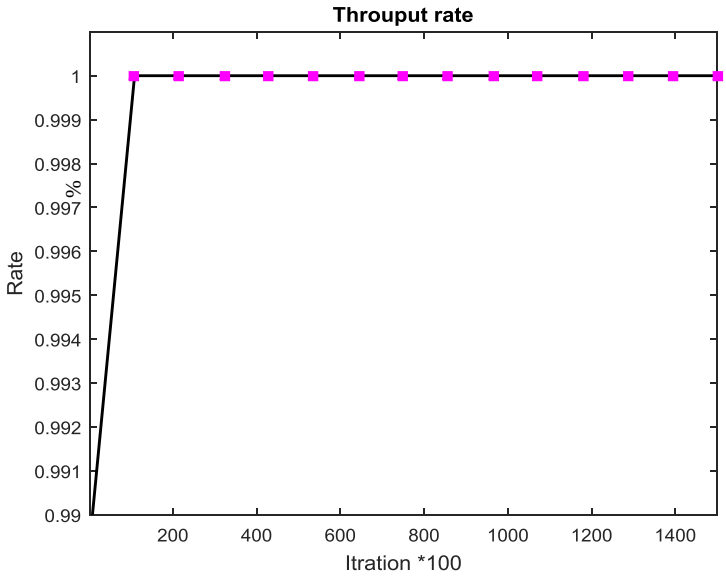


شکل (۶): روند مرگ گره‌های حسگر

Figure (6): Death process of sensor nodes

براساس شکل (۶)، مرگ اولین گره پس از ۱۲۵۹ بار تکرار اتفاق افتاده است. در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مرگ یک گره تمامی مسیرهای منتهی به این گره به بن‌بست رسیده و ناگزیر به تغییر مسیر هستند و وظیفه جمع‌آوری داده‌ها از منطقه تحت پوشش آن گره، بر دوش گره‌های همسایه آن گره می‌افتد. بدین ترتیب انرژی مصرفی در گره‌های همسایه آن افزایش یافته و احتمال مرگ آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، پس از مرگ اولین گره، سرعت مرگ بقیه گره‌ها نیز بیشتر می‌شود و نهایتاً طول عمر شبکه به ۱۴۸۷ دور می‌رسد. معیار دیگری که به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی از آن استفاده شده است، گذردهی در شبکه است. گذردهی عبارت از نرخ بسته‌های منتقل شده در واحد زمان که در سمت مقصد دریافت شده‌اند. به

عبارت دیگر نرخ داده‌های جمع‌آوری شده که به سلامت به گره سینک ر سیده‌اند در واحد زمانی در شبکه ح سگر بی سیم، گذردهی شبکه نامیده می‌شود. شکل (۷) گذردهی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

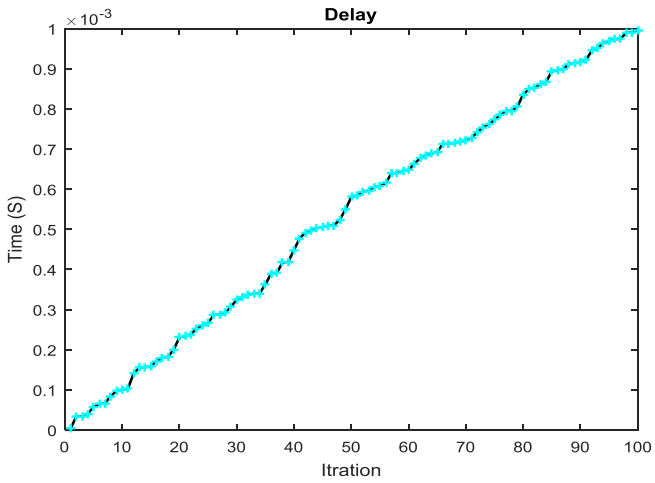


شکل (۷): نرخ گذردهی در شبکه

Figure (7): Network throughput rate

همان‌طور که در شکل (۷) م شاهده می شود، با توجه به م سیریابی بهینه سعی در فرار از گلوگاه‌ها و ایجاد م سیری امن برای انتقال داده‌ها به گره سینک دارد. از این رو نرخ گذردهی در شبکه مقدار بالایی داشته و متوسط آن ۹۹/۹۳٪ است.

