

A Reactive and Adaptive Protocol (EERP+) for Energy-Aware Clustering in Wireless Sensor Networks

Atefeh Karimi^{1*}, Mohammad mehdi Shirmohammadi²

¹ Department of Computer Engineering, Ha.C, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

atefeh.karimi@iau.ir

² Department of Computer Engineering, Ha.C, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

Mmshirmohammadi@iau.ac.ir

Abstract: With the rapid expansion of Wireless Sensor Networks (WSNs), optimizing energy consumption has become a critical challenge due to the limited power resources of sensor nodes. This paper presents EERP+ (Enhanced Energy-Efficient Reactive Protocol), a novel reactive and adaptive routing protocol designed to enhance network performance under energy constraints. EERP+ integrates adaptive clustering, energy-aware cluster head (CH) selection using a multi-criteria decision-making (MCDM) approach, sleep scheduling, and event-driven data transmission. Unlike traditional methods, EERP+ transmits data only when significant variations are detected in the sensed environment, thereby reducing communication overhead and conserving energy. Furthermore, the use of multiple base stations helps balance network traffic and prevent energy hotspots. Simulation results obtained in MATLAB show that EERP+ reduces total energy consumption by 19.65% and extends the stability period by 13.3% compared to existing protocols. These results demonstrate the protocol's potential to improve energy efficiency and communication reliability in real-world WSN deployments.

Keywords: Wireless Sensor Networks, reactive dispatch, adaptive clustering, energy saving, cluster head selection based on ranking

JCDSA, Vol. 3, No. 3, Autumn 2025 Received: 2025-05-31	Online ISSN: 2981-1295 Accepted: 2025-12-01	Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa Published: 2025-12-21
--	---	---

CITATION

Karimi, A., Shirmohammadi, M., " A Reactive and Adaptive Protocol (EERP+) for Energy-Aware Clustering in Wireless Sensor Networks", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 3, pp. 41-49, 2025.
 DOI: 10.82526/jcdsa.2026.1208300

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Wireless Sensor Networks (WSNs) are a fundamental technology for enabling intelligent and distributed sensing systems. Consisting of numerous low-power sensor nodes, WSNs are widely deployed in large or inaccessible areas to monitor environmental conditions and transmit collected data to one or more base stations. Their flexibility, scalability, and low deployment cost have enabled applications in environmental monitoring, precision agriculture, healthcare, industrial automation, and military surveillance. Despite these advantages, WSNs face critical challenges related to energy consumption. Sensor nodes are typically battery-powered and deployed in remote or hazardous environments, making battery replacement impractical. Consequently, improving energy efficiency remains a primary concern in the design of WSN communication protocols. Clustering-based routing protocols address this issue by organizing nodes into clusters and assigning cluster heads (CHs) for data aggregation and forwarding, thereby reducing redundant transmissions and conserving energy. However, many existing clustering approaches suffer from limitations such as static or random CH selection, poor adaptability to dynamic network conditions, reliance on a single base station, and periodic data transmissions that lead to unnecessary energy usage.

To overcome these limitations, this paper proposes EERP+ (Enhanced Energy-Efficient Reactive Protocol), a reactive and adaptive routing protocol aimed at improving energy efficiency, network lifetime, and data transmission stability. EERP+ employs an energy-aware CH selection mechanism based on a multi-criteria decision-making (MCDM) strategy, along with event-driven data transmission, sleep scheduling, and support for multiple base stations. By minimizing unnecessary communication and balancing energy consumption across the network, EERP+ provides a scalable and efficient solution for real-world WSN deployments.

2- Methodology

The EERP+ protocol is designed as a reactive and adaptive multi-phase routing strategy to enhance energy efficiency and network stability in Wireless Sensor Networks (WSNs). Initially, sensor nodes are randomly deployed and organized into clusters based on three factors: residual energy, distance to the nearest base station, and local node density. A multi-criteria decision-making (MCDM) function evaluates these factors to ensure balanced and energy-aware clustering. Cluster heads (CHs) are selected from nodes with above-average residual energy using an energy ranking score that integrates energy level, connectivity, and proximity. Nodes with low energy levels are excluded from CH candidacy to prevent premature energy depletion. Data transmission is event-driven; nodes transmit data only when the change in sensed values exceeds a predefined threshold (δ), which significantly

reduces redundant communication. Inactive nodes enter sleep mode to conserve energy. EERP+ also supports multiple base stations, allowing each node or CH to communicate with its nearest base station. This strategy reduces transmission distance and balances network load. Collectively, these features enable scalable and energy-efficient routing suitable for real-world WSN deployments.

3- Results and discussion

Extensive simulations were conducted in MATLAB and compared against two baseline protocols: REEC and E-REEC. Key performance metrics included total energy consumption, stability period (time until the first node dies), number of active nodes over time, average throughput, and the percentage of overloaded cluster heads. Simulation results demonstrate that EERP+ significantly outperforms the benchmark protocols. Specifically, EERP+ reduced total energy consumption by 19.65% and extended the stability period by 13.3% compared to E-REEC. These improvements are primarily attributed to the event-driven data transmission mechanism and the sleep scheduling strategy, which minimize redundant communication and idle energy loss. EERP+ also maintained a higher number of active nodes throughout the simulation rounds. At round 3000, all REEC nodes had failed, E-REEC retained only 40 active nodes, whereas EERP+ achieved 100% node survival. Additionally, throughput analysis showed that EERP+ achieved the highest number of successfully delivered packets per joule, confirming its superior energy efficiency. The inclusion of multiple base stations contributed to balanced energy distribution and reduced traffic congestion. Furthermore, EERP+ maintained the lowest percentage of overloaded cluster heads, enhancing overall network stability. These results confirm the effectiveness of EERP+ in improving energy efficiency and extending network lifetime in WSNs. Nevertheless, future studies may include real hardware implementations or statistical significance testing to further validate these findings.

4- Conclusion

This paper proposed EERP+, a reactive and adaptive clustering protocol for Wireless Sensor Networks that incorporates energy-aware cluster head selection, event-driven data transmission, sleep scheduling, and multi-sink support. Simulation results demonstrated a 19.65% reduction in energy consumption and a 13.3% improvement in network stability compared to REEC and E-REEC. These findings confirm the effectiveness of EERP+ in balancing energy usage and extending network lifetime. The proposed protocol is well suited for real-world, energy-constrained WSN applications. Future work will focus on extending EERP+ to heterogeneous and mobile network scenarios and implementing it on embedded platforms for practical evaluation.





