

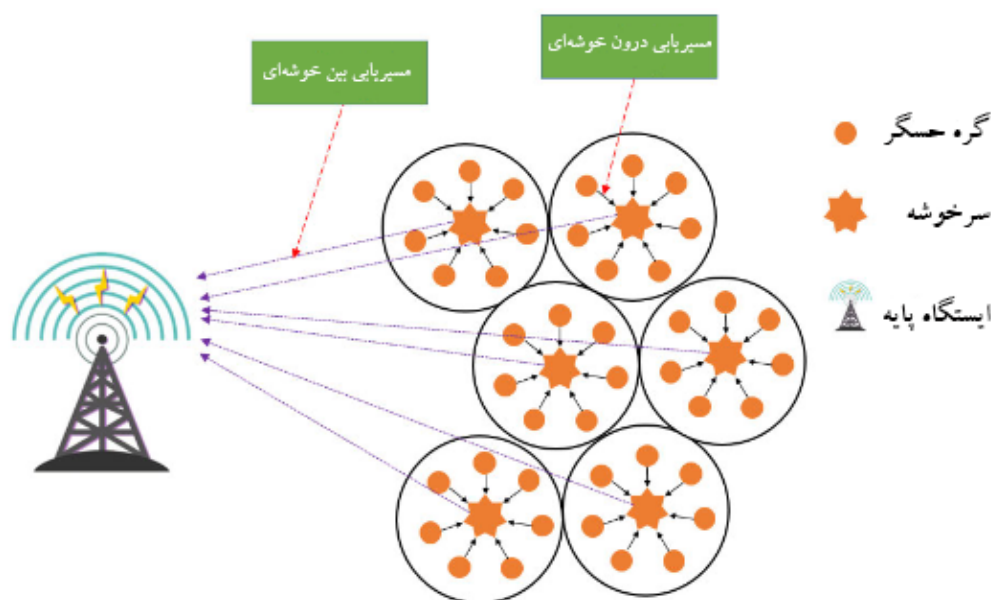
بهینه‌سازی خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با مدل‌های EECHS-ISSADE، IMD-EACBR و ABC-ACO

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

چکیده

شبکه‌های حسگر بی‌سیم و اینترنت اشیا به دلیل کاربردهای گسترده در زمینه‌هایی مانند نظارت محیطی، حمل و نقل هوشمند و مراقبت‌های بهداشتی، اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. یکی از چالش‌های اصلی این شبکه‌ها، محدودیت انرژی گره‌های حسگر است که بر طول عمر شبکه تأثیر می‌گذارد. برای حل این مشکل، استفاده از تکنیک‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی همراه با الگوریتم‌های فراابتکاری برای انتخاب سرخوشه‌ها و طراحی مسیرهای بهینه داده‌ها پیشنهاد شده است. در این مقاله، سه مدل به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود عملکرد شبکه ارائه می‌شوند. مدل IMD-EACBR که از الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته برای انتخاب سرخوشه‌ها و از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری اصلاح‌شده برای مسیریابی چندپرسی استفاده می‌کند، مدل EECHS-ISSADE که ترکیبی از الگوریتم‌های جست‌وجوی گنجشک و تکامل تفاضلی را برای خوشه‌بندی و مسیریابی پیشنهاد می‌دهد و مدل ABC-ACO که از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی و کلونی مورچه‌ها برای کاهش تأخیر و توازن مصرف انرژی بهره می‌برد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قبلی، طول عمر شبکه را افزایش داده، مصرف انرژی را کاهش می‌دهند و نرخ انتقال داده‌ها را بهبود می‌بخشند.

در سال‌های اخیر، اینترنت اشیا^۱ و شبکه‌های حسگر بی سیم^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 مشاهده می‌کنید. یکی از چالش‌های اصلی این شبکه‌ها، محدودیت انرژی گره‌های حسگر است، زیرا این گره‌ها معمولاً 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 بی سیم خوشه‌ای

یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با محدودیت‌های انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم، استفاده از تکنیک‌های مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی است. در این روش، شبکه به چندین خوشه تقسیم می‌شود و برای هر خوشه یک سرخوشه^۶ تعیین می‌گردد. سرخوشه‌ها مسئول جمع‌آوری داده‌ها از گره‌های عضو خوشه و انتقال آن‌ها به ایستگاه پایه هستند. انتخاب بهینه سرخوشه‌ها و مسیریابی داده‌ها^۷ به منظور کاهش مصرف انرژی،

