



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 1, 2024
pp. 91-106
Research Paper

ARPDA: Petal-shaped Data Aggregation in Wireless Sensor Networks Using Mobile Sink and Ant Colony Optimization Algorithm

Anis Jari¹, Avid Avokh^{*1,2}

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Digital Processing and Machine Vision Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

Simultaneous use of an efficient routing protocol and mobile sink not only prevents rapid sensor energy depletion but also effectively improves the energy balance in wireless sensor networks. In this paper, a new data aggregation method is proposed called “Ant colony-based Routing and Petal-shaped Data Aggregation (ARPDA)”, which includes clustering, Cluster Head (CH) selection, intra-cluster routing, determining polling points, and designing the sink node trajectory. In the proposed method, the network is divided by several virtual concentric circles that are equidistant from each other. The intersection point of these circles with the virtual lines passing through the origin of the network determines the probable polling points for the sink node. First, by efficiently clustering the sensor nodes and forming an intra-cluster routing tree based on the ant colony optimization algorithm, the sensor data is aggregated in CHs; then, by selecting the appropriate polling points and designing a petal-shaped path, the sink node periodically collects the aggregated data in CHs based on two linear and circular movements. Considering the sink movement in the CH selection process is another advantage of the proposed algorithm. Numerical results confirm the better performance of the proposed algorithm compared to the EDT algorithm.

Keywords: Ant Colony Optimization Algorithm, Delay, Mobile Sink, Petal-Shaped Trajectory, Wireless Sensor Networks.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2023.129787.1494>

تجمیع گلبرگ گونه داده در شبکه‌های حسگر بی سیم با استفاده همزمان از گره چاهک

متحرک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه

انیس جاری^۱، آوید آوخ^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

a.jari@sel.iaun.ac.ir

۲- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد،

ایران

aavokh@pel.iaun.ac.ir

چکیده: استفاده همزمان از یک روش مسیریابی کارآمد و گره چاهک متحرک در شبکه‌های حسگر بی سیم، علاوه بر اینکه از تخلیه سریع انرژی حسگرها جلوگیری می‌کند، توازن مصرف انرژی را در فرآیند تجمیع داده به صورت مؤثری بهبود می‌بخشد. در این مقاله، روش جدیدی برای تجمیع داده حسگرها موسوم به «جمع‌آوری گلبرگ گونه داده مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچه» پیشنهاد می‌شود که همزمان به خوشه‌بندی، تعیین سرخوشه، مسیریابی درون‌خوشه‌ای، تعیین نقاط توقف گره چاهک و طراحی مسیر حرکت گره چاهک می‌پردازد. در این روش، شبکه توسط دوایر متحدالمرکز فرضی فراز می‌شود که در فواصل مساوی از هم قرار دارند. محل برخورد این دوایر با خطوط فرضی عبوری از مبدأ، نقاط توقف مجاز چاهک را مشخص می‌کند. ابتدا با خوشه‌بندی کارآمد گره‌های حسگر و تشکیل درخت مسیریابی مبتنی بر یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه بهبودیافته در هر خوشه، داده حسگرها در سرخوشه متناظر تجمیع می‌شود. سپس با انتخاب نقاط توقف مناسب و طراحی یک مسیر گلبرگ گونه، گره چاهک براساس دو حرکت خطی و کمانی، داده تجمیع شده در سرخوشه‌ها را جمع‌آوری می‌کند. در نظر گرفتن ملاحظات حرکت گره چاهک در فرآیند تعیین سرخوشه از دیگر قابلیت‌های روش پیشنهادی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های EDT، EMPAR و EGRPM هستند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه، تأخیر، چاهک متحرک، حرکت گلبرگ گونه، شبکه حسگر بی سیم

۱- مقدمه

یک گره چاهک ثابت، الگوی ترافیکی چندبه‌یک حاکم است. در واقع، حسگرهای مختلف پس از سنجش کمیتی از محیط و انجام پردازش‌های محلی، داده‌های خود را با استفاده از یک الگوریتم مسیریابی به گره چاهک ارسال می‌کنند؛ بنابراین، حسگرهای نزدیک به گره چاهک، مسئولیت خطیری در دریافت، تجمیع و ارسال داده سایر حسگرها بر عهده دارند. این مسأله باعث می‌شود این گره‌ها با سرعت بیشتری انرژی خود را از دست بدهند و نتوانند به فعالیت خود ادامه دهند. در این حالت، ارتباط چاهک با سایر گره‌های شبکه، قطع و شبکه دچار دوپارگی یا چندپارگی می‌شود. این در حالی است که مصرف عادلانه

مسأله حفره انرژی یکی از عوامل اصلی محدودیت طول عمر شبکه‌های حسگر بی سیم (WSNs) محسوب می‌شود [۱]. مطابق شکل ۱، در شبکه‌های سستی مبتنی بر

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

نام نویسنده مسئول: آوید آوخ

نشانی نویسنده مسئول: ایران، نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی برق

مناسب در کنار تعیین کارآمد مسیر گره چاهک متحرک و نقاط توقف آن به بهبود چشمگیر تأخیر و مصرف انرژی در شبکه منجر می‌شود. یکی از نقاط ضعف کارهای اخیر، توجه نکردن به این مهم در فرایند جمع‌آوری داده در شبکه است [۶-۸]. به این منظور، در این مقاله، الگوریتم کارآمدی موسوم به «جمع‌آوری گلبرگ گونه داده مبتنی بر الگوریتم ACO (ARPD)» ارائه می‌شود که به‌طور همزمان به خوشه‌بندی، تعیین سرخوشه، مسیریابی درون خوشه‌ای مبتنی بر الگوریتم ACO، تعیین نقاط توقف گره چاهک و طراحی مسیر حرکت گره چاهک می‌پردازد. در روش پیشنهادی، پس از خوشه‌بندی مناسب شبکه و تعیین سرخوشه‌ها، هر گره داده خود را از طریق یک درخت مسیریابی به سرخوشه ارسال می‌کند. در تعیین سرخوشه، علاوه بر مسأله انرژی، ملاحظات در ارتباط با حرکت چاهک نیز در نظر گرفته می‌شود. درخت مسیریابی در هر خوشه به شیوه‌ای ساخته می‌شود که ضمن کاهش مصرف انرژی، به توازن بار در خوشه منجر شود. شبکه به‌صورت فرضی به خطوط و دوابر متحدالمرکزی افزای می‌شود و براساس آنها و با توجه به موقعیت سرخوشه‌ها، مسیر حرکت گره چاهک به شیوه‌ای تعیین می‌شود که مصالحه بین مصرف انرژی و تأخیر برقرار شود. از دیگر قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی استفاده از حداقل تعداد نقطه توقف برای جمع‌آوری داده سرخوشه‌ها است.

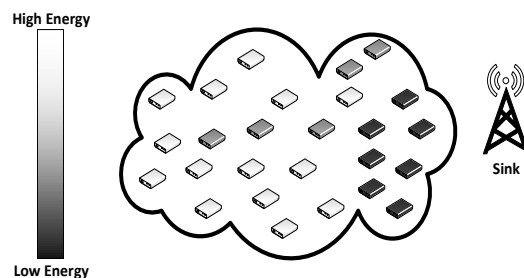
ساختار این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲، کارهای مرتبط پیشین مرور می‌شود. مدل شبکه و مفروضات را می‌توان در بخش ۳ دنبال کرد. در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی مفصل تشریح می‌شود. بخش ۵، به شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی می‌پردازد. در نهایت، نتایج حاصل از این مقاله در بخش ۶ ارائه خواهند شد.

۲- کارهای پیشین

به‌تازگی تحقیقات جدیدی در ارتباط با استفاده از چاهک متحرک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه در شبکه‌های حسگر بی سیم ارائه شده است. در این بخش، ابتدا مرور جداگانه‌ای بر کارهای مرتبط با هر دو مسأله

انرژی توسط همه حسگرها، مرگ اولین گره را به تعویق می‌اندازد و طول عمر شبکه را بهبود می‌بخشد. در این ارتباط، استفاده از گره چاهک متحرک ایده کارآمدی است که کمک شایانی به کاهش مصرف انرژی و توازن بار بهتر در شبکه می‌کند [۲، ۳].

یک چاهک متحرک، حرکت خود را از نقطه‌ای در شبکه، آغاز و با توقف در نقاطی از پیش تعیین شده، داده حس شده توسط گره‌ها را جمع‌آوری می‌کند. مسلماً تعیین نقاط توقف^۲ و طراحی مسیر حرکت چاهک، نقش مهمی در تأخیر جمع‌آوری داده و مصرف انرژی در شبکه دارد.



شکل (۱): مسأله حفرة انرژی در شبکه‌های حسگر بی سیم سستی

تعامل مستقیم چاهک با هریک از حسگرها، با کاهش مصرف انرژی آنها همراه است؛ اما این راهکار به مسیرهای طولانی برای حرکت گره چاهک در شبکه منجر می‌شود. این در حالی است که تلفیق روش‌های مدرن و سستی برای جمع‌آوری داده همچون استفاده همزمان از چاهک متحرک و خوشه‌بندی می‌تواند مصالحه‌ای بین مصرف انرژی و تأخیر برقرار کند. براساس این، گره‌های حسگر به شکل مناسبی خوشه‌بندی می‌شوند و داده‌های خود را از طریق یک درخت مسیریابی درون خوشه‌ای کارآمد برای سرخوشه^۳ (CH) ارسال می‌کنند. حال، چاهک به‌جای تعامل مستقیم با حسگرها، با پیمودن مسیر کوتاه‌تری، داده تجمیع شده در سرخوشه‌ها را جمع‌آوری می‌کند؛ بنابراین، تأخیر حرکت چاهک به شکل چشمگیری کاهش خواهد یافت.

