

Energy Consumption Optimization in Wireless Sensor Nodes Using Hole Repair Algorithms

**Majid Zakeri Asl¹, *M.Sc. Student*, Alireza Chamkoori², *Assistant Professor*,
Nooshin Rabiee³, *Assistant Professor***

¹ **Department of Computer Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Lian Institute of Higher
Education, Bushehr, Iran**
M.zakeriasl@gmail.com

² **Department of Computer Engineering, Bu.C., Islamic Azad University, Bushehr, Iran**
Chamkoori@iau.ac.ir

³ **Department of Electrical Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Lian Institute of Higher
Education, Bushehr, Iran**
Nooshin.rabiee@yahoo.com

Received: 10 October 2025	Revised: 31 October 2025	Accepted: 15 November 2025
----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------

Abstract:

In today's world, where communication technologies are rapidly expanding, wireless sensor systems have emerged as one of the most important innovations in data collection and processing across many fields, including environment, healthcare, security, industry, and agriculture. These systems are capable of collecting sensitive data from the surrounding environment and transmitting this information to base stations or central nodes. As a result, wireless sensor networks have become powerful tools used in many operational scenarios, especially in hard-to-reach environments such as forests, seas, and mines. However, one of the major challenges in these systems is the limited energy consumption and battery life of sensor nodes. The aim of this research is to optimize energy consumption in wireless sensor nodes using hole repair algorithms. This study employs quantitative and qualitative data analysis to evaluate the performance of the algorithms in improving energy consumption and network coverage. The research process includes the phases of deployment, initialization, hole detection, and hole repair. The overall conclusion of this research demonstrates that the proposed method effectively enhances network performance by optimizing energy consumption and repairing holes in wireless sensor networks. Compared to other algorithms, this method significantly improved network coverage by reducing the movement distance of nodes and making efficient use of redundant nodes. Furthermore, the proposed algorithm performed better under various conditions, particularly in environments with a large number of nodes.

Keywords: Energy, Wireless Sensor Nodes, Hole Healing

Corresponding Author: Dr. Alireza Chamkoori

Corresponding Author Address: Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.

بهینه‌سازی مصرف انرژی در گره‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم‌های ترمیم حفره

مجید ذاکری اصل^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، علیرضا چمکوری^۲، استادیار، نوشین ربیعی^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، مؤسسه آموزش عالی لیان، بوشهر، ایران

M.zakeriasl@gmail.com

۲- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

Chamkoori@iau.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، مؤسسه آموزش عالی لیان، بوشهر، ایران

Nooshin.rabice@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

چکیده:

در دنیای امروز که تکنولوژی‌های ارتباطی به سرعت در حال گسترش هستند، سیستم‌های حسگر بی‌سیم به عنوان یکی از نوآوری‌های مهم در زمینه جمع‌آوری و پردازش داده‌ها در بسیاری از حوزه‌ها، از جمله محیط‌زیست، بهداشت، امنیت، صنعت و کشاورزی، مطرح شده‌اند. این سیستم‌ها قادرند داده‌های حساسی را از محیط اطراف جمع‌آوری کرده و این اطلاعات را به ایستگاه‌های پایه یا گره‌های مرکزی ارسال کنند. به این ترتیب، شبکه‌های حسگر بی‌سیم به ابزارهایی قدرتمند تبدیل شده‌اند که در بسیاری از سناریوهای عملیاتی، به ویژه در محیط‌های خارج از دسترس، از جمله مناطق جنگلی، دریاها یا معادن، کاربرد دارند. با این حال، یکی از چالش‌های عمده در این سیستم‌ها، محدودیت در مصرف انرژی و عمر باتری گره‌های حسگر است. هدف از انجام این پژوهش بهینه‌سازی مصرف انرژی در گره‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم‌های ترمیم حفره می‌باشد. این تحقیق از تحلیل کمی و کیفی داده‌ها برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در بهبود مصرف انرژی و پوشش شبکه استفاده می‌کند. فرآیند تحقیق شامل فازهای استقرار، مقداردهی اولیه، تشخیص حفره و ترمیم حفره است. نتیجه‌گیری کلی این پژوهش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و ترمیم حفره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌طور مؤثری عملکرد شبکه را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر، این روش توانست با کاهش فاصله حرکت گره‌ها و استفاده بهینه از گره‌های افزونه، پوشش شبکه را به‌طور چشم‌گیری بهبود دهد. همچنین، این الگوریتم در شرایط مختلف، به‌ویژه در محیط‌های با تعداد گره‌های زیاد، عملکرد بهتری ارائه داد.

کلمات کلیدی: انرژی، ترمیم حفره، گره‌های حسگر بی‌سیم

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا چمکوری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: بوشهر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر- دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱ (WSNs) به عنوان یکی از ارکان اصلی انقلاب دیجیتال و هسته مرکزی اینترنت اشیاء (IoT)، نقش بی‌بدیلی در جمع‌آوری، پردازش و انتقال داده از محیط‌های فیزیکی به دنیای دیجیتال ایفا می‌کنند [۱]. این شبکه‌ها متشکل از تعداد زیادی گره حسگر کوچک، کم‌هزینه و مستقل هستند که به صورت خودکار و بدون نیاز به زیرساخت ثابت، امکان نظارت بر پدیده‌های محیطی در حوزه‌های متنوعی از جمله نظارت زیست‌محیطی، کشاورزی هوشمند، سلامت از راه دور، امنیت، مدیریت شهرهای هوشمند و صنعت را فراهم می‌سازند [۱۵]. با این حال، یکی از بزرگ‌ترین موانع بر سر راه توسعه و به کارگیری گسترده این فناوری، محدودیت ذاتی در منابع انرژی گره‌های حسگر است. این گره‌ها معمولاً با باتری‌هایی با ظرفیت محدود تغذیه می‌شوند که در بسیاری از کاربردها، به ویژه در محیط‌های دورافتاده یا خصمانه، تعویض یا شارژ مجدد آنها غیرممکن یا بسیار پرهزینه است [۱۱]. بنابراین، بهینه‌سازی مصرف انرژی به عنوان یک چالش حیاتی، تعیین‌کننده طول عمر، قابلیت اطمینان و کارایی کلی شبکه است.

مصرف انرژی در WSN ها عمدتاً در سه بخش اصلی رخ می‌دهد: حسگری (جمع‌آوری داده)، پردازش (تجزیه و تحلیل محلی) و ارتباطات (ارسال و دریافت داده). در این میان، بخش ارتباطات، به ویژه عمل انتقال داده‌ها، سهم غالب (اغلب بیش از ۷۰٪) در مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. این امر به دلیل نیاز به فعال‌سازی ماژول رادیویی و ارسال سیگنال‌های پرتوان برای غلبه بر فاصله و نویز است. یکی از پدیده‌های مخرب که مستقیماً ناشی از این مصرف انرژی نابرابر است و به شدت بر عملکرد شبکه تأثیر می‌گذارد، مسئله «حفره‌های انرژی»^۲ یا «حفره‌های پوششی»^۳ است.

