Scientific Journal of Electronic & Cyber Defense
Vol. 12, No. 2, Summer 2024, Serial No. 46
ISSN: 2322-4347 , E-ISSN: 2980-8979

Sink mobility management in mobile sensor networks for cluster-heads load balancing

O. Abedi[1]*, F. Moradi[2], M. Ghazvini[3]
1- Assistant Professor, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
(Received: 20240308, Revised: 2024/07/06, Accepted: 2024/08/03, Published: 2024/08/31)
DOR:

ABSTRACT

Paying attention to the limited battery energy of sensor nodes is one of the design challenges of wireless sensor networks (WSNs). It is essential to balance energy consumption to enhance network lifetime. In this research, we focus on clustering sensor nodes and optimizing the data transfer from the cluster head to the sink, which significantly reduces energy consumption. Furthermore, one of the most effective solutions to the critical problem of wireless sensor networks, known as the hotspot or energy-hole problem, is the use of a mobile sink. The proposed method employs two mobile sinks: one moves within a specific area, while the other traverses the entire network environment. Using the prioritized Random Way Point (RWP) mobility model, both mobile sinks select suitable locations in the network based on parameters such as density of nodes and cluster heads. To minimize frequent advertisements of the current location of the sinks, we have implemented location-aware cluster heads that save the updated positions of the two mobile sinks. The evaluation results indicate that the proposed method demonstrates higher efficiency compared to similar algorithms in terms of network lifetime, residual energy of nodes, number of sent packets, network coverage, and overhead. On average, the proposed method has shown an improvement of approximately 8% across all parameters .

Keywords: Wireless Sensor Networks, Mobile Sink, Routing, Trajectory determination, Load Balancing.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

*Corresponding Author Email: oabedi@uk.ac.ir

"پدافند الکترونیکی و سایبری"
سال دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۶۶-۵۳

علمی – پژوهشی

مدیریت تحرک چاهک در شبکه‌های حسگر متحرک به‌منظور تعادل بار سرخوشه‌ها

امید عابدی[1*]، فاطمه مرادی[2]، مهدیه قزوینی[3]

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۳- دانشیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰)

DOR:

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) نویسندگان

چکیده

باتوجه‌به انرژی محدود باطری گره‌های حسگر، یکی از چالش‌های طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، متعادل‌کردن مصرف انرژی است که منجر به افزایش طول عمر شبکه می‌شود. در این پژوهش، ما علاوه بر خوشه‌بندی مناسب گره‌های حسگر، با کمک نحوه انتقال داده‌ها از سرخوشه به چاهک، انرژی مصرفی را به طور قابل‌توجهی کاهش داده‌ایم. از طرفی، بهترین راه‌حل شناخته‌شده برای بحرانی‌ترین مشکل شبکه‌های حسگر بی‌سیم که مشکل نقطه داغ یا چاله انرژی است، استفاده از چاهک متحرک است. در روش پیشنهادی از دو چاهک متحرک که یکی از آنها در یک ناحیه مشخص و دیگری در کل محیط شبکه به‌صورت کنترل‌شده حرکت می‌کنند، استفاده شده است. دو چاهک متحرک با استفاده از مدل تحرک Random Way Point (RWP) اولویت‌بندی شده، با درنظرگرفتن پارامترهایی مانند ناحیه متراکم و سرخوشه متراکم، یک مکان مناسب را در محیط شبکه انتخاب کرده و به سمت آن حرکت می‌کنند. همچنین برای جلوگیری از تبلیغات مکرر مکان فعلی چاهک، سرخوشه‌های آگاه از موقعیت را، برای ذخیره‌کردن موقعیت به‌روز شده دو چاهک متحرک در نظر گرفته‌ایم. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از لحاظ طول عمر شبکه، انرژی باقیمانده گره‌ها، تعداد بسته‌های ارسالی، میزان پوشش شبکه و سربار در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه، کارایی بالاتری از خود نشان می‌دهد و در نهایت به طور میانگین، روش پیشنهادی در تمام پارامترها، حدود ۸ درصد بهبود داشته است.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های حسگر بی‌سیم، چاهک متحرک، مسیریابی، تعیین مسیر، تعادل بار

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم[2] (WSNs)، یکی از شبکه‌های پرکاربرد در دنیای امروز می‌باشند، که این شبکه‌ها از تعداد زیادی (ده‌ها تا هزاران) گره حسگر[3] (SN)، که منبع تغذیه آنها معمولاً باتری است، تشکیل شده‌اند [۱]. به طور کلی، گره‌های حسگر با استفاده از ارتباطات بی‌سیم به یکدیگر متصل می‌شوند و برای شناسایی بر محیطی که مداخله انسان تقریباً غیرممکن است؛ مانند نظارت بر کارخانه‌های شیمیایی، نظارت بر میدان جنگ، تشخیص آتش‌سوزی و غیره، استفاده می‌شوند [۲]. گره‌های حسگر علاوه بر ثبت اطلاعات مفید (مانند حرکت اجسام، رطوبت و دما، فشار و غیره)، داده‌ها را از سایر گره‌ها، از طریق ارتباطات تک گامی[4] یا چند گامی[5]، به یک چاهک[6] انتخابی که به‌عنوان ایستگاه پایه[7] (BS) شناخته می‌شود انتقال می‌دهند. درنهایت، چاهک داده‌های دریافتی را از طریق زیرساخت‌های معمولی مانند اینترنت به یک کاربر ارسال می‌کند [۳]. از آنجایی که در سناریوهای مسیریابی سنتی، گره حسگر بسته‌ی داده را به‌صورت چند گامی به چاهک ثابت[8] (SS) منتقل می‌کند باعث به وجود آمدن چاله انرژی[9] و مشکل نقطه داغ[10]، می‌شوند؛ زیرا یکی از نقاط ضعف استفاده از چاهک ثابت، این است که گره‌های حسگر نزدیک به گره چاهک به‌دلیل دریافت و ارسال داده‌های بیشتر، بار ترافیکی بیشتری نسبت به بقیه گره‌ها حمل می‌کنند و به دلیل محدودیتی که از نظر حافظه دارند، انرژی خود را سریعتر از دست

* رایانامه نویسنده مسئول: Oabedi@uk.ac.ir

[2] Wireless Sensor Network (WSNs)
[3] Sensor Node

[4] Single-hop
[5] Multi-hop
[6] Sink
[7] Base Station (BS)
[8] Static Sink (SS)
[9] Energy-Hole
[10] Hot spot

می‌دهند، با اینکه تعداد زیادی گره در شبکه با میزان قابل‌توجهی انرژی، هنوز زنده هستند، به‌خاطر از بین‌رفتن زودهنگام این گره‌ها، ارتباط گره‌های فعال شبکه با چاهک قطع می‌شود و طول عمر شبکه کاهش می‌یابد [۴, ۵].

یک روش برای کاهش فاصله ارتباطی بین گره‌های حسگر و چاهک ثابت، استفاده از چندین چاهک ثابت [۶]، است که هر گره حسگر، داده را باتوجه به موقعیت خود به نزدیکترین چاهک ارسال می‌کند. اما چالش موجود در این روش، قرارگیری صحیح چاهک‌های ثابت در شبکه است که استقرار بهینه آن‌ها، در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست؛ زیرا گره‌هایی که نزدیک به یک چاهک ثابت خاص هستند در مقایسه با بقیه گره‌ها انرژی بیشتری را از دست می‌دهند و باعث ایجاد چاله انرژی می‌شوند. برای غلبه‌بر مشکلات یک یا چند چاهک ثابت، مفهوم چاهک متحرک[1] [۷-۹]، معرفی شده است؛ که تعادل بار و مصرف انرژی یکنواخت را در سراسر شبکه بدون تلاش اضافی فراهم می‌کند. به طورکلی چاهک‌های متحرک، اشیاء متحرکی با قدرت باتری نامحدود می‌باشند که می‌توانند به‌صورت یک ربات هوشمند، هواپیمای بدون‌سرنشین(UAV)[2] [۱۰] و یا وابسته به انسان، که دارای لپ‌تاپ نصب شده بر روی وسیله نقلیه یا اتصال چاهک به بازوی انسان[۱۱]، در نظر گرفته شوند. چاهک‌های متحرک می‌توانند در سراسر زمین حتی در مناطق خطرناک و دورافتاده، باتوجه به الگوهای حرکتی تصادفی، قابل‌پیش‌بینی/ثابت و کنترل‌شده برای جمع‌آوری داده‌ها حرکت کنند [۳]، و درنهایت تمام داده‌ها را به ایستگاه پایه ارسال کنند. دلیل دیگر برای معرفی چاهک‌های متحرک این است که برخی برنامه‌ها به شبکه حسگری نیاز دارند که گره‌های حسگر در آن به‌جای ثابت بودن، متحرک باشند، ازاین‌رو شبکه‌های حسگر بی‌سیم متحرک[3] (MWSNs) که اجازه می‌دهند گره‌های حسگر آزادانه حرکت کنند و با یکدیگر ارتباط برقرار کنند در زندگی بشر، چشم‌انداز بیشتری پیدا کرده‌اند [۱۲]. بنابراین استفاده از چاهک‌های متحرک، به‌دلیل مزایای زیادی مانند رفع مشکل نقاط‌داغ و جلوگیری از ایجاد چاله‌انرژی، افزایش طول عمر حسگرها، کاهش ارتباط چند گامی، کاهش مصرف انرژی، بهبود امنیت و درنهایت پوشش بهتر، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند [۱۳, ۱۴]. اما از طرفی، اگرچه چاهک متحرک مزایای زیادی را شامل می‌شود، ولی با چالش‌های جدیدی به‌دلیل تحرک گره چاهک مانند تبلیغ موقعیت چاهک متحرک در گره‌های حسگر و مسئله تنظیم مسیریابی مواجهه می‌شود [۳].