به‌تازگی تحقیقات مختلفی در زمینه استفاده از گره چاهک متحرک در شبکه‌های حسگر بی سیم ارائه شده‌اند [۴، ۵]؛ اما بهره‌گیری همزمان از یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه^۴ (ACO) اصلاح شده و یک خوشه‌بندی

نتیجه را از طریق سرخوشه‌های نزدیک به مسیر حرکت گره چاهک یا حسگرهایی که در فاصله تک‌پرسی این مسیر قرار دارند، به گره چاهک ارسال می‌کنند. مرجع [۱۴]، از مزایای استفاده همزمان از خوشه‌بندی و گره‌های چاهک متحرک بهره می‌برد. در ابتدا مسیر حرکت گره‌های چاهک، با تقسیم ناحیه مدنظر به چندین زیرناحیه نابرابر و محاسبه میانگین انرژی باقی‌مانده حسگرهای هر قسمت تعیین می‌شود. سپس خوشه‌بندی حسگرها با استفاده از پروتکل توزیع‌شده نابرابر مبتنی بر منطق فازی انجام می‌گیرد؛ به‌طوری‌که تعداد خوشه‌های نزدیک به مسیر حرکت گره‌های چاهک بیشتر خواهد بود. الگوریتم پیشنهادی به افزایش طول عمر شبکه و رفع مشکل حفره انرژی در شبکه‌های مقیاس بزرگ منجر می‌شود. مطالعه تحقیقاتی ارائه‌شده در [۱۵] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسأله فروشنده دوره‌گرد را به‌منظور تعیین حرکت چاهک متحرک حل می‌کند. امکان تجمیع دادگان بافرشده چندین سرخوشه در یک نقطه توقف و همچنین، نگاه همزمان به دو مسأله انرژی و تأخیر در قالب یک مسیر گلبرگ‌گونه چاهک از مهم‌ترین تفاوت‌های روش پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با [۱۵] است.

نویسندگان در [۱۶]، استفاده از گره‌های چاهک متحرک مجهز به چند کارت رادیویی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد می‌دهند که در آن با به‌کارگیری از یک مدل MILP مناسب، حرکت گره‌های چاهک و نقاط توقف آنها طراحی می‌شود. در ابتدا شبکه به‌طور وقفی به چندین زیربخش تقسیم می‌شود و هر گره چاهک در بخش متناظر خود حرکت می‌کند. سپس در نقاطی برای جمع‌آوری داده‌های بافرشده در سرخوشه‌ها توقف می‌کند. زمان‌بندی دریافت داده‌های بافرشده از دیگر نقاط قوت این کار تحقیقاتی قلمداد می‌شود. مؤلفان نشان می‌دهند برخورداری گره چاهک از چند رادیو، با کاهش چشمگیر تأخیر جمع‌آوری داده همراه است. در [۱۷] با هدف بهره‌گیری از گره چاهک متحرک، شبکه به سلول‌های مشبکی تقسیم و برای هر یک، سرسولولی انتخاب می‌شود. مسیر حرکت گره چاهک با چرخه همیلتونی طراحی می‌شود؛ درنهایت، سلول‌های مجاور داده‌های خود را به‌صورت تک‌پرسی برای گره چاهک ارسال می‌کنند. مراجع [۱۸] و [۱۹]، استفاده از

خواهیم داشت. سپس، تحقیقاتی که از الگوریتم ACO در جمع‌آوری داده مبتنی بر چاهک متحرک استفاده کرده‌اند را به‌طور اجمالی مطالعه می‌کنیم.

۲-۱- استفاده از گره چاهک متحرک

مراجع [۹،۱۰]، مسأله انتخاب مناسب نقاط ملاقات^۶ در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مجهز به گره چاهک متحرک را بررسی می‌کنند. در [۹]، ابتدا با فرمول‌بندی مسأله براساس انرژی گره‌های حسگر، معیاری برای تعیین نقاط ملاقات مناسب از میان گره‌ها ارائه می‌شود. سپس با تعریف یک حد آستانه، نقش این نقاط را تغییر می‌دهد. درنهایت، با استفاده از الگوریتم فروشنده دوره‌گرد^۷، مسیر حرکت گره چاهک در شبکه را مشخص می‌کند. در [۱۰]، از چاهک متحرک به‌منظور کاهش انرژی مصرفی و کاهش نرخ از دست رفتن بسته‌های داده استفاده می‌شود. این مرجع، الگوریتم کارآمدی موسوم به PSOBS^۸ ارائه می‌دهد که مشتمل بر دو فاز است. در فاز اول الگوریتم، نقاط ملاقات براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به‌صورتی تعیین می‌شوند که استفاده مناسب‌تری از منابع شبکه حاصل شود. سپس در فاز دوم، یک مسیر کارآمد از بین این نقاط برای حرکت گره چاهک طراحی می‌شود. مرجع [۱۱]، با تقسیم شبکه به چند سلول، از دو چاهک استفاده می‌کند. براساس ارتباط بین هر سلول و چاهک‌های موجود، سلول‌ها به دو دسته سلول با ارتباط تک‌پرسی و سلول با ارتباط چندپرسی تقسیم می‌شوند. هر یک از چاهک‌ها روی مسیرهای لوزی شکل هم‌مرکز به‌گونه‌ای حرکت می‌کنند که همزمان، نیمی از شبکه را پوشش دهند. سپس از طریق مخابرات تک‌پرسی یا چندپرسی به تجمیع داده حسگرها می‌پردازند.

در [۱۲،۱۳]، با هدف کاهش تأخیر و مصرف انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم، از تئوری نمونه‌برداری فشرده، خوشه‌بندی و گره چاهک متحرک به‌صورت همزمان استفاده می‌شود. مرجع [۱۳]، با در نظر گرفتن چند توپولوژی خاص، تحلیلی به‌منظور تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها ارائه می‌دهد. در این مرجع، گره چاهک در یک مسیر ثابت به‌صورت متناوب در حرکت است. هر حسگر داده خود را بدون فشرده‌سازی به سرخوشه متناظر ارسال می‌کند. گره‌های سرخوشه نیز پس از تجمیع داده اعضای خود،

نظر گرفتن سه معیار انرژی باقی مانده حسگرها، تعداد حسگرهای همسایه هر گره و فاصله آن تا گره چاهک سرخوشه را تعیین می‌کنند. سپس در فاز دوم، از الگوریتم ACO به منظور ایجاد زنجیری مشابه روش PEGASIS^{۱۱} بین سرخوشه‌ها و گره چاهک استفاده می‌شود. مرجع [۲۶] با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه، پارامترهای زاویه و فاصله بین حسگرها را در الگوریتم کلونی مورچه به کار می‌گیرد. یک مورچه تعمیرکار در مسیرهای تصادفی برای شناسایی حسگرها با سطح انرژی زیر یک آستانه مشخص فرستاده می‌شود. سپس مسیر ارتباطی براساس انرژی باقی مانده گره‌ها به‌روزرسانی می‌شود؛ به طوری که حالت بهینه خود را حفظ کند.

۲-۳- استفاده همزمان از ACO و گره چاهک

متحرک

در کنار مراجع توصیف شده، به تازگی مطالعاتی نیز به استفاده همزمان از گره چاهک متحرک و الگوریتم ACO روی آورده‌اند؛ برای مثال، مؤلفان در [۲۷] ابتدا از تئوری بازی به منظور تعیین نقاط ملاقات مناسب در شبکه حسگر بی سیم استفاده می‌کنند. به منظور تعیین بهترین نقاط ملاقات، تمامی حسگرها امکان شرکت در تئوری بازی را دارند. حسگری با بالاترین میزان بار تجمیع شده و انرژی باقی مانده، در فرایند تعیین نقاط ملاقات برنده می‌شود. انتخاب مؤثر این نقاط، گره چاهک را قادر می‌کند بدون طی مسافت‌های طولانی به تجمیع داده حسگرها بپردازد. سپس با به کارگیری ACO، مسیر کارآمدی برای حرکت گره چاهک و تجمیع داده در شبکه طراحی می‌شود. مرجع [۲۸] استفاده از خوشه‌بندی و گره‌های چاهک متحرک را به عنوان روشی برای حل چالش‌های شبکه‌های حسگر بی سیم مطرح می‌کند. این مرجع ابتدا با استفاده از الگوریتم LEACH^{۱۲} بهبودیافته، به خوشه‌بندی و تعیین سرخوشه‌ها در شبکه می‌پردازد. سپس با استفاده از مسیریابی مبتنی بر ACO، مسیرهای مناسبی برای حرکت گره‌های چاهک در شبکه ارائه می‌دهد. در این راستا، خوشه‌ها در چندین دسته تقسیم‌بندی می‌شوند و هر دسته، به یک گره چاهک

چندین گره چاهک به همراه خوشه‌بندی را یک روش کارآمد برای حل چالش طول عمر در شبکه‌های حسگر بی سیم برمی‌شمارند؛ به طوری که روش پیشنهادی در [۱۸] با امتیازدهی گره‌ها به انتخاب سرخوشه‌ها می‌پردازد. سپس با تقسیم‌بندی شبکه، هر چاهک متحرک را به یک قسمت تخصیص می‌دهد.

نویسندگان در [۲۰] با اشاره به کاربردهای شبکه‌های حسگر، ابتدا به خوشه‌بندی شبکه با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌پردازند. سپس تعداد بهینه نقاط توقف گره چاهک را محاسبه می‌کنند و براساس آن، مسیر کارآمدی را برای جمع‌آوری داده سرخوشه‌ها در شبکه پیشنهاد می‌دهند. مرجع [۲۱] ابتدا به خوشه‌بندی حسگرها و انتخاب سرخوشه‌های آنها با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی عقاب طاس می‌پردازد. سپس با بهره‌گیری از یک شبکه عصبی ترکیبی، مسیر حرکت گره چاهک را در میان نقاط توقف از قبل تعیین شده طراحی می‌کند.