حفره‌های پوششی به مناطقی در میدان حسگری اشاره دارند که در آنها به دلیل تخلیه کامل انرژی، خرابی فیزیکی یا استقرار نامناسب گره‌ها، هیچ حسگر فعالی برای نظارت و جمع‌آوری داده وجود ندارد [۱۳]. این حفره‌ها می‌توانند به دلایل مختلفی شکل بگیرند. در توپولوژی‌های چندگامی^۴، گره‌های نزدیک به ایستگاه پایه (Sink) نقش رله را برای گره‌های دورتر ایفا می‌کنند و در نتیجه بار ترافیکی و مصرف انرژی بسیار بالاتری را تجربه می‌کنند. این امر منجر به مرگ زود هنگام این گره‌های حیاتی می‌شود و یک حفره ارتباطی و پوششی در اطراف سینک ایجاد می‌کند که کل شبکه را از کار می‌اندازد، حتی اگر گره‌های دورتر هنوز انرژی کافی داشته باشند [۱۰]. همچنین، عوامل دیگری مانند شرایط محیطی غیرقابل پیش‌بینی، تداخل و تصادم سیگنال‌ها و حملات مخرب نیز می‌توانند در ایجاد این حفره‌ها نقش داشته باشند.

وجود حفره‌های پوششی، اهداف اصلی شبکه یعنی پوشش کامل و اتصال پیوسته را خدشه‌دار می‌سازد. این پدیده باعث از دست رفتن داده‌های حیاتی، کاهش دقت و قابلیت اطمینان شبکه، افزایش تأخیر در انتقال داده و در نهایت کاهش چشمگیر طول عمر کلی شبکه می‌شود [۶]. در کاربردهای حساسی مانند نظارت بر سلامت بیماران یا تشخیص حریق در جنگل، وجود چنین حفره‌هایی می‌تواند فاجعه‌بار باشد. بنابراین، توسعه مکانیسم‌های هوشمند برای تشخیص به موقع، پیشگیری و ترمیم این حفره‌ها به یک حوزه تحقیقاتی فعال و ضروری تبدیل شده است.

راهکارهای متعددی برای مقابله با این چالش ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به چند دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: پروتکل‌های مسیریابی انرژی‌آگاه^۵، الگوریتم‌های خوشه‌بندی و انتخاب سرخوشه‌های بهینه (مانند LEACH و بهبود یافته‌های آن)، استفاده از گره‌های متحرک برای بازسازی پوشش، و بهره‌گیری از فناوری برداشت انرژی^۶ از محیط [۹]. در این میان، الگوریتم‌های ترمیم حفره^۷ به عنوان یک راهکار مستقیم و مؤثر، بر شناسایی هوشمندانه نواحی آسیب‌دیده و بازسازی پوشش آن‌ها متمرکز هستند. این الگوریتم‌ها با استفاده از تکنیک‌های مختلفی از جمله تحلیل توپولوژی شبکه (مانند دیاگرام ورونوی)، الگوریتم‌های هوش جمعی (مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO و الگوریتم کلونی مورچه ACO و منطق فازی)، سعی در حرکت دادن گره‌های ذخیره^۸ یا تنظیم دینامیک قدرت انتقال برای پوشش دادن حفره‌ها با کمترین مصرف انرژی ممکن دارند [۵ و ۸].

هدف از این پژوهش، ارائه و ارزیابی یک الگوریتم بهینه برای ترمیم حفره‌های پوششی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با محوریت بهینه‌سازی مصرف انرژی است. این تحقیق به این سؤال اصلی پاسخ می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از یک راهکار ترمیم حفره هوشمند، مصرف انرژی را کاهش داد و طول عمر شبکه را بدون قربانی کردن کیفیت پوشش، افزایش داد.

۲- پیشینه تحقیق

مبحث بهینه‌سازی انرژی و ترمیم حفره در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، موضوع تحقیقات گسترده‌ای در دو دهه گذشته بوده است. پژوهش‌های اولیه عمدتاً بر روی پروتکل‌های مسیریابی و خوشه‌بندی متمرکز بودند تا مصرف انرژی را به صورت کلی کاهش دهند. پروتکل معروف LEACH یکی از اولین و تأثیرگذارترین این پروتکل‌ها بود که با معرفی مفهوم خوشه‌بندی تصادفی و چرخش دوره‌ای نقش سرخوشه، گام مهمی در توزیع متعادل بار انرژی در شبکه برداشت [۷]. با این حال، LEACH به مسائل مربوط به حفره‌های انرژی که به صورت متمرکز در اطراف سینک ایجاد می‌شوند، به صورت کامل نمی‌پردازد. در سال‌های اخیر، تحقیقات به سمت توسعه الگوریتم‌های هوشمندتر و اختصاصی‌تر برای تشخیص و ترمیم فعالانه حفره‌ها سوق یافته است. گو و همکاران یک الگوریتم بهینه‌سازی تعمیر حفره مشترک چندعامله (FCH-ROA) برای شبکه‌های ناهمگن ارائه دادند. این الگوریتم از مدل‌های هندسی Voronoi و Delaunay برای شناسایی دقیق مرزهای حفره استفاده می‌کند و با در نظرگیری همزمان فاصله، انرژی و قابلیت اطمینان گره‌ها، آن‌ها را برای ترمیم حفره به کار می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده بهبود چشمگیر در پوشش شبکه و افزایش طول عمر بود [۵]. همچنین، هیا و همکاران بر مدیریت انرژی در طول فرآیند ترمیم تمرکز کردند. آن‌ها پروتکل مسیریابی فرصت‌طلبانه‌ای به نام SOCGO مبتنی بر خوشه‌های خودسازمان‌ده معرفی کردند که با استفاده ترکیبی از الگوریتم K-means و جستجوی حریصانه، نه تنها به ترمیم حفره می‌پردازد، بلکه مصرف انرژی را متعادل کرده و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد [۴].

در زمینه استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی، هالافی و همکاران یک روش توزیع‌شده و کارآمد انرژی برای تشخیص و بازبانی حفره‌ها بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) ارائه دادند. روش پیشنهادی آن‌ها با تقسیم شبکه به سلول‌ها و انتخاب هوشمند عامل‌های ترمیم، موفق به کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ پوشش شبکه شد [۱۶].

یکی از جدیدترین و مرتبط‌ترین تحقیقات، کار جون و همکاران است که به چالش حفره‌های انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم رادیو شناختی (CRWSNs) پرداختند. آن‌ها الگوریتم UCEHA را معرفی کردند که با ایجاد خوشه‌های نابرابر تناسب با فاصله از سینک، از تشکیل نقاط داغ^۹ و تخلیه سریع انرژی گره‌های نزدیک به سینک جلوگیری می‌کند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها کاهش ۱۹٪ در مصرف انرژی، بهبود ۲۶٪ در تعادل بار و افزایش ۴۰٪ در طول عمر شبکه را نشان داد [۸].