در این مقاله علاوه بر خوشه‌بندی مناسب گره‌های حسگر، از دو چاهک متحرک کنترل‌شده، با تکنیک مناسبی برای به‌روزرسانی مکان چاهک‌ها استفاده شده است. این دو چاهک متحرک، با استفاده از مدل تحرک RWP[4] اولویت‌بندی شده، به‌صورت کنترل‌شده با درنظرگرفتن پارامترهایی مانند ناحیه متراکم و سرخوشه[5] متراکم، یک مکان مناسب را در محیط شبکه انتخاب و به سمت آن حرکت می‌کنند. نقاط قوت روش پیشنهادی نسبت به بقیه روش‌های موردمطالعه، به این صورت است که: در روش پیشنهادی به دلیل استفاده از ذخیره‌کردن اطلاعات در صف سرخوشه‌ها و حالت Stand By، گره‌های کمتری از بین می‌روند و از طرفی هم به دلیل حرکت چاهک‌ها به‌صورت اولویت‌بندی، از قحطی‌زدگی خوشه‌ها جلوگیری شده است. سپس به‌خاطر اینکه چاهک‌ها با یکدیگر ارتباط مستقیمی دارند، درصد قابل‌قبولی از گره‌های حسگر توسط چاهک‌ها پوشش داده می‌شوند. درنهایت، تکنیک‌های مورداستفاده در این روش، باعث به‌حداقل‌رساندن مصرف انرژی، افزایش طول عمر و همچنین افزایش پوشش‌دهی شبکه می‌شوند. در ادامه، این مقاله به شرح زیر سازماندهی می‌شود: در بخش دوم کارهای مرتبط در زمینه رفع چالش‌های موجود در چاهک متحرک و همچنین طرح‌های استفاده از چندین چاهک متحرک موردبحث قرار گرفته است. جزئیات روش پیشنهادی در بخش سوم شرح داده شده است. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نمایش، و مورد ارزیابی قرار گرفته است و در پایان، در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری از روش پیشنهادی خواهیم داشت.

۲- کارهای مرتبط

همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد، یکی از روش‌های مناسب برای کاهش مصرف انرژی، جلوگیری از ایجاد چاله‌های انرژی و افزایش طول عمر شبکه، استفاده از چاهک متحرک است. ازآنجایی‌که افزایش تعداد چاهک‌های متحرک به معنای توزیع داده‌ها در بین این چاهک‌هاست، بنابراین استفاده از چندین چاهک متحرک موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش تأخیر در ارسال اطلاعات و کاهش ارتباطات چند گامی می‌شود. اخیراً بسیاری از محققان از این معیار برای توازن بهتر در شبکه استفاده می‌کنند [۴]. بنابراین در ادامه به مروری بر کارهای انجام‌شده برای رفع چالش‌های نام‌برده شده، و همچنین طرح‌های استفاده از چندین چاهک متحرک پرداخته شده است.

۲-۱. پژوهش‌های مبتنی‌بر کاهش هزینه به‌روزرسانی مکان چاهک متحرک

به‌دلیل تحرک گره چاهک، هر گره حسگر قبل از انتقال داده خود، باید از آخرین موقعیت چاهک آگاه باشد تا بتواند آنها را به

[1] Mobile Sink
[2] Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
[3] Mobile Wireless Sensor Networks (MWSNs)
[4] Random Way Point (RWP)
[5] Cluster head

چاهک ارسال کند. باتوجه‌به منابع کمیاب انرژی گره‌ها، نحوه نگه‌داری از موقعیت‌های جدید چاهک‌های متحرک، یک مشکل اساسی است که برای رفع آن ناگامالار و رانگاسوامی [۱۵]، وانگ و همکاران [۱۶] و همچنین لیو و همکاران [۱۷]، با هدف کاهش تبلیغات سربار مکان چاهک، فقط مجموعه‌ای از سرخوشه‌ها را طبق برخی قوانین انتشار، مسئول حفظ مسیرهای جدید مکان بعدی چاهک‌های متحرک در نظر گرفتند و درنهایت، آن سرخوشه‌ها اطلاعات محل چاهک‌های متحرک را به‌صورت کنترل‌شده، به سرخوشه‌های باقیمانده منتقل می‌کنند. همچنین در [۱۸]، یک الگوریتم مسیریابی تودرتو[1] توسط یاری‌نژاد پیشنهاد شد. در این روش با ایجاد حلقه‌ها توسط گره‌های روتر، این گره‌ها از آخرین موقعیت چاهک نگه‌داری می‌کنند و به درخواست دریافت‌شده موقعیت چاهک، از بقیه گره‌ها پاسخ می‌دهند. کومار و کومار [۱۹]، یک روش مسیریابی آگاه از موقعیت مکانی، برای چاهک‌های متحرک کنترل‌شده[2] (LARCMS)، ارائه دادند. در این روش از دو نوار برای حرکت دو چاهک متحرک استفاده کرده‌اند. حرکت چاهک‌ها در این نوارها، به این صورت است که، وقتی یکی از چاهک‌ها به گوشه شبکه رسید، دیگری به‌صورت عرضی به مرکز شبکه حرکت کند. گره‌هایی که در این دو نوار وجود دارند را به‌عنوان گره‌های آگاه از مکان، برای ذخیره موقعیت به‌روزشده چاهک‌های متحرک در نظر گرفتند.

۲-۲. پژوهش‌های مبتنی‌بر مسیریابی چاهک متحرک با استفاده از خوشه‌بندی

مسیر حرکت چاهک متحرک، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد شبکه دارد. درارتباط با چالش تنظیم مسیریابی، مسیریابی چاهک هم باید به‌گونه‌ای باشد که ضمن توازن‌بار بر روی گره‌های مختلف، طول عمر شبکه را حداکثر سازد. کوششی و عبادی [۲۰]، یک استراتژی تعیین‌مسیر چندین چاهک متحرک را برای روش خوشه‌بندی به‌کاررفته، در WSN ارائه دادند. رویکرد پیشنهادی آنها، گره‌های حسگر را بر اساس منطق‌فازی به خوشه‌های نابرابر تقسیم می‌کند. میدان سنجش به ۱۶ منطقه مساوی تقسیم شده، و میانگین انرژی باقیمانده در هر منطقه برای تعیین مسیرهای مطلوب چاهک‌های متحرک محاسبه شده است. نویسندگان نشان دادند که رویکرد معرفی شده آنها، باعث کاهش مصرف انرژی و رفع چاله‌های انرژی موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌شود. ویجیاشری و داس [۲۱]، استراتژی جمع‌آوری داده را برای چندین چاهک متحرک، با یک طرح خوشه‌بندی ارائه دادند. در این روش، مسیر جمع‌آوری اطلاعات برای چندین چاهک متحرک، با استفاده از الگوریتم ABC[3]، ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد پیشنهادی آنها، کاهش مؤثری در انتقال داده‌های اضافی، حفظ انرژی گره‌ها و طول عمر شبکه را نشان داده است. یک روش ترکیبی به نام HM-ACOPSO، برای برنامه‌ریزی مسیر حرکت چاهک متحرک، توسط گائو و همکاران [۲۲]، ارائه شد. در روش پیشنهادی برای انتخاب کوتاهترین مسیر، چاهک متحرک سرخوشه‌ها را به‌ترتیب الگوریتم ACO، طی می‌کند و سرانجام با استفاده از الگوریتم PSO، که هدفش به حداقل رساندن مسیر حرکت چاهک متحرک است، برای هر سرخوشه، یک گره لنگر[4] انتخاب می‌کند. اشکال اصلی این روش، این است که از یک چاهک متحرک استفاده کرده‌اند که منجر به تأخیر زیاد در جمع‌آوری داده‌ها می‌شود. شارکاویا و همکاران [۱۹]، یک طرح مسیریابی و خوشه‌بندی داده دینامیک چاهک متحرک با انرژی کارآمد[5] (EMSDRC)، برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش طول عمر WSNs، ارائه دادند. عملیات طرح پیشنهادی، در حالت‌های پیکربندی و عملیاتی انجام می‌شود. حالت پیکربندی شامل ساخت خوشه، زمان‌بندی TDM، و انتخاب سرخوشه است. از طرف دیگر، حالت عملیاتی برای انجام دو هدف اصلی، سنس‌کردن و جمع‌آوری داده‌ها، توسط هر سرخوشه استفاده می‌شود. و برای مسیریابی داده مبتنی‌بر چاهک متحرک، تعداد بهینه نقاط قرارملاقات[6] (RVPs) انتخاب می‌شود، که بهترین مسیر چاهک متحرک با استفاده از خوشه‌بندی K-mean، و الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود. آگاروال و همکارانش [۲۳]، یک تکنیک مسیریابی داده هوشمند، برای WSNs، بر اساس چاهک متحرک برای جمع‌آوری داده‌ها پیشنهاد کردند. آنها از الگوریتم PSO، برای تشکیل خوشه بهینه استفاده می‌کنند. در مرحله بعد، نقاط قرارملاقات بر اساس، میانگین تمام مختصات X-Y برای گره‌های حسگر هر منطقه، ارزیابی می‌شوند. در نهایت، آنها از این نقاط قرارملاقات برای رسم مسیر چاهک متحرک، برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌کنند. نقطه ضعف اصلی این رویکرد، ارزیابی نقاط قرارملاقات بدون درنظرگرفتن موقعیت واقعی سرخوشه است.

۲-۳. پژوهش‌های مبتنی بر استفاده از چندین چاهک متحرک

کریمی و امینی [۲۴]، برای بهبود حفظ انرژی و افزایش تعادل بار، یک الگوریتم مسیریابی مبتنی‌بر خوشه، بر اساس چندین مسیر حرکت قابل‌پیش‌بینی برای چاهک‌های متحرک ارائه دادند.