¹Internet Of Things

²Wireless Sensor Networks

³Sensor Nodes

⁴Base Station

⁵Network Lifetime

⁶Cluster Head

⁷Data Routing

- افزایش طول عمر شبکه و بهبود کارایی، به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ و پیچیده، اهمیت زیادی دارد.
- برای انتخاب بهینه سرخوشه‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری^۸ متعددی 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 مؤثر در این زمینه عبارتند از:
- الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس بهبودیافته^۹: الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته با بهره‌گیری از یک تابع تناسب^{۱۰} که پارامترهایی نظیر فاصله، بهره‌وری انرژی و درجه گره را در نظر می‌گیرد، سرخوشه‌های بهینه را انتخاب می‌کند.
 - الگوریتم جست‌وجوی گنجشک^{۱۱}: این الگوریتم از رفتار اجتماعی گنجشک‌ها در یافتن منابع غذایی الهام گرفته و با تحلیل انرژی باقی‌مانده گره‌ها و فاصله آن‌ها از ایستگاه پایه، سرخوشه‌های بهینه را تعیین می‌کند.
 - الگوریتم تکامل تفاضلی^{۱۲}: الگوریتم تکامل تفاضلی با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی با پیچیدگی کم و پایدار، فرآیند انتخاب سرخوشه‌ها را تسهیل می‌کند.
 - الگوریتم زنبورعسل بهبودیافته^{۱۳}: الگوریتم زنبورعسل بهبود یافته با الهام از رفتار زنبورها در یافتن منابع غذایی، گره‌هایی با بیشترین بهره‌وری انرژی و مناسب‌ترین موقعیت مکانی را به عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند.
- علاوه بر انتخاب سرخوشه‌ها، طراحی الگوریتم‌های بهینه برای مسیریابی داده‌ها 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 اصلاح‌شده ترکیبی^{۱۴}: الگوریتم مسیریابی چندپرسی از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای یافتن مسیرهای بهینه بین گره‌ها استفاده می‌کند.
 - الگوریتم کلونی مورچه بهبودیافته: الگوریتم کلونی مورچه بهبودیافته با ایجاد مسیرهای چندپرسی بهینه از سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه، به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند.

^۸Metaheuristic Algorithms

^۹Improved Archimedes Optimization Algorithm

^{۱۰}Fitness Function

^{۱۱}Sparrow Search Algorithm

^{۱۲}Differential Evolution

^{۱۳}Improved Artificial Bee Colony

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

این مقاله تلاش دارد تا با طراحی و بررسی مدل‌های پیشنهادی، گام‌های مؤثری در راستای کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه و بهبود عملکرد اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر بی‌سیم بردارد.

۲ کارهای مرتبط

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای برای بهینه‌سازی خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم صورت گرفته است. در این بخش به مرور برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده پرداخته می‌شود:

- پروتکل LEACH: یکی از نخستین روش‌های خوشه‌بندی است که به‌طور گسترده استفاده شده است [۵، ۱]. این پروتکل سرخوشه‌ها را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و از مسیریابی تک‌مرحله‌ای استفاده می‌کند. با این حال، این روش در شبکه‌های بزرگ‌تر به دلیل مصرف بالای انرژی ناکارآمد است.
- پروتکل‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری: الگوریتم‌هایی مانند PSO و ABC برای بهبود مصرف انرژی معرفی شده‌اند [۴، ۶]. این الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن فاکتورهایی مانند انرژی باقی‌مانده گره‌ها و فاصله تا ایستگاه پایه، سرخوشه‌های بهینه را انتخاب می‌کنند.
- پروتکل‌های ترکیبی: در پژوهش‌هایی مانند [۵، ۷]، ترکیب الگوریتم‌های مختلف از جمله جستجوی گنجشک و زنبور عسل باعث بهبود طول عمر شبکه و کاهش تأخیر شده است.
- روش‌های جدید مبتنی بر یادگیری ماشینی: برخی پژوهش‌ها از مدل‌های یادگیری ماشینی مانند شبکه‌های عصبی و یادگیری تقویتی برای پیش‌بینی مسیرهای بهینه استفاده کرده‌اند [۸، ۹].

این مرور نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده پیشرفت‌های قابل توجهی در بهینه‌سازی خوشه‌بندی و مسیریابی ارائه داده‌اند. با این حال، همچنان نیاز به توسعه روش‌های کارآمدتر با قابلیت انطباق بیشتر در سناریوهای پویای اینترنت اشیا وجود دارد.

۳ روش شناسی

در این بخش، سه مدل پیشنهادی و الگوریتم‌های مورد استفاده تشریح می‌شوند.

