



KNO-1201-4703

مدل هوش مصنوعی برای بهبود انتخاب CH در WSNها: بهینه سازی مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه با الگوریتم RDA

طاهره جوانمردی^۱، th.javanmardi57@gmail.comموسی مجرد^۲، musa.mojarad@iau.ac.ir^{۱،۲}گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

چکیده

این مقاله به بررسی یک روش انتخاب سرخوشه با انرژی کارآمد با استفاده از نسخه‌ای بهبود یافته از الگوریتم RDA می‌پردازد. این الگوریتم پارامترهایی نظیر فاصله سینک، انرژی باقیمانده، و میانگین فاصله درون خوشه‌ای را در نظر می‌گیرد و ویژگی‌های چند جهشی را برای بهبود طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه می‌دهد. طراحی تابع تناسب بر پایه انرژی باقیمانده گره‌ها و فاصله اقلیدسی آن‌ها تا ایستگاه پایه است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد برتر این روش در مقایسه با سایر الگوریتم‌هاست. در مرحله ابتدایی (۰ تا ۵۰۰ دور)، هیچ‌گونه گره مرده‌ای وجود ندارد که نشان‌دهنده مصرف بهینه انرژی است. در مرحله میانی (۵۰۰ تا ۷۰۰ دور)، اگرچه تعداد گره‌ها کاهش می‌یابد، اما این کاهش نسبت به الگوریتم‌های دیگر کندتر است. در مرحله نهایی (بعد از ۷۰۰ دور)، تعداد گره‌های زنده بیشتر از سایر روش‌ها باقی می‌ماند، که حاکی از توانایی این الگوریتم در حفظ طول عمر شبکه است. در نهایت، این روش بهبود تقریباً ۲۰ درصدی در طول عمر شبکه و ۳۸۱،۴۴ درصد بهبود کلی را نسبت به الگوریتم‌های موجود نشان می‌دهد، که موید کارآمدی و اثرگذاری آن در مدیریت انرژی و افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است.

واژه‌های کلیدی: انتخاب سرخوشه، انرژی کارآمد، الگوریتم RDA، طول عمر شبکه، مدیریت انرژی.

مقدمه

امروزه هوش مصنوعی (AI) با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی، نقش مهمی در بهبود عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) ایفا می‌کند، به‌ویژه در انتخاب بهینه سرخوشه (CH) برای کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه [۱]؛ ترکیب AI با اینترنت اشیا (IoT) نیز موجب تحلیل هوشمند داده‌ها، تصمیم‌گیری خودکار و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌شود، به‌گونه‌ای که AI به‌عنوان مغز سیستم‌های IoT عمل کرده و به افزایش بهره‌وری سیستم‌ها منجر می‌گردد [۲]. با رشد سریع اینترنت صنعتی اشیا (IIoT)، نیاز به راهکارهایی جهت کاهش مصرف انرژی و بهبود زمان پاسخ در سیستم‌های مبتنی بر رایانش ابری احساس می‌شود [۳] [۴]. خوشه‌بندی، به‌عنوان یکی از تکنیک‌های مهم در WSN، با کاهش ارتباطات غیرضروری و گروه‌بندی هوشمند گره‌ها، بهره‌وری انرژی را بهبود می‌بخشد [۵] و الگوریتم‌های فراابتکاری مانند Red Deer Algorithm (RDA) به‌عنوان ابزارهای قدرتمند در این زمینه، با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر انرژی باقی‌مانده، فاصله از ایستگاه پایه و چگالی گره‌ها، به انتخاب CHهای بهینه و توزیع مناسب بار شبکه کمک می‌کنند [۶] [۷] [۸] [۹] [۱۰] [۱۱]. استفاده از RDA منجر به افزایش قابل توجه پایداری، کاهش سربار ارتباطی و بهبود کیفیت خدمات (QoS) در WSNها، به‌ویژه در کاربردهای مقیاس‌پذیر و حساس به انرژی می‌شود.