[1] Nested
[2] Location Aware Routing for Controlled Mobile Sinks (LARCMS)
[3] Artificial Bee Colony (ABC)
[4] Anchor
[5] Energy-efficient Mobile Sink-dynamic Data Routing and Clustering (EMSDRC)
[6] rendezvous points (RVPs)

آنها شبکه انتخابی را به‌شکل یک شش‌ضلعی، متشکل از سه لوزی که هر لوزی به‌عنوان یک خوشه در نظر گرفته شده است، انتخاب کردند. چاهک‌ها پس از یک پیام موقعیت خود را در سراسر شبکه پخش، و گره‌های حسگر با توجه با این پیام دریافتی، مناسب‌ترین چاهک را برای انتقال داده‌های خود انتخاب می‌کنند. کولی و سامانتا [۲۵]، یک طرح جمع‌آوری داده‌های کارآمد انرژی، با استفاده از چندین چاهک متحرک بر اساس تئوری Cooperative game، پیشنهاد دادند. در مدل پیشنهادی، چاهک‌های متحرک بازیکن هستند و حرکت چاهک‌ها به‌صورت توزیع‌شده، است. سپس انتقال داده به ایستگاه پایه به دو روش: ارسال مستقیم و ارسال از طریق دروازه‌های ثابت[1] انجام شده است. روشی به نام EGRPM، توسط نقیبی و براتی [۲۶]، معرفی شد که در آن، شبکه به برخی سلول تقسیم شده است و سپس از دو چاهک متحرک برای جمع‌آوری داده‌های گره‌های سلولی، استفاده کرده‌اند. باتوجه به محل قرارگیری سلول‌ها، سلول‌هایی که در فاصله تک گامی از چاهک قرار دارند به‌صورت مستقیم داده‌های خود را ارسال می‌کنند، اما سلول‌هایی که در فاصله چند گامی چاهک قرار دارند، عامل سلول فعلی، بهترین مسیر و کوتاهترین مسیر را از بین مجموعه Nnear، که در مقایسه با عامل سلول فعلی از همسایگان نزدیک به چاهک محسوب می‌شوند، انتخاب می‌کند. پراسانت [۲۷]، یک روش انتخاب مسیر بهینه شده برای چندین چاهک متحرک را، بر اساس برنامه‌ریزی‌وزنی برای نقاط ملاقات[2] (WRP)، ارائه داد. در این مقاله، از روش تقسیم منطقه سازگار مبتنی‌بر Q-learning، برای تقسیم شبکه به مناطق کوچکتر و برای ارزیابی مسیر بهینه، از الگوریتم PSO، استفاده کرده است. نویسنده استدلال کرد که به‌دلیل کاهش مصرف انرژی در انتقال چند گامی، طول عمر شبکه افزایش یافته است. یک پروتکل مسیریابی مبتنی‌بر ACO، با پشتیبانی از چندین چاهک متحرک برای WSNs، به نام IARP، توسط موسی و علویی [۲۸]، پیشنهاد شد که از الگوریتم LEACH بهبودیافته، برای جلوگیری از خوشه‌بندی مجدد در هر دور استفاده کرده‌اند. سپس برای یافتن یک مسیر بهینه، حرکت چاهک متحرک بر اساس ACO، بهبود یافته است، که در این الگوریتم علاوه بر پارامتر فرمون، پارامترهای انرژی باقیمانده و تعداد گام را نیز درنظر گرفتند. همچنین در این تحقیق یک الگوریتم تحمل خطا برای مقابله با خرابی سرخوشه‌ها هم ارائه شده است. القاسم و همکاران [۲۹]، یک استراتژی برنامه‌ریزی مسیر بهینه، بر اساس طرح SEA[3]، معرفی کرده‌اند که تعداد تقسیم‌بندی میدان سنجش به تعداد دلخواه چاهک متحرک مستقر، بستگی دارد. در این روش از الگوریتم SEA، برای به حداقل رساندن تبادل پیام و یک الگوریتم تعیین محل اقامت بر اساس MWVCP[4]، ارائه دادند تا بهترین موقعیت را برای توقف کردن چاهک‌ها و جمع‌آوری داده‌ها از سرخوشه، بررسی کنند. درنهایت برای ایجاد یک مسیر بهینه چاهک متحرک، الگوریتم MOEA، پیشنهاد شد که برای ارزیابی مسیرهای بهینه شده چاهک متحرک، از سه روش بهینه‌سازی ACO، GA و SA استفاده کردند. موسی و همکارانش [۳۰]، یک روش مسیریابی WSN، بر اساس ACO، با چاهک متحرک را پیشنهاد کردند. الگوی خوشه چند چاهک WSN، توسط این فناوری صرفه‌جویی در انرژی، ارائه شده است. جایی که ACO، برای محاسبه مسیر بهینه چاهک متحرک استفاده می‌شود، سرخوشه با انرژی باقیمانده و فاصله از گره‌های حسگر تعیین می‌شود. نویسندگان یک تکنیک قابل اعتماد برای انرژی مؤثر، پیشنهاد کردند. با این‌حال، آنها اولویت منطقه را نادیده گرفتند، و از آنجایی که پیام‌هایی که از گره‌های حسگر واقع‌در مناطق، با اولویت بالا می‌آیند باید بلافاصله به گره چاهک منتقل شوند. بنابراین نادیده‌گرفتن اولویت منطقه، می‌تواند تأخیر تحویل فوری داده‌ها، و نرخ خطا را افزایش دهد، که تأثیر منفی بر تأخیر و یا توان‌عملیاتی جریان‌داده با اولویت بالا را دارد. لیو و گوا [۳۱]، یک پروتکل مسیریابی سلسله‌مراتبی مبتنی بر بیشینه‌سازی پوشش چندین چاهک متحرک[5](MMSCM)، برای شبکه‌های حسگربی‌سیم‌متحرک ارائه دادند، که می‌تواند از گره‌های حسگر و چاهک‌های متحرک پشتیبانی کند. MMSCM، ناحیه نظارت را به شبکه‌های مجازی تقسیم می‌کند و یک چاهک متحرک را در هر سلول‌شبکه مستقر می‌کند. در مرحله راه‌اندازی، MMSCM، مصرف کل انرژی، پوشش منطقه، چگالی انرژی و عامل تحرک را در یک تابع تطبیقی برای انتخاب سرخوشه، ترکیب می‌کند و بهترین سرخوشه را با الگوریتم ژنتیک اپراتور جفت باکتری (HPGA)، برای بهینه‌سازی انتخاب می‌کند. و سرانجام جنگل‌های مسیریابی قوی بین خوشه‌ها، با انتخاب بهترین گام بعدی برای هر سرخوشه، ساخته می‌شوند. در مرحله تثبیت، چاهک جنگل مسیریابی بهینه را در مناطق مربوطه خود می‌سازد و از یک استراتژی حداکثرسازی پوشش برای انتقال دسترسی به گره ریشه هر درخت مسیریابی، استفاده می‌کند. یک شمای کلی از کارهای مرتبط در رابطه با طرح‌های استفاده از چندین چاهک متحرک در جدول (۱)، ارائه شده است.

[1] Static Gateway
[2] Weighted Rendezvous Planning (WRP)
[3] Stable Election Algorithm
[4] Minimum Weighted Vertex Cover Problem
[5] Multiple Mobile Sinks Coverage Maximization

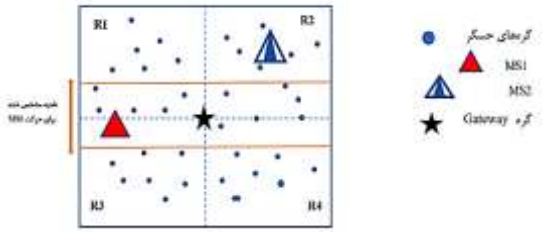
جدول (۱). خلاصه‌ای از روش‌های استفاده از چندین چاهک متحرک

منابع	چکیده	توضیحات
[۱۹]	تعداد MS	۲
	الگوی حرکتی	ثابت
	اهداف	کاهش تأخیر گزارش، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه
	مدیریت تحرک	حرکت دو چاهک در دو مدار مشخص شده
	مزایا	مدیریت به‌روزرسانی موقعیت چاهک، به‌حداقل‌رساندن تأخیر
[۲۴]	تعداد MS	۶
	الگوی حرکتی	ثابت
	اهداف	افزایش طول عمر شبکه و کاهش میانگین فاصله بین سرخوشه‌ها و چاهک‌های متحرک
	مدیریت تحرک	حرکت در امتداد یک مثلث داخلی متشکل از اتصال قطرهای بزرگ سه لوزی در یک منطقه ۶ ضلعی
	مزایا	کاهش میانگین فاصله بین سرخوشه‌ها و چاهک‌های متحرک توسط منطقه شش‌ضلعی
[۲۵]	تعداد MS	N
	الگوی حرکتی	کنترل شده
	اهداف	حداکثر جمع‌آوری داده، کاهش ازبین‌رفتن داده‌ها، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه
	مدیریت تحرک	بدون محدودیت
	مزایا	ارتباط بهتر بین گره‌های حسگر و چاهک‌ها به دلیل تقسیم منطقه به مناطق کوچک‌تر
[۲۶]	تعداد MS	۲
	الگوی حرکتی	ثابت
	اهداف	حداکثر جمع‌آوری داده، کاهش مصرف انرژی
	مدیریت تحرک	حرکت در دو مدار هم‌مرکز به شکل لوزی در جهت عقربه‌های ساعت
	مزایا	افزایش میزان تحویل بسته‌ها به دلیل به‌حداقل‌رساندن احتمال برخورد بین بسته‌ها و کاهش مصرف انرژی
[۲۷]	تعداد MS	۵
	الگوی حرکتی	کنترل شده
	اهداف	تعیین مجموعه‌های نقاط ملاقات و مسیرهای بهینه، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه
	مدیریت تحرک	انتخاب مسیر بهینه توسط PSO از نقاط ملاقات انتخابی طبق WRP
	مزایا	کاهش تعداد ارتباطات، متعادل‌کردن مصرف انرژی
[۲۸]	تعداد MS	۱-۴
	الگوی حرکتی	کنترل شده
	اهداف	کاهش ترافیک اطراف هر چاهک و به حداکثر رساندن طول عمر شبکه
	مدیریت تحرک	انتخاب مسیر بهینه توسط ACO
	مزایا	کاهش مصرف انرژی توسط ACO بهبودیافته و محدودکردن دامنه جستجو مورچه‌ها، وجود الگوریتم تحمل خطا برای مقابله با خرابی سرخوشه‌ها
[۲۹]	تعداد MS	۱-۴
	الگوی حرکتی	ثابت
	اهداف	کاهش تعداد گام، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه
	مدیریت تحرک	ایجاد یک مسیر بهینه توسط الگوریتم MOEA
	مزایا	الگوریتم SEA از چرخش سرخوشه در هر دور جلوگیری می‌کند. SEA با حذف تبادل پیام غیرضروری در هنگام تشکیل خوشه ، انرژی گره را حفظ می‌کند

۳- روش پیشنهادی

در این طرح پیشنهادی، N گره حسگر متحرک همگن، در محیطی دوبعدی با ابعاد M*M، به‌صورت تصادفی قرار گرفته‌اند. برای افزایش مقیاس‌پذیری شبکه و کاهش سربار ارتباطات، علاوه بر خوشه‌بندی گره‌ها، محیط شبکه در ابتدا به‌صورت جغرافیایی به چهار ناحیه یکسان (R1,R2,R3,R4) تقسیم شده است، سپس از دو چاهک متحرک، و یک گره مرکزی به نام Gateway که دارای ظرفیت انرژی با منابع نامحدود است، استفاده شده است. چاهک متحرک اول (MS1)، به‌صورت کنترل‌شده در یک محیط مشخص، چاهک متحرک دوم(MS2)، به‌صورت تصادفی و گره Gateway که به‌عنوان ایستگاه پایه در نظر می‌گیریم، در مرکز شبکه به‌صورت ثابت که به اینترنت متصل است، مستقر شده است. در این روش، فرض می‌شود تمامی گره‌های حسگر علاوه بر اینکه از موقعیت مکانی خودآگاه هستند، آنها به طور دائم در حال سنس کردن داده به‌صورت دوره‌ای می‌باشند. همچنین، دو چاهک متحرک به‌صورت دوره‌ای با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند و هیچ‌گاه از محیط خارج نمی‌شوند. شکل (۱)، یک شمای کلی از شبکهٔ مدنظر ما را نشان می‌دهد. ازآنجایی‌که گره حسگر، برای ارسال داده به مسافت دورتر، نیازمند مصرف انرژی بیشتری است، در روش پیشنهادی، محدوده انتقالی که برای ارسال یا دریافت داده، توسط گره‌های حسگر در نظر می‌گیریم ۵۰m است. همچنین به دلیل این‌که چاهک، بی‌سیم و به‌صورت

متحرک در نظر گرفته شده است و قطعاً با باتری کار می‌کند، پس محدوده انتقال دو چاهک متحرک را ۵۰۰ m در نظر می‌گیریم که مصرف باتری هم زیاد نشود؛ بنابراین به دلیل استفاده از بحث ناهمگونی ارتباطات، گره‌های حسگر می‌توانند از چاهکی که ۵۰۰ m با آن فاصله دارند پیامی دریافت کنند، اما آنها به دلیل محدوده انتقال کمتر، نمی‌توانند پیامی را برای چاهک ارسال کنند.