۱.۳ مدل IMD-EACBR

مدل IMD-EACBR از الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته برای انتخاب سرخوشه‌ها استفاده می‌کند [۴، ۵]. با استفاده از فرمول‌های زیر، مدل به شناسایی سرخوشه‌های بهینه و کاهش مصرف انرژی می‌پردازد. این فرمول‌ها

برای محاسبه کارایی انرژی، هزینه خوشه‌بندی، و تعیین فاصله بهینه بین گره‌ها و ایستگاه پایه طراحی شده‌اند.

$$f_1 = \frac{CH_{opt} \times e(n_i)}{CH_{opt} \times Avg_e} \quad (۱)$$

این فرمول برای محاسبه بهره‌وری انرژی گره‌ها به کار می‌رود و تضمین می‌کند که سرخوشه‌های انتخاب‌شده دارای انرژی کافی برای مدیریت داده‌ها باشند.

$$f_2 = \max(n(CH_1), n(CH_2), \dots, n(CH_j)) \quad (۲)$$

این فرمول تعداد گره‌های موجود در هر خوشه را ارزیابی می‌کند تا از توزیع متعادل گره‌ها در سرخوشه‌ها اطمینان حاصل شود.

$$f_3 = \frac{1}{n_{sr}} \sum_{i=1}^{n_{sr}} dist(CH, i) \quad (۳)$$

این فرمول فاصله میان سرخوشه‌ها و گره‌های عضو را بهینه می‌کند تا مصرف انرژی انتقال داده‌ها کاهش یابد.

$$f_4 = \frac{1}{CH} \sum_{i=1}^{CH} dist(BS, CH_i) \quad (۴)$$

این فرمول فاصله بین سرخوشه‌ها و ایستگاه پایه را محاسبه می‌کند و به کاهش تأخیر و مصرف انرژی کمک می‌کند.

۲.۳ مدل EECHS-ISSADE

مدل EECHS-ISSADE از ترکیب الگوریتم‌های جستجوی گنجشک و تکامل تفاضلی بهره می‌برد [۵، ۶]. این مدل به طور خاص برای شبکه‌های بزرگ و پیچیده طراحی شده و مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مدل:

- الگوریتم جستجوی گنجشک: سرخوشه‌ها را بر اساس انرژی باقی‌مانده و فاصله از ایستگاه پایه انتخاب

می‌کند.

- الگوریتم تکامل تفاضلی: تنوع جمعیت و جلوگیری از همگرایی زودهنگام را تضمین می‌کند.

این مدل به طور خاص برای شبکه‌های بزرگ و پیچیده طراحی شده و مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

۳.۳ مدل ABC-ACO

مدل ABC-ACO از الگوریتم زنبور عسل بهبود یافته برای انتخاب سرخوشه‌ها و الگوریتم کلونی مورچه برای مسیریابی استفاده می‌کند [۶، ۷]. ویژگی‌های اصلی این مدل عبارتند از:

- بهینه‌سازی انتخاب سرخوشه: استفاده از رفتار زنبورها برای شناسایی گره‌های با انرژی بالا.
- مسیریابی چند مرحله‌ای: کاهش تأخیر و افزایش نرخ انتقال داده با الگوریتم کلونی مورچه.

۴ نتایج و تحلیل

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده و عملکرد سه مدل پیشنهادی با روش‌های موجود مقایسه شده است. معیارهای ارزیابی شامل موارد زیر هستند:

- طول عمر شبکه: تعداد دورهای فعال شبکه قبل از اتمام انرژی گره‌ها.
- مصرف انرژی^{۱۵}: میزان انرژی مصرفی در هر دور.
- نرخ انتقال داده^{۱۶}: تعداد بسته‌های ارسال شده به ایستگاه پایه.
- نسبت تحویل بسته: درصد بسته‌های موفق ارسال شده.

جدول ۱: مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادی

مدل	طول عمر شبکه (دور)	مصرف انرژی (ژول)	نرخ انتقال داده (بسته/ثانیه)	نسبت تحویل بسته (%)
IMD-EACBR	۳۵۰۰	۰۴۷۰	۹۷۵۰	۸۳.۹۸
EECHS-ISSADE	۳۲۵۰	۰۵۶۰	۹۴۵۰	۶۲.۹۷
ABC-ACO	۳۱۰۰	۰۶۳۰	۹۱۰۰	۴۵.۹۶

^{۱۵}Energy Consumption

^{۱۶}Data Transmission Rate

۵ بحث و تحلیل

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل IMD-EACBR با استفاده از الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته و مسیریابی چندپرسی، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. این مدل به دلیل توزیع متوازن بار بین گره‌های شبکه، باعث افزایش طول عمر شبکه شده است. همچنین، مصرف انرژی در این مدل به میزان قابل توجهی کاهش یافته و نرخ انتقال داده بهبود پیدا کرده است.

در مقایسه، مدل EECHS-ISSADE، که از ترکیب الگوریتم‌های جستجوی گنجشک و تکامل تفاضلی استفاده می‌کند، در شبکه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر عملکرد مطلوبی داشته است. دلیل این امر، توانایی این مدل در جلوگیری از همگرایی زودهنگام و تضمین تنوع در فرآیند خوشه‌بندی و مسیریابی است.

