

بهینه‌سازی خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مدل‌های ABC-ACO و EECHS-ISSADE، IMD-EACBR

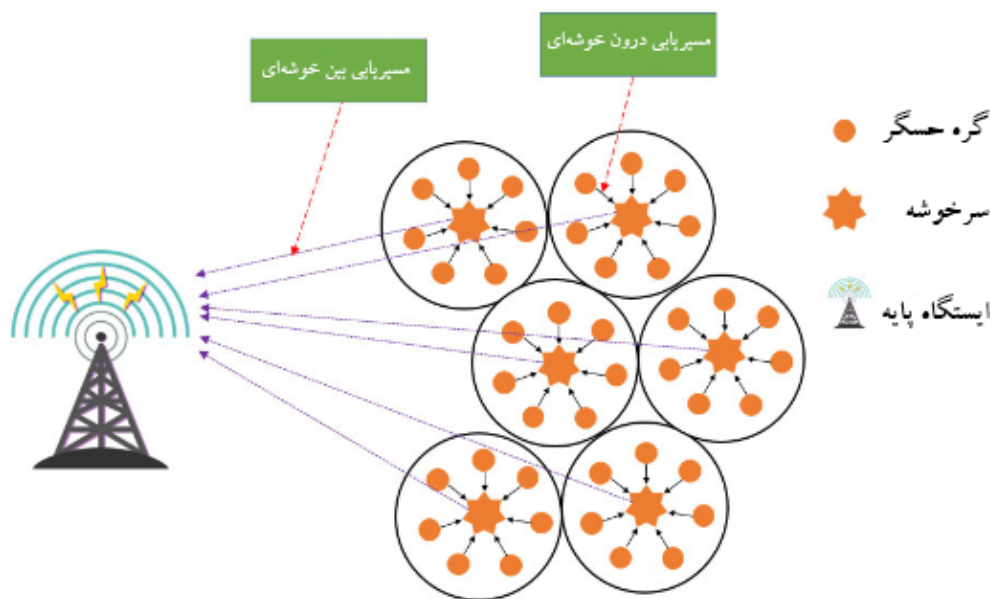
فائزه قیاسی، رانیا کارگر و ملیکا ملکی
دانشجویان کارشناسی دانشگاه صنعتی اصفهان
مهندسی کامپیوتر

چکیده

شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیا به دلیل کاربردهای گسترده در حوزه‌هایی همچون نظارت بر محیط، حمل‌ونقل هوشمند و مراقبت‌های بهداشتی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. یکی از چالش‌های اساسی این شبکه‌ها، محدودیت انرژی گره‌های حسگر و تأثیر آن بر طول عمر شبکه است. در این راستا، استفاده از تکنیک‌های مسیریابی براساس خوشه‌بندی به همراه الگوریتم‌های فراابتکاری برای انتخاب سرخوشه‌ها و طراحی مسیرهای بهینه‌ی انتقال داده‌ها به عنوان راهکاری مناسب مطرح شده‌است. ما در این مقاله سه مدل پیشرفته برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود عملکرد شبکه ارائه می‌دهیم. IMD-EACBR که از الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته برای انتخاب سرخوشه‌ها و از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری اصلاح‌شده‌ی دورگه برای مسیریابی چندپرسی استفاده می‌کند، مدل EECHS-ISSADE که ترکیبی از الگوریتم‌های جست‌وجوی گنجشک و تکامل تفاضلی را برای خوشه‌بندی مسیریابی پیشنهاد می‌دهد و مدل ترکیبی ABC-ACO که از الگوریتم زنبورعسل مصنوعی و کلونی مورچه‌ها برای کاهش تأخیر و توازن مصرف انرژی بهره می‌گیرد. براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها مدل‌های پیشنهادی ما در مقایسه با روش‌های پیشین، منجر به افزایش طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی و بهبود نرخ انتقال داده‌ها می‌شوند. این تحقیق گامی مؤثر در راستای بهینه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیا است.

۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، اینترنت اشیا^۱ و شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۲ به عنوان دو فناوری نوین و کلیدی، نقش مهمی در زمینه‌های مختلفی از جمله نظارت بر محیط، مراقبت‌های بهداشتی هوشمند، حمل و نقل هوشمند و اتوماسیون صنعتی ایفا کرده‌اند [۱، ۲، ۳]. در این شبکه‌ها، گره‌های حسگر^۳ به صورت گسترده در مناطق جغرافیایی پراکنده می‌شوند. این گره‌ها اطلاعات محیطی را جمع‌آوری کرده و به ایستگاه پایه^۴ ارسال می‌کنند که در شکل ۱ نمونه‌ای از آن را می‌بینیم. یکی از چالش‌های اصلی این شبکه‌ها، محدودیت انرژی گره‌های حسگر است، چرا که این گره‌ها به طور معمول وابسته به باتری‌های محدود هستند. مصرف سریع انرژی در گره‌ها می‌تواند باعث کاهش طول عمر شبکه^۵ و اختلال در انتقال داده‌ها شود. به همین دلیل، بهینه‌سازی مصرف انرژی و طراحی راهکارهایی برای افزایش طول عمر شبکه از مهم‌ترین اولویت‌ها در این حوزه به شمار می‌روند.



شکل ۱: یک شبکه حسگر بی‌سیم خوشه‌ای

تکنیک‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی

یکی از راهکارهای موثر برای مقابله با محدودیت‌های انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، استفاده از تکنیک‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی است. در این روش، شبکه به چندین خوشه تقسیم می‌شود و برای هر خوشه یک سرخوشه تعیین می‌گردد. سرخوشه‌ها وظیفه‌ی جمع‌آوری داده‌ها از گره‌های عضو خوشه و انتقال آن‌ها به ایستگاه پایه را بر عهده دارند. انتخاب بهینه‌ی سرخوشه‌ها و مسیریابی داده‌ها به منظور کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه و بهبود کارایی به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ و پیچیده اهمیت زیادی دارند.

¹Internet Of Things

²Wireless Sensor Networks

³Sensor Nodes

⁴ Base Station

⁵Network Lifetime

الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای انتخاب سرخوشه‌ها

برای انتخاب بهینه سرخوشه‌ها^۶، الگوریتم‌های فراابتکاری^۷ ارائه شده‌اند. این الگوریتم‌ها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته و تحلیل پارامترهای مرتبط، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه ایفا می‌کنند. برخی از الگوریتم‌های موثر در این زمینه عبارتند از:

• الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس بهبودیافته^۸

این الگوریتم با بهره‌گیری از یک تابع تناسب^۹ که پارامترهایی نظیر فاصله، بهره‌وری انرژی و درجه‌ی گره را در نظر می‌گیرد، سرخوشه‌های بهینه را انتخاب می‌کند.

• الگوریتم جست‌وجوی گنجشک^{۱۰}

این الگوریتم از رفتار اجتماعی گنجشک‌ها در یافتن منابع غذایی الهام گرفته و با تحلیل انرژی باقی‌مانده‌ی گره‌ها و فاصله‌ی آن‌ها از ایستگاه پایه، سرخوشه‌های بهینه را تعیین می‌کند.

• الگوریتم تکامل تفاضلی^{۱۱}

این الگوریتم با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی با پیچیدگی کم و پایدار، فرآیند انتخاب سرخوشه‌ها را تسهیل می‌کند.

• الگوریتم زنبور عسل بهبودیافته^{۱۲}

این الگوریتم با الهام از رفتار زنبورها در یافتن منابع غذایی، گره‌هایی با بیشترین بهره‌وری انرژی و مناسب‌ترین موقعیت مکانی را به عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسیریابی

برای انتخاب بهینه سرخوشه‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری علاوه بر انتخاب سرخوشه‌ها، طراحی الگوریتم‌های بهینه برای مسیریابی داده‌ها^{۱۳} از دیگر چالش‌های اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. این الگوریتم‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی، بهبود تأخیر در انتقال داده‌ها و افزایش کارایی طراحی می‌شوند. برخی از الگوریتم‌های برجسته در این زمینه شامل موارد زیر است:

• الگوریتم مسیریابی چندپرسی مبتنی بر بهینه‌سازی آموزش و یادگیری-اصلاح شده‌ی ترکیبی^{۱۴}

این الگوریتم از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای یافتن مسیرهای بهینه بین گره‌ها استفاده می‌کند.