۲-۲- مسیریابی مبتنی بر ACO

در [۲۲] با ارائه الگوریتم کارآمدی موسوم به EAACA^{۱۳}، از روش ACO به منظور انتخاب کوتاه‌ترین مسیر از حسگر مبدأ تا گره چاهک استفاده می‌شود. بدین منظور، از دو معیار فاصله بین حسگر بعدی تا گره چاهک و انرژی باقی مانده آن حسگر استفاده شده است. نویسندگان مرجع [۲۳] نیز از معیار فاصله و دو معیار انرژی (انرژی باقی مانده حسگرها و انرژی مورد نیاز برای ارسال با استفاده از پیوند ایجادشده) در تابع احتمال الگوریتم ACO استفاده می‌کنند. در این مرجع، با تلفیق انرژی مصرفی حسگرها و گام‌های موجود در مسیر انتخابی، روش جدیدی به منظور به‌روزرسانی فرمون^{۱۴} مورچه‌ها پیشنهاد شده است. در [۲۴]، الگوریتم کارآمدی مبتنی بر روش ACO به منظور مسیریابی داده در شبکه‌های حسگر بی سیم پیشنهاد می‌شود. در این الگوریتم با بهبود تابع احتمال، در نظر گرفتن فاصله ارتباطی، جهت ارسال داده و انرژی باقی مانده حسگرها، مسیر بهینه‌ای از حسگر مبدأ تا حسگر مقصد شکل می‌گیرد. نویسندگان در مرجع [۲۵] یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر خوشه را پیشنهاد می‌کنند. آنها در فاز اول الگوریتم با در

سرخوشه‌های بهینه را انتخاب می‌کنند و سپس کوتاه‌ترین مسیر حرکت گره چاهک را ارائه می‌دهند.

۳- مدل شبکه و مفروضات

شبکه حسگر بی‌سیمی مشتمل بر N گره همگن ثابت و یک گره چاهک متحرک را در نظر بگیرید. در این مقاله، فرض بر یک معماری دو سطحی برای شبکه است که در سطح اول، حسگرهای کاملاً مشابه به‌طور تصادفی در ناحیه مربعی به ضلع A متر توزیع می‌شوند. این گره‌ها پس از خوشه‌بندی در قالب N_c خوشه، داده‌های سنجش شده خود را از طریق یک درخت مسیریابی مناسب برای سرخوشه خود ارسال می‌کنند. سطح دوم شبکه مشتمل بر سرخوشه‌ها و گره چاهک است. شبکه توسط C دایره فرضی $\frac{A}{2C}$ متحدالمرکزی افراز می‌شود که در فواصل مساوی $2C$ از هم قرار دارند. محل برخورد این دوایر با خطوط فرضی عبوری از مبدأ در زوایای $[0, \theta, 2\theta, \dots]$ نقاط توقف مجاز گره چاهک را مشخص می‌کند. چاهک، حرکت خود را با سرعت v از مرکز شبکه آغاز می‌کند و با توقف در نقاط منتخب، داده‌های تجمیع شده در سرخوشه‌ها را دریافت می‌کند. شایان ذکر است چاهک، مجاز به پیمودن دو حرکت کمانی و خطی به ترتیب روی دوایر فرضی و خطوط فرضی مدنظر است.

برای روشن‌تر شدن مسأله، شکل ۲، مثالی از حرکت چاهک در شبکه‌ای مشتمل بر سه دایره را به تصویر می‌کشد که خطوط فرضی آن در زوایای 0° ، 90° و 270° در نظر گرفته شده‌اند. هریک از نقاط ۱ تا ۱۲، محلی برای توقف چاهک محسوب می‌شوند؛ هرچند طبق مسیر، فقط نقاط خاکستری ۱۱، ۲، ۹، ۵ و ۸ برای توقف این گره و جمع‌آوری داده انتخاب شده‌اند.

طول مسیر حرکت به‌عنوان عامل تعیین‌کننده در تأخیر شبکه لحاظ می‌شود. دو نقطه متوالی i و j را روی کمان یک دایره در نظر بگیرید. چاهک برای پیمودن مسیر کمانی بین این دو نقطه باید مسافتی به طول $r_{i,j} \times \phi_{i,j}$ را طی کند که

تخصیص می‌یابد. هر چاهک پس از تجمیع داده‌های سرخوشه‌های متناظرش به مکان اولیه خود برمی‌گردد.

مؤلفان در [۲۹] با ارائه دو الگوریتم ابتکاری به‌دنبال حفظ تعادل بین تأخیر و مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مجهز به گره چاهک متحرک هستند. برخلاف رویکرد این مقاله، آنها برای تجمیع داده‌های سنجش شده در شبکه پیشنهاد می‌کنند گره چاهک در نزدیکی همه گره‌های سرخوشه توقف کند. این در حالی است که کاهش تعداد نقاط توقف می‌تواند ضمن کاهش تأخیر شبکه، به کاهش پیچیدگی مسأله نیز منجر شود. همچنین، آنها از ACO به‌منظور تعیین مسیر حرکت چاهک بهره می‌برند. این در حالی است که طرح پیشنهادی در این مقاله با در نظر گرفتن همزمان دو معیار انرژی و موقعیت نقاط توقف کاندید، از ACO برای مسیریابی و جمع‌آوری داده درون خوشه‌ها و برای تور چاهک از یک حرکت گلیبرگ‌گونه ابتکاری بهره می‌گیرد. در [۳۰]، با هدف کاهش اتلاف داده و بهبود طول عمر شبکه، از تعمیمی از الگوریتم ACO مبتنی بر گره چاهک متحرک استفاده می‌شود. بدین منظور، یک مسیر از پیش تعیین شده برای حرکت گره چاهک، طراحی و مسأله انتخاب نقاط توقف از میان حسگرها عنوان می‌شود. هدف اصلی، انتخاب دقیق نقاط توقف به صورتی است که با کاهش تعداد ارسال‌ها، میزان مصرف انرژی در شبکه کاهش یابد.

طرح پیشنهادی در [۳۱]، الگوریتم مسیریابی کلونی مورچه مبتنی بر چند گره چاهک را برای تجمیع مطمئن داده‌های یک شبکه حسگر بی‌سیم ارائه می‌دهد. از ویژگی‌های این طرح می‌توان به مقاوم‌بودن در برابر خطا و کارآمدی در انتقال داده قابل اعتماد در صورت مواجهه با یک مسیر معیوب اشاره کرد. نویسندگان در [۳۲] ضمن اشاره به NP-hard بودن مسأله طراحی مسیر حرکت گره چاهک، استفاده از این گره را در شبکه روشی مؤثر برای افزایش اتصال شبکه بیان می‌کنند. آنها با در نظر گرفتن همزمان مسیریابی مبتنی بر خوشه و گره چاهک متحرک، یک مسیر کارآمد برای حرکت این گره با استفاده از الگوریتم ACO پیشنهاد می‌دهند. در این راستا، به‌منظور کاهش تأخیر و تعادل مصرف انرژی در شبکه، ابتدا

در آن مجموعه رئوس $V = \{1, 2, \dots, N+1\}$ شامل N حسگر و یک چاهک متحرک و مجموعه یال‌های E بیان‌کننده پیوندهای بی سیم بین گره‌های شبکه‌اند. پیوند (x, y) بین دو گره $x \in V$ و $y \in V$ به این معنی است که دو حسگر در برد مخابراتی یکدیگر قرار دارند و می‌توانند به‌طور مستقیم تبادل داده کنند. همچنین، فرض بر آن است که از پروتکل IEEE802.15.4 برای زمان‌بندی در ارسال داده حسگرها بهره گرفته می‌شود.

در این مقاله، برای محاسبه میزان انرژی مصرفی گره‌ها از مدل معروف رادیویی مرتبه اول استفاده می‌شود [۳۳]. براساس این مدل، انرژی لازم برای ارسال و دریافت داده به ترتیب از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$E_{TX}(L, d) = E_{elec} \times L + E_{amp} \times L \times d^2, \quad (3)$$

$$E_{RX}(L) = E_{elec} \times L, \quad (4)$$

که $E_{TX}(L, d)$ بیان‌کننده انرژی مصرفی برای ارسال بسته L بیتی روی پیوندی به طول d متر است و $E_{RX}(L)$ انرژی برای دریافت یک بسته L بیتی را نشان می‌دهد. همچنین، E_{elec} و E_{amp} به ترتیب انرژی ارسال یا دریافت توسط مدارات الکتریکی و انرژی مصرفی تقویت‌کننده‌های انتقال‌اند.