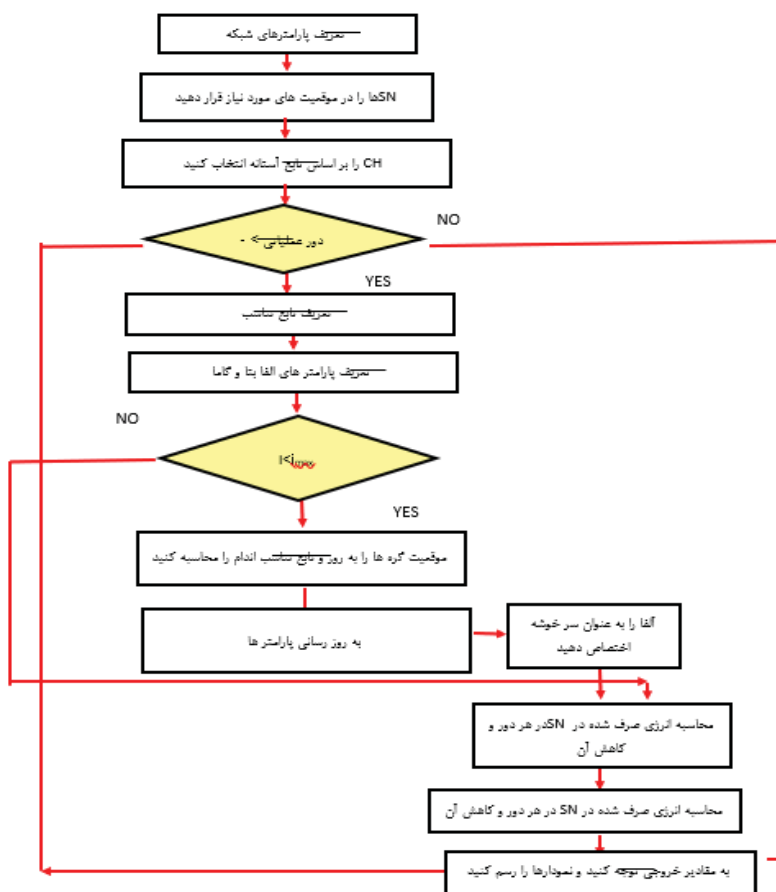


کارهای گذشته

مطالعات [۱۲] تا [۲۹] به بررسی جامع روش‌های نوین بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs) با تمرکز بر الگوریتم‌های متاهیوریستیک و هوش مصنوعی پرداخته‌اند. این تحقیقات از رویکردهای مختلفی همچون خوشه‌بندی هوشمند، انتخاب بهینه سرخوشه، مسیریابی انرژی کارآمد، برداشت انرژی محیطی، و الگوریتم‌های ترکیبی مانند M-PSO, Bald Eagle, K-LionER و Simulated Annealing برای افزایش طول عمر شبکه، کاهش مصرف انرژی، بهبود امنیت، و مدیریت منابع بهره‌برده‌اند. همچنین، برخی از مطالعات به کاربرد این الگوریتم‌ها در زمینه‌های پیشرفته‌تری نظیر شهرهای هوشمند و شبکه‌های ناهمگن اشاره کرده‌اند. هدف مشترک همه این مقالات، ارتقای عملکرد و پایداری WSNها از طریق بهینه‌سازی ساختار، زمان‌بندی، و انتقال داده‌ها در شرایط مختلف محیطی و کاربردی بوده است.

روش پیشنهادی

مفروضات کلیدی شامل استقرار تصادفی گره‌های حسگر، ایستگاه پایه واقع در مرکز با ارتباطات چند هاپ، تقسیم گره‌ها به گروه‌های مساوی، تحرک محدود گره، منبع تغذیه بدون وقفه برای ایستگاه پایه و گره‌های درگیر در ارتباط چند مسیره، و پایه است. ایستگاهی که الگوریتم انتخاب سرخوشه را اجرا می‌کند و داده‌های جمع‌آوری شده از همه سرخوشه‌ها را جمع‌آوری می‌کند.



شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی



```
% Initialization
function WSN_RDA(num_nodes, max_iter)
% Parameters
population_size = 20; % Number of red deer
max_energy = 100; % Initial energy of each node
threshold_energy = 10; % Threshold energy for CH selection
nodes = InitializeNodes(num_nodes, max_energy); % Initialize sensor nodes
best_CH = []; % Store the best Cluster Head
best_fitness = 0; % Best fitness value
% Main loop for RDA
for iter = 1:max_iter
    fitness = zeros(population_size, 1); % Fitness array for each deer
    % Evaluate fitness of each red deer
    for i = 1:population_size
        fitness(i) = EvaluateFitness(nodes, threshold_energy); % Define fitness evaluation
    end
    % Update best CH based on fitness
    [current_best_fitness, best_index] = max(fitness);
    if current_best_fitness > best_fitness
        best_fitness = current_best_fitness;
        best_CH = nodes(best_index); % Update best CH
    end
    % Update positions of red deer based on RDA
    for i = 1:population_size
        nodes(i) = UpdatePosition(nodes(i), best_CH, fitness(i)); % Update positions
    end
end
% Final CH selection
```

شکل ۲. شبه کد متلب روش پیشنهادی

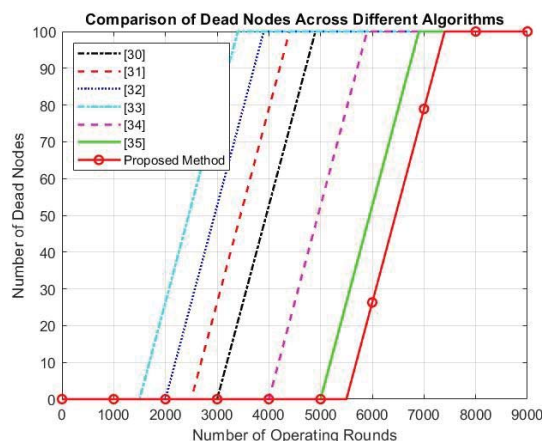
در این مقاله فرآیند بهبود انتخاب سرخوشه (CH) در شبکه‌های حسگر بی سیم (WSNs) با استفاده از الگوریتم قرمز [RDA] شرح داده شده است که شامل مراحل مختلفی است: ابتدا با مرحله آغاز [Initialization]، پارامترهایی مانند تعداد گره‌ها، اندازه جمعیت، و انرژی اولیه گره‌ها تعیین می‌شود. سپس در مرحله ارزیابی تناسب [Fitness Evaluation]، گره‌ها بر اساس انرژی و فاصله‌شان از ایستگاه پایه سنجیده می‌شوند. در ادامه، بهترین سرخوشه با توجه به نتایج ارزیابی در مرحله به‌روزرسانی بهترین [Updating Best CH] انتخاب می‌شود. در مرحله به‌روزرسانی موقعیت [Position Update]، گوزن‌های قرمز به سمت بهترین CH حرکت کرده و موقعیت آن‌ها بر اساس تابع تناسب به‌روزرسانی می‌شود. محاسبه فاصله [Distance Calculation] و مصرف انرژی [Energy Consumption Calculation] نیز بر اساس موقعیت گره‌ها و مدل مصرف ساده انجام می‌گیرد. سپس در مرحله محدودیت‌های موقعیت [Position Boundaries]، موقعیت‌های جدید در محدوده تعیین شده نگه داشته می‌شوند. در نهایت، با مرحله نمایش نتایج [Display Results]، بهترین CH به همراه موقعیت و انرژی باقی‌مانده‌اش ارائه می‌شود. این چارچوب بهینه‌سازی انتخاب سرخوشه را با در نظر گرفتن انرژی و فاصله ممکن ساخته و موجب افزایش طول عمر شبکه می‌شود.