پروتکل واکنشی و تطبیقی EERP+ برای خوشه بندی انرژی محور

در شبکه های حسگر بی سیم

عاطفه کریمی^{۱*}، محمدمهدی شیرمحمدی^۲

۱- گروه کامپیوتر، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران atefeh.karimi@iau.ir

۲- گروه کامپیوتر، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران Mmshirmohammadi@iau.ac.ir

چکیده: رشد روزافزون کاربرد شبکه های حسگر بی سیم، مدیریت بهینه انرژی در این شبکه ها به یکی از مهم ترین چالش ها تبدیل شده است. در این مقاله، پروتکل جدیدی با نام EERP+ پیشنهاد شده که با رویکردی واکنشی و تطبیقی طراحی شده است تا علاوه بر کاهش مصرف انرژی، طول عمر و پایداری شبکه را نیز افزایش دهد. ایده اصلی این پروتکل بر پایه خوشه بندی هوشمند گره ها، انتخاب سرخوشه با در نظر گرفتن معیارهایی مانند انرژی باقی مانده، تراکم همسایگی و فاصله تا ایستگاه پایه، و همچنین ارسال واکنشی داده ها بنا شده است. ارسال اطلاعات تنها زمانی انجام می شود که تغییر معناداری در داده های حسگر رخ دهد؛ این کار باعث کاهش چشمگیر در انتقال های غیر ضروری و مصرف انرژی می شود. همچنین با استفاده از چند ایستگاه پایه، ترافیک شبکه متوازن تر شده و از بار بیش از حد در نواحی مرکزی جلوگیری می شود. نتایج شبیه سازی ها در محیط MATLAB نشان می دهد که EERP+ توانسته مصرف انرژی را تا ۱۹.۶۵ درصد کاهش دهد و زمان مرگ اولین گره را به طور میانگین ۱۳.۳ درصد افزایش دهد. این یافته ها بیانگر عملکرد مؤثر پروتکل در بهبود بهره وری و پایداری شبکه های حسگر بی سیم هستند.

واژه های کلیدی: شبکه حسگر بی سیم، ارسال واکنشی داده، خوشه بندی تطبیقی، صرفه جویی انرژی، انتخاب سرخوشه مبتنی بر رتبه بندی

DOI: 10.82526/jcdsa.2026.1208300

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

۱- مقدمه

انرژی و توزیع یکنواخت مصرف کمک می کند [۶،۷]. با این حال، بسیاری از روش های کلاسیک نظیر LEACH، HEED و DEEC به رغم اثربخشی اولیه، با محدودیت هایی مانند انتخاب غیر تطبیقی سرخوشه، بی توجهی به انرژی باقی مانده، اتکای کامل به یک ایستگاه پایه و انتقال پیوسته داده ها مواجه اند [۸، ۱۰]. این محدودیت ها در عمل منجر به افزایش سربار ارتباطی، ازدحام شبکه و کاهش پایداری عملیاتی گره ها می شود. در نتیجه، نیاز به رویکردی جامع که بتواند هم زمان مسئله انتخاب سرخوشه، ارسال داده و توزیع ترافیک را با در نظر گرفتن وضعیت انرژی و شرایط محیطی بهینه سازی کند، همچنان یک چالش باز و انگیزه اصلی این پژوهش است. برای پاسخ به این نیاز، در این مقاله پروتکل EERP+ معرفی می شود که با ترکیب سازوکارهای رتبه بندی چندمعیاره بر پایه انرژی، ارسال واکنشی^۳ تطبیقی، بهره گیری از چند ایستگاه پایه و زمان بندی خواب تلاش می کند مصرف انرژی را کنترل کرده و طول عمر شبکه را افزایش دهد. در فرآیند انتخاب سرخوشه، تنها گره هایی واجد شرایط هستند که انرژی باقی مانده آن ها بالاتر از میانگین بوده و در چرخه های پیشین عملکرد موفقی داشته اند؛ این سازوکار از انتخاب مکرر گره های ضعیف جلوگیری کرده و موجب توزیع متعادل بار انرژی می شود. از سوی

شبکه های حسگر بی سیم^۱ به عنوان یکی از زیربنای کلیدی سیستم های هوشمند و پراکنده، نقش مهمی در تحقق اینترنت اشیا، پایش محیطی، نظارت ایمنی، حمل و نقل هوشمند و سامانه های دفاعی ایفا می کنند [۱، ۲]. این شبکه ها از مجموعه ای از گره های کوچک با توان پردازشی و ارتباطی محدود تشکیل شده اند که معمولاً با باتری تغذیه می شوند و در بسیاری از کاربردهای عملی، امکان شارژ یا تعویض باتری آن ها وجود ندارد [۳، ۴]. از این رو، مصرف بهینه انرژی و افزایش طول عمر عملیاتی شبکه همواره یکی از مؤلفه های بنیادین در طراحی پروتکل های ارتباطی این حوزه بوده است. دستیابی به این هدف مستلزم رویکردهایی است که بتوانند ضمن حفظ پوشش و قابلیت اطمینان شبکه، از ارسال های غیر ضروری جلوگیری کرده و بار انرژی را میان گره ها به صورت متوازن توزیع کنند. یکی از راهکارهای مطرح برای کاهش مصرف انرژی، خوشه بندی^۲ است؛ در این روش، گره ها به خوشه هایی تقسیم شده و گره منتخب سرخوشه وظیفه تجمیع، پردازش اولیه و ارسال داده های خوشه به ایستگاه پایه را بر عهده دارد [۵]. چرخش دوره ای نقش سرخوشه میان گره ها نیز به کاهش بار

³ reactive dispatch

¹ Wireless Sensor Networks

² clustering



دیگر، ارسال واکنشی تطبیقی تنها در صورت بروز تغییر معنی‌دار در مقادیر حسگر انجام می‌شود؛ بدین ترتیب از انتقال‌های غیرضروری کاسته شده و مصرف انرژی و تأخیر انتهلبه‌انتهای کاهش می‌یابد. همچنین استفاده هدفمند از چند ایستگاه پایه، توزیع ترافیک و سربار ارتباطی را بهبود می‌بخشد و مدل‌های انتقال تطبیقی متناسب با فاصله، پایداری و راندمان ارتباطی را افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB نشان می‌دهد که EERP+ با کاهش حدود ۱۹.۶۵٪ در مصرف کل انرژی و افزایش حدود ۱۳.۳٪ در زمان مرگ اولین گره، نسبت به پروتکل‌های مرجع عملکرد انرژی‌کارا و پایدارتری ارائه می‌دهد. این نتایج مؤید آن است که EERP+ می‌تواند به‌عنوان رویکردی مقیاس‌پذیر، تطبیق‌پذیر و کارآمد برای نسل جدید شبکه‌های حسگر بی‌سیم در محیط‌های واقعی مورد استفاده قرار گیرد. ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، کارهای مرتبط بررسی می‌شوند. بخش سوم مدل شبکه و رویکرد پیشنهادی را تشریح می‌کند. در بخش چهارم، فلوچارت و شبه‌کد پروتکل ارائه می‌گردد. بخش پنجم شامل نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد است و در نهایت، بخش ششم جمع‌بندی ارائه می‌شود.