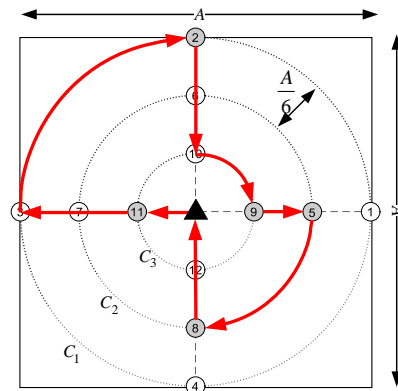
تعامل مستقیم چاهک با حسگرها با کاهش مصرف انرژی آنها همراه است؛ اما به مسیرهای طولانی‌تر و تعداد نقطه توقف بیشتر برای چاهک منجر می‌شود؛ بنابراین، لازم است کنار مصرف انرژی، تعداد توقف چاهک نیز لحاظ شود. بدین منظور، از معیار «ناکارآمدی شبکه» (NI) استفاده می‌شود که به صورت ضرب کل مصرف انرژی در تعداد نقاط توقف گره چاهک تعریف شده و بیان‌کننده مصالحه بین این دو عامل است:

$$NI = E_T \times |stop| \quad (5)$$

که در آن، E_T و $|stop|$ به ترتیب کل انرژی مصرفی توسط گره‌ها و تعداد نقاط توقف گره چاهک‌اند. بدیهی

شعاع دایره متناظر و $\varphi_{i,j}$ زاویه کمان متصل‌کننده دو نقطه i و j است. این در حالی است که اگر نقاط توقف متوالی روی خطوط فرضی واقع باشند، چاهک مسیر خطی به فاصله اقلیدسی دو گره را می‌پیماید. بدین ترتیب، کل مسافت طی شده توسط چاهک (D^t) با جمع مسافت مربوط به هر یک از حرکت‌های کمانی و خطی آن به دست می‌آید؛ بنابراین، برای تأخیر کل حرکت گره چاهک (T) می‌توان نوشت:

$$T = \frac{D^t}{v} \quad (1)$$



شکل (۲): مثالی از حرکت گره چاهک براساس مدل پیشنهادی

برای مثال، تأخیر چاهک در شکل ۲ ناشی از ۳ حرکت کمانی (۲ و ۳)، (۳ و ۴)، (۹ و ۱۰) و (۵ و ۸) و ۵ حرکت خطی (۱۱ و چاهک)، (۳ و ۴)، (۱۱ و ۱۰)، (۲ و ۱۰)، (۱۱ و ۳) و (چاهک و ۸) است که با فرض $v = 1 \frac{m}{s}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{A}{6} + \frac{A}{3} + \frac{A}{4} + \frac{A}{3} + \frac{A}{12} + \frac{A}{6} + \frac{A}{6} + \frac{A}{3} \quad (2)$$

حرکت خطی (چاهک و ۸) حرکت خطی (۵ و ۸) حرکت خطی (۱۰ و ۹) حرکت خطی (۱۱ و ۳) حرکت خطی (۲ و ۱۰) حرکت کمانی (۳ و ۴) حرکت کمانی (۱۱ و ۱۰) حرکت خطی (چاهک و ۸)

گره‌های شبکه مجهز به آنتن‌های همه‌جته هستند. براساس این، شبکه توسط گراف $G(V, E)$ مدل می‌شود که

است کوچک‌تر بودن NI بیان‌کننده عملکرد بهتر شبکه است.

۴- الگوریتم ARPDA

در این بخش، الگوریتم ARPDA به‌منظور کاهش همزمان مصرف انرژی و تأخیر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مجهز به گره چاهک متحرک به‌طور جامع معرفی می‌شود. این الگوریتم در سه فاز متوالی، در دو سطح شبکه اجرا می‌شود.

۴-۱- فاز اول: خوشه‌بندی و انتخاب سرخوشه

در فاز اول، حسگرها خوشه‌بندی و برای هر خوشه، یک سرخوشه مناسب انتخاب می‌شود. با هدف سادگی و تطابق مسأله با مدل رادیویی مرتبه اول، از روش K-means برای تشکیل خوشه‌های شبکه استفاده می‌شود؛ به‌طوری‌که مجموع فاصله حسگرها تا مرکز خوشه کمینه شود. بدین منظور، ابتدا N_c نقطه تصادفی به‌عنوان مراکز خوشه انتخاب می‌شوند. سپس تمامی حسگرها، فاصله اقلیدسی خود را تا این نقاط محاسبه می‌کنند. هر حسگر به خوشه‌ای می‌پیوندد که کوتاه‌ترین فاصله را تا مرکز مربوطه داشته باشد. با میانگین‌گیری روی فاصله بین نقاط متعلق به هر خوشه، برای هر خوشه، نقاط جدیدی به‌عنوان مرکز انتخاب می‌شوند. با تکرار این فرایند تا یکسان‌شدن مراکز خوشه‌ها در دو تکرار متوالی، خوشه‌بندی نهایی شبکه محقق خواهد شد. با توجه به عدم تحرک حسگرها، خوشه‌بندی شبکه ثابت است و صرفاً یک‌بار پس از چیدمان گره‌ها اجرا می‌شود. این در حالی است که نقش سرخوشه در هر خوشه، دوره به دوره به‌صورت وقتی تغییر می‌کند تا علاوه بر متعادل‌شدن مصرف انرژی حسگرها، طول مسیر حرکت چاهک نیز حداقل شود.

با توجه به نقش خطیر سرخوشه در تجمیع داده اعضای خود و ارسال نتیجه به گره چاهک، این گره نسبت به سایر حسگرهای خوشه، انرژی بیشتری مصرف می‌کند. هرچه یک حسگر انرژی باقی‌مانده بیشتری داشته باشد کاندید شایسته‌تری برای ایفای نقش سرخوشه محسوب می‌شود؛ همچنین، بررسی تعداد نقاط توقف همسایگی در یک حسگر می‌تواند عامل مؤثری برای کاهش تأخیر ناشی از

حرکت گره چاهک باشد؛ زیرا احتمال انتخاب نقاط توقف مشترک بین سرخوشه‌ها افزایش می‌یابد. این امر، به حذف بخش‌های غیرضروری مسیر منجر می‌شود و تأخیر حرکت چاهک کاهش می‌یابد. در هر خوشه s ، گره‌ای به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود که:

$$CH(s) = \arg \max_{n \in M(s)} (NP(n) \times E_r(n)). \quad (6)$$

به ترتیب انرژی باقی‌مانده و تعداد نقاط توقف پیرامون حسگر n هستند. همچنین، $CH(s)$ و $M(s)$ به ترتیب سرخوشه انتخاب‌شده و مجموعه اعضای خوشه s را نشان می‌دهند. گره‌ای نقش سرخوشه را بر عهده می‌گیرد که از انرژی باقی‌مانده بیشتری برخوردار باشد و تعداد نقاط توقف بیشتری در اطراف خود نسبت به سایر اعضا داشته باشد. بدیهی است با تغییر تدریجی انرژی گره‌ها در هر دوره، گره‌های متفاوتی نقش سرخوشه را بر عهده می‌گیرند.

۴-۲- فاز دوم: ارسال درون‌خوشه‌ای

با مشخص‌شدن خوشه‌ها و سرخوشه آنها، هر حسگر باید داده‌های خود را از طریق یک درخت مسیریابی کارآمد به سرخوشه متناظر خود ارسال کند. بدین منظور، ما از یک الگوریتم کلونی مورچه اصلاح‌شده برای ساخت درخت مسیریابی و ارسال داده‌های درون‌خوشه‌ای بهره می‌بریم.

ساخت درخت مدنظر از گره سرخوشه آغاز می‌شود و در هر گام، حسگرها به‌واسطه یک مسیر مناسب به درخت جاری اضافه می‌شوند. در ابتدا درخت فقط شامل گره سرخوشه است. معیار اولویت بررسی حسگرها برای تعیین مسیر اتصال آنها به گره سرخوشه، فاصله است؛ به‌طوری‌که اولویت با حسگرهایی است که بیشترین فاصله را تا سرخوشه داشته باشند. فرض کنید حسگر n به‌عنوان دورترین حسگر نسبت به سرخوشه قصد پیوستن به درخت مسیریابی را داشته باشد، براساس الگوریتم پیشنهادی، تعداد B مورچه را روی این حسگر قرار می‌دهیم. هر مورچه برای تعیین گام بعدی خود، از میان حسگرهای همسایه، حسگری را انتخاب می‌کند و این فرایند را تا اتصال مسیر ایجادشده

به سرخوشه یا درخت جاری ادامه می‌دهد. در هر مرحله، با استفاده از تابع احتمال $PF_{nm}^k(t)$ و الگوریتم چرخ رولت^{۱۴} [۳۴]، احتمال حرکت k امین مورچه از حسگر n به حسگر همسایه m در t امین تکرار محاسبه می‌شود:

$$PF_{nm}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{nm}(t)^\alpha \times (\frac{E_r(m)}{d_{nm}})^\beta}{\sum_{l \in allowed_k} \tau_{nl}(t)^\alpha \times (\frac{E_r(l)}{d_{nl}})^\beta} & \text{if } n \in allowed_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (V)$$

که در آن، $\tau_{nm}(t)$ و d_{nm} به ترتیب میزان فرومون موجود روی پیوند حسگر n به m در تکرار t و فاصله بین آن دو حسگر هستند. α و β نیز دو ثابت کنترل‌کننده وزن عامل مربوطه در تابع احتمال‌اند. همچنین، $allowed_k$ شامل حسگرهایی است که توسط مورچه k ام ملاقات نشده‌اند. طبیعی است که احتمال انتخاب حسگری که در همسایگی حسگر n نباشد یا در مسیر جاری انتخاب شده باشد، برابر صفر است. این مهم، از ایجاد دور در درخت مسیریابی جلوگیری می‌کند. دو معیار اصلی استفاده‌شده در تابع احتمال فوق، یعنی انرژی باقی‌مانده حسگرها و فاصله‌های بین آنها، شانس انتخاب حسگری با بیشترین انرژی و کمترین فاصله تا حسگر فعلی و تشکیل مسیر از طریق آن حسگر را افزایش می‌دهد. این مسأله ضمن توازن بهتر انرژی بین حسگرها، به کاهش مصرف انرژی منجر خواهد شد. از طرف دیگر، این تابع احتمال با میزان فرومون اضافه‌شده بر مسیرهای عبوری توسط مورچه‌ها رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین، هرچه میزان فرومون موجود روی یک پیوند بیشتر باشد، آن پیوند از نظر مورچه‌ها محبوب‌تر شمرده می‌شود و احتمال انتخاب آن توسط سایر مورچه‌ها افزایش می‌یابد. فرومون اضافه‌شده روی پیوند دو حسگر n و m هنگام عبور هر مورچه از آن برابر است با:

$$\Delta \tau_{nm}^k = \frac{(h_{\max} - h^k + \lambda) \times E_{avg}^k}{h^k}, \quad (A)$$

که در آن، h_{\max} نشان‌دهنده حداکثر تعداد گام‌های مجاز برای مورچه‌ها است و h^k و E_{avg}^k به ترتیب بیان‌کننده

تعداد گام‌ها و میانگین انرژی حسگرهایی‌اند که k امین مورچه برای رسیدن به مقصد، از آنها عبور می‌کند. همچنین، τ یک مقدار ثابت است. براساس این، در هر تکرار، میزان فرومون موجود روی هر پیوند به‌روزرسانی می‌شود [۲۳]:

$$\tau(t+1) = (1 - \rho) \times \tau_{nm}(t) + \Delta \tau_{nm}, \quad (9)$$

که در آن، ثابت تبخیر ρ عدد ثابتی بین صفر و یک است.