به طور مشابه، راویکومار و همکاران از یک شبکه متخاصم مولد باقیمانده دوگانه برای انتخاب بهینه سرخوشه و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی طلایی (GSOA) برای یافتن کارآمدترین مسیر انتقال داده استفاده کردند. این رویکرد هیبریدی منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش توان عملیاتی شبکه شد [۱۲]. در یک مطالعه مروری، چودوری و همکاران، اثربخشی ادغام تکنیک‌های یادگیری عمیق در این حوزه را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی گروه اجتماعی بهبودیافته (ISGO) با یک شبکه عصبی گرافی (RGNN) برای تشخیص و وصله حفره‌ها می‌تواند تا ۹۹/۶٪ در زمان تشخیص و تا ۸۲٪ در سربار انرژی صرفه‌جویی کند [۳]. اگرچه این تحقیقات پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند، اما بسیاری از آن‌ها بر روی سناریوهای ایستا متمرکز بوده یا پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند. پژوهش حاضر با هدف ارائه یک راهکار سبک‌وزن و مقیاس‌پذیر که بتواند به صورت پویا و با مصرف انرژی کم‌تری حفره‌ها را در محیط‌های مختلف ترمیم کند، از خلا موجود در ادبیات پیشین بهره می‌گیرد.

۳- معرفی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل چهار فاز اصلی است: استقرار، مقداردهی اولیه، تشخیص حفره و ترمیم حفره. در فاز مقداردهی اولیه، هر گره اطلاعات مورد نیاز را در خصوص همسایه‌های حسگری خود جمع‌آوری می‌کند که برای آماده‌سازی فازهای بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فاز تشخیص حفره، هر گره وضعیت خود را بررسی می‌کند تا مشخص کند که آیا بر روی حفره قرار دارد یا خیر. اگر یک گره بر روی حفره واقع شده باشد، وارد فاز ترمیم حفره می‌شود. در فاز ترمیم حفره، گره‌هایی که بر روی حفره قرار دارند به منظور بهبود و ترمیم حفره و افزایش پوشش شبکه در این فاز عمل می‌کنند. شکل (۱) و (۲) به ترتیب، نمای کلی شبکه مورد نظر، قبل و بعد از اجرای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳-۱- فاز استقرار

در این فاز، n گره حسگر به طور تصادفی در محیط مستقر می‌شوند و مجموعه $S = \{S_j, j = 1 \dots n\}$ تشکیل می‌دهند.

۳-۲- فاز مقداردهی اولیه

هر گره پس از استقرار اولیه، با توجه به تغییر موقعیت خود، وارد این فاز می‌شود و در این فاز، هر گره اطلاعات خود را جمع‌آوری کرده و در مرحله‌های زیر را اجرا می‌کند.

مرحله ۱: یافتن همسایه ارتباطی

در این مرحله، هر گره حسگر همسایه خود را پیدا می‌کند. مجموعه تمامی گره‌های حسگری که در داخل ناحیه ارتباطی $(C(S_j))$ قرار دارند، همسایگان ارتباطی گروه $cn(S_j)$ هستند.

مرحله ۲: یافتن همسایه حسگری

در این مرحله، هر گره حسگر S_j خود را به همسایگان حسگری نزدیک‌تر می‌کند. گره‌هایی که در مجموعه هستند، فهرستی از همسایگان حسگری ایجاد می‌کنند که به گره $S_j \in cn(S_j)$ نزدیک‌تر هستند. این گره‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: گره‌هایی که فاصله کمتری دارند و گره‌هایی که فاصله بیشتری دارند.

مرحله ۳: یافتن همسایه افزوده

در این مرحله، گره S_j همسایگان اضافی را از طریق استفاده از اطلاعات حاصل از همسایگان نزدیک‌تر $S_j \in cn(S_j)$ خود می‌یابد. این گره‌ها از طریق همسایگی گره‌های دیگر که در مجموعه قرار دارند، شناسایی می‌شوند. و این گروه‌ها به عنوان گروه افزوده S_j به فهرست $cn(S_j)$ اضافه می‌شود.

مرحله ۴: تعیین نقاط تقاطع

در این مرحله، هر گره S_j نقاط تقاطع (p_1, p_2) را برای هر دو نقطه تقاطع که در نقاط همسایگی $S_j \in cn(S_j)$ قرار دارند، محاسبه می‌کند. نقاط تقاطع گره‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$x_{p_1} = x_2 - \frac{r(y_j - y_i)}{d} \quad (1)$$

$$y_{p_1} = y_2 + \frac{r(x_j - x_i)}{d} \quad (2)$$

$$x_{p_2} = x_2 + \frac{r(y_j - y_i)}{d} \quad (3)$$

$$y_{p_2} = y_2 - \frac{r(x_j - x_i)}{d} \quad (4)$$

در این روابط، d فاصله بین گره‌ها فاصله‌های دو گره S_i و S_j به طور خاص در نظر گرفته می‌شود به صورتی که $d \leq r_i - r_j$ و $d \leq r_i + r_j$ مطابق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$r = \sqrt{r_i^2 - \left(\frac{r_i^2 - r_j^2 + d^2}{2d}\right)} \quad (5)$$

$$x_2 = x_i + \left(\frac{r_i^2 - r_j^2 + d^2}{2d}\right) \left(\frac{x_j - x_i}{d}\right) \quad (6)$$

$$y_2 = y_i + \left(\frac{r_i^2 - r_j^2 + d^2}{2d}\right) \left(\frac{y_j - y_i}{d}\right) \quad (7)$$

نقاط تقاطع p_1, p_2 بین هر جفت از همسایه‌های حسگری $(i) S_j, S_i \in cn(S_j)$ اضافه می‌شود. همچنین نقطه تقاطعی که توسط گره محاسبه شده و به فهرست نقاط تقاطع $p(S_j)$ بیش از یک گره پوشش داده شود نقطه مرزی محسوب نمی‌شوند و در

غیر این صورت نقطه مرزی حفره هستند. در پایان این مرحله هر گره باید فهرستی از اطلاعات همسایگان خود و نقاط تقاطع مرتبط را حفظ کند.

۳-۳ فاز تشخیص حفره

به دلیل آنکه گره‌های حسگر در محیط مورد نظر به طور تصادفی پخش می‌شوند، محیط مورد نظر ممکن است توسط گره‌های حسگر پوشش داده نشود و حفره‌های پوششی در محیط ایجاد شوند. به این منظور برای شناسایی این نوع از حفره‌ها، هر گره فرآیند زیر را اجرا می‌کند.

مرحله ۱

شناسایی حفره: در مرحله شناسایی حفره از اطلاعات همسایه‌های حسگری استفاده شده است، هر گره حسگر بررسی می‌کند که آیا بخشی از محیط پیرامون آن توسط حداقل یک همسایه حسگری پوشش داده شده است یا خیر. اگر بخشی از محیط وجود داشته باشد که توسط حسگرهای همسایه پوشش داده نشده باشد، به این معنی است که بر روی یک حفره قرار دارد. مطابق با فرآیند زیر مشخص می‌شود که هر گره بر روی یک حفره قرار دارد یا خیر.

۱. هر گره حسگر لیست نقاط تقاطع خود را با حذف نقاطی که توسط حسگرهای همسایه پوشش داده شده اند به‌روزرسانی می‌کند.