۲- کارهای مرتبط

در دهه اخیر، شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌عنوان زیرساختی کلیدی در کاربردهایی همچون پایش محیطی، صنایع هوشمند، مراقبت سلامت و اینترنت اشیا مطرح شده‌اند. باتوجه به محدودیت شدید انرژی در این شبکه‌ها، طراحی پروتکل‌های انرژی کارآمد جهت افزایش طول عمر عملیاتی، به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهشی تبدیل شده است. Xiuwen Fu و همکاران [۱] با تمرکز بر مسئله پایداری، نشان دادند که بازتخصیص بار در پیوندها و گره‌ها می‌تواند از بروز خرابی‌های پی‌درپی در شبکه جلوگیری کند. اگرچه این پژوهش چارچوب مشخصی برای خوشه‌بندی ارائه نکرد، اما اهمیت توزیع بار و جلوگیری از ازدحام ترافیکی را پررنگ ساخت. در ادامه، در سال ۲۰۲۲، Singh و همکاران [۲] الگوریتمی مبتنی بر نگاشت آشوبی در ساختار Mole-Rat طراحی کردند که با هدف توزیع متعادل سرخوشه‌ها در شبکه‌های شهری توسعه یافته بود. این روش توانست توازن مصرف انرژی را بهبود بخشد، اما فاقد ارسال واکنشی و انتخاب تطبیقی سرخوشه‌ها در زمان اجرا بود. از سوی دیگر، Younis و همکاران [۳] یک رویکرد خوشه‌بندی ترکیبی برای WSN‌های ناهمگن معرفی کردند که ضمن توجه به سطح انرژی گره‌ها، ساختار توپولوژیکی شبکه را نیز لحاظ می‌کرد. این روش توانست مصرف انرژی را به شکل چشمگیری کاهش دهد، ولی به ارسال داده‌های دوره‌ای محدود بود و از معماری‌های چند ایستگاه پایه پشتیبانی نمی‌کرد. همچنین، Ahmed و همکاران [۵] پروتکلی چندمرحله‌ای برای خوشه‌بندی انرژی‌آگاه ارائه دادند که انتقال داده‌ها را به‌صورت سلسله‌مراتبی مدیریت می‌کرد. این پروتکل با کاهش بار روی گره‌های دور از ایستگاه پایه، باعث افزایش طول عمر شبکه شد، اما در برابر تغییرات پویا و سریع محیطی عملکرد محدودی داشت.

در سال ۲۰۲۴، Zhou و همکاران [۴] الگوریتمی تطبیقی برای خوشه‌بندی در شبکه‌های بزرگ مقیاس ناهمگن طراحی کردند. آن‌ها با ترکیب معیارهایی مانند انرژی باقی‌مانده، چگالی ناحیه و فاصله تا سینک، ساختاری پویا برای خوشه‌ها ارائه کردند. با وجود کارایی بالای این الگوریتم، ارسال داده‌ها به‌صورت دوره‌ای انجام می‌شد و مکانیزمی برای مدیریت بار ترافیکی در سطح چندسینک ارائه نشد. در پژوهشی شبیه‌سازی محور، Wang و همکاران [۶] عملکرد استراتژی‌های مختلف انتخاب سرخوشه را با هم مقایسه کردند و دریافتند که ترکیب انرژی، فاصله و تعداد همسایه‌ها در تصمیم‌گیری، می‌تواند موجب افزایش پایداری شبکه شود. مطالعه آن‌ها همچنین ضعف الگوریتم‌های ایستا در برابر تغییرات محیطی را برجسته ساخت. سرانجام، Huang و همکاران [۱۰] با ارائه الگوریتم MSSO، بهینه‌سازی چندمرحله‌ای مسیرهای بین‌خوشه‌ای را پیشنهاد کردند. این روش توانست انتقال داده‌ها را در لایه بین‌خوشه‌ای بهبود دهد، اما توجهی به ساختار خوشه‌بندی داخلی و مدیریت خواب گره‌ها نداشت.

این مطالعات، گام‌های مؤثری در بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه برداشته‌اند، اما همچنان نبود طراحی یکپارچه برای انتخاب تطبیقی سرخوشه، ارسال واکنشی، زمان‌بندی خواب گره‌ها و استفاده از چند ایستگاه پایه، به‌عنوان خلأهای باقی‌مانده در این حوزه شناخته می‌شود. جدول (۱) به‌صورت خلاصه به مقایسه روش‌های حوزه پروتکل‌های مرتبط می‌پردازد. این مقایسه شامل توضیح مختصر روش‌ها، چالش‌های اصلی، مزایا و سال انتشار مقالات است. ارائه چنین جدولی امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف هر روش را فراهم کرده و به محققان کمک می‌کند تا با دیدی جامع‌تر، مسیر تحقیقاتی مناسبی برای توسعه راهکارهای نوآورانه و بهینه‌تر انتخاب کنند.

جدول (۱): بررسی مقایسه روش‌های مرتبط پیشین

عنوان مقاله	روش مقاله	مزایا	چالش‌ها	انتشار / مرجع
تحلیل ناپایداری شبکه و باز تخصیص بار	Fu et al	افزایش پایداری ساختاری	بدون الگوریتم خوشه‌بندی مشخص	2020 / [1]
الگوریتم آشوبی مبتنی بر Mole-Rat	Singh et al	بهبود توزیع سرخوشه، ساده‌سازی انتخاب	فاقد ارسال واکنشی و ساختار تطبیقی	2022 / [2]
خوشه‌بندی ترکیبی انرژی محور	Younis et al	کاهش مصرف انرژی، طراحی ترکیبی	ارسال دوره‌ای، بدون پشتیبانی چند سینک	2023 / [3]
پروتکل سلسله‌مراتبی چندمرحله‌ای	Ahmed et al	تعادل بار، کاهش بار ارتباطی	واکنش‌پذیری پایین به تغییرات سریع	2023 / [5]
خوشه‌بندی تطبیقی در مقیاس بزرگ	Zhou et al	پویایی خوشه‌ها، پایداری بالا	ارسال دوره‌ای، فاقد مدیریت چند سینک	2024 / [4]
تحلیل چندمعیاره انتخاب سرخوشه	Wang et al	انتخاب بهینه سرخوشه، کاهش مصرف انرژی	عدم بررسی فاز خواب یا ساختار کلی خوشه	2024 / [6]
الگوریتم بین خوشه‌ای MSSO	Huang et al	کاهش مصرف در انتقال، افزایش توان عملیاتی	تمرکز صرف بر مسیریابی بین خوشه‌ای	2024 / [10]



۳- مدل شبکه و رویکردهای پیشنهادی

۳-۱- مدل شبکه

شبکه حسگر مورد استفاده در این پژوهش، در قالب یک محیط دوبعدی به ابعاد 100×100 مترمربع مدل سازی شده است که در آن ۱۰۰ گره حسگر به طور یکنواخت و تصادفی پراکنده شده اند. هر گره توانایی دارد محیط اطراف خود را پایش کرده، اطلاعات محلی را پردازش نماید و داده ها را به ایستگاه های پایه ارسال کند. ارتباطات میان گره ها و ایستگاه ها به صورت بی سیم و متناسب با فاصله آن ها انجام می گیرد. برای بهینه سازی عملکرد ارتباطی، چند ایستگاه پایه در اطراف ناحیه عملیاتی و در موقعیت های از پیش تعیین شده مستقر شده اند، به طوری که هر گره داده های خود را به نزدیک ترین ایستگاه پایه منتقل می کند. این ساختار موجب کاهش انرژی مصرفی و ایجاد تعادل در ترافیک شبکه می شود. مدل ارتباطی بین گره ها و ایستگاه ها با توجه به فاصله و شرایط محیطی، بر پایه دو الگوی فضای آزاد و چندمسیره طراحی شده است. همچنین، گره هایی که در یک دوره مشخص وظیفه ای در خوشه بندی یا ارسال و دریافت داده ندارند، به حالت غیرفعال (خواب) می روند تا انرژی خود را حفظ کنند.