فرایند توصیف‌شده برای تمامی مورچه‌ها تا همگرایی کامل آن در تعداد تکرار مشخص (t_{\max}) تکرار می‌شود. در فرایند همگرایی، با مقایسه مسیرهای ایجادشده از حسگر n تا سرخوشه مربوطه ($Path(t)$)، مسیری که بتواند بهتر از سایر مسیرها معیار $\sum_{(n,m) \in Path(t)} \frac{E_r(n)}{d_{nm}}$ را برآورده کند، به‌عنوان مسیر بهینه به درخت جاری افزوده می‌شود. سپس دورترین حسگر بعدی برای تعیین مسیر آن تا سرخوشه متناظرش انتخاب خواهد شد.

شکل ۳، مثالی از خوشه‌بندی و تشکیل درخت مسیریابی مبتنی بر الگوریتم ACO در هر خوشه از شبکه را نشان می‌دهد؛ برای نمونه، خوشه شماره ۶ را در نظر بگیرید که در آن، ابتدا مسیر حسگر x به‌عنوان دورترین حسگر تا سرخوشه تعیین می‌شود. این حسگر، ۶ همسایه دارد که با استفاده از تابع احتمال توصیف‌شده، احتمال انتخاب هریک از همسایگان محاسبه می‌شود. استفاده از چرخ رولت منجر می‌شود هر مورچه، همسایه متفاوت و در نتیجه، مسیر متفاوت را انتخاب کند. درنهایت، با همگرایی الگوریتم و انتخاب بهترین مسیر که با رنگ قرمز مشخص شده است، این حسگر به سرخوشه ۶ متصل می‌شود. این فرایند تا تشکیل کامل درخت مسیریابی برای سایر حسگرهای پوشش داده نشده خوشه، ادامه می‌یابد.

پس از تشکیل درخت، گره‌های والد میانی موظف به تجمیع بسته‌های داده فرزندان خود هستند. در شکل ۳، شماره نوشته‌شده کنار هر پیوند، تعداد بسته‌های ارسالی توسط آن پیوند را نشان می‌دهد. هر حسگر، داده دریافتی از فرزندان را با داده خود، ترکیب و مجموع آنها را برای گره

باشد، با عنوان سرخوشه‌های «پوشش داده شده» یاد می‌شود. گره چاهک، حرکت خود را از مرکز آغاز می‌کند و با توقف در نقاط منتخب به تجمیع داده سرخوشه‌ها می‌پردازد. قبل از شروع حرکت گره چاهک، سرخوشه‌هایی که در برد مخابراتی این گره قرار دارند، داده خود را در قالب یک ارسال تک‌پرشی به چاهک منتقل می‌کنند؛ برای مثال، در شکل ۴، سرخوشه‌های ۱، ۳، ۴، ۱۷ و ۲۵ داده خود را قبل از شروع حرکت چاهک، برای این گره ارسال می‌کنند. این مسأله با حذف بخش‌های اضافی مسیر برای رسیدن به این سرخوشه‌ها، تأخیر را به حداقل می‌رساند.

در گام نخست، نزدیک‌ترین سرخوشه پوشش داده نشده به چاهک تعیین تکلیف می‌شود. با بررسی نقاط توقف مجازی که در برد مخابراتی این سرخوشه قرار دارند، نقطه‌ای به‌عنوان نقطه توقف انتخابی جدید برگزیده می‌شود که بتواند بیشترین سرخوشه پوشش داده نشده را پوشش دهد. در این صورت، چاهک با توقف در این نقطه می‌تواند داده تعداد سرخوشه بیشتری را جمع‌آوری کند؛ بنابراین، با کوتاه‌تر شدن مسیر حرکت چاهک، تأخیر در شبکه کاهش می‌یابد. اگر چند نقطه توقف تعداد برابری سرخوشه جدید را پوشش دهند، نقطه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع فاصله سرخوشه‌ها تا آن نقطه کمتر باشد. طبق مدل رادیویی مرتبه اول، سرخوشه‌ها انرژی کمتری برای ارسال داده خود به چاهک مصرف می‌کنند. براساس استراتژی فوق در شکل ۴، ابتدا لازم است نقطه توقف مناسبی برای سرخوشه ۷ (یعنی نقطه ۴۰) تعیین شود. بدیهی است تمام سرخوشه‌های پوشش داده نشده موجود در برد مخابراتی نقطه انتخابی، با توقف گره چاهک در این نقطه می‌توانند داده‌های خود را ارسال کنند. این سرخوشه‌ها نیز به مجموعه سرخوشه‌های پوشش داده شده ملحق می‌شوند؛ به این ترتیب، این نقطه به‌عنوان اولین نقطه در مجموعه نقاط توقف منتخب قرار می‌گیرد. با انتخاب یک نقطه توقف، تمامی نقاط توقف دیگر در راستای خط فرضی عبوری از آن نقطه بررسی می‌شوند. اگر نقطه‌ای در این راستا بتواند سرخوشه جدیدی را پوشش دهد، به مجموعه نقاط منتخب و سرخوشه‌های متناظر با آن نیز به سرخوشه‌های پوشش داده شده اضافه می‌شوند. دو نقطه توقف ۱۶ و ۲۴، در راستای نقطه توقف

والد ارسال می‌کند؛ برای مثال، حسگرهای A، B و D هر کدام یک بسته داده به والد خود ارسال می‌کنند. حسگر C، بسته‌های دریافتی از A و B را با داده خود، ترکیب و سه بسته به گره E منتقل می‌کند. در نهایت، ۵ بسته داده از طریق حسگر E به سرخوشه متناظر ارسال می‌شود.

۴-۳- فاز سوم: تعیین مسیر حرکت گره چاهک

پس از تجمیع داده در هر خوشه توسط سرخوشه مربوطه، این گره نتیجه را در قالب یک ارتباط تک‌پرشی برای گره چاهک ارسال می‌کند. همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد، شبکه مدنظر به‌واسطه دایره‌های متحدالمرکز فرضی با فواصل یکسان و خطوط فرضی افراز می‌شود؛ به‌طوری‌که محل تلاقی این دوایر و خطوط، نقاط توقف مجاز برای گره چاهک را تعیین می‌کند. با این حال، لزومی به توقف گره چاهک در همه این نقاط نیست و لازم است ضمن انتخاب نقاط توقف کارآمد، مسیر مناسبی برای حرکت این گره تعیین شود؛ برای مثال، اگر در همسایگی یکی از نقاط توقف، سرخوشه‌ای قرار نداشته باشد، طبیعی است توقف گره چاهک در آن نقطه علاوه بر اینکه منفعتی ندارد، به افزایش پیچیدگی مسأله منجر می‌شود. الگوریتم ARPDA با نگاه همزمان به دو مسأله انرژی و تأخیر، در دو مرحله، نقاط توقف مناسب را انتخاب و مسیر حرکت گره چاهک را طراحی می‌کند. در مرحله اول، تمامی نقاط منتخب برای توقف گره چاهک تعیین می‌شوند. سپس در مرحله دوم، مسیر حرکت گره چاهک طراحی می‌شود. برای روشن شدن موضوع، عملکرد الگوریتم پیشنهادی را به‌همراه یک مثال جامع در شکل ۴ تشریح می‌کنیم. شکل ۴-الف، شبکه‌ای متشکل از ۵ دایره متحدالمرکز را نشان می‌دهد که خطوط فرضی آن در زوایایی به فاصله $\theta = 45^\circ$ عبور می‌کنند. در چنین شبکه‌ای، ۴۰ نقطه توقف مجاز برای گره چاهک در نظر گرفته می‌شود.

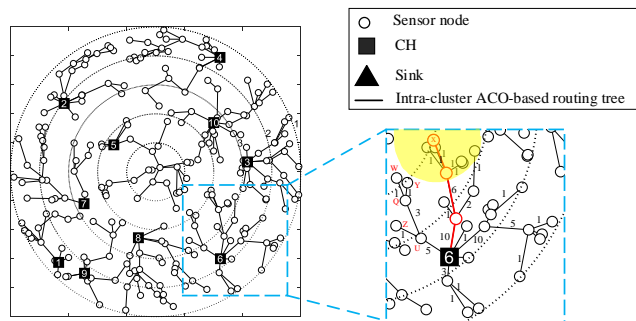
مرحله ۱: تشکیل مجموعه نقاط توقف منتخب

ابتدا با تعیین مجموعه نقاط توقف منتخب، نقاط توقف متناظر با هر سرخوشه مشخص می‌شوند. در هر گام، از سرخوشه‌هایی که نقطه توقف مربوط به آنها تعیین شده

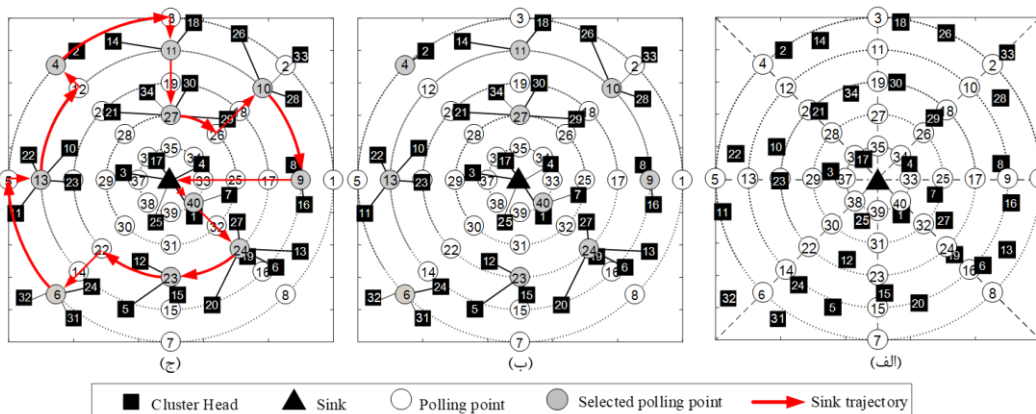
۱۰۰ تجمع گلبرگ گونه داده در شبکه‌های حسگر بی سیم با استفاده همزمان از گره چاهک متحرک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه

بنابراین، به‌عنوان سومین توقف تعیین می‌شود. با تکرار فرایند فوق، نقاط ۴۰ (با سرخوشه ۷)، ۲۴ (با سرخوشه‌های ۶، ۱۳، ۱۹، ۲۰ و ۲۷)، ۲۳ (با سرخوشه‌های ۵، ۱۲ و ۱۵)، ۶ (با سرخوشه‌های ۲۴، ۳۱ و ۳۲)، ۱۳ (با سرخوشه‌های ۱۰، ۱۱، ۲۲ و ۲۳)، ۴ (با سرخوشه)، ۱۱ (با سرخوشه‌های ۱۴ و ۱۸)، ۲۷ (با سرخوشه‌های ۲۱، ۲۹، ۳۰ و ۳۴)، ۱۰ (با سرخوشه‌های ۲۶، ۲۸ و ۳۳) و ۹ (با سرخوشه‌های ۸ و ۱۶) برای توقف چاهک انتخاب می‌شوند.

۴۰ هستند که به‌طور مشترک ۵ سرخوشه ۶، ۱۳، ۱۹، ۲۰ و ۲۷ را پوشش می‌دهند (شکل ۴-ب). با مقایسه مجموع فاصله این سرخوشه‌ها تا هریک از نقاط توقف ۱۶ و ۲۴، نقطه ۲۴ انتخاب و به مجموعه نقاط توقف منتخب اضافه می‌شود. در گام بعدی، نزدیک‌ترین سرخوشه پوشش داده نشده به نقطه توقف منتخب فعلی (یعنی سرخوشه ۱۵) برگزیده می‌شود و مجدداً تمامی نقاط توقف پیرامون آن سنجیده می‌شوند. براساس معیار توصیف‌شده، نقطه ۲۳ نسبت به سایر نقاط، سرخوشه بیشتری را دربرمی‌گیرد؛



شکل (۳): مثالی از تشکیل درخت مسیریابی درون‌خوشه‌ای مبتنی بر الگوریتم ACO پیشنهادی



شکل (۴): مسیر حرکت گره چاهک در الگوریتم ARPDA

می‌شود. حرکت گره چاهک از مرکز شبکه به سمت اولین نقطه منتخب به صورت حرکت بیرونی خواهد بود. در ادامه، حرکت این گره روی کلیه خطوط فرضی، یکی در میان، به صورت حرکت درونی و بیرونی تنظیم می‌شود؛ برای مثال، حرکت روی خطوط فرضی در زوایای ۳۱۵، ۲۷۰، ۲۲۵، ۱۸۰، ۱۳۵، ۹۰، ۴۵ و ۰ درجه به ترتیب بیرونی، بیرونی، درونی، بیرونی، بیرونی، درونی، بیرونی و درونی است (شکل ۴-ج). دسته دوم،

مرحله ۲: طراحی مسیر حرکت گره چاهک

حال، لازم است مسیر حرکت گره چاهک برای توقف در این نقاط و دریافت داده جمع‌شده از سرخوشه‌های متناظر مشخص شود. مسیر حرکت گره به دو دسته حرکت خطی و حرکت کمانی تقسیم‌بندی می‌شود؛ در دسته اول، این گره روی خطوط فرضی موجود از سمت دایره کوچک‌تر به سمت دایره بزرگ‌تر (جهت بیرونی) یا برعکس (جهت درونی) جابه‌جا

زاویه بین خطوط فرضی و تعداد دایره‌ها به ترتیب ۵۰۰ متر، ۵۰ متر، ۴۵ درجه و ۵ در نظر گرفته می‌شوند. انرژی اولیه حسگرها $E_{elec} = 50nJ/bit$ و $E_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ و طول بسته‌های داده برابر با ۱۰۲۴ بیت فرض می‌شوند. همچنین پارامترهای B ، ρ ، $\tau_{nm}(0)$ ، α ، β ، λ و t_{max} در الگوریتم ACO به ترتیب برابر ۵۰، ۰/۰۰۱، ۱/۵، ۱، ۰/۰۰۱ و ۱۰۰ انتخاب می‌شوند. حسگرها دوره به دوره کمیتی در محیط را اندازه‌گیری می‌کنند و آن را به سرخوشه خود تحویل می‌دهند. این گره داده جمع‌شده را توسط یک ارسال تک‌پرسی به چاهک منتقل

$$v = 1 \frac{m}{s}$$

می‌کند. سرعت چاهک فرض می‌شود؛ از این رو، مسافت طی شده توسط گره چاهک با تأخیر ناشی از حرکت آن برابر است. با توجه به چیدمان تصادفی حسگرها، هر سناریو حداقل ۳۰ مرتبه تکرار و میانگین نتایج ارائه می‌شود.

سناریو ۱: در اولین سناریو، با فرض ۴۰۰ حسگر، ۳۰ خوشه و برد مخابراتی ۵۰ متر، ابعاد شبکه را به‌طور تدریجی از ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر تغییر می‌دهیم. شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب ناکارآمدی شبکه و مسافت طی شده گره چاهک (تأخیر) را برای دو الگوریتم ARPDA و EDT به‌ازای ابعاد مختلفی از شبکه مقایسه می‌کنند. براساس مدل رادیویی مرتبه اول، مصرف انرژی به مربع فاصله بین دو گره حسگر وابسته است؛ بنابراین، طبیعی است با افزایش ابعاد شبکه و در نتیجه، افزایش فاصله بین حسگرها، میزان مصرف انرژی افزایش یابد. این در حالی است که به دلیل فرض ثابت ماندن برد مخابراتی، میزان اتصالات در گراف شبکه کاهش می‌یابد که عاملی بر افزایش تعداد نقاط توقف گره چاهک متحرک است؛ بنابراین، همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، این روند ناکارآمدی شبکه را افزایش می‌دهد؛ اما مهم این است که روش پیشنهادی در مقایسه با EDT توانسته است ناکارآمدی شبکه را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. این مهم، در شبکه‌های مقیاس بزرگ بهتر دیده می‌شود. در واقع، ARPDA با به‌کارگیری از یک ساختار دو سطحی مناسب و با خوشه‌بندی کارآمد حسگرها و تعیین مناسب سرخوشه‌ها در هر دوره، تعداد توقف گره چاهک را به‌شدت کاهش می‌دهد.

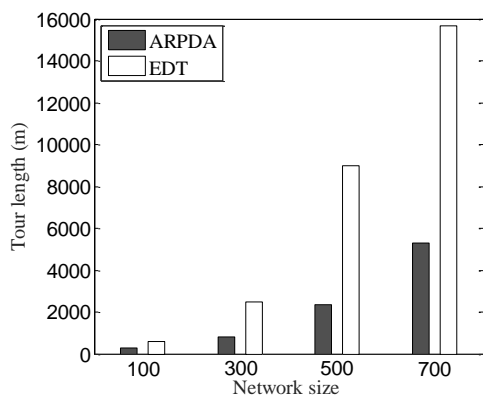
مطابق شکل ۶، با افزایش ابعاد شبکه، مسافت طی شده گره چاهک (تأخیر) در هر دو الگوریتم افزایش می‌یابد. با این حال،

حرکت‌های کمانی ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد هستند. تعیین جهت این نوع حرکت به اولین نقاط منتخبی وابسته است که در دو زاویه متفاوت واقع شده‌اند. در صورتی که زاویه اولین و دومین نقطه توقف منتخب برابر با θ باشد این حرکت، ساعت‌گرد و در غیر این صورت، حرکت کمانی به پادساعت‌گرد تغییر خواهد کرد. مطابق شکل ۴، دو نقطه ۴۰ و ۲۴ نمی‌توانند تعیین‌کننده این حرکت باشند؛ زیرا در یک زاویه مشترک 135° قرار دارند. پس باید دو نقطه منتخب بعدی، یعنی ۲۴ و ۲۳ را بررسی کنیم که به ترتیب در 135° و 270° قرار دارند. از آنجا که تفاضل این دو زاویه $\theta = 45^\circ$ است، حرکت ساعت‌گرد اتخاذ می‌شود.