آخرین معیار ارزیابی، تأخیر انتها به انتهای گره‌ها در شبکه ا ست. با توجه به این که ضریب زمان انتقال یک ب سته برای گره‌ها ثابت است، اصلی ترین دلیل بروز تأخیر در انتقال انتها به انتها، فاصله بین گره‌ها است. از آنجایی که انتقال بین گره‌های حسگر و گره‌های سرخو شه اتفاق می‌افتد، فا صله کمتر بین گره‌های سرخو شه و سایر گره‌ها به معنای خو شه‌بندی دقیق و متو سط فوا صل درون خو شه‌ای کمتر ا ست که یکی از اهداف تابع هدف ما ا ست. در شکل (۸) نمودار مربوط به تأخیر تجمعی انتها به انتهای ۱۰۰ حسگر نشان داده شده است.

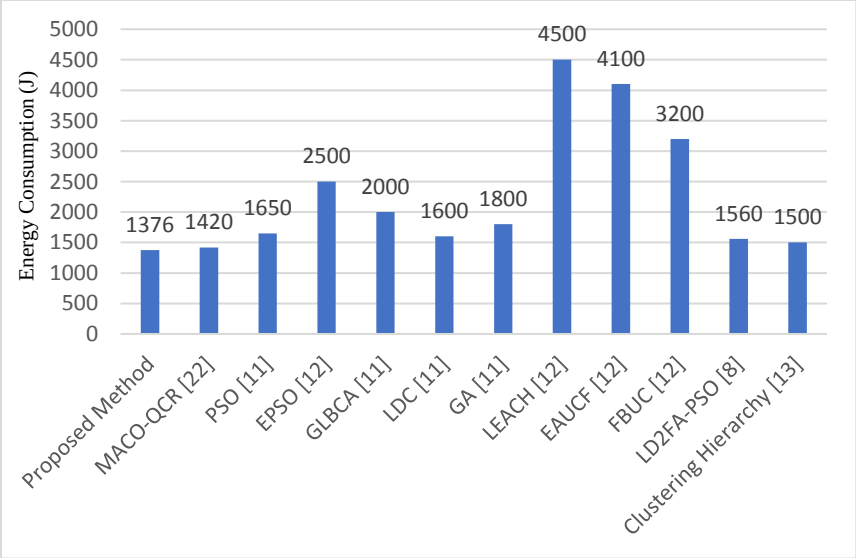


شکل (۸): تاخیر انتها به انتهای گره‌های حسگر

Figure (8): End to end delay of sensor nodes

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌کنید، برای ۱۰۰ گره به صورت متوسط دارای ۱ میلی‌ثانیه تأخیر در هر دور است. این مقدار کم حاکی از فاصله کم بین گره‌های سرخوشه و گره‌های خوشه بوده که به لطف ماهیت فرااابتکاری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه به دست آمده است.