۲. نقاط تقاطع باقیمانده را که نقاط مرز حفره محسوب می‌شوند در لیست HBP قرار می‌دهد

۳. گره S_j نقاط محیط پیرامونی خود را در لیست C قرار می‌دهد

۴. لیست C را با حذف نقاط پوشش داده شده توسط همسایه‌های حسگری، به‌روزرسانی می‌کند

۵. با توجه به شعاع هر حسگر فاصله بین نقاط در لیست C متفاوت است، این فاصله با d_s مشخص می‌شود

۶. نقاط لیست C پیمایش می‌شوند و فاصله بین هر دو نقطه مقایسه می‌شود اگر نقطه‌ای پیدا شد که فاصله آن تا نقطه‌ی بعدی در لیست بیشتر از فاصله فیزیکی بین دو نقطه در لیست C بود، مشخص می‌شود که آن دو نقطه در دو بخش (S_{ij}) مجزا از محیط پیرامونی S_j قرار دارند. به این ترتیب لیست C به بخش‌های مجزا تقسیم می‌شود و انتها آن تعیین می‌شود.

۷. با مقایسه نقاط ابتدا و انتها هریک از بخش‌ها با نقاط HBP بخش‌های روی حفره به طور دقیق مشخص می‌شود. بخش‌های مرزی (یال) و نقاط گره مرزی نشان داده شده است.

۸. اگر C دارای بیش از یک بخش باشد به این معنی است که گره بر روی بیش از یک حفره قرار دارد.

مرحله ۲

کشف مرز حفره: با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مرحله قبل، تمامی گره‌های قرار گرفته بر روی حفره‌ها در لیست H قرار می‌گیرند. فرض کنید لیست $HS = \{S_j, S_{j+1}, \dots, S_m\}$ شامل گره‌هایی باشد که یک حفره را احاطه کرده‌اند و دارای بخش محیطی هستند که پوشش داده نشده‌اند. هر گره $S_j \in HS$ برای یافتن مرز حفره فرآیند کشف مرز حفره را به‌صورت زیر اجرا می‌کند.

۱. نقاط تقاطع p_i و p_{i+1} روی مرز حفره در نظر گرفته می‌شوند اگر یک بخش پوشش داده نشده از محیط S_j وجود داشته باشد که از نقاط p_i و p_{i+1} عبور کند.

۲. گره S_i بسته «کشف مرز حفره» دریافت‌شده را به گره بعدی مرز حفره (مثال: S_{i+1}) ارسال می‌کند.

۳. گره S_i نقاط مرز حفره را از بسته دریافت شده استخراج کرده و آن‌ها را به‌روز رسانی می‌کند. اگر نقطه مشترکی بین نقاط مرز حفره گره S_i و نقاط مرز حفره گره S_{i+1} وجود داشته باشد، HBP_j به‌روزرسانی می‌شود.

۴. گره S_{i+1} اطلاعات خود و HBP به‌روز رسانی‌شده را به بسته دریافت‌شده اضافه کرده و آن را به گره بعدی S_{i+2} ارسال می‌کند؛ این فرآیند ادامه خواهد یافت تا زمانی که تمامی گره‌ها مرز حفره را شناسایی کنند.

۳-۴- فاز ترمیم حفره

پس از شناسایی دقیق حفره‌ها و نقاط مرزی آن‌ها در فاز تشخیص حفره، گره‌ها برای ترمیم حفره‌ها باید بر اساس نزدیکی به مرز حفره، انرژی باقی‌مانده، و توانایی حرکت به سمت حفره انتخاب شوند. گره‌هایی که انرژی کافی دارند و در نزدیکی حفره قرار دارند، به عنوان گره‌های مناسب برای ترمیم شناخته می‌شوند.

از میان گره‌های افزونه گره ای برای ترمیم حفره انتخاب می‌شود که در لیست H (گره‌های مرزی شناسایی شده در فاز سوم) نباشد، انرژی باقیمانده آن رو به پایان نباشد و همچنین فاصله گره تا مرکز حفره کم باشد. برای این کار از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

(انرژی مصرفی برای ترمیم حفره) / (محدوده پوشش $\times$ انرژی باقیمانده)

با این فرمول به هر گره یک امتیاز می‌دهیم هر گره ای که بیشترین امتیاز را داشت برای ترمیم حفره انتخاب می‌شود. گره‌های منتخب به سمت مرکز حفره حرکت می‌کنند. پس از حرکت گره‌ها، شبکه دوباره اسکن می‌شود تا از پوشش کامل حفره اطمینان حاصل شود. در صورت باقی‌ماندن حفره، این فرآیند تکرار می‌شوند.

۳-۵- مدل مصرف انرژی

برای مدل اتلاف انرژی، از مدل رادیویی و مدل استفاده شده است. مصرف انرژی به سه قسمت تقسیم می‌شود: انرژی دریافت پیام، انتقال پیام (انرژی رادیویی) و مسافت طی شده. انرژی مصرفی در فرآیند انتقال، برای تقویت سیگنال، به مقدار انرژی اضافی بستگی به فاصله تا مقصد نیاز دارد. به همین دلیل، برای انتقال و دریافت یک پیام به اندازه l بیت در فاصله مشخص، مصرف انرژی رادیویی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l E_{elec} + l \epsilon_{fs} d^2 & \text{if } d < d_0 \\ l E_{elec} + l \epsilon_{mp} d^4 & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{Rx}(l) = l E_{elec}$$

در روش پیشنهادی، سرعت گره‌های حسگر به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