مدل ABC-ACO نیز در کاهش تأخیر و بهبود نرخ انتقال داده موفق عمل کرده است. این مدل با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه برای مسیریابی، توانسته است مسیرهای بهینه را برای ارسال داده‌ها پیدا کند. با این حال، مصرف انرژی در این مدل نسبت به دو مدل دیگر بیشتر بوده است که می‌تواند به دلیل ساختار پیچیده‌تر الگوریتم کلونی مورچه باشد.

با توجه به این تحلیل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که هر یک از مدل‌ها نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و انتخاب مدل مناسب بستگی به شرایط و نیازهای خاص شبکه دارد.

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات آینده

در این مقاله، سه مدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شدند. هر مدل با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته فراابتکاری، مصرف انرژی را کاهش داده و طول عمر شبکه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل IMD-EACBR به دلیل استفاده از الگوریتم ارشمیدس بهبودیافته و رویکرد چندپرسی، در مقایسه با سایر روش‌ها عملکرد بهتری از خود نشان داده است. مدل EECHS-ISSADE نیز به واسطه ترکیب الگوریتم‌های جستجوی گنجشک و تکامل تفاضلی توانست در شبکه‌های بزرگ و پیچیده کارایی مطلوبی داشته باشد. همچنین، مدل ABC-ACO با استفاده از الگوریتم زنبور عسل و کلونی مورچه، تأخیر در انتقال داده‌ها را کاهش داده و نرخ انتقال داده را بهبود بخشید.

دستاوردهای کلیدی

- افزایش طول عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی در گره‌های حسگر.
- بهبود نرخ انتقال داده و کاهش تأخیر در انتقال اطلاعات.

- ارائه مدل‌هایی که قابل پیاده‌سازی در سناریوهای مختلف و مقیاس‌های بزرگ‌تر هستند.

پیشنهادهای پژوهش‌های آینده

۱. به کارگیری روش‌های یادگیری عمیق: ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری با شبکه‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی بهتر الگوهای مصرف انرژی و بهبود تصمیم‌گیری در انتخاب سرخوشه‌ها.
 ۲. بررسی تأثیر ایستگاه پایه متحرک: گسترش مدل‌های پیشنهادی برای شبکه‌هایی که در آن‌ها ایستگاه پایه قابلیت حرکت دارد، به‌ویژه در سناریوهایی مانند پهپادهای متحرک.
 ۳. افزودن معیارهای کیفی دیگر: بررسی تأثیر عواملی نظیر قابلیت اطمینان ارتباط، امنیت داده‌ها، و تأخیر شبکه در مدل‌های پیشنهادی.
 ۴. پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی: ارزیابی مدل‌ها در محیط‌های فیزیکی و مقایسه عملکرد آن‌ها با شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری.
 ۵. بررسی تطبیق‌پذیری در اینترنت اشیا: گسترش مدل‌ها برای سازگاری بهتر با سناریوهای متنوع اینترنت اشیا، شامل شبکه‌های هوشمند و صنعتی.
- نتایج این پژوهش نشان‌دهنده توانایی بالای مدل‌های پیشنهادی در افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. توسعه بیشتر این مدل‌ها می‌تواند گامی مؤثر در راستای ایجاد شبکه‌های پایدار و کارآمد در کاربردهای اینترنت اشیا باشد.

مراجع

- [۱] Sharma, Deepak, and Amol P. Bhondekar. "Traffic and energy aware routing for heterogeneous wireless sensor networks." *IEEE Communications Letters* 22.8 (2018): 1608-1611.
- [۲] Farsi, Mohammed, et al. "A congestion-aware clustering and routing (CCR) protocol for mitigating congestion in WSN." *IEEE Access* 7 (2019): 105402-105419.
- [۳] 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.

- [۴] 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.
- [۵] Lakshmana, Kuruva, et al. "Improved metaheuristic-driven energy-aware cluster-based routing scheme for IoT-assisted wireless sensor networks." *Sustainability* 14.13 (2022): 7712.
- [۶] 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.
- [۷] Mohan, Prakash, et al. "Improved metaheuristics-based clustering with multihop routing protocol for underwater wireless sensor networks." *Sensors* 22.4 (2022): 1618.
- [۸] Yue, Jiangyue, et al. "A hybrid optimization-based clustering algorithm for energy-efficient wireless sensor networks." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17.4 (2021): 2413-2424.
- [۹] Chen, Shuo, et al. "Energy-efficient cluster head selection in wireless sensor networks with metaheuristic optimization." *IEEE Sensors Journal* 20.23 (2020): 14012-14022.
- [۱۰] Lyu, Xuan, et al. "Dynamic energy-aware clustering and routing algorithm for wireless sensor networks." *Journal of Network and Computer Applications* 193 (2022): 103162.