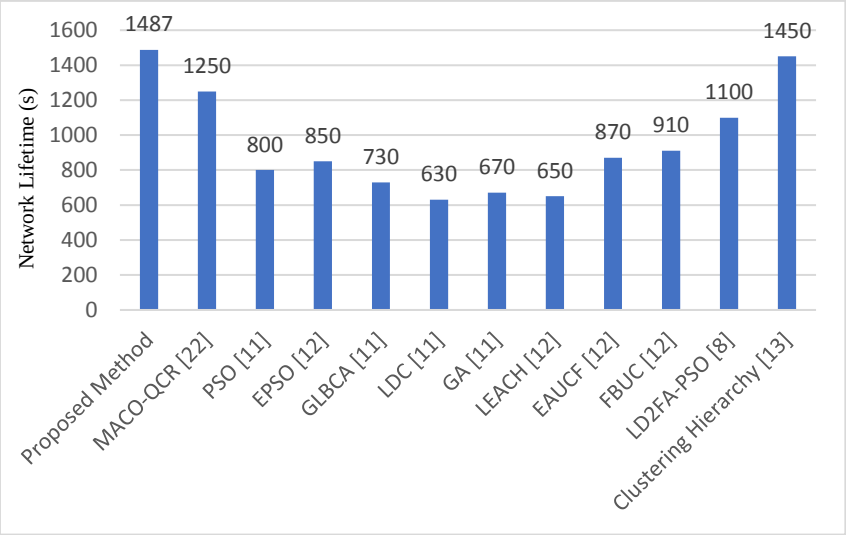
محدودیت انرژی در گره‌های حسگر، بسیاری از محققان را برآن داشته است که روش‌های بهینه سازی به‌منظور یافتن مسیر بهینه در راستای کاهش مصرف انرژی و سایر فاکتورهای مسیریابی در این نوع از شبکه‌ها، ارائه کنند. بنابراین شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیش از پیش محبوب شده‌اند. در ادامه‌ی این بخش از پژوهش به‌منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی به مقایسه آن با روش‌های پیشین در راستای مصرف انرژی و طول عمر شبکه می‌پردازیم. بدین منظور روش پیشنهادی را با روش‌های پایه که از الگوریتم‌های مسیریابی چند لایه مبتنی بر کلونی مورچگان آگاه از کیفیت خدمات در شبکه حسگر بی‌سیم[۱۳] (MACO-QCR)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسترش یافته[۱۴] (EPSO)، خوشه‌بندی سلسله مراتبی سازگار با انرژی کم (LEACH)، خوشه‌بندی نابرابر آگاه از انرژی فازی[۱۵] (EAUCF)، خوشه‌بندی نابرابر مبتنی بر فازی[۱۶] (FBUC)، ژنتیک[۱۷] (GA)، خوشه‌بندی متعادل بار حریصانه[۱۸] (GLBCA)، چرخه کم‌کار[۱۹] (LDC)، یادگیری اتوماتای محدود پویای قطعی (LD2FA) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی (Clustering Hierarchy) از نظر معیارهای یاد شده مقایسه می‌کنیم. شکل (۹) مقایسه بین روش پیشنهادی و روش‌های پیشین از نظر متوسط انرژی مصرفی در شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۹): مقایسه روش پیشنهادی و سایر روش‌ها از نظر انرژی مصرفی

Figure (9): Comparison of the proposed method and other methods in terms of energy consumption

همان‌طور که در شکل (۹) قابل رویت است، روش پیشنهادی متوسط انرژی مصرفی کمتری نسبت به روش‌های پیشین دارد. همچنین در شکل (۱۰) روش پیشنهادی و روش‌های پیشین از نظر طول عمر شبکه مقایسه شده‌اند.



شکل (۱۰): مقایسه روش پیشنهادی و سایر روش‌ها از نظر طول عمر شبکه

Figure (10): Comparison of the proposed method and other methods in terms of network lifetime

همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل رویت است، روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین طول عمر بیشتری دارد. طول عمر بیشتر نشان دهنده توازن مصرف انرژی در این روش و مرگ دیرتر گره‌ها است که از خوشه‌بندی دقیق و رعایت فاکتورهای اصلی شبکه سرچشمه می‌گیرد. روش پیشنهادی با ایجاد توازن بین چندین هدف در مسیریابی شبکه توانسته به نتایج مطلوبی برسد که در مقایسه با روش‌های پیشین در این حوزه بهبود چشم‌گیری داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی براساس الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده است. در روش پیشنهادی ذرات به‌عنوان گره‌های سرخوشه در نظر گرفته می شوند که تابع شایستگی آن‌ها براساس اهداف کیفیت خدمات شامل انرژی باقیمانده، کیفیت پیوند، تأخیر انتها به انتها و نرخ تحویل داده برای آن گره بیشترین مقدار را داشته باشد. در واقع در هر خوشه از گره‌های حسگر که در مناطق تحت رسیدگی تشکیل می‌شود، گره‌ای که دارای بیشترین مقدار تابع هدف باشد به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب می‌شود و وظیفه انتقال بسته‌های داده‌ای را بر عهده می‌گیرد. کیفیت پیوند به‌صورت انرژی مصرفی برای انتقال بسته‌ها از گره مبدأ تا گره کنونی به‌علاوه هزینه تخمین زده شده‌ی انتقال بسته‌ها از گره بعدی تا گره مقصد تعریف می شود. در این روش از روش مسیریابی چندگامه استفاده می شود که در آن در هر گام گره بعدی به‌صورت پویا انتخاب می شود. به‌منظور انتخاب گره بعدی در شبکه علاوه بر مقدار تابع شایستگی، فاصله بین گره‌ها و فاصله تا گره سینک نیز در نظر گرفته می شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علاوه بر اینکه متوسط انرژی مصرفی کمتری نسبت به سایر روش‌های پیشین دارد، طول عمر بیشتری نیز دارد. متوسط انرژی مصرفی کمتر و طول عمر بیشتر نشان دهنده توازن مصرف انرژی در این روش و مرگ دیرتر گره‌ها است که از خوشه‌بندی دقیق و رعایت فاکتورهای اصلی شبکه سرچشمه می‌گیرد. روش پیشنهادی با ایجاد توازن بین چندین هدف در مسیریابی شبکه توانسته به نتایج مطلوبی برسد که در مقایسه با روش‌های پیشین در این حوزه بهبود زیادی داشته است.

References

مراجع

[1] S. Adhyapok, H.K.D. Sarma, "Review on QoS aware routing protocols for multi-channel wireless sensor network", Proceeding of the IEEE/ICIMIA, pp. 503–509, Bangalore, India, March 2020 (doi: 10.1109/ICIM-IA48430.2020.9074932).

[2] W. Lu, H. Zhao, H. Zhao, "Distributed energy balancing routing algorithm in wireless sensor networks", Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 227–232, Feb. 2012.

[3] N. Z. Cedeno, O.P. Asqui, E.E. Chaw, "The performance of QoS in wireless sensor networks", Proceeding of the IEEE/CISTI, pp. 1-5, Coimbra, Portugal, June 2019 (doi: 10.23919/CISTI.2019.8760756).

[4] C.W. Tsai, T.P. Hong, G.N. Shiu, "Metaheuristics for the lifetime of WSN: A review", IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 9, pp. 2812–2831, May 2016 (doi: 10.1109/JSEN.2016.2523061).

[5] A. Jari, A. Avokh, "PSO-based sink placement and load-balanced anycast routing in multi-sink WSNs considering compressive sensing theory", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 100, p. 104164, Apr. 2021 (doi: 10.1016/j.engappai.2021.104164).

[6] S. Tian, Y. Li, Y. Kang, J. Xia, "Multi-robot path planning in wireless sensor networks based on jump mechanism PSO and safety gap obstacle avoidance", Future Generation Computer Systems, vol. 118, pp. 37–47, May 2021 (doi: 10.1016/j.future.2020.12.012).

[7] S. P. Tirani, A. Avokh, S. Azar, "WDAT-OMS: A two-level scheme for efficient data gathering in mobile-sink wireless sensor networks using compressive sensing theory", IET Communications, vol. 14, no. 11, pp. 1826–1837, Jul. 2020 (doi: 10.1049/iet-com.2019.0433).

[8] S. Prithi, S. Sumathi, "LD2FA-PSO: A novel learning dynamic deterministic finite automata with PSO algorithm for secured energy efficient routing in wireless sensor network", Ad Hoc Networks, vol. 97, p. 102024, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.adhoc.2019.102024).

[9] K. Vijayalakshmi, P. Anandan, "A multi objective Tabu particle swarm optimization for effective cluster head selection in WSN", Cluster Computing, vol. 22, no. 5, pp. 12275–12282, Sep. 2019 (doi: 10.1007/s10586-017-1608-7).