۳-۲- مدل مصرف انرژی

یکی از مؤلفه های مهم در طراحی پروتکل های ارتباطی برای شبکه های حسگر بی سیم، چگونگی مدل سازی مصرف انرژی در فرآیند ارسال و دریافت داده ها است. در این مطالعه، از مدلی ترکیبی بهره گرفته شده که شامل دو سناریوی رایج یعنی مدل فضای آزاد و مدل چندمسیره است [۱۳]. این مدل که در بسیاری از پژوهش های حوزه شبکه حسگر بی سیم نیز مورد استفاده قرار گرفته است، امکان شبیه سازی دقیق تری از رفتار مصرف انرژی در انتقال داده ها را فراهم می آورد. در قالب مدل (۱)، میزان انرژی مورد نیاز برای ارسال یک بسته داده به اندازه L بیت به گیرنده ای در فاصله d ، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{TX}(L, d) = E_{elec} \times L + \begin{cases} L \times \epsilon_{fs} \times d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ L \times \epsilon_{mp} \times d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

انرژی مصرفی برای دریافت بسته نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{RX}(L) = L \cdot E_{elec} \quad (2)$$

در (۱)، پارامتر L نمایانگر اندازه بسته داده بر حسب بیت است، در حالی که d فاصله میان گره فرستنده و گیرنده را نشان می دهد. انرژی مصرف شده توسط مدارهای الکترونیکی برای پردازش هر بیت با نماد E_{elec} نمایش داده می شود. همچنین، ضرایب ϵ_{fs} و ϵ_{mp} به ترتیب بیانگر نرخ اتلاف انرژی در مدل فضای آزاد و مدل چندمسیره هستند. برای تعیین اینکه کدام مدل (فضای آزاد یا چندمسیره) در انتقال داده استفاده شود، یک مقدار آستانه ای به نام d_0 تعریف می گردد. این مقدار به عنوان مرز تصمیم گیری دو مدل شناخته شده و به صورت (۳) محاسبه می شود:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3)$$

بر اساس این مدل، اگر فاصله بین گره فرستنده و گیرنده کمتر از d_0 باشد، از مدل فضای آزاد با رشد مربعی انرژی استفاده می شود. در غیر این صورت، برای فواصل طولانی تر، مدل چند پرش با رشد چهارمین توانی مصرف انرژی به کار گرفته می شود که باعث افزایش مصرف انرژی در ارسال های دوربرد می شود.

۳-۳- رویکرد پیشنهادی و معیارهای بهینه سازی

در این بخش، رویکرد پیشنهادی برای ارتقای بهره وری انرژی و افزایش دوام شبکه حسگر بی سیم تشریح می شود. راهکار ارائه شده مبتنی بر ترکیبی از سه راهبرد کلیدی است: خوشه بندی هوشمند بر اساس رتبه بندی انرژی گره ها، ارسال واکنشی داده ها، و استفاده هم زمان از چند ایستگاه پایه. هدف از این طراحی، نه تنها بهینه سازی مصرف انرژی، بلکه ارتقا سطح پایداری و اتکا پذیری ارتباطات در شبکه است. در فرآیند انتخاب سرخوشه ها، برخلاف روش های رایج که از انتخاب های تصادفی استفاده می کنند، ابتدا گره هایی که سطح انرژی باقی مانده آن ها بالاتر از میانگین انرژی کل شبکه است شناسایی می شوند. سپس، از میان این گره ها، آن هایی که دارای بالاترین امتیاز انرژی هستند به عنوان سرخوشه انتخاب می شوند. این امتیاز یا رتبه انرژی از طریق یک تابع ارزیابی چندمعیاره محاسبه می شود که عواملی نظیر انرژی باقی مانده، تراکم خوشه های اطراف، و فاصله هر گره تا نزدیک ترین ایستگاه پایه را در نظر می گیرد:

$$RE_i = \alpha \cdot \frac{E_i}{E_{avg}} + \beta \cdot \frac{1}{d_i} + \gamma \cdot \frac{N_{nei}}{N} \quad (4)$$

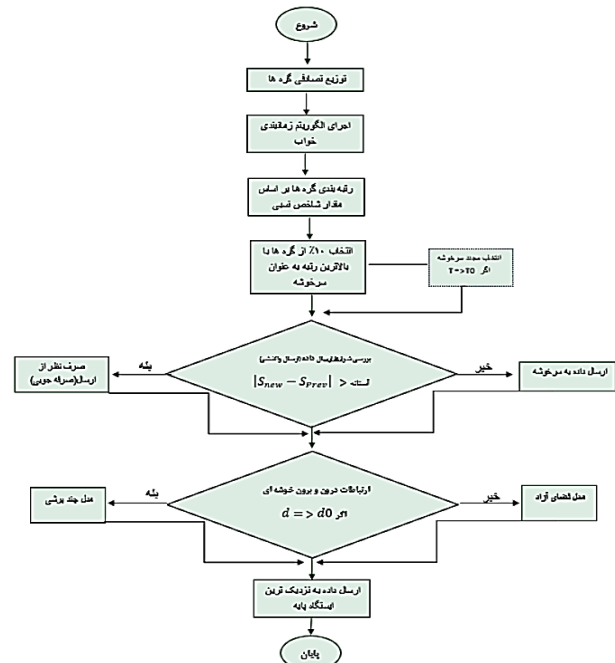
که در این رابطه، انرژی باقی مانده گره i (E_i)، میانگین انرژی کل گره ها (E_{avg})، فاصله گره تا نزدیک ترین ایستگاه پایه (d_i)، تعداد همسایه های گره (N_{nei})، تعداد کل گره ها (N)، ضرایب α, β, γ به ترتیب وزن دهی معیارهای انرژی باقی مانده، فاصله تا ایستگاه پایه و تراکم همسایگی را نشان می دهند. این ضرایب بر اساس تحلیل تجربی و ارزیابی چندین سناریوی شبیه سازی تعیین شده اند تا تعادلی میان مصرف انرژی و توزیع بار شبکه برقرار شود. به بیان دیگر، مقادیر انتخابی باهدف جلوگیری از انتخاب مکرر یک گره خاص به عنوان سرخوشه و نیز افزایش طول عمر کلی شبکه در نظر گرفته شده اند. لازم به ذکر است که بسیاری از پژوهش های مرجع در این حوزه نیز انتخاب ضرایب وزنی را به صورت تجربی و بر اساس نتایج شبیه سازی انجام داده اند. باین وجود، در بخش «کارهای آینده» پیشنهاد شده است که به کارگیری روش های علمی تر مانند AHP یا ENTROPY برای تعیین ضرایب به طور دقیق تر بررسی شود تا شفافیت و عینیت فرآیند تصمیم گیری چندمعیاره ارتقا یابد.