نتایج روش پیشنهادی

عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های دیگر، مانند [SSMOECHS] [۳۰]، [FGWSTERP] [۳۱]، [LEACH-PRO] [۳۲]، [HMGWO] [۳۳]، و FIGWO [۳۴] و [۳۵] مقایسه شده است. این مقایسه در یک شبکه ۱۰۰ متر مربعی با ۱۰۰ گره حسگر انجام شده و معیارهایی نظیر مصرف انرژی متوسط، تعداد گره‌های مرده (برای سنجش پایداری شبکه)، و میانگین توان عملیاتی (تعداد بسته‌های تحویل داده شده به ایستگاه پایه) مورد بررسی

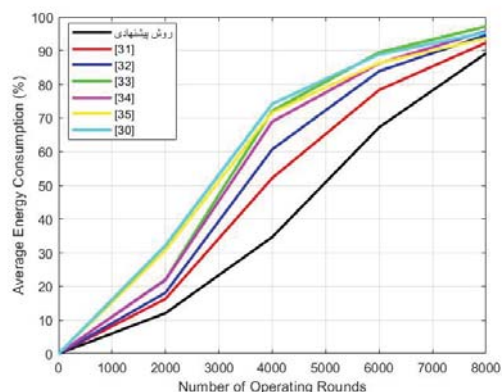


قرار گرفته‌اند. در این سیستم، گره‌های حسگر داده‌های خود را به سرخوشه‌ها ارسال می‌کنند و سرخوشه‌ها نیز داده‌های جمع‌آوری‌شده را از طریق گره‌های میانی ثابت به ایستگاه پایه می‌فرستند. طول عمر شبکه به دو دوره پایدار (از شروع تا مرگ اولین گره - FND) و ناپایدار (از FND تا مرگ آخرین گره - LND) تقسیم می‌شود که در این سناریو به ترتیب در دوره‌های ۵۹۴۰، ۶۶۰۴ و ۷۹۰۸ رخ داده‌اند. بهبود طول عمر الگوریتم پیشنهادی ناشی از حذف انتخاب تصادفی سرخوشه‌ها (CH) و بهره‌گیری از انتخاب مبتنی بر مقدار تناسب بهینه است، که توسط ایستگاه پایه انجام می‌شود و اطلاعات آن از طریق گره‌های چندپایه با موقعیت ثابت و منبع تغذیه مداوم به سایر گره‌ها ارسال می‌شود. این روش باعث کاهش احتمال انتخاب گره‌های کم‌انرژی به عنوان CH شده و از مرگ زودهنگام آن‌ها جلوگیری می‌کند، که در نهایت موجب افزایش طول عمر شبکه می‌گردد.



شکل ۳. طول عمر شبکه در دوره‌های پایدار و ناپایدار.

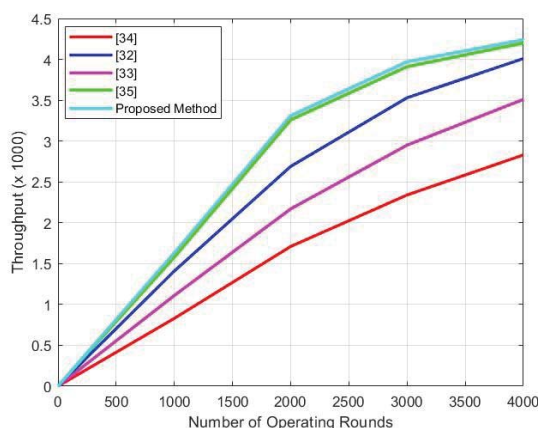
در شکل ۳ روش پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری دارد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در مرحله ابتدایی (۰ تا ۵۰۰۰ دور)، مشابه با [۳۵]، هیچ‌گونه گره مرده‌ای وجود ندارد که نشان‌دهنده مصرف بهینه انرژی است. در مرحله میانی (۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ دور)، روش پیشنهادی تعداد کمتری از گره‌ها را از دست می‌دهد و سرعت افزایش تعداد گره‌های مرده نسبت به [۳۵] کندتر است، که نشان‌دهنده مدیریت بهینه‌تر انرژی در این بازه است. در مرحله نهایی (بیش از ۷۰۰۰ دور)، این روش گره‌های زنده بیشتری نسبت به [۳۵] و سایر الگوریتم‌ها حفظ کرده و قادر است شبکه را فعال‌تر و برای مدت طولانی‌تری نگه دارد. به‌طور کلی، روش پیشنهادی موفق شده است تعداد گره‌های مرده را به طور قابل توجهی کاهش دهد و طول عمر شبکه را افزایش دهد. در مقایسه با [۳۵]، این روش ۲۰ درصد بهبود در طول عمر شبکه (زمان فعال بودن بدون گره مرده) ارائه می‌دهد، که این امر نشان‌دهنده بهره‌وری بیشتر در مصرف انرژی و طول عمر بیشتر شبکه است. همچنین، پروتکل پیشنهادی از قابلیت‌های بهینه‌سازی جهانی برتری برخوردار است که منجر به مصرف متعادل انرژی در میان گره‌ها و کاهش مصرف انرژی در گره‌های دور از ایستگاه پایه می‌شود.