• الگوریتم کلونی مورچه بهبودیافته^{۱۵}

این الگوریتم با ایجاد مسیرهای چندپرسی بهینه از سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه، به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند.

^۶Cluster Head

^۷Metaheuristic Algorithms

^۸Improved Archimedes Optimization Algorithm

^۹Fitness Function

^{۱۰}Sparrow Search Algorithm

^{۱۱}Differential Evolution

^{۱۲}Improved Artificial Bee Colony

^{۱۳}Data Routing

^{۱۴}Teaching-learning-Based Optimization for Multi-Hop Routing

^{۱۵}Improved Ant Colony Optimization

مدل‌های پیشنهادی

برای دستیابی به بیشترین بهره‌وری انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مدل‌های ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی شده‌اند. از جمله مدل‌های پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• مدل IMD-EACBR [۴]

این مدل از ترکیب دو الگوریتم قدرتمند ارشمیدس بهبود یافته و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری-اصلاح شده‌ی ترکیبی برای انتخاب بهینه‌ی سرخوشه‌ها و مسیریابی چندپرسی استفاده می‌کند. هدف این مدل کاهش تاخیر، متوازن‌سازی مصرف انرژی و بهبود کارایی شبکه است.

• مدل EECHS-ISSADE [۵]

در این مدل، الگوریتم‌های جست‌وجوی گنجشک و تکامل تفاضلی برای انتخاب سرخوشه‌ها و بهبود فرآیند مسیریابی استفاده می‌شوند. هدف اصلی این مدل کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه از طریق انتخاب بهینه سرخوشه‌ها است.

• مدل ترکیبی ABC-ACO [۷]

این مدل، از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی برای انتخاب سرخوشه‌ها و از الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای مسیریابی بهینه داده‌ها استفاده می‌کند. مکانیزم کنترل درون‌خوشه‌ای نیز برای کاهش مصرف انرژی در گره‌های غیرفعال به این مدل اضافه شده است. این مقاله تلاش دارد تا با طراحی و بررسی مدل‌های پیشنهادی، گام‌های موثری در راستای کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه و بهبود عملکرد اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر بی‌سیم بردارد.

۲ کارهای مرتبط

• رویکردهای ترکیبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی

مطالعات اخیر به بررسی تکنیک‌های پیشرفته‌ای برای مسیریابی و خوشه‌بندی بهینه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs) پرداخته‌اند که هدف آن‌ها افزایش طول عمر شبکه و بهبود عملکرد است. کویتا و همکاران یک رویکرد ترکیبی با نام SAGA-H را معرفی کردند که شامل الگوریتم‌های بازپخت شبیه‌سازی شده و ژنتیک برای مسیریابی مبتنی بر خوشه است. این روش در MATLAB پیاده‌سازی شده و نتایج آن با الگوریتم ژنتیک معاصر مقایسه شده است. سبولاکشمی و همکاران نیز پروتکلی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌ساز بادبان ماهی^{۱۶} برای بهینه‌سازی انرژی ارائه کردند [۹] که انتخاب سرخوشه‌ها را بر اساس معیارهای تناسب انجام می‌دهد. همچنین، گوودا و همکاران یک روش ترکیبی مبتنی بر شبکه عصبی^{۱۷} را پیشنهاد دادند که در آن حسگرها با استفاده از خوشه‌بندی تغییر میانگین خوشه‌بندی شده و سرخوشه‌ها با الگوریتم جست‌جوی عقاب طاس^{۱۸} انتخاب می‌شوند. در ادامه، وایاپوری و همکاران روشی به نام CBR-ICWSN برای مسیریابی خوشه‌ای مبتنی بر اطلاعات ارائه کردند که از بهینه‌سازی بیه سیاه (BWO) برای انتخاب سرخوشه و الگوریتم مصنوعی زنبور عسل مخالف (OABC) برای تعیین مسیر استفاده می‌کند. شفیق و همکاران نیز پروتکل مسیریابی خوشه‌ای قوی (RCBRP) را معرفی کردند که شامل تکنیک‌های ارزیابی فاصله و مصرف انرژی است. ژنگ و همکاران رویکرد SACR را توسعه دادند که بر پایداری خوشه‌ها تمرکز دارد، در حالی که آوان و همکاران یک استراتژی مبتنی بر بهینه‌سازی گرگ خاکستری را برای صنعت دام طراحی کردند. پاندی و همکاران نیز یک استراتژی مسیریابی چندگامی مبتنی بر یادگیری تقویتی پیشنهاد دادند که مشکلات تأخیر داده و ناکارآمدی پهنای باند را حل می‌کند.