شکل (۱). نمایی از پخش گره‌ها در ناحیه شبکه و مکان اولیه چاهک‌ها

باتوجه‌به توضیحاتی که برای روش LARCMS [۱۹]، در بخش قبل دادیم، مشکلی که این روش دارد به این صورت است که تک‌تک گره‌های حسگر موجود باید داده‌های خود را به چاهک متحرک ارسال کنند، که در اینجا انرژی زیادی مصرف می‌شود. و همچنین گره‌هایی که فاصله زیادی تا چاهک دارند، بعد از چندین‌گام می‌توانند اطلاعات خود را به چاهک ارسال کنند، در نتیجه، سربار مسیریابی چند گامی در این روش افزایش می‌یابد. تفاوتی که روش پیشنهادی با روش LARCMS، دارد به این صورت است که برای جلوگیری از این‌که تمام گره‌های حسگر، داده‌های خود را به چاهک متحرک ارسال کنند، از خوشه‌بندی استفاده شده است که منجربه کاهش مصرف انرژی می‌شود[۳۲]. همچنین به‌جای اینکه تمام گره‌هایی که در محدوده مشخص شده قرار گرفته‌اند به‌عنوان گره‌های آگاه از مکان درنظر گرفته شوند، فقط سرخوشه‌های آن منطقه، به عنوان سرخوشه‌های آگاه از مکان درنظر گرفته می‌شوند. درنهایت با استفاده از دو چاهک، که یکی از آن‌ها به‌صورت کنترل‌شده و دیگری به‌صورت تصادفی در شبکه مستقر می‌شوند، سعی در بهبود مصرف انرژی و همچنین افزایش طول عمر شبکه را داریم. در ادامه به معرفی بخش‌های روش پیشنهادی می‌پردازیم.

۳-۱. خوشه‌بندی گره‌های حسگر

در خوشه‌بندی روش پیشنهادی، پارامتر فاصله هم در نظر گرفته شده است که در آن، سرخوشه بر اساس بیشترین انرژی باقیمانده انتخاب می‌شود. سرخوشه‌های انتخابی دو نقشِ، سرخوشه‌های آگاه از مکان و سرخوشه‌های نرمال را شامل می‌شوند که از آنها برای ذخیره موقعیت به‌روز شده چاهک‌ها استفاده شده است. شرط تبدیل‌شدن به سرخوشه‌های آگاه از مکان در رابطه (۱)، در مقاله [۱۹] آورده شده است، سپس این سرخوشه‌ها پس از انتخاب شدن، یک بسته‌ای به نام Type CH، که در جدول (۲)، ارائه شده است را برای اطلاع‌رسانی به سرخوشه‌های اطراف خود ارسال می‌کنند. به این طریق، همه سرخوشه‌ها از نقش و موقعیت خود مطلع می‌شوند. بنابراین سرخوشه‌های آگاه از مکان، برای ذخیره موقعیت به‌روزشده چاهک متحرک اول و سرخوشه‌های نرمال، برای ذخیره موقعیت به‌روزشده چاهک متحرک دوم درنظر گرفته شده‌اند. شکل (۲)، شبه‌کد طریقه انتخاب سرخوشه‌های آگاه از مکان و نرمال را نشان‌می‌دهد.

$$\frac{X\ max}{2}(1-Py) \le Xi \le \frac{X\ max}{2}(1-Py) \quad (۱)$$

X max، طول شبکه است. Xi، موقعیت گره سرخوشه در جهت X، است و Py، مقدار کمتر از ۱ را شامل می‌شود.

جدول (۲). مشخصات ارسالی پیام Type CH توسط سرخوشه‌های آگاه ازمکان

CH_ID	CH_Type	CH_Position

Algorithm 1: (Select Location aware clusters head and normal)

1. Start
2. Random distribution of sensor nodes in a network environment
3. Clustering of sensor nodes
4. If(Formula 1 is valid) Then
5. Select clusters head, as Location aware clusters head
6. Distribute Type CH (Tabel 1) package by Location aware clusters head to neighboring clusters head
7. Save the updated position of MS1 in the Location aware clusters head
8. Else
9. Select the cluster head as the normal cluster head
10. End

شکل(۲). طریقه انتخاب سرخوشه‌های آگاه از مکان و نرمال

از طرفی برای کنترل بار و جلوگیری از سریع پر شدن صف سرخوشه، یک حد آستانه‌بالا روی اعضای هر خوشه در نظر گرفته‌شده است که اگر تعداد اعضای یک خوشه بیشتر از حد آستانه در آن محدوده انتقال گره حسگر شد، آن خوشه به دو بخش کوچک‌تر تقسیم شود. ازآنجایی‌که در نظر داریم، سرخوشه داده‌ها را در خود ذخیره کند تا چاهک متحرک در نزدیکی آن قرار گیرد، پس در این ایده تعداد خوشه‌های زیاد، باعث می‌شود که بار بر روی سرخوشه‌ها کمتر شود. حال هر چه مقدار باری که سرخوشه تحمل می‌کند کمتر باشد، مدت‌زمان بیشتری می‌تواند منتظر چاهک باشد که در نتیجه، کمتر به استفاده از مسیریابی چند گامی نیاز پیدا می‌کند؛ بنابراین، سربار مسیریابی چند گامی در این روش کاهش می‌یابد. همچنین برای جلوگیری از سریع ازبین‌رفتن سرخوشه‌ها، در نظر گرفته‌ایم که هرگاه مقدار انرژی باقیمانده گره سرخوشه فعلی، کمتر از ۲۰ درصد میانگین کل انرژی باقیمانده گره‌های حسگر شد، سرخوشه فعلی باید باتوجه‌به انرژی باقیمانده و نرخ مصرف انرژی، یک سرخوشه جدید انتخاب

کند و سپس اطلاعاتش را به آن منتقل کند. در نهایت، سرخوشه جدید یک بسته‌ای حاوی شناسه و موقعیت خود در شبکه پخش می‌کند تا تمامی گره‌ها از وجود سرخوشه جدید مطلع شوند.

۳-۲. به‌روزرسانی موقعیت چاهک‌ها

چاهک‌های متحرک بعد از دریافت موقعیت اولیه، یک بسته update-sink-position، طبق جدول (۳)، را به سرخوشه‌های همسایه پخش می‌کنند. سپس سرخوشه‌های همسایه با دریافت این پیام پس از ذخیره این اطلاعات در لیست چاهک محلی، آنها فیلد تعداد گام درون بسته که در ابتدا صفر بوده است را به مقدار یک به‌هنگام، و سپس شناسه خود را هم به پیام اضافه، و در آخر بسته پیام را برای همسایه‌ها ارسال می‌کنند. گره‌های سرخوشه همسایه نیز به محض دریافت این پیام، چک می‌کنند اگر این پیام را قبلاً دریافت نکرده باشند، گره مربوطه را به لیست همسایگان تک گامی محلی خود اضافه می‌کنند و سرانجام یک واحد به فیلد تعداد گام درون بسته، اضافه و سپس پس از اضافه نمودن شناسه خود به پیام، به ارسال پیام ادامه می‌دهند، در غیر این صورت (یعنی اگر قبلا این پیام را دریافت کرده باشند) آن را نادیده می‌گیرند. بنابراین انجام این مراحل برای ثبت موقعیت چاهک متحرک اول، چاهک متحرک دوم و تعداد گام سرخوشه تا چاهک در هر زمان که چاهک موقعیت خود را تغییر می‌دهد، تکرار می‌شود و موقعیت جدید خود را به تمام سرخوشه‌ها اعلام می‌کند. شبه کد موجود در شکل (۳) نحوه به‌روز کردن موقعیت جدید دو چاهک متحرک را نشان‌می‌دهد.