شکل ۴. میانگین مصرف انرژی الگوریتم روش پیشنهادی در مقایسه با سایر پروتکل ها.

در شکل ۴، میزان مصرف انرژی میانگین (%) در برابر تعداد دورهای عملیاتی برای روش پیشنهادی و سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. به‌ویژه، در تمامی نقاط داده، روش پیشنهادی مقدار کمتری از انرژی را مصرف می‌کند. به عنوان مثال، در ۴۰۰۰ دور عملیاتی، روش پیشنهادی با مصرف ۷۴,۲۱٪ انرژی نسبت به روش‌های دیگر دارد. همچنین، این روش در ۸۰۰۰ دور عملیاتی نیز مصرف انرژی پایین‌تری (۹۵,۴۳٪) در مقایسه با سایر روش‌ها.



شکل ۵. میانگین توان مقایسه پروتکل روش پیشنهادی با سایر پروتکل ها.

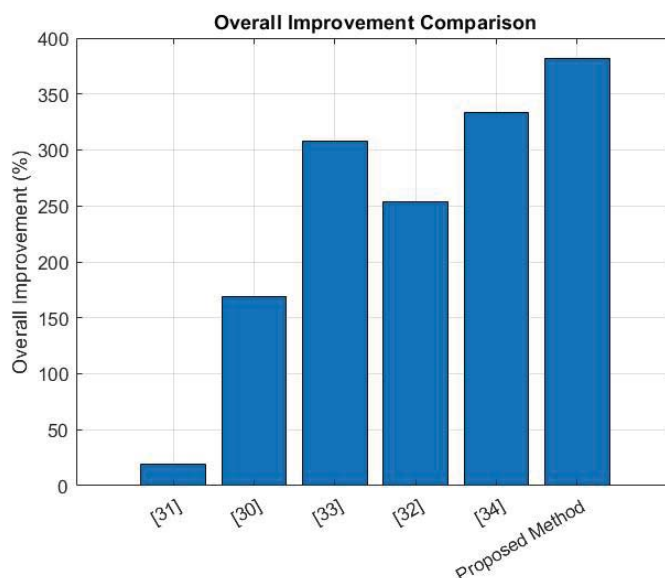
در شکل ۵ با توجه به تجزیه و تحلیل پیشرفت‌ها در مقایسه با روش اصلی [۳۵]، در دورهای مختلف عملیاتی بهبودهایی مشاهده می‌شود. در ۱۰۰۰ دور عملیاتی، روش پیشنهادی با ۳,۱۶٪ بهبود (۱,۶۳ در مقایسه با ۱,۵۸) عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور، بهبودها به ترتیب ۱,۵۳٪ (۳,۳۱ در مقابل ۳,۲۶) و ۱,۵۳٪ (۳,۹۷ در مقابل ۳,۹۱) هستند. در ۴۰۰۰ دور عملیاتی، این بهبود به ۰,۹۵٪ کاهش می‌یابد (۴,۲۴ در مقابل ۴,۲۰). اگرچه پیشرفت‌ها در مقایسه با روش [۳۵] نسبتاً کوچک هستند، اما نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند عملکرد خروجی بهتری را در طیف وسیعی از دورهای عملیاتی ارائه دهد، که به بهینه‌سازی تدریجی در طول زمان اشاره دارد.