ارسال واکنشی یکی دیگر از ویژگی های کلیدی رویکرد پیشنهادی، پیاده سازی ارسال داده ها تنها در صورت رخداد تغییرات معنی دار در داده های حسگر است. در بسیاری از کاربردهای محیطی، تغییرات داده

سطح انرژی‌شان بالاتر از این میانگین باشد، به‌عنوان گزینه‌های اولیه برای سرخوشه شدن در نظر گرفته می‌شوند. این انتخاب اولیه کمک می‌کند تا تنها گره‌هایی وارد فرآیند انتخاب شوند که توانایی کافی برای مدیریت بار اضافی را داشته باشند. در گام بعد، برای هر یک از این گره‌های کاندید، یک امتیاز ترکیبی محاسبه می‌شود که بر اساس معیارهایی مانند انرژی باقی‌مانده، فاصله از ایستگاه پایه، تعداد دفعات انتخاب به‌عنوان سرخوشه در دوره‌های گذشته، و نسبت انرژی فعلی به آستانه مشخص شده تعیین می‌گردد. این امتیاز نقش تعیین‌کننده‌ای در رتبه‌بندی گره‌ها دارد. اگر امتیاز گره از یک حد مشخص بیشتر باشد، به‌عنوان سرخوشه نهایی انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، نقش یک گره معمولی را در خوشه بر عهده می‌گیرد. پس از تعیین سرخوشه‌ها، سایر گره‌ها با بررسی فاصله، نزدیک‌ترین سرخوشه را انتخاب کرده و به آن متصل می‌شوند. سپس داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط گره‌ها، ابتدا به سرخوشه‌ها و در نهایت به ایستگاه پایه منتقل می‌گردد. این فرآیند به‌صورت منظم تکرار می‌شود، مگر آنکه شرایط خاصی نظیر کاهش محسوس انرژی در سطح شبکه یا کاهش دفعات موفق ارسال داده‌ها رخ دهد. در چنین مواردی، ساختار خوشه‌بندی به‌روزرسانی شده و سرخوشه‌های جدید با در نظر گرفتن شرایط جاری شبکه انتخاب می‌شوند. به‌طور کلی، پروتکل EERP+ با ترکیب هوشمندانه معیارهای مختلف و رویکرد تطبیقی، تلاش می‌کند تا تعادلی بین مصرف انرژی، بار شبکه و طول عمر عملیاتی ایجاد کند. این رویکرد موجب می‌شود شبکه در مواجهه با تغییرات تدریجی یا ناگهانی، عملکردی پایدار و بهینه از خود نشان دهد.

۴-۳- تحلیل پیچیدگی محاسباتی و سربار الگوریتم

در طراحی پروتکل‌های خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، صرف تمرکز بر مصرف انرژی و طول عمر شبکه کافی نیست، بلکه بررسی دقیق پیچیدگی محاسباتی و سربار اجرایی نیز نقشی اساسی در ارزیابی کارایی یک الگوریتم ایفا می‌کند. پروتکل پیشنهادی EERP+ با در نظر گرفتن این ملاحظات طراحی شده و تلاش شده است تا ضمن بهبود عملکرد انرژی، هزینه‌های محاسباتی و ارتباطی آن در سطحی بهینه و قابل‌پذیرش باقی بماند. از منظر پیچیدگی محاسباتی، بخش اصلی الگوریتم شامل عملیات پایه‌ای نظیر جمع، مقایسه و رتبه‌بندی چندمعیاره است. براین اساس، پیچیدگی زمانی الگوریتم در حد $O(n)$ است که در آن n بیانگر تعداد گره‌های شبکه است. این سطح از پیچیدگی نشان می‌دهد که هزینه محاسباتی به‌صورت خطی با افزایش اندازه شبکه رشد می‌کند؛ بنابراین الگوریتم از نظر زمانی مقیاس‌پذیر بوده و در شبکه‌های بزرگ نیز قابلیت اجرا و پایداری خود را حفظ می‌کند. در زمینه سربار محاسباتی، بیشترین هزینه به فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مربوط می‌شود. با این حال، این فرآیند در لایه اپلیکیشن اجرا می‌گردد و فشار پردازشی مستقیم بر گره‌های عادی با توان محاسباتی محدود وارد نمی‌سازد. این ویژگی موجب می‌شود الگوریتم در محیط‌های واقعی، حتی با استفاده از سخت‌افزارهای ساده و کم‌مصرف نیز قابلیت پیاده‌سازی داشته باشد.



شکل (۱): فلوچارت پروتکل EERP+ برای انتخاب سرخوشه مبتنی بر رتبه بندی و ارسال واکنشی داده

در فواصل زمانی کوتاه معمولاً ناچیز هستند؛ بنابراین، ارسال مکرر داده‌هایی با محتوای مشابه باعث هدررفت انرژی خواهد شد. در این روش، مکانیزم ارسال واکنشی بر اساس یک آستانه δ تعریف می‌شود که به‌عنوان معیار تشخیص تغییرات معنادار در داده‌های حسگر عمل می‌کند. مقدار δ در این پژوهش به‌صورت تطبیقی در نظر گرفته شده و بر اساس ماهیت داده و شرایط محیطی تنظیم می‌شود. به‌طور مشخص، برای داده‌های حساس مانند تغییرات دما یا سطح انرژی، مقدار δ کوچک‌تر انتخاب می‌گردد تا تغییرات جزئی نیز منجر به ارسال شوند، درحالی‌که برای داده‌های پایدارتر نظیر موقعیت یا فشار، مقدار δ بزرگ‌تر لحاظ می‌شود تا از ارسال‌های غیرضروری جلوگیری گردد. این رویکرد تطبیقی موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و درعین حال حفظ دقت در پایش محیط می‌شود. مطابق (۵)، داده‌ها تنها زمانی ارسال می‌شوند که اختلاف میان مقدار جاری و قبلی بیشتر از آستانه تعیین‌شده باشد:

$$|S_{new} - S_{prev}| \geq \delta \quad (5)$$

این روش منجر به کاهش چشمگیر حجم داده‌های ارسالی، مصرف انرژی کمتر و افزایش طول عمر عملیاتی گره‌ها خواهد شد و حفظ بیشتر نودها در طول زمان فعالیت شبکه با استفاده از دو معیار فوق، علاوه بر توزیع بهینه بار و جلوگیری از انتخاب گره‌های ضعیف به‌عنوان سرخوشه، بار ارتباطی کلی نیز کاهش می‌یابد. به همین دلیل، گره‌ها انرژی خود را با سرعت کمتری مصرف کرده و دیرتر از بین می‌روند. این موضوع افزایش طول دوره پایداری را به همراه دارد و باعث افزایش نرخ پوشش و قابلیت اطمینان شبکه در مأموریت‌های طولانی‌مدت می‌شود.