جدول (۳). مشخصات ارسالی پیام update-sink-position، از چاهک‌های متحرک به سرخوشه‌ها

Sink_ID	Sink_Position	Stop_Time	Number of hup

Algorithm 2: (Update sink position)

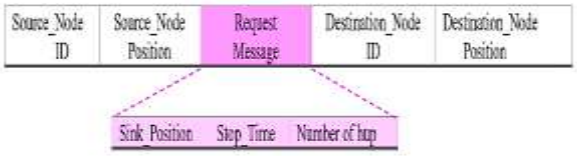
1. **As soon as** mobile sinks (MS1/MS2) enter the network randomly, do
2. **Send update-sink-position** message (**Tabel 2**) from mobile sinks to neighboring clusters head (Location aware clusters head/ Normal clusters head)
3. **while** (**All** clusters **head updates_sink_ positions**) **do**
4. **If** (I have not seen before this message) Then
5. **Update sink position** and (**number of hop +1**)
6. **Send** this message to my neighbors
7. **Else**
8. **Delete** this message
9. **End while**

شکل (۳). به‌روز کردن موقعیت جدید چاهک‌های متحرک

۳-۳. آگاهی گره‌های سرخوشه از موقعیت چاهک‌ها

سرخوشه‌های نرمال/ سرخوشه‌های آگاه از مکان، باید قبل از ارسال داده‌های خود، از موقعیت چاهک‌ها مطلع باشند تا سرانجام سرخوشه‌ها برای کاهش مصرف انرژی خود، نزدیک‌ترین چاهک را برای ارسال داده انتخاب کنند. حال باتوجه‌به شکل (۴)، زمانی که یک سرخوشه نرمال (به‌عنوان مثال سرخوشه شماره یک) خواستار دریافت موقعیت جدید گره چاهک متحرک اول باشد، از آنجایی که موقعیت به‌روزشده گره چاهک متحرک اول، فقط در سرخوشه‌های آگاه از مکان موجود است، پس یک پیام درخواست SP[1]، با مشخصات جدول (۴)، را به نزدیکترین سرخوشه آگاه از مکان (به‌عنوان مثال سرخوشه شماره دو) ارسال، و به اندازه $t+\alpha$ (برای مثال ۱۵ms) صبر می‌کند. سرخوشه آگاه از مکان بلافاصله پس از دریافت این پیام، موقعیت چاهک متحرک اول و تعدادگام چاهک تا سرخوشه منبع را محاسبه می‌کند و سپس در قالب یک پیامِ پاسخ، (فرض کنید در بازه موردنظر ۱۵ms) به سرخوشه نرمال ارسال می‌کند و این سرخوشه با موقعیت و تعداد گام خود تا چاهک متحرک اول آشنا می‌شود. سپس سرخوشه شماره یک برای ارسال داده‌های خود به چاهک، از مسیریابی‌های پیشنهادی که در ادامه توضیح خواهیم داد، استفاده می‌کند. در این میان، سرخوشه‌های میانی که پیام‌های پاسخ SP، را به سمت سرخوشه منبع هدایت می‌کنند، ممکن است از موقعیت چاهک متحرک اول اطلاع داشته‌باشند، پس این سرخوشه‌ها می‌توانند از این اطلاعات برای انتقال داده‌های خود به چاهک متحرک اول استفاده کنند و بار سرخوشه‌های آگاه از مکان را کاهش دهند.

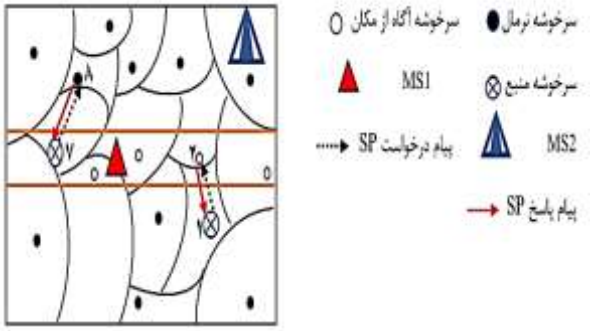
جدول (۴). مشخصات ارسالی پیام درخواست SP از سرخوشه‌ها به چاهک‌ها



از طرفی ممکن است همین مسئله برای سرخوشه‌های آگاه از مکان هم به وجود آید؛ به این صورت که اگر یک سرخوشه آگاه از مکان (به‌عنوان‌مثال سرخوشه شماره هفت) خواستار دریافت موقعیت چاهک متحرک دوم باشد، باید پیام درخواست SP، خود را طبق جدول (۴)، به نزدیکترین سرخوشه نرمال (مثلاً سرخوشه شماره هشت) ارسال و به‌اندازه $t+\alpha$ صبر کند، اگر در این بازه موردنظر، پیام پاسخی دریافت کرد که از موقعیت و تعدادگام خود تا چاهک متحرک دوم، مطلع می‌شود و درنهایت برای ارسال داده‌های خود به چاهک، از مسیریابی پیشنهادی استفاده می‌کند. اما در غیر این صورت (اگر پس از $t+\alpha$ پاسخی دریافت نکرد) ، به‌اندازه یک بازه زمانی $t+\alpha+\beta$ ($\alpha<\beta$) برای مثال ۲۰ms)، صبر می‌کند اگر در این بازه زمانی، پیام پاسخی دریافت کرد، داده‌های خود را طبق مسیریابی‌های پیشنهادی به چاهک ارسال می‌کند. در غیر این صورت (یعنی پس از گذشت بازه‌های زمانی $t+\alpha$ و $t+\alpha+\beta$)، اگر هیچ پیام پاسخی دریافت نکرد،

[1] Sink Position (SP)

باتوجه‌به جدول خود یک گره سرخوشه نرمال دیگری را برای ارسال درخواست خود انتخاب می‌کند و این روند همچنان ادامه می‌یابد تا پاسخی دریافت کند، مگر اینکه دیگر همسایه‌ای نداشته‌باشد که در این حالت، گره برای ذخیره انرژی خود به حالت Stand By، می‌رود تا فقط از محیط اطراف خود مطلع باشد و هر زمان که متوجه گره سرخوشه همسایه‌ای، در اطراف خود شد، دوباره درخواست خود را برای آن گره ارسال کند.



شکل (۴). درخواست و دریافت موقعیت چاهک‌ها توسط گره منبع

۳-۴. ارسال اطلاعات از سرخوشه به چاهک

زمانی که گره منبع (سرخوشه‌های نرمال/ سرخوشه‌های آگاه از مکان)، خواستار ارسال اطلاعات به چاهک‌ها باشد پس از دریافت موقعیت چاهک‌ها، سه حالت برای ارسال اطلاعات سرخوشه‌ها به چاهک‌ها به وجود می‌آید که در ادامه حالت‌ها موردبحث قرار می‌گیرند:

حالت اول: سرخوشه در فاصله تک گامی از چاهک قرار دارد: در این حالت در ابتدا طبق رابطه (۲)، فاصله بین سرخوشه و چاهک‌های متحرک از طریق فاصله اقلیدوسی محاسبه می‌شود. در صورتی که رابطه (۳) برقرار باشد، آنگاه چاهک در محدوده انتقال سرخوشه که ۵۰ m است رسیده است، بنابراین سرخوشه بلافاصله داده‌ها را به‌صورت تک گامی (مستقیم) به چاهک متحرک ارسال می‌کند.

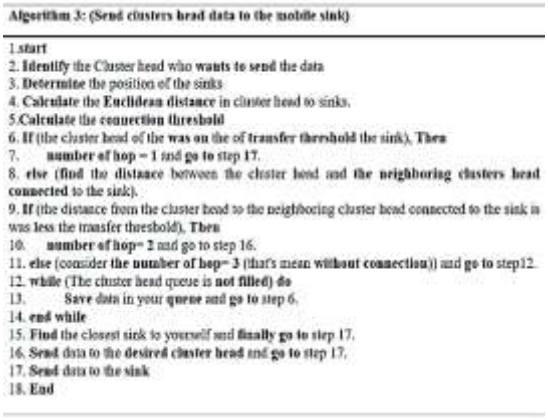
$$d_1 = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2} \quad (۲)$$

$$d_1 \leq CH\ communication\ range \quad (۳)$$

حالت دوم: سرخوشه در فاصله تک گامی از چاهک همسایه‌ای دارد: در این حالت هم در ابتدا طبق فاصله اقلیدسی، فاصله بین سرخوشه و چاهک‌ها محاسبه می‌شود. درصورتی‌که رابطه (۳) برقرار نباشد؛ یعنی هیچ‌کدام از چاهک‌ها در محدوده رادیویی گره سرخوشه قرار نداشته‌باشند، سرخوشه نمی‌تواند داده‌ها را به طور مستقیم به چاهک ارسال کند. بنابراین گره سرخوشه، در ابتدا نزدیکترین چاهک به خود را در نظر می‌گیرد، سپس در بین همسایگان خود آن سرخوشه‌ای که در محدوده رادیویی خود و در فاصله تک گامی از چاهک قرار دارد را انتخاب می‌کند و داده‌های خود را از طریق این سرخوشه‌همسایه، به‌صورت دو گامی به چاهک ارسال می‌کند.

حالت سوم: سرخوشه‌ای که هیچ چاهک متحرکی در فاصله تک گامی خود و هیچ همسایه‌ای بافاصله تک گامی چاهک، در نزدیکی‌اش وجود ندارد: در ابتدا حالت‌های اول و دوم بررسی می‌شود و مشخص می‌شود که نه‌تنها هیچ‌کدام از چاهک‌ها در محدوده سرخوشه قرار نگرفته‌اند، بلکه هیچ همسایه‌ای هم وجود ندارد که با چاهک یک گام فاصله داشته باشد. در این حالت برای استفاده‌نکردن از مسیریابی چند گامی (تعداد گام بیشتر از سه)، به دلیل سربار زیاد، از ذخیره داده‌ها در صف سرخوشه‌ها استفاده شده است. آن سرخوشه‌ای که خواستار ذخیره اطلاعات در صف خود است برای اینکه مدیریت انرژی انجام دهد، به‌اندازه یک‌زمان تصادفی به‌صورت دوره‌ای چک می‌کند، ببیند گره‌ای در همسایگی‌اش وجود دارد یا خیر. اگر همسایه‌ای وجود داشت که به ذخیره‌کردن داده‌ها ادامه می‌دهد، در غیر این صورت به حالت Stand By، می‌رود تا انرژی خود را ذخیره کند.

در حالت سوم، ذخیره داده‌ها به این صورت است که با درنظرگرفتن تئوری صف در سرخوشه‌ها، هر سرخوشه بر اساس نرخی که داده دریافت می‌کند، پیش‌بینی می‌کند که مثلاً چند دقیقه دیگر صفش پر می‌شود؛ بنابراین در زمانی که سرخوشه، همسایه‌ای دارد قبل از پر شدن صف خود، به‌جای این‌که داده‌های خود را به‌صورت چند گامی به چاهک ارسال کند، بعد از محاسبه فاصله خود تا چاهک‌ها، با ارسال یک پیام اضطراری، به‌صورت چند گامی که حاوی موقعیت و شرایط اضطراری خود است از چاهکی که کمترین تعداد گام تا خود را دارد، درخواست می‌کند که به سمت آن حرکت کند. اگر در زمان‌های مشخص، پاسخی دریافت کرد که در نهایت داده‌های خود را به سمت آن چاهک ارسال می‌کند. اما اگر بعد از زمان‌های موردنظر، پاسخی دریافت نکرد، در اینجا یک فرصت دیگر به سرخوشه برای ارسال داده‌ها، در نظر گرفته می‌شود؛ به این طریق که سرخوشه، درخواست جمع‌آوری داده‌هایش را به چاهک دیگری (چاهک دورتر)، ارسال کند؛ اما باز هم اگر از این چاهک پاسخی دریافت نکرد، دیگر نباید به ذخیره‌کردن داده‌ها در صف خود ادامه دهد؛ بلکه باید در حالت Stand By قرار گیرد؛ چون اگر به ذخیره‌کردن داده ادامه دهد صفش پر می‌شود، از طرفی هم انرژی سرخوشه از بین می‌رود و هم داده‌ها، Drop می‌شوند. شبه کد موجود در شکل (۵)، حالت‌های ارسال اطلاعات از سرخوشه به چاهک را نشان می‌دهد.