جدول ۱. مقایسه پایداری شبکه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر

روش	FND	FND (%بهبود)	HND	HND (%بهبود)	LND	LND (%بهبود)	بهبود کلی بر حسب درصد
[31]	5500	8	5807	13.72	5841	35.38	۱۹,۰۳٪
[30]	2190	171.23	2600	154	2798	182.63	۱۶۹,۲۹٪
[33]	1450	309.65	1675	294.27	1884	319.75	۳۰۷,۸۹٪
[32]	1159	412.5	1720	283.95	4800	64.75	۲۵۳,۷۳٪
[35]	5940	—	6604	—	7908	—	
[34]	1248	375.96	1612	309.68	1906	314.9	۳۳۳,۵۱٪
روش پیشنهادی	۶۱۲۰	۴۱۳,۵	۶۷۹۲	۳۱۲,۳۱	۸۱۰۰	۴۱۸,۵	۳۸۱,۴۴٪



روش پیشنهادی با ۳۸۱,۴۴٪ بالاترین درصد بهبود کلی را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. در حالی که روش‌های دیگر مانند [۳۱]، [۳۰]، [۳۳]، و [۳۴] به ترتیب بهبودهایی به میزان ۱۹,۰۳٪، ۱۶۹,۲۹٪، ۳۰۷,۸۹٪ و ۳۳۳,۵۱٪ داشته‌اند، روش [۳۵] هیچ درصد بهبودی ارائه نداده است. این نشان‌دهنده عملکرد برتر روش پیشنهادی در بهبود طول عمر شبکه و کاهش تعداد گره‌های مرده است، به ویژه در مقایسه با سایر الگوریتم‌های موجود.



شکل ۶. مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر

با توجه به نمودار شکل ۶ روش پیشنهادی بالاترین بهبود کلی را با ۳۸۱,۴۴ درصد نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که به طور قابل توجهی بهتر از سایر روش‌ها عمل می‌کند، و نشان می‌دهد که بهبودهای انجام شده در این رویکرد بسیار مؤثر بوده است.

نتیجه‌گیری

این پایان‌نامه یک انتخاب سرخوشه با انرژی کارآمد را با استفاده از یک نسخه بهبود یافته از الگوریتم RDA پیشنهاد می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف انرژی را با در نظر گرفتن فاصله سینک، انرژی باقیمانده، عامل متعادل‌کننده و میانگین فاصله درون خوشه‌ای به عنوان پارامترها انجام می‌دهد. این پروتکل با ویژگی‌های چند جهشی و طراحی تابع تناسب بر اساس انرژی باقیمانده گره‌ها و فاصله اقلیدسی آنها تا ایستگاه پایه، مصرف متعادل انرژی را در هر دور پشتیبانی کرده و از مرگ زودرس گره‌ها جلوگیری می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم [۳۵] عملکرد بهتری دارد و در طول مراحل مختلف عملیاتی از جمله مرحله ابتدایی (۰ تا ۵۰۰۰ دور)، میانه (۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ دور) و نهایی (پس از ۷۰۰۰ دور)، تعداد گره‌های مرده را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و شبکه را برای مدت طولانی‌تری فعال نگه می‌دارد. بهبودهای نسبتاً اندک در طی زمان‌های عملیاتی مختلف (۴,۶۲٪ در ۲۰۰۰ دور، ۳,۴۲٪ در ۴۰۰۰ دور، ۲,۹۵٪ در ۶۰۰۰ دور، ۱,۸۲٪ در ۸۰۰۰ دور) نشان‌دهنده بهبود عملکرد مصرف انرژی در مقایسه با روش [۳۵] است. در نهایت، روش پیشنهادی با ۳۸۱,۴۴٪ بالاترین بهبود کلی را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت بهبودهای انجام شده در این رویکرد است.