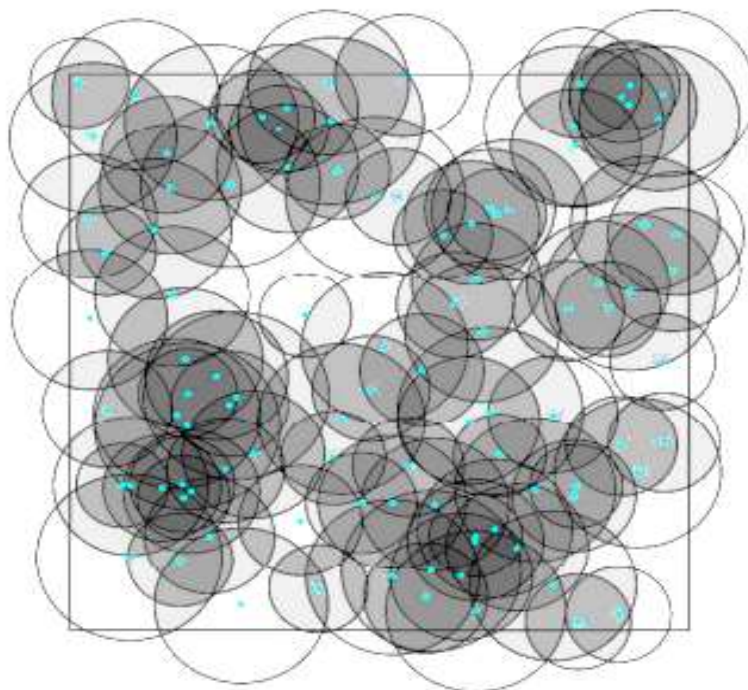
۴- شبیه سازی روش پیشنهادی

در این بخش، دو سناریو متفاوت برای ارزیابی روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در سناریو اول، فرض بر این است که تعدادی گره با شعاع حسگری متفاوت و به صورت تصادفی در محیط مورد نظر قرار گرفته‌اند. سپس، روش پیشنهادی از نظر دقت و اعتبار در تشخیص و ترمیم حفره‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این سناریو، توجه ویژه‌ای به حفره‌ها با اندازه‌های مختلف صورت می‌گیرد و فاصله مجموع حرکت گره‌ها و تعداد گره‌هایی که برای پوشش و ترمیم این حفره‌ها حرکت کرده‌اند، بررسی می‌شود. هدف از این تحلیل، سنجش میزان کارایی روش پیشنهادی در شرایط مختلف و با توجه به اندازه و توزیع حفره‌ها است. در سناریوی دوم، فرض بر این است که شعاع حسگری تمام گره‌ها یکسان باشد. در این سناریو، روش پیشنهادی با دو روش دیگر مقایسه می‌شود. برای انجام این مقایسه، روش‌های مختلفی که به تشخیص و ترمیم حفره‌ها پرداخته‌اند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این مقایسه به‌ویژه در شرایطی که پارامترهای شبکه یکسان است، به منظور بررسی عملکرد نسبی روش پیشنهادی و ارزیابی نقاط قوت و ضعف آن در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها انجام می‌شود. برای هر دو سناریو، پارامترهای شبکه به طور یکسان تنظیم شده‌اند که جزئیات آن‌ها در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. این بخش از تحقیق به ارزیابی دقیق‌تر و تطبیقی روش پیشنهادی در شرایط مختلف کمک می‌کند و نتایج آن می‌تواند بینش‌های مفیدی در زمینه بهبود الگوریتم‌های تشخیص و ترمیم حفره‌ها ارائه دهد.

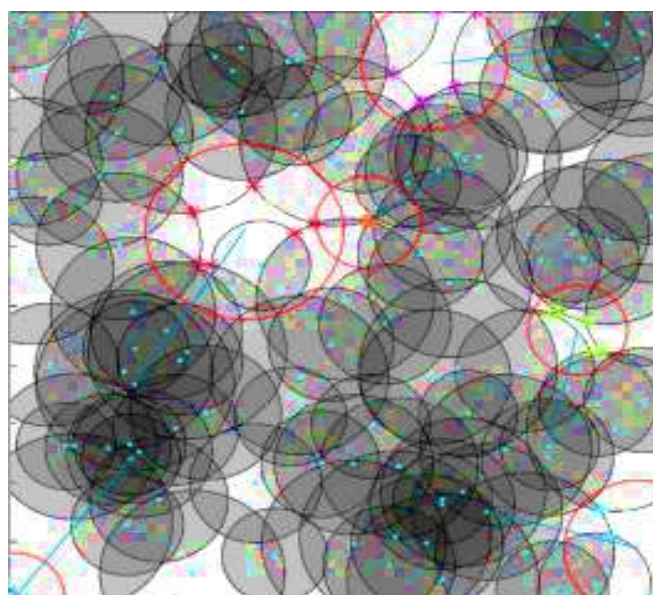
۴-۱- سناریو اول

در این سناریو، گره‌های حسگر به‌طور تصادفی در یک محیط مربعی شکل توزیع شده‌اند. این گره‌ها دارای شعاع حسگری متفاوتی هستند که به‌طور تصادفی در نقاط مختلف این محیط قرار می‌گیرند. هر یک از گره‌های حسگر دارای شناسه‌ای

منحصر به فرد است که به آن امکان می‌دهد به‌طور مستقل از دیگر گره‌ها عمل کند و ارتباط برقرار نماید. علاوه بر این، انرژی اولیه هر گره محدود و متفاوت است، به این معنی که هر گره با مقدار خاصی از انرژی شروع به کار می‌کند که ممکن است بر اساس موقعیت و نوع گره‌ها متغیر باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گره‌ها در طول زمان از نظر مصرف انرژی و قابلیت‌های حسگری تفاوت‌های چشمگیری داشته باشند. در این سناریو، نحوه توزیع گره‌ها و همچنین تاثیر تفاوت‌های انرژی و شعاع حسگری در عملکرد کلی سیستم به دقت بررسی می‌شود تا اثربخشی و کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی در تشخیص و ترمیم حفره‌ها به‌طور دقیق‌تر ارزیابی گردد.



شکل (۱): شبکه قبل از اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفره‌های متفاوت (کوچک)



شکل (۲): شبکه در حال پوشش با حرکت گره‌های افزونه با اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفره‌های متفاوت (کوچک)

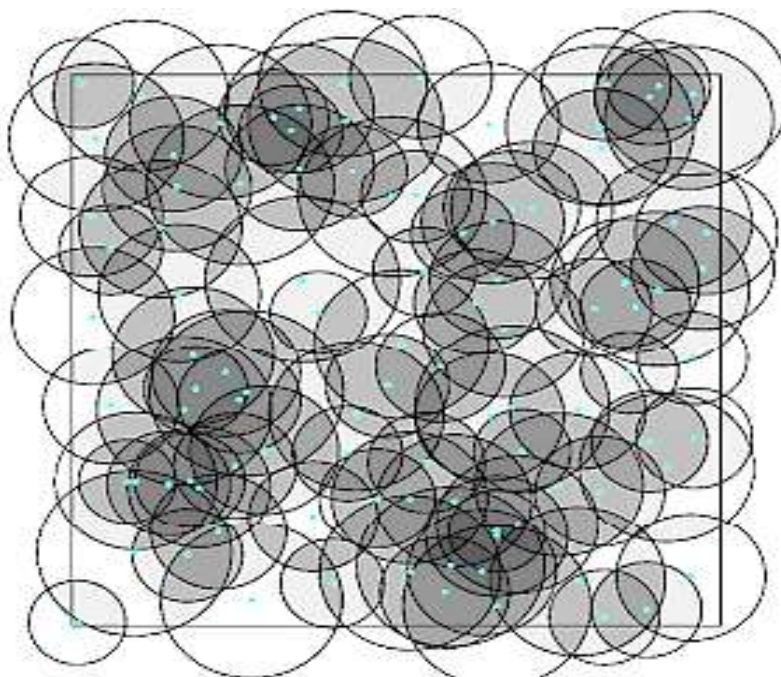
جدول (۱): پارامترهای شبکه

پارامتر	نماد	مقدار (واحد)
انرژی اولیه	E_0	(20J-50J)
انرژی حدساز	$E_{threshold}$	10% انرژی اولیه
انرژی لازم برای ارسال هر بیت	E_{elec}	50 bit/nJ
ضریب تقویت سیگنال در فضای آزاد	ε_{fs}	(10PJ/bit/m ²)
ضریب تقویت سیگنال در محیط‌های چند مسیره	ε_{mp}	(0.0014pJ/bit/m ⁴)
سرعت انتشار سیگنال	-	ثابت
مصرف انرژی گره در طول حرکت	e_d	1 J/m