Algorithm 3: (Send clusters head data to the mobile sink)

1.start
2. **Identify** the Cluster head who **wants to send** the data
3. **Determine** the position of the sinks
4. **Calculate** the **Euclidean distance** in cluster head to sinks.
5.**Calculate** the **connection threshold**
6. **If** (the cluster head of the **was on** the of **transfer threshold** the sink), **Then**
7. **number of hop** = 1 and **go to** step 17.
8. **else (find the distance** between the cluster head and **the neighboring clusters head connected** to the sink).
9. **If** (the distance from the cluster head to the neighboring cluster head connected to the sink is was less the transfer threshold), **Then**
10. **number of hop**= 2 and go to step 16.
11. **else** (consider **the number of hop**= 3 (that's mean **without connection**)) and **go to** step12.
12. **while** (The cluster head queue is **not filled**) **do**
13. **Save** data in your **queue** and **go to** step 6.
14. **end while**
15. **Find** the closest sink to yourself and **finally go to** step 17.
16. **Send** data to the **desired cluster head** and **go to** step 17.
17. **Send** data to the sink
18. **End**

شکل (۵). ارسال اطلاعات سرخوشه‌ها به سمت چاهک‌های متحرک

۳-۵. حرکت چاهک‌های متحرک با استفاده از مدل RWP اولویت‌بندی شده

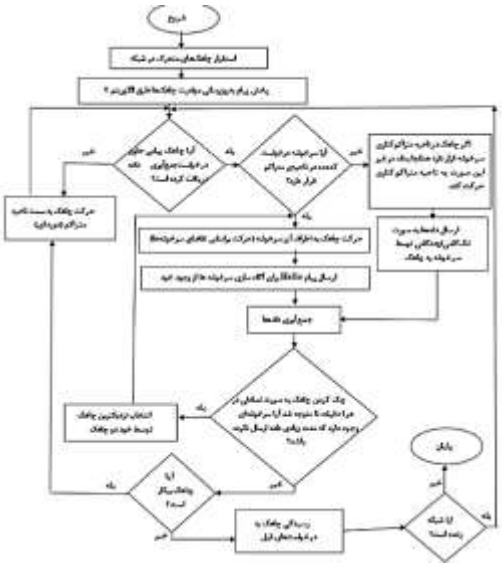
همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم، یکی از چالش‌هایی که در استفاده از چاهک متحرک وجود دارد، مسئله مسیریابی چاهک است که باعث مصرف انرژی می‌شود. در این مقاله برای رفع این چالش، از مدل حرکتی RWP، استفاده شده است. در مدل RWP [۳]، هر گره به‌صورت تصادفی، گره دیگری را به عنوان مقصد انتخاب می‌کند و با یک سرعت ثابت که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، به‌طرف آن مقصد، شروع به حرکت می‌کند. پس از رسیدن گره به مقصد، به‌اندازه یک‌زمان تصادفی T، توقف کرده و سپس گره دیگری را به‌عنوان مقصد انتخاب می‌کند و همان فرایند قبلی را تکرار می‌کند. دلیل استفاده از مدل RWP، به‌خاطر سادگی، در دسترس بودن و همچنین به‌خاطر استفاده گسترده در شبیه‌سازی شبکه‌های متحرک است. هدف ما در این تحقیق، هدفمند کردن مدل حرکتی RWP، است. در RWP اولویت‌بندی‌شده، با درنظرگرفتن پارامترهایی مانند سرخوشه متراکم (تعداد اعضای زیاد) و ناحیه متراکم (ناحیه‌ای که تعداد سرخوشه در آن زیاد باشد)، حرکت چاهک‌ها را اولویت‌بندی کرده‌ایم و از اینکه چاهک‌ها به‌صورت تصادفی هدفی را انتخاب کرده و به آن سمت حرکت کنند جلوگیری شده است. در این روش دریافت داده‌ها از گره‌ها توسط چاهک، فقط زمانی صورت‌می‌گیرد که چاهک برای مدت زمان خاصی(T)، ثابت می‌ماند که این مقدار T، توسط مدیر شبکه بر اساس برنامه تعریف می‌شود. در روش پیشنهادی چاهک‌ها به دو صورت تحرک دوره‌ای و تحرک بر اساس تقاضای سرخوشه[1] حرکت می‌کنند. در ادامه حالت‌ها مورد بحث قرار می‌گیرند.

تحرک دوره‌ای: در ابتدای شبکه که چاهک‌های متحرک درخواستی برای جمع‌آوری داده‌ها توسط سرخوشه‌ها دریافت نمی‌کنند (به عبارتی بیکار هستند)، آن‌ها به‌صورت دوره‌ای به سمت ناحیه‌ای از شبکه که تراکم بیشتر است، حرکت می‌کنند تا اگر سرخوشه‌ای داده‌ای برای ارسال داشت، با کمترین گام و کمترین مصرف انرژی داده خود را به چاهک ارسال کند. همچنین در این حالت به‌صورت دوره‌ای، با کمک ارتباط مستقیمی که چاهک‌ها با یکدیگر دارند، آنها از وجود سرخوشه‌هایی که به هر دلیلی نتوانسته‌اند برای مدت‌زمان زیادی داده‌های خود را ارسال کنند، مطلع می‌شوند و برای جمع‌آوری چنین داده‌هایی به سمت آنها حرکت می‌کنند. در نهایت با درنظرگرفتن این شرایط از بحث قحطی‌زدگی خوشه‌ها هم جلوگیری شده است.

تحرک بر اساس تقاضای سرخوشه: همان‌طور که می‌دانیم، زمانی که یک خوشه تراکمش زیاد باشد صف آن زود پر می‌شود و نمی‌تواند منتظر حرکت چاهک در فاصله تک گامی/ دو گامی خود باشد، پس تا قبل از پرشدن صف، سرخوشه باید به چاهک به‌صورت چند گامی با ارسال بستهٔ کنترلی که حاوی موقعیت خود و شرایط اضطراری است، درخواست دهد تا چاهک به سمت آن حرکت، و داده‌های خود را به چاهک ارسال کند که آن را حرکت چاهک بر اساس تقاضای سرخوشه، نام‌گذاری کرده‌ایم. در این روش، زمانی که چاهک درخواستی را دریافت می‌کند باید تصمیم بگیرد از ناحیه خود به سمت آن حرکت کند یا خیر؟ بنابراین چاهک به‌محض دریافت پیام درخواستی، بررسی می‌کند آیا سرخوشه درخواست‌کننده، در ناحیه متراکمی قرار دارد یا خیر؟ اگر سرخوشه در ناحیهٔ متراکمی قرار نداشته باشد در این وضعیت، چاهک فقط به‌خاطر یک سرخوشه متراکم، موقعیت خود را تغییر نمی‌دهد؛ بلکه در این شرایط، اگر چاهک در ناحیه کناری سرخوشه متراکم درخواست‌کننده قرار داشته باشد در همان موقعیت خود می‌ماند، و سرخوشه داده‌های خود را به‌صورت چند گامی به چاهک ارسال می‌کند (حالت استثنا برای استفاده از ارسال داده‌ها به‌صورت چند گامی). در غیر این صورت به ناحیهٔ متراکم کناری آن سرخوشه متراکم حرکت می‌کند که در این حالت، ممکن است بعد از حرکت به ناحیه کناری جایی قرار گیرد که آن سرخوشه متراکم، حتی بتواند داده‌ها را به‌صورت تک گامی/ دو گامی ارسال کند و اگر چنین حالتی هم به وجود نیامد بالاخره می‌تواند به‌صورت چند گامی داده‌های خود را ارسال کند. با انجام این کار، چاهک هم به سرخوشه متراکم نزدیک می‌شود و هم در ناحیه‌ای قرار گرفته است که بار شبکه در آن زیاد است. همچنین در این حالت اگر چندین سرخوشه هم‌زمان خواستار حرکت چاهک به سمت خود باشند، چاهک‌ها در ابتدا، درخواست‌ها را بر حسب موقعیت گره‌های سرخوشه، مرتب می‌کنند و سرخوشه‌های درخواست‌کننده که موقعیتشان نزدیک به هم است را دربسته مشترکی قرار می‌دهند، سرانجام چاهک

[1] on demand mobility proactive

جایی قرار می‌گیرد که در نزدیکی تعداد بیشتری از سرخوشه‌های درخواست‌کننده باشد و سرخوشه‌ها بتوانند به‌صورت تک گامی داده‌های خود را ارسال کنند. برای درک بهتر در شکل (۶)، فلوچارت مدل‌های حرکتی چاهک‌های متحرک آورده شده است.



شکل (۶). فلوچارت مدل‌های حرکتی چاهک‌های متحرک

۳-۶. ارسال اطلاعات از چاهک‌ها به Gateway

سرخوشه‌ها با ادغام اطلاعات دریافتی از گره‌های حسگر، مقدار داده‌ای که به چاهک‌های متحرک ارسال می‌کنند را کاهش می‌دهند. سپس چاهک‌های متحرک پس از جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت دوره‌ای و بر اساس تقاضای سرخوشه‌ها، اطلاعات دریافتی را از طریق گره Gateway، برای پردازش‌های نهایی یا ذخیره این اطلاعات، به سرورهای اینترنت و Cloud، متصل می‌کنند.

۴- محیط شبیه‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی

برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی از نرم‌افزار شبیه‌ساز MATLAB R2014a، استفاده شده است. برای این منظور، یک محیط ۲۰۰۰*۲۰۰۰ m2 که ۲۰۰ گره متحرک به طور تصادفی در آن پخش شده است، در نظر گرفته‌ایم. در این بخش پس از معرفی مدل انرژی در نظر گرفته شده، مدل پیشنهادی با روش LARCMS، MMSCM و روش RWP معمولی، از طریق یک‌سری معیارهای ارزیابی، مقایسه شده است.