• پروتکل‌های خوشه‌بندی

روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده‌اند. پروتکل LEACH، یکی از نخستین الگوریتم‌های خوشه‌بندی، از انتخاب تصادفی سرخوشه‌ها استفاده می‌کند، اما این روش ممکن است منجر به افزایش مصرف انرژی در برخی گره‌ها شود. الگوریتم‌های متاهوریستیک مانند PSO و ABC نیز برای بهینه‌سازی انتخاب سرخوشه‌ها معرفی شده‌اند، اما مشکلاتی نظیر همگرایی زودرس و هزینه‌های محاسباتی بالا همچنان وجود دارد. پروتکل LEACH-C بهبود یافته، فرآیند خوشه‌بندی را براساس مکان و انرژی گره‌ها انجام می‌دهد، اما مکانیزم مسیریابی

¹⁶Sailfish Optimizer (SFO)

¹⁷Neural Network (NN)

¹⁸Bald eagle search

تک‌پرسی باعث مصرف سریع انرژی در گره‌های دور از ایستگاه پایه می‌شود. پروتکل GWO از قدرت محاسباتی ایستگاه پایه برای محاسبه دقیق انرژی مصرفی شبکه استفاده کرده و از مسیریابی دوطرفه بهره می‌برد، اما محدودیت‌هایی در پیدا کردن گره واسط مناسب دارد. پروتکل FIGWO نیز با بهبود موقعیت شکار در GWO طراحی شده است، اما فاقد مکانیزم مسیریابی موثر است. سایر پروتکل‌ها مانند ABC-SD و PSO نیز تلاش دارند تا عمر شبکه را افزایش دهند، اما تعادل بار بین سرخوشه‌ها را نادیده می‌گیرند.

با توجه به چالش‌های موجود در مسیریابی و خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ما قصد داریم یک مکانیسم جدید مسیریابی داده ارائه دهیم که نرخ مصرف انرژی کابل‌ها را بهینه کند. این استراتژی با حفظ مصرف ثابت انرژی، سرعت انتقال داده‌ها را افزایش خواهد داد. آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی و استقرار گره‌های واقعی در یک بستر آزمایشی WSN انجام خواهد شد. همچنین، برای جلوگیری از رفتار خودخواهانه گره‌های حسگر، یک ابزار پیامد مبتنی بر نظریه بازی طراحی خواهد شد که گره‌ها را به پذیرش روش‌های مشارکتی ترغیب می‌کند. پیش‌بینی می‌شود این روش بتواند مصرف انرژی شبکه را کاهش داده و میزان انتقال داده‌ها را افزایش دهد که منجر به بهبود طول عمر شبکه خواهد شد.