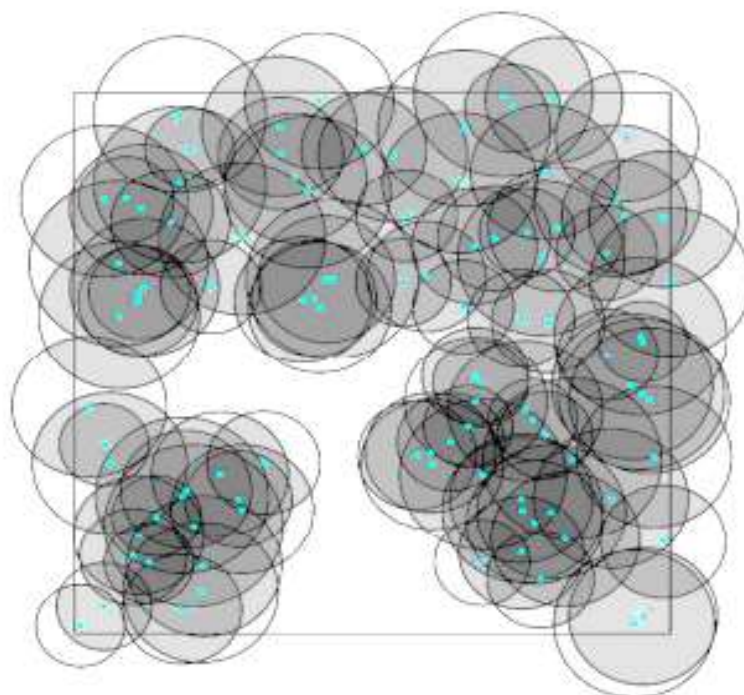
جدول (۲): پارامترهای شبیه سازی روش پیشنهادی در سناریو اول

پارامتر	نماد	مقدار (واحد)
اندازه محیط	-	200 × 200 m ²
تعداد حسگرها	-	100
محدوده حسگری	R_s	15 m – 30 m
محدوده ارتباطی	R_c	60 m

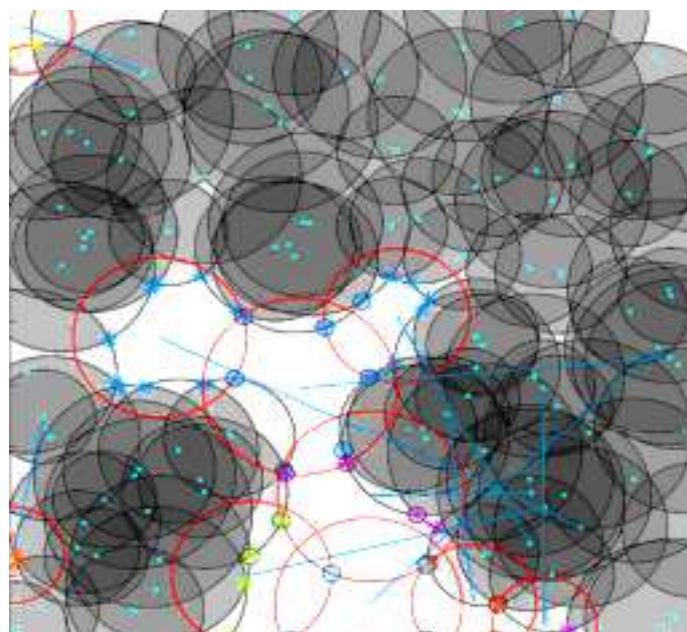
در این سناریو، عملکرد روش پیشنهادی با توجه به دو پارامتر فاصله حرکت و تعداد گره‌های حرکت کرده بررسی می‌شود. به دلیل استقرار تصادفی گره‌ها، اندازه حفزه‌ها در هر بار اجرای الگوریتم متفاوت است. به همین دلیل، اندازه حفزه‌ها در بازه‌ای از ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر تقسیم‌بندی شده و پارامترهای مورد نظر در این بازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، برای کاهش خطای شبیه‌سازی، الگوریتم ده بار به‌طور مستقل اجرا شده و میانگین نتایج به‌دست‌آمده محاسبه شده است. شکل‌های (۱) الی (۶) نمایش‌دهنده پوشش شبکه قبل و بعد از اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفزه‌های مختلف هستند.



شکل (۳): پوشش کامل شبکه بعد از اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفزه‌های متفاوت (کوچک)



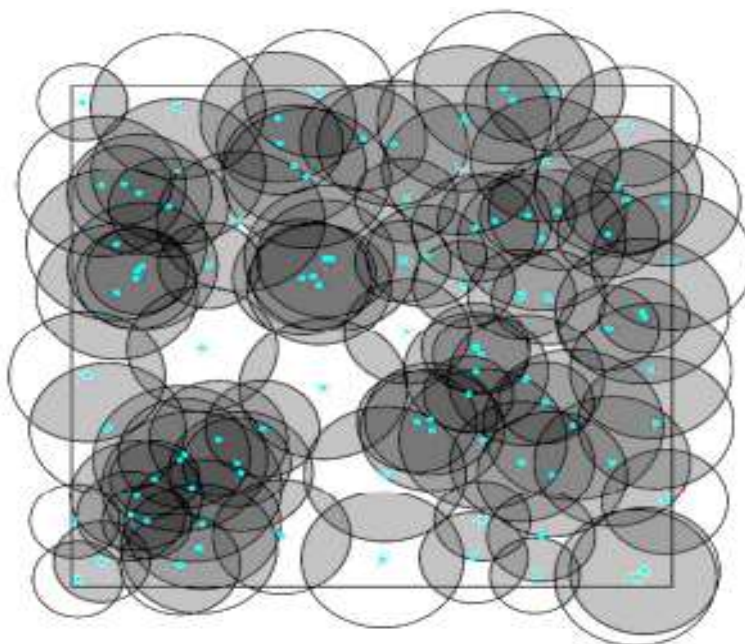
شکل (۴): شبکه قبل از اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفره‌های متفاوت (بزرگ)



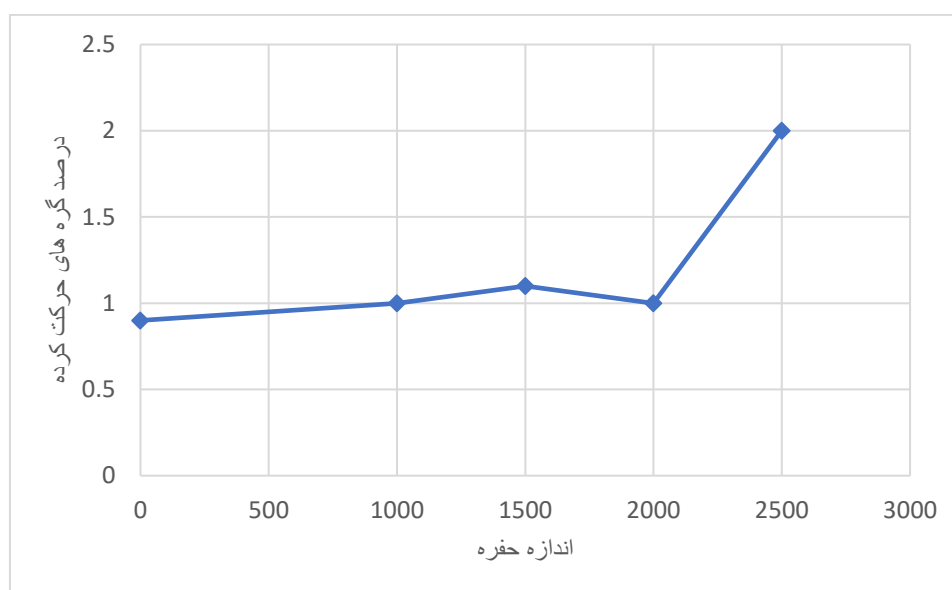
شکل (۵): شبکه در حال پوشش با حرکت گره‌های افزونه با اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفره‌های متفاوت (بزرگ)