[10] F. Gao, W. Luo, X. Ma, "Energy constrained clustering routing method based on particle swarm optimiz ation", Cluster Computing, vol. 22, no. 3, pp. 7629–7635, May 2019 (doi: 10.1007/s10586-018-2339-0).

[11] E. Rezaei, S. Ghasemi, "Energy-aware data aggregation in wireless sensor networks using particle swarm optimization algorithm", American Journal of Information Science and Computer Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2018.

[12] M. Challa, M. D. Reddy, P. Venkata, S. Reddy, "Energy aware WSN transmission and network lifetime improvement using particle swarm based distance error optimization", International Journal of Applied Engineering Research, vol. 13, no. 11, pp. 9218–9227, 2018.

[13] P. C. S. Rao, P. K. Jana, H. Banka, "A particle swarm optimization based energy efficient cluster head selection algorithm for wireless sensor networks", Wireless Networks, vol. 23, no. 7, pp. 2005–2020, Oct. 2017 (doi: 10.1007/s11276-016-1270-7).

[14] Y. Zhou, N. Wang, W. Xiang, "Clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks using an improved PSO algorithm", IEEE Access, vol. 5, pp. 2241–2253, 2017 (doi: 10.1109/ACCESS.2016.2633826).

[15] B. Singh, D. K. Lobiyal, "A novel energy-aware cluster head selection based on particle swarm optimization for wireless sensor networks", Human-centric Computing and Information Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 1–18, Dec. 2012 (doi: 10.1186/2192-1962-2-13).

[16] D. Wu, S. Geng, X. Cai, G. Zhang, and F. Xue, "A many-objective optimization WSN energy balance model", KSII Transactions on Internet and Information Systems, vol. 14, no. 2, pp. 514–537, 2020 (doi: 10.3837/tiis.2020.02.003).

[17] I. S. Akila, R. Venkatesan, "A cognitive multi-hop clustering approach for wireless sensor networks", Wireless Personal Communications, vol. 90, no. 2, pp. 729–747, Sep. 2016 (doi: 10.1007/s11277-016-3200-5).

[18] M. Habib, I. Aljarah, H. Faris, S. Mirjalili, "Multi-objective particle swarm optimization: Theory, Literature Review, and Application in feature selection for medical diagnosis", Springer, Singapore, 2020, pp. 175–201.

[19] C. A. Coello Coello, M. S. Lechuga, "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimizatio n", Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, pp. 1051–1056, Honolulu, USA, May 2002 (doi: 10.1109/CEC.2002.1004388).

[20] C. Saranya, G. Manikandan, "A study on normalization techniques for privacy preserving data mining", vol. 5, pp. 2701–2704, Jun. 2013.

[21] "A review of spatial interpolation methods for environmental scientists - datasets - data.gov.au." https://data.gov.au/data/dataset/a-review-of-spatial-interpolation-methods-for-environmental-scientists, (accessed Jan. 11, 2021).

[22] T. Kaur, D. Kumar, "MACO-QCR: Multi-objective ACO based QoS-aware cross-layer routing protocols in WSN", IEEE Sensors Journal, p. 1, 2020 (doi: 10.1109/JSEN.2020.3038241).

زیرنویس‌ها

1. Wireless sensor networks
2. Multi-sink placement and anycast routing
3. Extended multi-sink placement and anycast routing
4. Jumping mechanism particle swarm optimization
5. Safety gap obstacle avoidance algorithm
6. Weighted data aggregation trees with optimal mobile sink
7. Learning dynamic deterministic finite automata
8. Low-energy adaptive clustering hierarchy
9. Expected transmission count
10. Energy-efficient expected transmission count
11. Remaining energy of the path
12. Multi-objective particle swarm optimization
13. Multi-objective ACO-based QoS-aware cross-layer routing protocols in WSN
14. Extended particle swarm optimization
15. Energy aware fuzzy unequal clustering algorithm for wireless sensor networks
16. Fuzzy based unequal clustering
17. Genetic algorithm
18. Greedy load balanced clustering algorithm
19. Low duty-cycle