مراجع

- [۱] Sadeghi Ghahroudi, M., Shahrabi, A., Ghoreyshi, S. M., & Alfouzan, F. A. (۲۰۲۳). Distributed node deployment algorithms in mobile wireless sensor networks: survey and challenges. *ACM Transactions on Sensor Networks*, ۱۹(۴), ۲۶-۱
- [2] Hossain, M., Kayas, G., Hasan, R., Skjellum, A., Noor, S., & Islam, S. R. (2024). A Holistic Analysis of Internet of Things (IoT) Security: Principles, Practices, and New Perspectives. *Future Internet*, 16(2), 40.
- [3] Bali, M. S., Gupta, K., Gupta, D., Srivastava, G., Juneja, S., & Nauman, A. (2023). An effective technique to schedule priority aware tasks to offload data on edge and cloud servers. *Measurement: Sensors*, 26, 100670.
- [4] Cong, P., Zhou, J., Wang, J., Wu, Z., & Hu, S. (2023). Learning-based cloud server configuration for energy minimization under reliability constraint. *IEEE Transactions on Reliability*, 73(1), 203-215.
- [5] Oyewole, G. J., & Thopil, G. A. (2023). Data clustering: application and trends. *Artificial Intelligence Review*, 56(7), 6439-6475.
- [6] Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Maghrabie, H. M., & Baroutaji, A. (2023). Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems. *Sustainability*, 15(12), 9434.
- [7] Al-Baz, A.; El-Sayed, A. A new Algorithm for Cluster Head Selection in LEACH protocol for Wireless Sensor Networks. *Int. J. Commun. Syst.* 2018, 31, e3407. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [8] Pour, S.E.; Javidan, R. A new energy aware cluster head selection for LEACH in wireless sensor networks. *IET Wirel. Sens. Syst.* 2021, 11, 45–53. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [9] Ghosal, A.; Halder, S.; Das, S.K. Distributed on-demand clustering algorithm for lifetime optimization in wireless sensor networks. *J. Parallel Distrib. Comput.* 2020, 141, 129–142. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [10] Arghavani, M.; Esmaeili, M.; Maryam, E.; Mohseni, F.; Arghavani, A. Optimal energy aware clustering in circular wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2017, 65, 91–98. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [11] Zhongdong, H.; Hualin, W.; Zhendong, W. Energy balanced adaptive clustering routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *Int. J. Wirel. Mob. Comput.* 2019, 16, 264–271.
- [12] Priyadarshi, R. (2024). Energy-efficient routing in wireless sensor networks: a meta-heuristic and artificial intelligence-based approach: a comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(4), 2109-2137.
- [13] Sahoo, B. M., & Sabyasachi, A. S. (2024). A Metaheuristic Algorithm Based Clustering Protocol for Energy Harvesting in IoT-Enabled WSN. *Wireless Personal Communications*, 1-26.
- [14] Rekha, & Garg, R. (2024). K-LionER: meta-heuristic approach for energy efficient cluster based routing for WSN-assisted IoT networks. *Cluster Computing*, 1-15.
- [15] Roberts, M. K., Thangavel, J., & Aldawsari, H. (2024). An improved dual-phased meta-heuristic optimization-based framework for energy efficient cluster-based routing in wireless sensor networks. *Alexandria Engineering Journal*, 101, 306-317.
- [16] Salim, A., Khedr, A. M., & Osamy, W. (2024). Enhancing IoT-enabled Sustainable Smart Cities with Secure and Energy-Aware Data Collection using Meta-heuristic Technique. *IEEE Sensors Journal*.
- [17] Gomaa, D., Abdel-Raouf, O., El-Hefnawy, N., & Kafafy, A. (2024). Meta-Heuristics optimization for mobile sink in WSNs based smart grid. *IJCI. International Journal of Computers and Information*, 11(2), 13-24.
- [18] Janakiraman, S. (2024). Energy efficient clustering protocol using hybrid bald eagle search optimization algorithm for improving network longevity in WSNs. *Multimedia Tools and Applications*, 1-23.
- [19] Prakash, V., Singh, D., Pandey, S., Singh, S., & Singh, P. K. (2024). Energy-Optimization Route and Cluster Head Selection Using M-PSO and GA in Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 1-26.
- [20] Kiran Kumar, G., K Prashanth, S., Padmalatha, E., Venkata Krishna Reddy, M., Rama Devi, N., Abualigah, L., ... & Kumar, M. (2024). An optimized meta-heuristic clustering-based routing scheme for secured wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, e5791.
- [21] Puranikmath, V., & Iyer, S. (2024). Performance Evaluation of Cluster Head Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 16(1), 6246-6253.
- [22] Manoharan, J. S. (2023). A Metaheuristic Approach Towards Enhancement of Network Lifetime in Wireless Sensor Networks. *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, 17(4), 1276-1295.
- [23] Gülbaş, G., & Çetin, G. (2023). Lifetime optimization of the leach protocol in wsns with simulated annealing algorithm. *Wireless Personal Communications*, 132(4), 2857-2883.
- [۲۴] Hameed, M. K., & Idrees, A. K. (۲۰۲۴). Energy-aware scheduling protocol-based hybrid metaheuristic technique to optimize the lifespan in WSNs. *The Journal of Supercomputing*, ۲۱-۱
- [25] Sharma, A., & Kansal, A. (2024). Enhanced CH selection and energy efficient routing algorithm for WSN. *Microsystem Technologies*, 1-13.
- [26] Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). Reviewing the role of artificial intelligence in energy efficiency optimization. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(4), 1243-1256.