بدین ترتیب، با تعیین نقاط توقف و مسیر حرکت چاهک، فرایند جمع‌آوری داده توسط این گره شروع می‌شود. چاهک برای توقف در نقاط ۴۰ و ۲۴، باید مسیری خطی را در جهت بیرونی طی کند. سومین نقطه منتخب روی دایره مشترک با نقطه توقف ۲۴ قرار دارد. پس چاهک همان مسیر کمانی را در جهت ساعت‌گرد برای رسیدن به این نقطه می‌پیماید. با توجه به اینکه نقاط ۲۳ و ۶ روی دایره‌های متفاوت قرار دارند، باید چاهک از طریق مسیر خطی به دایره مدنظر برسد. مسیر خطی در راستای نقطه ۶، در جهت بیرونی تنظیم شده است. پس ابتدا باید گره چاهک با طی مسیر کمانی بین نقاط ۲۳ و ۲۲ در مسیر خطی نقطه منتخب ۶ قرار بگیرد و سپس در جهت بیرونی به این نقطه برسد. این در حالی است که سمت مسیر خطی نقطه منتخب ۱۳ درونی است. مطابق حالت قبل، به‌علت تفاوت دایره‌های دو نقطه ۶ و ۱۳ و جهت درونی نقطه ۱۳، چاهک با پیمودن کمان بزرگ‌ترین دایره به نقطه ۵ می‌رسد و سپس در نقطه ۱۳ به جمع‌آوری داده می‌پردازد. نقطه ۹ آخرین نقطه‌ای است که چاهک روی آن توقف می‌کند؛ در نهایت، از طریق مسیر خطی درونی به مرکز شبکه بازمی‌گردد. حرکت گلبزرگ‌گونه چاهک، وجه تسمیه الگوریتم پیشنهادی است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های EDT [۹]، EGRPM [۱۱] و EMPAR [۳۳] از منظر ناکارآمدی شبکه، مصرف انرژی و مسافت حرکت گره چاهک ارزیابی می‌شود. به‌طور پیش‌فرض، قطر شبکه، برد مخابراتی،



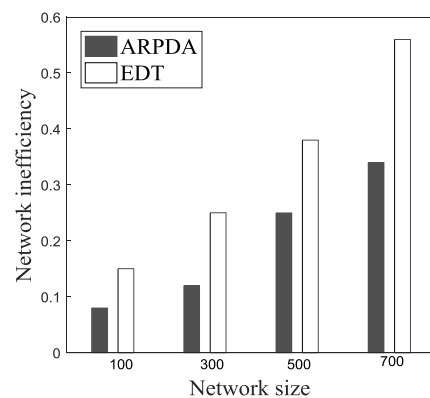
شکل (۶): مقایسه مسافت طی شده توسط گره چاهک در ARPDA و EDT با تغییر ابعاد شبکه

سناریو ۳: در این سناریو، عملکرد الگوریتم ARPDA از منظر مصرف انرژی و مسافت طی شده گره چاهک، به‌ازای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ خوشه بررسی می‌شود. تعداد حسگرها ۲۰۰ و اندازه شبکه ۵۰۰ متر فرض می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد خوشه‌ها در شبکه، انرژی مصرفی کاهش می‌یابد؛ اما مسافت طی شده گره چاهک افزایش می‌یابد. در واقع، ما شاهد یک مصالحه بین مصرف انرژی و تأخیر گره چاهک هستیم. با افزایش تعداد خوشه‌ها، اندازه آنها کوچک‌تر می‌شود و تعداد کمتری حسگر را دربرمی‌گیرند. این مسأله با کاهش تعداد بسته‌های ارسالی به سرخوشه و کاهش مصرف انرژی همراه است. این در حالی است که با افزایش تعداد سرخوشه‌ها، چاهک مجبور به پیمودن مسیرهای طولانی‌تری است و تأخیر شبکه تشدید می‌شود. واضح است برای شبکه و تعداد حسگر مفروض، تعداد ۲۰ خوشه توانسته‌اند تعادلی بین مصرف انرژی و تأخیر شبکه ایجاد کنند.

سناریو ۴: در نهایت، انرژی مصرفی ARPDA در مقایسه با الگوریتم‌های EGRPM [۱۱] و EMPAR [۳۳] به‌ازای ۹ تا ۳۶ سرخوشه ارزیابی می‌شود. بدین منظور، ۴۰۰ حسگر با برد مخابراتی ۵۰ متر در محیطی با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ مترمربع توزیع می‌شود. مطابق شکل ۱۰، افزایش تعداد سرخوشه‌ها، انرژی مصرفی در شبکه را کاهش می‌دهد؛ زیرا روش‌های خوشه‌بندی با کاهش فاصله ارتباطی و تعداد بسته‌های ارسالی در سطح خوشه‌ها، به کاهش انرژی مصرفی در شبکه منجر خواهند شد. براساس مدل رادیویی مرتبه اول، هرچه فاصله ارتباطی بیشتر باشد، مصرف انرژی گره‌ها نیز بیشتر می‌شود. نکته قابل تأمل

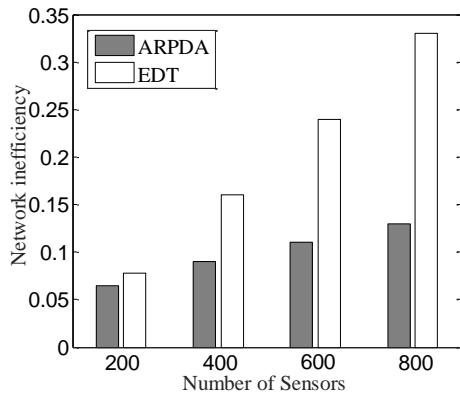
الگوریتم ARPDA تأخیر کمتری در مقایسه با EDT دارد. دلیل این مسأله، استراتژی روش پیشنهادی در تجمیع داده سرخوشه‌های مختلف با طی کردن حداقل مسافت ممکن است. ملاحظات توصیف‌شده در مرحله ۲ الگوریتم پیشنهادی و استفاده از دوایر و خطوط فرضی علاوه بر اینکه به کاهش نقاط توقف منجر شده است، مسیر چاهک را نیز کوتاه می‌کند.

سناریو ۲: در این سناریو، با فرض شبکه‌ای به قطر ۵۰۰ متر و ۳۰ خوشه، تأثیر تعداد حسگرهای شبکه بر عملکرد دو الگوریتم ARPDA و EDT را بررسی می‌کنیم. با افزایش حسگرها، بسته‌های ارسالی و در نتیجه، میزان مصرف انرژی در شبکه افزایش می‌یابد. ضمن اینکه این روند با افزایش تعداد نقاط توقف چاهک نیز همراه خواهد بود؛ بنابراین، همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش حسگرها، ناکارآمدی شبکه در هر دو الگوریتم افزایش می‌یابد. این در حالی است که به‌ازای تعداد مختلف حسگرها نیز روش پیشنهادی از ناکارآمدی شبکه پایین‌تری برخوردار است. نکته قابل تأمل دیگر این است که مطابق شکل ۸، در الگوریتم پیشنهادی، افزایش تعداد حسگرها تغییر محسوس در تأخیر ناشی از حرکت چاهک ایجاد نمی‌کند؛ اما این افزایش، به‌بالارفتن چشمگیر تأخیر الگوریتم EDT منجر می‌شود. در الگوریتم EDT، تعیین نقاط توقف متناسب با تعداد حسگرها است؛ درحالی‌که در ARPDA، چاهک به‌جای تعامل مستقیم با حسگرها فقط با سرخوشه‌های شبکه در ارتباط است. به‌دلیل رویکرد خوشه‌بندی، افزایش حسگرها تأثیری بر تعداد خوشه‌ها ندارد و تأخیر شبکه ثابت می‌ماند.

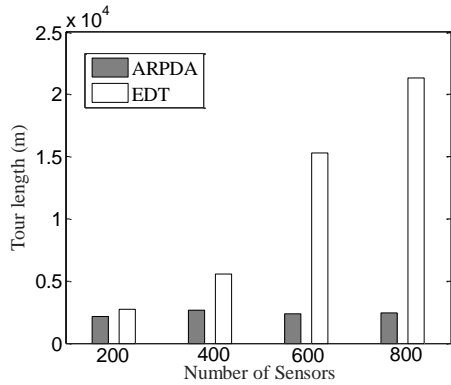


شکل (۵): مقایسه ناکارآمدی شبکه در ARPDA و EDT با

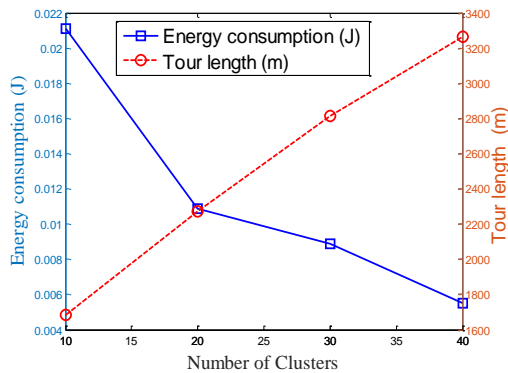
تغییر ابعاد شبکه



شکل (۷): مقایسه ناکارآمدی شبکه در ARPDA و EDT با تغییر تعداد حسگرها



شکل (۸): مقایسه مسافت طی شده توسط گره چاهک در ARPDA و EDT با تغییر تعداد حسگرها



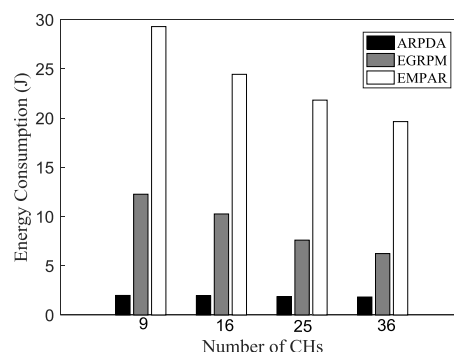
شکل (۹): اثر تعداد خوشه‌ها بر انرژی مصرفی و مسافت طی شده توسط گره چاهک در ARPDA

دیگر این است که انرژی مصرفی در ARPDA، به مراتب کمتر از دو الگوریتم EGRPM و EMPAR است. دلیل این امر، استفاده از چاهک متحرک، انتخاب کارآمد نقاط توقف و مسیریابی درون خوشه‌ای مبتنی بر ACO در ARPDA است. این در حالی است که در الگوریتم EMPAR، چاهک‌ها ثابت بوده‌اند و سرخوشه‌ها داده‌های خود را از طریق ارسالات چندپرسی به هریک از گره‌های چاهک می‌فرستند. از طرف دیگر، EGRPM [۱۱] با انتخاب تعداد محدودی نقطه توقف، از مسیرهای چندپرسی و تک‌پرسی برای ارسال داده‌های سرخوشه به گره‌های چاهک استفاده می‌کند؛ به طوری که سرخوشه‌های دورتر، داده خود را از طریق سرخوشه‌های نزدیک به نقاط توقف، داده خود را با ارسال تک‌پرسی برای چاهک می‌فرستند. همین امر، به مصرف انرژی بیشتر نسبت به الگوریتم ARPDA منجر می‌شود. شایان ذکر است این روش به واسطه بهره‌گیری از چاهک‌های متحرک، میزان انرژی مصرفی کمتری در مقایسه با الگوریتم EMPAR نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم جدیدی با عنوان ARPDA پیشنهاد شد که با بهره‌گیری از یک معماری دو سطحی به جمع‌آوری گلبرگ‌گونه داده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌پردازد. در سطح اول، گره‌های حسگر به تعدادی خوشه افراز شده‌اند و برای هریک، سرخوشه مناسبی انتخاب می‌شود. در تعیین سرخوشه‌ها، علاوه بر انرژی باقی‌مانده حسگرها، مکان‌های احتمالی توقف چاهک نیز در نظر گرفته می‌شوند. گره‌های حسگر داده‌های خود را از طریق یک درخت مسیریابی مبتنی بر ACO به سرخوشه منتقل می‌کنند. در سطح دوم، با توجه به موقعیت سرخوشه‌ها، جهت و مسیر حرکت چاهک تعیین می‌شود. گره چاهک با حرکت در شبکه و توقف در نقاط منتخب، داده‌های بافرشده در سرخوشه‌ها را جمع‌آوری می‌کند.