۳ مدل پیشنهادی

مدل EECHS-ISSADE بر اساس رفتارهای طبیعی گنجشک‌ها طراحی شده است. گنجشک‌ها از استراتژی‌های جستجوی غذا و اجتناب از شکار برای یافتن منابع استفاده می‌کنند. در این مدل، SSA به عنوان یک ابزار جستجوی سریع عمل می‌کند و DE به منظور جلوگیری از گرفتار شدن در بهینه‌های محلی و تقویت قابلیت جستجوی جهانی به کار می‌رود. تابع برازندگی این مدل شامل پارامترهایی نظیر انرژی باقی‌مانده، فاصله درون خوشه‌ای و فاصله سرخوشه تا ایستگاه پایه است. این پارامترها به طور پویا برای هر گره محاسبه شده و بهینه‌ترین سرخوشه‌ها انتخاب می‌شوند. SSA برای شبیه‌سازی رفتارهای اسپارو و DE برای بهبود فرایند جستجو و جلوگیری از همگرایی زود هنگام ترکیب شده‌اند. این مدل به طور خاص تضمین می‌کند که گره‌هایی با انرژی پایین به عنوان CH انتخاب نشوند، در حالی که گره‌هایی با انرژی بالا به طور عادلانه بار مسئولیت را تحمل می‌کنند. پروتکل پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است:

۱. خوشه‌بندی: در این مرحله، گره‌های حسگر به خوشه‌هایی تقسیم شده و یک گره به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. انتخاب سرخوشه‌ها با استفاده از الگوریتم IABC انجام می‌شود که معیارهایی نظیر انرژی باقی‌مانده، تراکم گره‌ها و فاصله را در نظر می‌گیرد.
۲. مسیریابی: پس از تشکیل خوشه‌ها، داده‌های حسگرها به سرخوشه‌ها منتقل شده و سپس از طریق مسیرهای چندگامی^{۱۹} به ایستگاه پایه ارسال می‌شوند. این مسیرها با استفاده از الگوریتم بهبود یافته ACO تعیین می‌شوند تا مصرف انرژی بهینه شود.

۴ مطالعه شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد مدل EECHS-ISSADE، شبیه‌سازی‌هایی در MATLAB انجام شد. شبکه‌ای به ابعاد 200×200 متر با ۱۰۰ گره حسگری همگن طراحی شد. این گره‌ها به طور تصادفی در شبکه توزیع شدند و ایستگاه پایه در مرکز شبکه قرار گرفت. مدل پیشنهادی با الگوریتم‌های LEACH، TABU-PSO و EECHS-ABC مقایسه شد. پارامترهایی مانند تعداد گره‌های زنده، انرژی باقی‌مانده، نرخ انتقال داده و پایداری شبکه به عنوان معیارهای ارزیابی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که EECHS-ISSADE در حفظ تعداد بیشتری از گره‌های زنده برای دوره‌های طولانی‌تر موفق عمل کرده است. همچنین، مصرف انرژی در این مدل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و نرخ انتقال داده به ایستگاه پایه افزایش پیدا کرد.

¹⁹Multi-Hop Paths

- [١] Sharma, Deepak, and Amol P. Bhondekar. "Traffic and energy aware routing for heterogeneous wireless sensor networks." *IEEE Communications Letters* 22.8 (2018): 1608-1611.
- [٢] Farsi, Mohammed, et al. "A congestion-aware clustering and routing (CCR) protocol for mitigating congestion in WSN." *IEEE Access* 7 (2019): 105402-105419.
- [٣] Satpathy, Sambit, et al. "Design a FPGA, fuzzy based, insolent method for prediction of multi-diseases in rural area." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 37.5 (2019): 7039-7046.
- [٤] Kathirolu, Panimalar, and Kanmani Selvadurai. "Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm in Wireless Sensor Networks." *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* 34.10 (2022): 8564-8575.
- [٥] Lakshmana, Kuruva, et al. "Improved metaheuristic-driven energy-aware cluster-based routing scheme for IoT-assisted wireless sensor networks." *Sustainability* 14.13 (2022): 7712.
- [٦] Wang, Zongshan, et al. "An energy efficient routing protocol based on improved artificial bee colony algorithm for wireless sensor networks." *IEEE Access* 8 (2020): 133577-133596.
- [٧] Mohan, Prakash, et al. "Improved metaheuristics-based clustering with multihop routing protocol for underwater wireless sensor networks." *Sensors* 22.4 (2022): 1618.