جریان کلی پروتکل EERP+ در قالب فلوچارت رسم شده در شکل (۱) است که در این فلوچارت، اجرای پروتکل با به‌روزرسانی مقدار انرژی باقی‌مانده در هر گره آغاز می‌شود. در این مرحله، هر گره انرژی فعلی خود را با میانگین انرژی کل شبکه مقایسه می‌کند. گره‌هایی که



با کمترین هزینه انرژی بیشترین داده را منتقل کرده است. در مقابل، پروتکل REEC پایین ترین بهره‌وری را نشان می‌دهد که حاکی از ساختار ساده‌تر و عدم سازگاری پویا با وضعیت شبکه است. عملکرد میانه پروتکل E-REEC نیز نسبت به REEC بهبود یافته ولی همچنان از سطح بهره‌وری EERP+ فاصله دارد.

در شکل (۳) نیز میزان مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بیسیم را مشاهده می‌شود پروتکل پیشنهادی EERP+ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند خوشه‌بندی تطبیقی و ارسال واکنشی داده‌ها توانسته است مصرف انرژی را در شبکه‌های حسگر بیسیم به طور قابل توجهی کاهش دهد. با مقایسه نتایج نمودار، مشاهده می‌شود که EERP+ نسبت به E-REEC توانسته است مصرف انرژی را تا ۱۹.۶۵٪ کاهش دهد، و نسبت به پروتکل REEC توانسته ۵۳.۴۹٪ مصرف انرژی را کاهش دهد. این بهبود در عملکرد ناشی از استفاده هوشمندانه‌تر از منابع انرژی، از جمله انتخاب بهینه سرخوشه‌ها بر اساس رتبه انرژی گره‌ها و ارسال داده‌ها تنها در صورت تغییرات معنادار است، که به طور قابل توجهی از ارسال غیرضروری داده‌ها و مصرف بیش از حد انرژی جلوگیری می‌کند. این ویژگی‌ها موجب افزایش طول عمر شبکه و بهبود کارایی در شرایط حساس به انرژی می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای استفاده شده در شبیه‌ساز متلب

Parameter	Value
Sensing area	100*100
Network size	100N
BS1	30,150
BS2	150,30
Data size	400,800,1200,1600
do	10M
Nodes initial energy	0.2J
E _{elec}	50nj/bit
E _{fs}	10pj/bit/m ²
E _{mp}	0.0013pj/bit/m ⁴
EDA	5nj/bit
TO	0.5
Δs	10%

جدول (۳): عملکرد روش REEC, E-Reec, EERP+

تعداد دور	تعداد گره‌های زنده (بر حسب تعداد)			انرژی باقی‌مانده (بر حسب ژول)		
	RE	E-Reec	EERP	REEC	E-Reec	EERP
	EC		+			+
1000	100	100	100	0.12	0.15	0.16
2000	94	100	100	0.05	0.09	0.12
2500	40	100	100	0.003	0.06	0.09
3000	0	100	100	0	0.04	0.07
3500	0	40	100	0	0.01	0.05
4000	0	0	87	0	0	0.02
4500	0	0	0	0	0	0

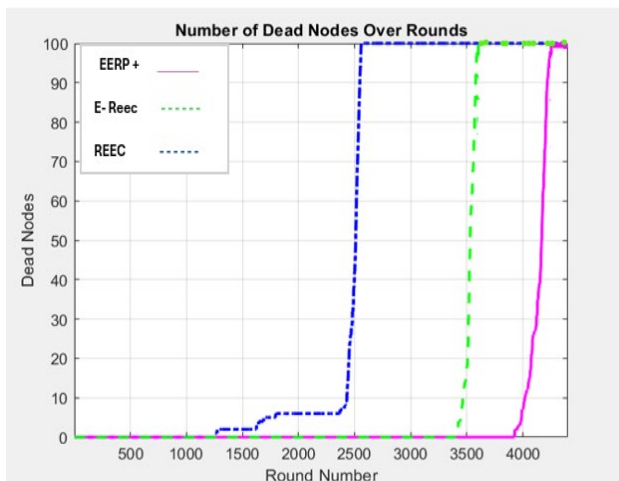
دیدگاه سربرار ارتباطی، پروتکل پیشنهادی صرفاً نیازمند تبادل پیام‌هایی مرتبط با گزارش انرژی باقی‌مانده و فرآیند عضویت در خوشه‌هاست. حجم این تبادلات در سطحی نزدیک به پروتکل‌های مرجع نظیر REEC و E-REEC قرار دارد و افزایش قابل توجهی در سربرار ارتباطی ایجاد نمی‌کند. به همین دلیل، اثر این تبادلات بر مصرف انرژی شبکه ناچیز بوده و از نظر عملیاتی قابل چشم‌پوشی است. به‌طور کلی، هرچند لحاظ معیارهای چندگانه در انتخاب سرخوشه موجب اندکی افزایش سربرار محاسباتی در مقایسه با پروتکل‌های مرجع می‌شود، اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این هزینه جزئی در برابر مزایای به‌دست آمده کاملاً قابل توجیه است. پروتکل EERP+ موفق شده است با کاهش حدود ۱۹.۶۵٪ مصرف انرژی و افزایش حدود ۱۳.۳٪ طول دوره پایداری شبکه نسبت به پروتکل‌های مرجع، توازن مطلوب میان کارایی انرژی و هزینه محاسباتی برقرار سازد.