- [9] K. Nitesh, A. Kaswan, and P. K. Jana, "Energy density based mobile sink trajectory in wireless sensor networks," *Microsystem Technology*, Vol. 25, pp. 1771-1781, 2019.
- [10] S. Tabibi and A. Ghaffari, "Energy-efficient routing mechanism for mobile sink in wireless sensor networks using particle swarm optimization algorithm," *Wireless Personal Communications*, Vol. 104, pp.199-216, Sep. 2018.
- [11] M. Naghibi and H. Barati, "EGRPM: Energy efficient geographic routing protocol based on mobile sink in wireless sensor networks," *Sustainable Computing: Information and Systems*, vol. 25, 2020.
- [12] A. Avokh, S. Pakdaman, and S. Azar, "WDAT-OMS: A two-level scheme for efficient data gathering in mobile-sink wireless sensor network considering compressive sensing theory," *IET Communications*, Vol. 14, No. 11, pp. 1826-1837, 2020.
- [13] H. Huang, C. Huang, and D. Ma, "The cluster based compressive data collection for wireless sensor networks with a mobile sink," *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, Vol. 108, pp-206-214, Aug. 2019.
- [14] K. Koosheshi and S. Ebadi, "Optimization energy consumption with multiple mobile sinks using fuzzy logic in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, Vol. 25, pp.1215-1234, 2018.
- [15] M. M. Alipour, S. N. Razavi, M. R. Feizi Derakhshi, and M. A. Balafar "A hybrid algorithm using a genetic algorithm and multiagent reinforcement learning heuristic to solve the traveling salesman problem," *Neural Computing and Applications*, Vol. 30, No. 9, pp.2935-2951, 2018.
- [16] S. Azar, A. Avokh, J. Abouei, and K. N. Plataniotis, "Energy-and delay-efficient algorithm for large-Scale data collection in mobile-sink WSNs," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 7, pp. 7324-7339, April 2022
- [17] R. K. Verma and S. Jain, "Energy and delay efficient data acquisition in wireless sensor networks by selecting optimal visiting for mobile sink," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Feb. 2022.
- [18] E. G. Dehkordi and H. Barati, "Cluster based routing method using mobile sinks in wireless sensor network," *International Journal of Electronics*, Jan. 2022.
- [19] J. Amutha, S. Sharma, and S. K. Sharma, "An energy efficient cluster based hybrid optimization algorithm with static sink and mobile sink node for wireless sensor networks," *Expert Systems with Applications*, Vol. 203, 117334, Oct. 2022.
- [20] V. Agarwal, S. Tapaswi, and P. Chanak, "Energy-efficient mobile sink-based intelligent data routing scheme for wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 10, pp. 9881-9891, Apr. 2022.
- [21] C. S. Gowda and P. V. Y. Jayasree, "Rendezvous point based energy-aware routing using hybrid neural network for mobile sink in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, Vol. 27, pp. 2961-2967, 2021.
- [22] D. Cheng, Y. Xun, T. Zhou, and W. Li, "An energy aware ant colony algorithm for the routing of wireless sensor networks," *Intelligent Computing and Information Science (ICICIS)*, 2011, pp. 395-401.
- [23] A. Mohajerani and D. Gharavian, "An ant colony optimization based routing algorithm for extending



شکل (۱۰): مقایسه انرژی مصرفی ARPDA، EGRPM و

EMPAR با تغییر تعداد سرخوشه‌ها

نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیان‌کننده یک مصالحه بین میزان مصرف انرژی و تأخیر ناشی از حرکت چاهک‌اند. با این حال، روش پیشنهادی به‌خوبی توانسته است با کنترل این مصالحه در مقایسه با دیگر روش مشابه عملکرد بهتری از خود نشان دهد.

مراجع

- [1] X. Zhange, L. Tao, F. Yan, and D. K. Sung, "Shortest-latency opportunistic routing in asynchronous wireless sensor networks with independent duty-cycling," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 19, No. 3, pp.711-723, Mar. 2020.
- [2] X. Liu, T. Qiu, X. Zhou, T. Wang, L. Yang, and V. Chang, "Latency-aware path planning for disconnected sensor networks with mobile sinks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, No. 1, pp. 350-361, May. 2019.
- [3] A. Rady, M. Shokair, E. Rabaie, W. Saad, and A. Benaya, "Energy-efficient routing protocol based on sink mobility for wireless sensor networks," *IET Wireless Sensor Systems*, Vol. 9, pp. 405-415, 2019.
- [4] H. Salarian, K. Chin, and F. Naghdy, "An Energy-efficient Mobile-Sink Path Selection Strategy for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 5, 2014. P. Donta,
- [5] B. Rao, T. Amgoth, C. Annavarapu, and S. Swain, "Data collection and path determination strategies for mobile sink in 3D WSNs," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 4, pp.2224-2233, Feb. 2020.
- [6] A. Nagaraju and Dipanshu "Energy-efficient routing technique for wireless sensor networks using multiple mobile sink nodes," *Parallel Computing*, 102623, 2020.
- [7] N. Kumar and D. Dash, "Flow based efficient data gathering in wireless sensor network using path-constrained mobile sink," *Journal of Ambient of Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 11, pp. 1163-1175, Feb. 2020.
- [8] V. Saranya, S. Shankar, and G. R. Kanagachidambaresan, "Energy Efficient Clustering Scheme (EECS) for wireless sensor network with mobile sink," *Wireless Personal Communications*, Vol. 10, pp. 1553-1567. 2018.

- networks with mobile sinks,” *The Journal of Supercomputing*, Vol. 76, pp. 2748-2776, April 2020.
- [30] P. K. Donta, T. Amgoth, and C. S. R. Annavarapu, “An extended ACO-based mobile sink path determination in wireless sensor network,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 12, pp. 8991-9006, Oct. 2021.
- [31] N. Moussa, D. Benhaddou, and A. E. B. E. Alaoui, “EARP: An enhanced ACO-Based routing protocol for wireless sensor networks with multiple mobile sinks,” *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 29, pp. 118-129, Jun. 2022.
- [32] Z. Wu and G. Wan, “An enhanced ACO-based mobile sink path determination for data gathering in wireless sensor networks” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 100, May. 2022.
- [33] A. Jari and A. Avokh, “PSO-based sink placement and load-balanced anycast routing in multi-sink WSNs considering compressive sensing theory,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 100, 104164, 2021.
- S. Ebadinezhad, “DEACO: Adopting dynamic evaporation strategy to enhance ACO algorithm for the traveling salesman problem,” *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 92, 2020.
- network lifetime in wireless sensor networks,” *Wireless Networks*, Vol. 22, No. 8, pp. 2637-2647, Nov. 2015.
- [24] Y. Sun, W. Dong, and Y. Chen, “An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks,” *IEEE Communications Letters*, Vol. 21, No. 6, pp. 1317-1320, Feb. 2016.
- [25] W. Xie, Q. Zhang, Z. M. Sun, and F. Zhang, “A clustering routing protocol for WSN based on type-2 fuzzy logic and ant colony optimization,” *Wireless Personal Communications*, Vol. 84, No. 2, pp. 1165-1196, Sep. 2015.
- [26] Z. Zhao, M. Hou, N. Zhang, and M. Gao, “Multipath routing algorithm based on ant colony optimization and energy awareness,” *Wireless Personal Communications*, Vol. 94, No. 4, pp. 2937-2948, June 2017.
- [27] P. Raj, A. Khedr, and Z. A. Aghbari, “Data gathering via mobile sink in WSNs using game theory and enhanced ant colony optimization,” *Wireless Networks*, pp. 2983-2998. 2020.
- [28] M. Krishnan, S. Yun, and Y. M. Jung, “Enhanced clustering and ACO-based multiple mobile sinks for efficiency improvement of wireless sensor networks,” *Computer Networks*, Vol. 160, pp. 33-40, Sep. 2019.
- [29] S. Ghabel, L. Farzinvas, and S. Razavi, “HPDMS: high-performance data harvesting in wireless sensor

¹ Wireless Sensor Networks

² Polling points

³ Cluster Head

⁴ Ant Colony Optimization algorithm

⁵ ACO-based Routing and Petal-shaped Data Aggregation

⁶ Rendezvous points

⁷ Travel Salesman Problem

⁸ Particle Swarm Optimization Based Selection

⁹ Energy Aware Ant Colony Algorithm

¹⁰ Pheromone

¹¹ Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems

¹² Low-energy adaptive clustering hierarchy

¹³ Network Inefficiency

¹⁴ Roulette wheel

¹⁵ Energy Efficient Geographic Routing Protocol based on Mobile Sink

¹⁶ Multi-sink Placement and Anycast Routing