۱-۴. مدل انرژی

در پروتکل پیشنهادی، ما با استفاده از یک مدل ساده پایه‌ای، مصرف انرژی را فقط در هنگام برقراری ارتباط حاصل از ارسال و دریافت داده، در نظر گرفته‌ایم. در این مدل، بر اساس فاصله بین گره‌های فرستنده و گیرنده (d)، از یک فضای آزاد یا مدل کانال چند مسیری، برای مصرف انرژی استفاده می‌شود. انرژی مصرفی ارسال k بیت داده (Etx (k.d)) به فاصله d، از طریق رابطه (۴)، محاسبه می‌شود [۷, ۸]:

$$E_{Tx}(k.d) = \begin{cases} E_{elec} * k + E_{fs} * k * d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} * k + E_{mp} * k * d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (۴)$$

انرژی مصرفی در زمان دریافت k بیت داده (ERx(k)) از طریق رابطه (۵)، محاسبه می‌شود [۷, ۸]:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (۵)$$

مقدار d0 نیز از طریق رابطه (۶)، محاسبه می‌شود [۷, ۸]:

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (۶)$$

در این رابطه‌ها Eelec انرژی هدررفته در مدار، Efs انرژی مصرفی توسط تقویت‌کننده قدرت در مدل فضای آزاد و Emp انرژی مصرفی توسط تقویت‌کننده قدرت در مدل چند مسیر می‌باشد.

در نهایت مقادیر اولیه پارامترهای شبیه‌سازی روش پیشنهادی در جدول (۵)، نمایش‌داده‌شده است.

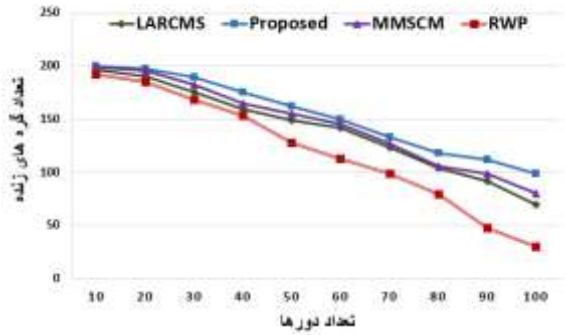
جدول (۵). مقادیر اولیه پارامترهای شبیه‌سازی

پارامترها	مقادیر
اندازه محیط شبیه‌سازی	2000m*2000m
تعداد گره‌های حسگر	200
تعداد چاهک‌های متحرک	2
طول بسته	64 bits
محدوده انتقال هر گره حسگر	50m
محدوده انتقال هر گره چاهک متحرک	500m
P_y	16%
انرژی اولیه هر گره حسگر	0/5 J
سرعت چاهک های متحرک	12 km/h
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{mp}	0/0013pJ/bit/m^4
E_{fs}	10 pJ/bit/m^2

۲-۴. طول عمر شبکه

شکل (۷)، طول عمر شبکه را از نظر تعداد گره‌های زنده، در مقابل دورهای شبیه‌سازی نشان‌می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در روش پیشنهادی، گره‌های حسگر مدت زمان بیشتری زنده می‌مانند؛ زیرا در این روش علاوه بر خوشه‌بندی مناسب و استفاده‌نکردن از مسیریابی چند گامی، به‌دلیل حرکت کنترل‌شده چاهک به سمت ناحیه‌ها و سرخوشه‌های متراکم، تعداد گره‌های بیشتری زنده می‌مانند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید طول عمر روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مقایسه، بیشتر می‌باشد. زیرا در روش LARCMS، و همچنین MMSCM، چاهک‌ها در

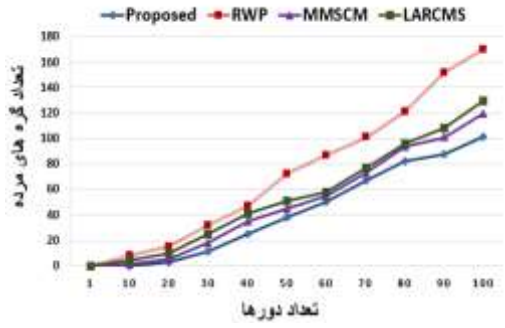
محیط مشخص حرکت می‌کنند و گره‌های دور از مسیر مشخص‌شده، بعد از چندین گام، می‌توانند داده‌های خود را به چاهک‌ها ارسال کنند، به همین دلیل انرژی گره‌ها در این دو روش، نسبت به روش پیشنهادی زودتر از بین می‌رود.



شکل (۷). طول عمر شبکه

۴-۳. تعداد گره‌های مرده

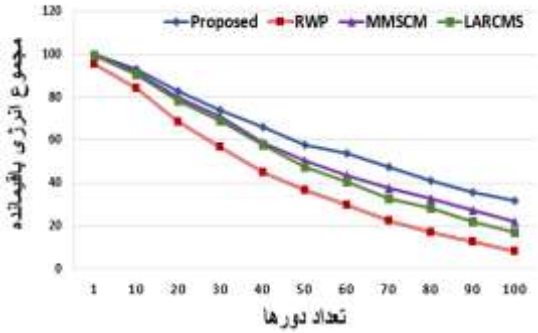
شکل (۸)، تعداد گره‌های مرده، به نسبت تعداد دورها را نشان‌می‌دهد. از آنجایی که کاهش تعداد گره‌های مرده در پایداری WSNs، نقش مهمی دارد، در پروتکل پیشنهادی با استفاده از یک مکانیزم مناسب که در انتخاب روش‌های انتقال اطلاعات توسط سرخوشه‌ها در نظر گرفتیم، باعث کاهش تعداد گره‌های مرده شده‌ایم؛ زیرا در این روش به‌جای استفاده از مسیریابی چند گامی، از ذخیره‌کردن اطلاعات در صف سرخوشه‌ها و حالت Stand By، برای زمانی که همسایه‌ای در اطراف گره وجود نداشت، استفاده شده است، که در نتیجه گره‌های حسگر، انرژی کمتری از دست می‌دهند. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان‌می‌دهد، تعداد گره‌های مرده در روش پیشنهادی برابر با ۱۰۱ گره است، در حالی‌که در روش MMSCM، LARCMS و RWP، به ترتیب برابر با ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۷۰گره است.



شکل (۸). تعداد گره‌های مرده

۴-۴. مقدار انرژی باقیمانده

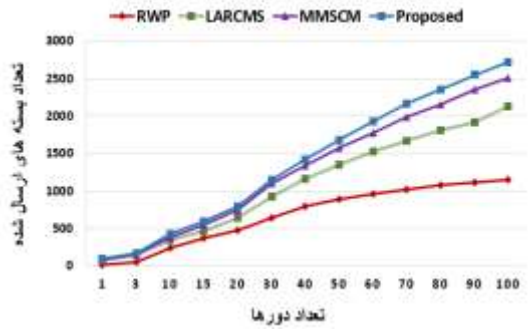
شکل (۹)، انرژی باقیمانده شبکه برای طرح پیشنهادی با روش LARCMS، MMSCM و RWP معمولی را، با تغییر در دورهای مختلف نشان‌می‌دهد. همان‌طورکه انتظار می‌رود، با افزایش تعداد دورها، انرژی گره نیز کاهش می‌یابد. در روش پیشنهادی به‌دلیل استفاده از چاهک‌های متحرک و حرکت آنها به‌صورت دوره‌ای و کنترل‌شده به ناحیه‌ای از شبکه که تراکمش زیاد است، سرخوشه‌ها با کمترین گام و کمترین مصرف انرژی، داده خود را به چاهک‌ها ارسال می‌کنند. و همچنین درنظرگرفتن حالت Stand By برای انجام مدیریت انرژی، باعث افزایش انرژی باقیمانده گره‌های حسگر روش پیشنهادی، نسبت به روش‌های LARCMS، MMSCM و RWP معمولی گردید.



شکل (۹). مجموع انرژی باقیمانده

۴-۵. تعداد بسته‌های ارسالی

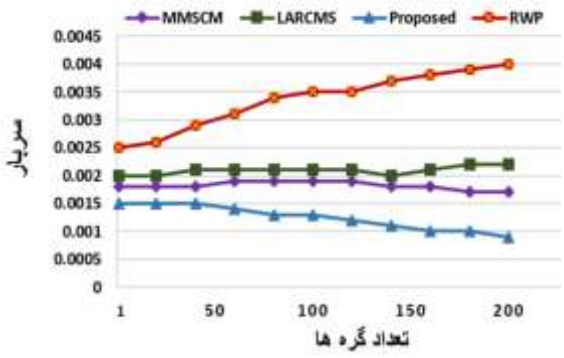
شکل (۱۰)، تعداد بسته‌های ارسالی از سرخوشه‌ها به چاهک‌های موجود در شبکه را نشان‌می‌دهد. همان‌طورکه در نمودار مشخص است روش پیشنهادی تعداد بسته‌های بیشتری نسبت به روش‌ها مورد مقایسه، به چاهک ارسال می‌کند. نتیجه به‌دست‌آمده به این دلیل است که در روش پیشنهادی، چاهک‌های متحرک همیشه به‌صورت مستقیم با یکدیگر ارتباط دارند و هیچ‌گاه هم‌زمان در یک ناحیه قرار نمی‌گیرند. از طرفی هم به دلیل حرکت چاهک‌ها به‌صورت کنترل‌شده به سمت ناحیه‌ها و سرخوشه‌های متراکم، آن‌ها می‌توانند داده‌های بیشتری را جمع‌آوری کنند. اما در روش LARCMS، به دلیل افزایش سربار مسیریابی چند گامی، احتمال خطای انتقال و برخورد افزایش می‌یابد و تعداد گره‌های کمتری می‌توانند بسته‌های خود را به چاهک‌ها ارسال کنند. روش MMSCM، به دلیل اینکه فاصله بین چاهک و گره‌های حسگر را به حداقل می‌رساند و حداقل تعدادگام را تضمین می‌کند، بنابراین احتمال خطای انتقال و برخورد آن نسبت به روش LARCMS کمتر است، پس تا حد مناسبی عملکرد تعداد بسته‌های ارسالی را نسبت به این روش بهبود بخشیده است. و از طرفی، در روش RWP معمولی به‌دلیل اینکه چاهک‌ها هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند ممکن است به سمت خوشه‌های یکسانی حرکت کنند که از قضا شاید در آن ناحیه، اصلاً داده‌ای وجود نداشته‌باشد که جمع‌آوری کنند.