- [27] Priyadarshi, R. (2024). Energy-efficient routing in wireless sensor networks: a meta-heuristic and artificial intelligence-based approach: a comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(4), 2109-2137.
- [28] Forghani, M., Soltanaghaei, M., & Boroujeni, F. Z. (2024). Dynamic optimization scheme for load balancing and energy efficiency in software-defined networks utilizing the krill herd meta-heuristic algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 114, 109057.
- [29] Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic. *Soft computing*, 24, 14637-14665.
- [30] Lee, J.-G.; Chim, S.; Park, H.-H. Energy-Efficient Cluster-Head Selection for Wireless Sensor Networks Using Sampling-Based Spider Monkey Optimization. *Sensors* 2019, 19, 5281. [Google Scholar] [CrossRef]
- [31] Mittal, N.; Singh, U.; Salgotra, R.; Sohi, B.S. An energy efficient stable clustering approach using fuzzy extended grey wolf optimization algorithm for WSNs. *Wirel. Netw.* 2019, 25, 5151–5172. [Google Scholar] [CrossRef]
- [32] Yousif, Z.; Hussain, I.; Djahel, S.; Hadjadj-Aoul, Y. A Novel Energy-Efficient Clustering Algorithm for More Sustainable Wireless Sensor Networks Enabled Smart Cities Applications. *J. Sens. Actuator Netw.* 2021, 10, 50. [Google Scholar] [CrossRef]
- [33] Zhao, X.; Ren, S.; Quan, H.; Gao, Q. Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks Based on a Modified Grey Wolf Optimizer. *Sensors* 2020, 20, 820. [Google Scholar] [CrossRef]
- [34] Zhao, X.; Zhu, H.; Aleksic, S.; Gao, Q. Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Improved Grey Wolf Optimizer. *KSII Trans. Internet Inf. Syst.* 2018, 12, 2644–2657.
- [35] Rami Reddy, M., Ravi Chandra, M. L., Venkatramana, P., & Dilli, R. (2023). Energy-efficient cluster head selection in wireless sensor networks using an improved grey wolf optimization algorithm. *Computers*, 12(2), 35.