روش پیشنهادی توانایی تشخیص و ترمیم حفره‌ها را با درصد تقریباً ۱۰۰٪ دارد و موجب بهبود پوشش کامل شبکه می‌شود. شکل (۷)، درصد متوسط حرکت گره‌های حرکت کرده را برای ترمیم حفره‌ها بر اساس اندازه حفره نشان می‌دهد. در این نمودار، مجموع فاصله حرکت گره‌ها نیز طبق اندازه حفره‌ها ارزیابی شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه حفره‌ها، به دلیل نیاز به تعداد بیشتری گره برای ترمیم حفره، فاصله حرکت گره‌ها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش فاصله

حرکت به دلیل افزایش تعداد گره‌های درگیر در فرآیند ترمیم است که باعث می‌شود هزینه‌های انرژی و زمان بیشتر شود؛ بنابراین، اندازه حفرة تأثیر مستقیمی بر عملکرد سیستم و کارایی فرآیند ترمیم دارد.



شکل (۶): پوشش کامل شبکه بعد از اجرای روش پیشنهادی با اندازه حفرة‌های متفاوت (کوچک)

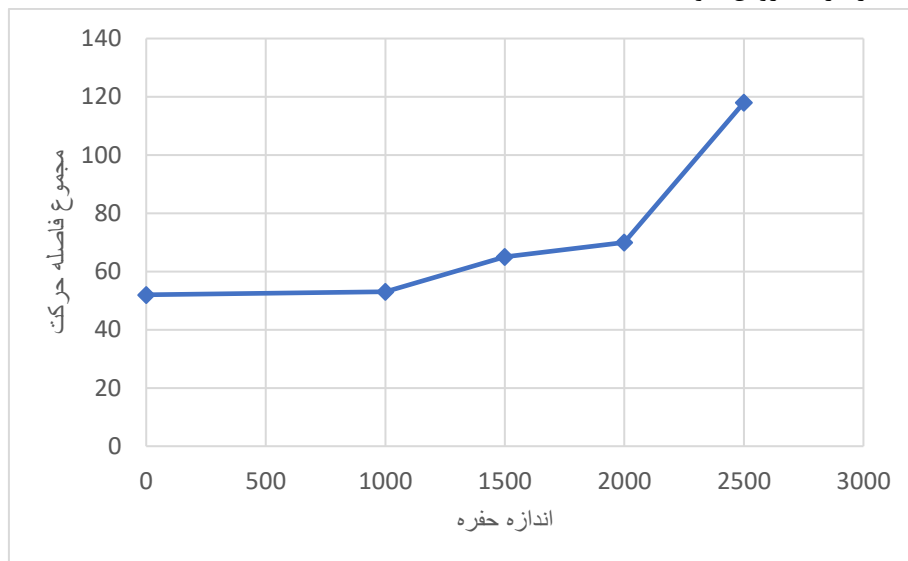


شکل (۷): نمودار متوسط درصد گره‌های حرکت کرده نسبت به اندازه حفرة در روش پیشنهادی

۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو، عملکرد روش پیشنهادی از نظر درصد پوشش شبکه با دو روش دیگر مقایسه می‌شود. در این مقایسه، گره‌های حسگر دارای شعاع حسگری یکسان هستند، اما انرژی اولیه آن‌ها محدود و متفاوت است. این تفاوت در انرژی اولیه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد گره‌ها در طول فرآیند ترمیم و پوشش شبکه داشته باشد. با توجه به محدودیت انرژی و تفاوت‌های آن در بین گره‌ها، این سناریو به بررسی کارایی روش‌های مختلف در شرایطی با ویژگی‌های مشابه می‌پردازد تا قابلیت اطمینان و

کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر ارزیابی شود. در این مقایسه، توجه ویژه‌ای به بهینه‌سازی مصرف انرژی و پوشش کامل شبکه در هر سه روش خواهد شد.



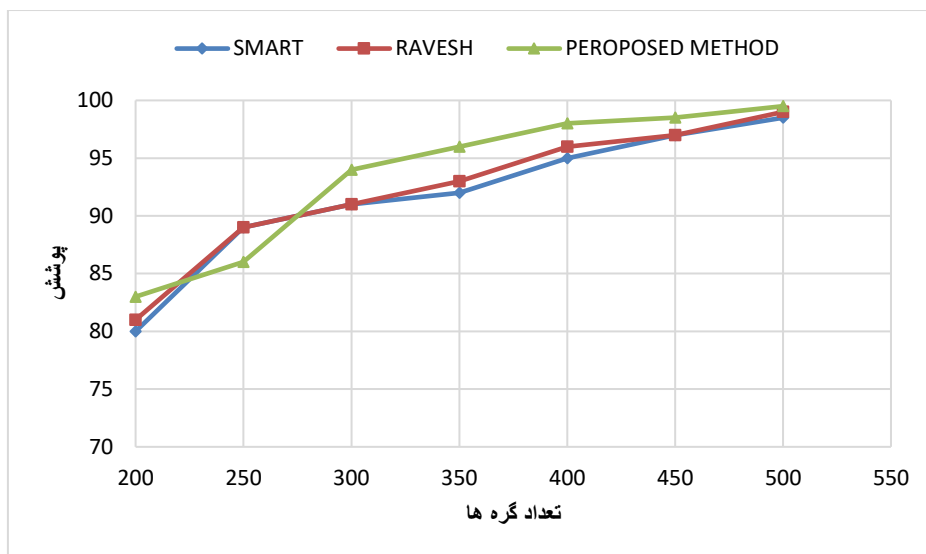
شکل (۸): نمودار مجموع فاصله حرکت گره‌ها نسبت به اندازه حفره در روش پیشنهادی

جدول (۳): پارامترهای شبیه سازی روش پیشنهادی در سناریو دوم

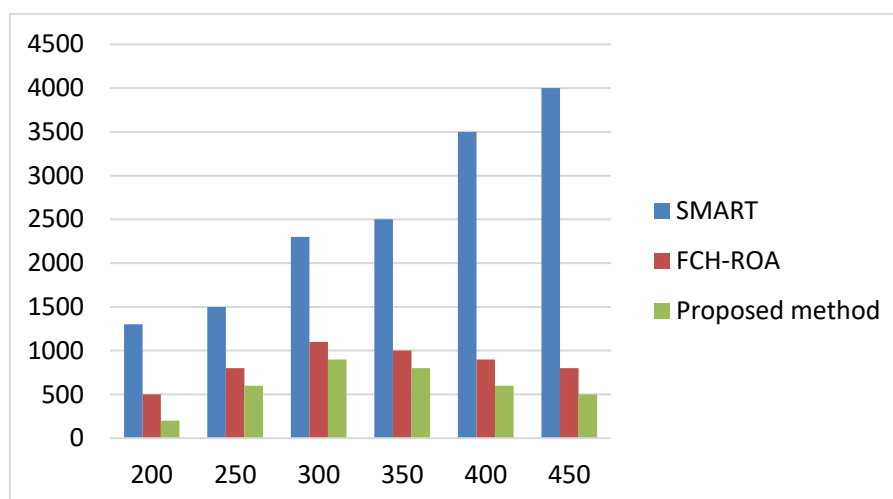
پارامتر	نماد	مقدار (واحد)
اندازه محیط	-	200 × 200
تعداد حسگرها	-	200-500
محدوده حسگری	R_s	10 m
محدوده ارتباطی	R_c	20 m

عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتم SMART [۱۴] و الگوریتم FCH-ROA [۵] مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم SMART به طور خاص بر تشخیص و ترمیم حفره‌هایی که به دلیل استقرار تصادفی گره‌ها به وجود می‌آیند، تمرکز دارد. در این مقایسه، روش پیشنهادی به دلیل انتخاب بهینه‌ترین گره از میان گره‌های افزونه کاندید برای حرکت به سمت ترمیم حفره، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. به طور خاص، زمانی که تعداد گره‌ها به ۳۰۰ می‌رسد، روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم SMART و FCH-ROA ارائه شده دارد. با افزایش تعداد گره‌ها در محیط، تعداد گره‌های افزونه نیز بیشتر می‌شود که در نتیجه اثر بخشی الگوریتم ترمیم حفره افزایش می‌یابد و درصد پوشش شبکه نیز بهبود پیدا می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بیشتر روش پیشنهادی در شرایط مختلف و به ویژه در محیط‌هایی با تعداد گره‌های زیاد است.

با توجه به نمودار (۱۰) مشاهده می‌شود که در نمودار مربوط به روش پیشنهادی، نسبت تعداد گره‌ها به فاصله حرکت در مقایسه با دو روش دیگر بهبود چشم‌گیری داشته است. در الگوریتم SMART، با افزایش تعداد گره‌ها، مجموع فاصله حرکت گره‌ها نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش فاصله به دلیل نیاز به حرکت بیشتر گره‌ها برای پوشش حفره‌ها است؛ اما در روش پیشنهادی، برای تعداد گره‌های بیشتر از ۳۰۰، مجموع فاصله حرکت کاهش می‌یابد. این کاهش فاصله حرکت نشان‌دهنده استفاده بهینه از گره‌های افزونه و کارایی بیشتر الگوریتم ترمیم حفره است که در مقایسه با روش‌های دیگر بهتر عمل کرده است. دلیل این بهبود، انتخاب بهینه گره‌ها برای حرکت و ترمیم حفره‌ها است که در نتیجه کارایی کلی شبکه را افزایش می‌دهد.



شکل (۹): نمودار مقایسه درصد پوشش نسبت به تعداد گره‌ها در روش پیشنهادی و الگوریتم SMART و FCH-ROA



شکل (۱۰): نمودار مقایسه مجموع فاصله حرکت گره نسبت به تعداد گره‌ها در الگوریتم SMART، FCH-ROA و روش پیشنهادی

جدول (۴): خلاصه معیارهای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی با دو روش دیگر

معیار ارزیابی	Smart	FCH-ROA	روش پیشنهادی
نرخ پوشش شبکه (%)	۹۱.۷۸	۹۲.۲۸	۹۳.۶۴
میانگین فاصله حرکت گره ها	۲۵۱۶	۷۷۸	۶۰۰

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با شبیه‌سازی روش پیشنهادی در دو سناریو مختلف، عملکرد آن در ترمیم حفرة‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر است حفرة‌ها را با دقت تقریباً ۱۰۰٪ شناسایی و ترمیم کند، همچنین عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم SMART و سایر روش‌ها در شرایط مختلف نشان داد. در سناریو اول، تاثیر اندازه حفرة‌ها بر فاصله حرکت گره‌ها و تعداد گره‌های درگیر بررسی شد و در سناریو دوم، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و دیگر الگوریتم‌ها انجام شد. نتایج به‌طور کلی بیانگر بهبود چشم‌گیر در پوشش شبکه و کاهش مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های دیگر است.

References

مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey", *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009.
- [3] R. Chowdhuri, M. K. D. Barma, "Enhancing Network Reliability: Exploring Effective Strategies for Coverage-Hole Analysis and Patching in Wireless Sensor Networks", *Wireless Personal Communications*, vol. 134, no. 1, pp. 487–517, 2024.
- [4] S. Dahiya, P. K. Singh, "Energy-efficient SOCGO protocol for scheduling hole repair nodes in reliable sensor systems", *Wireless Personal Communications*, vol. 110, no. 1, pp. 445–465, 2020.
- [5] P. Gu, J. Mao, F. Zhang, X. Jia, "Cover hole model reconstruction and cooperative repair optimization algorithm in heterogeneous wireless sensor networks", *Computer Communications*, vol. 153, pp. 614–625, 2020.
- [6] A. Halafi, A. Barati, H. Barati, "A Distributed Energy-Efficient Approach for Detecting and Recovering Coverage Holes in Wireless Sensor Networks Using the Grasshopper Optimization Algorithm", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 12, no. 2, p. 28, 2023.
- [7] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000, pp. 1-10.
- [8] R. Joon, P. Tomar, G. Kumar, B. Balusamy, A. Nayyar, "Unequal clustering energy hole avoidance (UCEHA) algorithm in cognitive radio wireless sensor networks (CRWSNs)", *Wireless Networks*, vol. 31, no. 1, pp. 735–757, 2025.
- [9] T. Kaur, D. Kumar, "A comprehensive survey on coverage problems and deployment techniques in wireless sensor networks", *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 166, p. 102705, 2020.
- [10] S. Olariu and I. Stojmenovic, "Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting", *IEEE International Conference on Computer Communications*, 2006, pp. 1–12.
- [11] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey", *Computer Networks*, vol. 67, pp. 104–122, 2014.
- [12] K. Ravikumar, M. Mathivanan, A. Muruganandham, and L. Raja, "Attentive Dual Residual Generative Adversarial Network for Energy-Aware Routing Through Golden Search Optimization Algorithm in Wireless Sensor Network Utilizing Cluster Head Selection", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 36, no. 1, p. e70035, 2025.
- [13] Y. Wang, S. Wu, Z. Chen, and X. Gao, "Coverage hole detection and repair in wireless sensor networks: A survey", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 10, p. 1550147717739146, 2017.
- [14] S. Yang, M. Li, and J. Wu, "Scan-based movement-assisted sensor deployment methods in wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 1108–1121, Aug. 2007.
- [15] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey", *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.

زیر نویس‌ها:

1. Wireless Sensor Networks
2. Energy Holes
3. Coverage Holes
4. Multi-hop
5. Energy-Aware Routing
6. Energy Harvesting
7. Hole Repair Algorithms
8. Redundant Nodes
9. Hot Spots