۴- شبیه‌سازی و ارزیابی

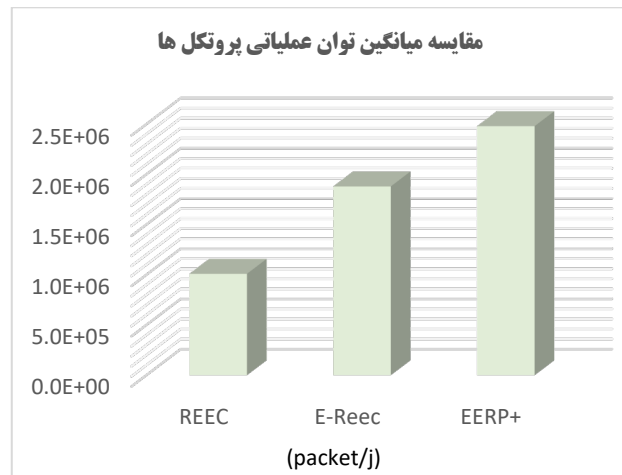
در این شبیه‌سازی، عملکرد پروتکل‌های REEC و E-reec با پروتکل پیشنهادی این مقاله، EERP+ مقایسه شده است. پروتکل EERP+ که در این پژوهش معرفی و توسعه یافته است، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی همچون خوشه‌بندی تطبیقی، ارسال واکنشی داده‌ها و زمان‌بندی هوشمند خواب گره‌ها، تلاش دارد تا مصرف انرژی را بهینه کرده و طول عمر شبکه را افزایش دهد. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است و جزئیات پارامترهای مورد استفاده برای این شبیه‌سازی در جدول (۲) ارائه گردیده است.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، توزیع انرژی باقیمانده در دور ۳۰۰۰ عملیاتی به وضوح برتری پروتکل EERP+ را در مدیریت انرژی نشان می‌دهد. در حالیکه REEC کاملاً فاقد انرژی باقیمانده است (۰٪) و E-Reec تنها ۰.۰۴ واحد انرژی دارد، EERP با حفظ (۰.۰۷) واحد انرژی ۷۵٪ بیشتر از E-Reec مؤثرترین استراتژی حفظ ذخیره انرژی را نمایش می‌دهد. این نمودار دایره‌ای به خوبی گویای این واقعیت است که EERP+ نه تنها از تخلیه کامل انرژی جلوگیری می‌کند، بلکه با رویکرد محافظه‌کارانه‌تر خود، ذخیره انرژی استراتژیکی برای دوره‌های بحرانی آینده نگه می‌دارد. این ویژگی کلیدی، EERP+ را به گزینه‌ای ایده‌آل برای برنامه‌های طولانی‌مدت تبدیل می‌کند که تداوم کار شبکه از اولویت بالایی برخوردار است.

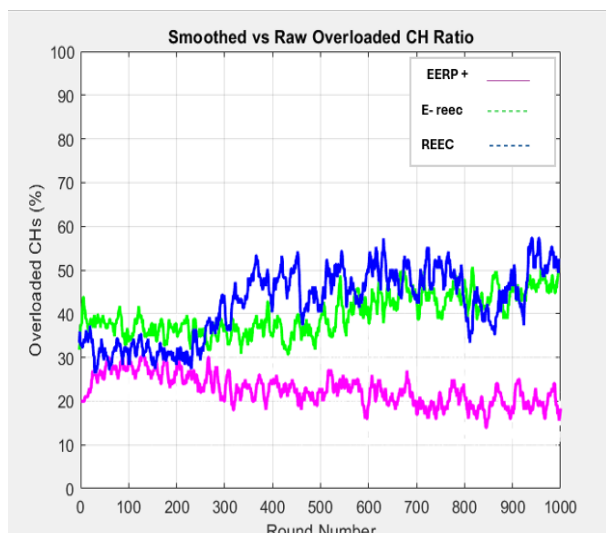
شکل (۲) مقایسه میانگین توان عملیاتی سه پروتکل REEC، E-REEC و EERP+ را از منظر بهره‌وری انرژی نمایش می‌دهد. این توان عملیاتی بر اساس تعداد بسته‌های موفق ارسال شده به‌ازای هر ژول انرژی مصرفی در کل طول عمر شبکه محاسبه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پروتکل EERP+ با مقدار بیش از ۲.۵ میلیون بسته بر ژول، بالاترین توان عملیاتی را در بین پروتکل‌های مورد بررسی دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از مکانیزم‌های هوشمند مانند ارسال واکنشی، خواب تطبیقی و خوشه‌بندی انرژی محور، به طور مؤثری از انرژی گره‌ها استفاده کرده و



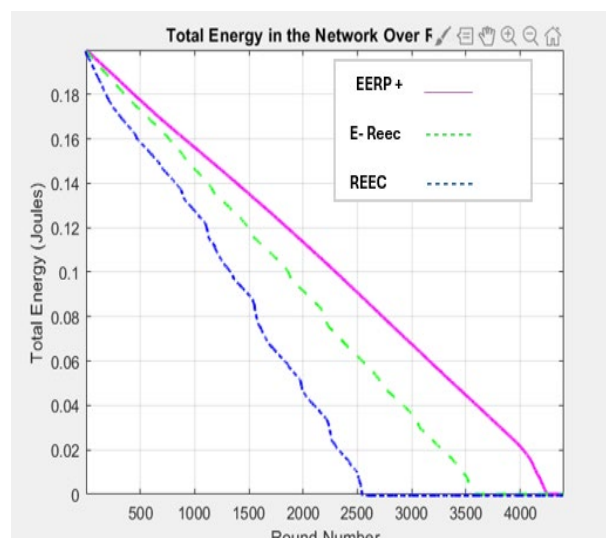
شکل (۵): تعداد سنسورهای مرده مقایسه شده بین پروتکل Reec و E-Reec, EERP+



شکل (۲): مقایسه میانگین توان عملیاتی انرژی بنیان پروتکل های Reec و E-Reec, EERP+

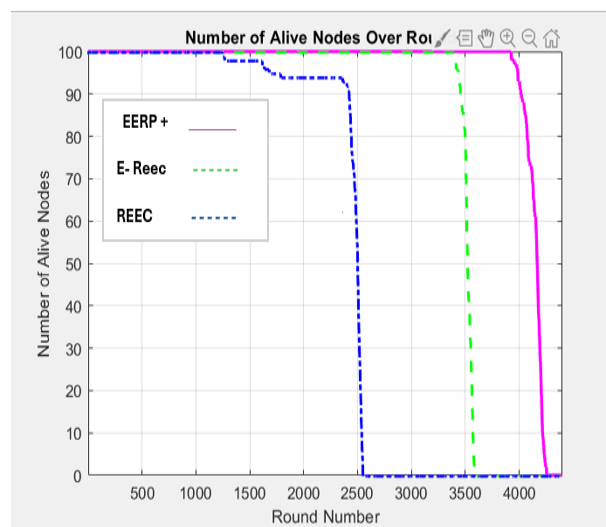


شکل (۶): مقایسه درصد خوشه‌های بیش بار در طول زمان برای پروتکل Reec و E-Reec, EERP+



شکل (۳): نمایش مصرف انرژی کل شبکه در مقایسه پروتکل Reec و E-Reec, EERP+

همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است پروتکل EERP+ با ترکیب خوشه‌بندی تطبیقی و ارسال واکنشی داده‌ها، توانسته است پایداری شبکه را به طرز چشمگیری بهبود بخشد. در مقایسه با E-Reec این پروتکل توانسته است ۱۳.۳٪ در پایداری شبکه بهبود داشته باشد. همچنین، در مقایسه با REEC، پروتکل پیشنهادی EERP+ توانسته است پایداری شبکه را ۹۷.۵٪ افزایش دهد. این بهبودها نشان‌دهنده کارایی و بهینه‌سازی بالای پروتکل EERP+ در مدیریت مصرف انرژی و افزایش عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در شکل (۵) تعداد گره‌های مرده را در هر دور قابل مشاهده است. این شکل نشان می‌دهد که نخستین سنسور مرده در پروتکل E-Reec دور ۳۴۳۰ مشاهده شده و این در حالی است که نخستین سنسور مرده در پروتکل پیشنهادی جدید ۳۹۲۰ اتفاق افتاده است و این نتایج نشان می‌دهد که EERP نسبت به E-Reec به میزان ۱۳.۳ درصد بهبود یافته است، و نسبت به پروتکل REEC که اولین گره آن در دور ۱۳۵۰ از بین می‌رود توانسته ۹۷.۵٪ بهبود داشته باشد.



شکل (۴): تعداد سنسورهای زنده مقایسه شده بین پروتکل Reec و E-Reec, EERP+



- clustering-based routing approach,” *Wireless Networks*, vol. 29, pp. 1231–1247, 2023. doi: 10.1007/s11276-023-03060-z
- [4] Y. Zhou, H. Zhao, and T. Li, “Adaptive clustering and energy-aware routing for large-scale heterogeneous WSNs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 150, Article no. 103263, 2024. doi: 10.1016/j.adhoc.2023.103263
- [5] S. Ahmed, A. Khan, and A. Rehman, “A novel multi-hop energy-aware clustering protocol for WSNs,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 216, Article no. 103584, 2023. doi: 10.1016/j.jnca.2022.103584
- [6] . Wang and Y. Wang, “Performance analysis of cluster-head selection strategies in WSNs: A simulation-based study,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 1456–1468, 2024. Available: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3328917>
- [7] A. Kumar, V. Kumar, and N. Chand, “Energy efficient clustering and cluster head rotation scheme for wireless sensor networks,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 3, no. 5, pp. 129–136, 2011.
- [8] L. Qing, Q. Zhu, and M. Wang, “Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks,” *Computer Communications*, vol. 29, no. 12, pp. 2230–2237, 2006. doi: 10.1016/j.comcom.2006.02.025
- [9] P. Saini and A. K. Sharma, “E-DEEC: Enhanced distributed energy efficient clustering scheme for heterogeneous WSN,” in *Proc. Int. Conf. on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, IEEE, 2010, pp. 205–210. Available: <https://doi.org/10.1109/PDGC.2010.5679614>
- [10] H. Huang, D. Li, and X. Fan, “MSSO: Multi-stage spanning optimization algorithm for energy-efficient inter-cluster routing in WSNs,” *Scientific Reports*, vol. 14, Article no. 17942, 2024. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-17942-y>
- [11] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” in *Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, 2000, pp. 1–10. Available: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
- [12] N. Ahmad, Z. A. Khan, U. Qasim, and T. A. Alghamdi, “ACH2: Routing scheme to maximize lifetime and throughput of wireless sensor networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 10, pp. 3516–3532, 2014. Available: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2308555>
- [13] D. Rajesh and T. Jaya, “Energy competent cluster-based secured CH routing EC2SR protocol for mobile wireless sensor network,” *Concurrency Computat.: Pract. Exper.*, vol. 31, no. 20, e5337, 2019. Available: <https://doi.org/10.1002/cpe.5337>
- [14] X. Liu and X. Zhang, “Rate and energy efficiency improvements for 5G-based IoT with simultaneous transfer,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 5970–5981, 2019. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903778>
- [15] M. M. Shirmohammadi, K. Faez, and M. Chhardoli, “LELE: Leader election with load balancing energy in wireless sensor network,” in *Proc. Int. Conf. on Communications and Mobile Computing*, 2009, pp. 311–315. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCMC.2009.111>

شکل (۶) روند تغییرات درصد سرخوشه‌های بیش بار^۱ را در سه پروتکل REEC, E-REEC و EERP+ در طول ۱۰۰۰ دور شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشخص است، پروتکل EERP+ در اغلب دوره‌ها کمترین درصد سرخوشه‌های بیش بار را ثبت کرده و از این نظر نسبت به سایر پروتکل‌ها عملکرد بهتری دارد. این موضوع نشان‌دهنده توانمندی EERP+ در ایجاد تعادل بار میان خوشه‌ها و جلوگیری از تمرکز بیش از حد گره‌ها روی سرخوشه‌های خاص است. در مقابل، پروتکل REEC بالاترین نرخ بارگذاری بیش از حد را در بین سرخوشه‌ها نشان می‌دهد که بیانگر توزیع نامتوازن اعضا و کاهش پایداری ساختار خوشه‌بندی است. پروتکل E-REEC عملکردی بین دو پروتکل دیگر دارد و نسبت به REEC بهبود نسبی در توزیع بار ارائه می‌دهد، هرچند هنوز به سطح توازن مشاهده‌شده در EERP+ نرسیده است؛ بنابراین، نتایج شکل (۵) تأکید می‌کند که EERP+ از منظر مدیریت بار و پایداری خوشه‌بندی، ساختاری بهینه‌تر نسبت به سایر روش‌ها فراهم می‌آورد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پروتکل EERP+ به‌عنوان راهکاری نوین و کارآمد برای بهبود عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شد. طراحی این پروتکل با بهره‌گیری از ترکیب چندین مکانیزم هوشمند، از جمله انتخاب تطبیقی سرخوشه بر پایه رتبه انرژی، استفاده از چند ایستگاه پایه، ارسال واکنشی داده‌ها و زمان‌بندی خواب گره‌ها، موجب بهبود چشمگیر در مصرف انرژی و افزایش پایداری شبکه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که EERP+ نسبت به نسخه‌های پیشین خود توانسته مصرف انرژی را به طور مؤثری کاهش دهد و طول عمر عملیاتی شبکه را افزایش دهد. همچنین، توزیع بار متوازن‌تر بین گره‌ها از تمرکز انرژی در نواحی خاص جلوگیری کرده و از مرگ زودهنگام گره‌ها پیشگیری نموده است. این دستاوردها نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های واکنشی و تطبیقی در چارچوبی یکپارچه، می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از پروتکل‌های کم‌مصرف و قابل‌اتکا در شبکه‌های حسگر بینجامد. در آینده، توسعه EERP+ برای سناریوهای پیچیده‌تر مانند شبکه‌های متحرک یا ناهمگن و پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن می‌تواند گام مؤثری در مسیر ارتقای عملکرد این شبکه‌ها باشد.

مرجع

- [1] X. Fu, H. Yao, and Y. Yang, “Cascading failures in wireless sensor networks with load redistribution of links and nodes,” *Ad Hoc Networks*, vol. 93, Article no. 101900, 2020. doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101900
- [2] S. Singh and U. Singh, “The effect of chaotic mapping on naked mole-rat algorithm for energy efficient smart city wireless sensor network,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 173, Article no. 108699, 2022. doi: 10.1016/j.cie.2022.108699
- [3] M. Younis, M. Elhoseny, and A. Elsayed, “Energy-efficient design for WSNs in IoT systems: A hybrid

^۱ Overloaded Cluster Heads