شکل (۱۰). تعداد بسته‌های ارسالی از سرخوشه‌ها به چاهک‌ها

۴-۶. میزان سربار

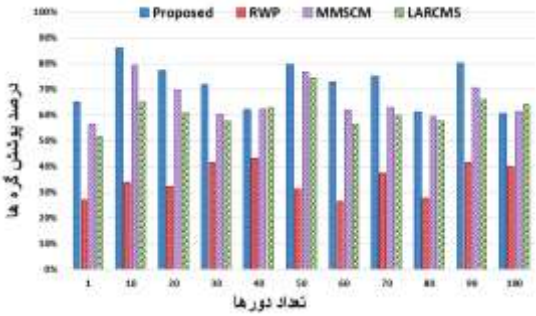
شکل (۱۱)، میزان سربار مربوط به انتقال داده کنترلی در روش پیشنهادی و روش‌های مورد مقایسه را برحسب تعداد مختلف گره‌ها، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، سربار در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه، همواره کمتر است. در روش پیشنهادی، به خاطر اینکه چاهک‌ها در ابتدا درخواست‌ها را برحسب موقعیت سرخوشه‌ها مرتب می‌کنند و سرخوشه‌های درخواست‌کننده که موقعیتشان نزدیک به هم است را در بسته مشترکی قرار می‌دهند، بنابراین موجب کاهش انتقال بسته‌های کنترلی می‌شود. اما در روش‌های مورد مقایسه، به ازای هر درخواست داده از طرف چاهک، یک بسته کنترلی به سمت ناحیه درنظر گرفته شده، در شبکه ارسال می‌شود که با زیاد شدن تعداد درخواست‌های چاهک برای داده، سربار انتقال داده شبکه هم افزایش پیدا می‌کند. به همین خاطر، پیچیدگی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه، کمتر است.



شکل (۱۱). سربار کنترلی بر اساس افزایش تعداد گره

۴-۷. میزان پوشش شبکه

شکل (۱۲)، درصدی از تعداد گره‌های زنده پوشش داده شده توسط چاهک‌های متحرک در شبکه را نشان می‌دهد. به روشنی می‌توان اذعان داشت که در روش پیشنهادی درصد قابل قبولی از گره‌های حسگر توسط چاهک‌ها پوشش داده می‌شوند. یکی از مهم‌ترین دلایل پوشش‌دهی موفق در روش پیشنهادی می‌توان به ارتباط مستقیم چاهک‌ها با یکدیگر و همچنین مدل انتخاب حرکت چاهک‌ها که به‌صورت کنترل‌شده به سمت ناحیه‌های متراکم حرکت می‌کنند اشاره کرد. اما یکی از معایب روش RWP معمولی، این است که چاهک‌های متحرک هیچ دیدی نسبت به یکدیگر ندارند و به‌صورت تصادفی حرکت می‌کنند. به همین‌خاطر، حتی ممکن است هیچ‌کدام از چاهک‌ها به سمت منطقه‌ی متراکم موجود درشبکه، حرکت نکنند و آن ناحیه را پوشش ندهند. از طرفی در روش LARCMS، با وجود این‌که چاهک‌ها به طور هم‌زمان در یک ناحیه مشخص قرار نمی‌گیرند، اما به‌دلیل اینکه هیچ‌کدام از چاهک‌ها نمی‌توانند در کل محیط حرکت کنند، پس گره‌های کمتری را نسبت به روش پیشنهادی در شبکه پوشش می‌دهند.



شکل (۱۲). میزان پوشش شبکه توسط چاهک‌های متحرک

۵- نتیجه‌گیری

جمع‌آوری داده‌ها موضوع مهمی در WSNs است؛ زیرا باعث مصرف انرژی می‌شود و همچنین بر طول عمر شبکه نیز تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، برای متعادل‌کردن مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه، از خوشه‌بندی و چاهک متحرک استفاده شده است. چاهک‌های متحرک، با استفاده از مدل تحرک RWP اولویت‌بندی شده به‌صورت کنترل‌شده با درنظرگرفتن یک‌سری پارامترها، یک مکان مناسب را در محیط شبکه انتخاب و به سمت آن حرکت می‌کنند. در نهایت برای توجیه اثربخشی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های LARCMS، MMSCM و روش RWP، معیارهای مختلفی مانند طول عمر شبکه، تعداد گره‌های مرده، انرژی باقیمانده، تعداد بسته‌های ارسالی به چاهک‌ها، سربار و همچنین میزان پوشش شبکه توسط چاهک‌های متحرک بررسی شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که روش پیشنهادی در تمام این معیارها بهتر از روش‌های مورد مقایسه عمل کرده است.

نویسندگان در نظر دارند در کارهای آتی خود، برای اینکه روش پیشنهادی با شرایط دنیای واقعی متناسب باشد، برای هر چاهک متحرک، ظرفیت بافر محدودی در نظر گیرند و در ادامه، همچنین پیشنهاد می‌گردد که برای فعالیت‌های آتی، در بحث حرکت چاهک‌ها برای جمع‌آوری داده‌ها طبق اولویت، می‌توان پارامتر تأخیر را برای کاربردهایی که فاکتور تأخیر در آن‌ها دارای اولویت بالاست، در نظر گرفت..

۶- مراجع

[1] Lewis, F.L., Wireless sensor networks. Smart environments: technologies, protocols, and applications, 2004. 11: p. 46. https://doi.org/10.1002/047168659X.ch2

[2] Nadinejad, A. and M. Alaei, A Heuristic Data Diffusion and Gathering Scheme Using Virtual Line for Wireless Sensor Networks with Mobile Sink. Electronic and Cyber Defense, 2021. 9(2): p. 195-207, (In Persian)

[3] Khan, A.W., et al., A comprehensive study of data collection schemes using mobile sinks in wireless sensor networks. Sensors, 2014. 14(2): p. 2510-2548. https://doi.org/10.3390/s140202510

[4] Al-Behadili, H.A., et al., Use of multiple mobile sinks in wireless sensor networks for large-scale areas. IET Wireless Sensor Systems, 2020. 10(4): p. 175-180. https://doi.org/10.1049/iet-wss.2019.0208.

[5] Majidian, S.Z. and M. Shirmohammadi, Clustering and Routing in Wireless Sensor Networks Using Multi-Objective Cuckoo Search and Game Theory. Electronic and Cyber Defense, 2022. 10(3): p. 11-20. (In Persian)

[6] Lee, E., et al., Communication model and protocol based on multiple static sinks for supporting mobile users in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010. 56(3): p. 1652-1660. https://doi.org/10.1109/TCE.2010.5606309.

[7] Wang, J., et al., An improved ant colony optimization-based approach with mobile sink for wireless sensor networks. The Journal of Supercomputing, 2018. 74(12): p. 6633-6645. https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1024422.

[8] Wang, J., et al., An enhanced PEGASIS algorithm with mobile sink support for wireless sensor networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018. 2018. https://doi.org/10.1155/2018/9472075.

[9] Motedaien, T., M. Yaghoobi, and M. Kheirabadi, Improving mobile mass monitoring in the IoT environment based on Chaotic Fog Algorithm. Electronic and Cyber Defense, 2023. 11(3): p. 77-88. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4. (In Persian)

[10] Rashed, S. and M. Soyturk. Effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks. in 2015 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNESTAT). 2015. IEEE. https://doi.org/10.3390/s17020413.

[11] Diniesh, V., et al., An Experimental Study and Analysis of Impact on Mobile Sink in Wireless Sensor Networks, in Advances in Smart System Technologies. 2021, Springer. p. 253-260. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5029-4_20

[12] 12.Sara, G.S. and D. Sridharan, Routing in mobile wireless sensor network: A survey. Telecommunication Systems, 2014. 57(1): p. 51-79. https://doi.org/10.1007/s11235-013-9766-2.

[13] Sethi, D., An approach to optimize homogeneous and heterogeneous routing protocols in WSN using sink mobility. MAPAN, 2020. 35(2): p. 241-250. https://doi.org/10.1007/s12647-020-00366-5

[14] Tunca, C., et al., Distributed mobile sink routing for wireless sensor networks: A survey. IEEE communications surveys & tutorials, 2013. 16(2),p.877-897. https://doi.org/10.1109/SURV.2013.100113.00293.

[15] Wang, J., et al., Energy-efficient cluster-based dynamic routes adjustment approach for wireless sensor networks with mobile sinks. The Journal of Supercomputing, 2017. 73(7): p. 3277-3290. https://doi.org/10.1007/s11227-016-1947-9.

[16] Nagamalar, T. and T. Rangaswamy. Energy efficient cluster based approach for data collection in wireless sensor networks with multiple mobile sink. in 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC). 2015. IEEE. https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150766.

[17] Liu, Q., et al. Grid routing: an energy-efficient routing protocol for WSNs with single mobile sink. in International Conference on Cloud Computing and Security. 2016. Springer. https://doi.org/10.1504/ijsnet.2017.10007397.

[18] Yarinezhad, R., Reducing delay and prolonging the lifetime of wireless sensor network using efficient routing protocol based on mobile sink and virtual infrastructure. Ad Hoc Networks, 2019. 84: p. 42-55. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.09.016

[19] Kumar, V. and A. Kumar, Improving reporting delay and lifetime of a WSN using controlled mobile sinks. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019. 10(4): p. 1433-1441.

[20] Koosheshi, K. and S. Ebadi, Optimization energy consumption with multiple mobile sinks using fuzzy logic in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2019. 25(3): p. 1215-1234. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04496-6.

[21] Vijayashree, R. and C. Suresh Ghana Dhas, Energy efficient data collection with multiple mobile sink using artificial bee colony algorithm in large-scale WSN. Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije, 2019. 60(5): p. 555-563. https://doi.org/10.1080/00051144.2019.1666548

[22] Gao, Y., et al., A hybrid method for mobile agent moving trajectory scheduling using ACO

and PSO in WSNs. Sensors, 2019. 19(3): p. 575. https://doi.org/10.3390%2Fs19030575.

[23] Agarwal, V., S. Tapaswi, and P. Chanak, Energy-efficient mobile sink-based intelligent data routing scheme for wireless sensor networks. IEEE Sensors Journal, 2022. 22(10): p. 9881-9891. https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3164944.

[24] Karimi, A. and S.M. Amini, Reduction of energy consumption in wireless sensor networks based on predictable routes for multi-mobile sink. The Journal of Supercomputing, 2019. 75(11): p. 7290-7313. https://doi.org/10.1007/s11227-019-02938-y.

[25] Koley, I. and T. Samanta, Mobile sink based data collection for energy efficient coordination in wireless sensor network using cooperative game model. Telecommunication Systems, 2019. 71(3): p. 377-396. https://doi.org/10.1007/s11235-018-0507-4.

[26] Naghibi, M. and H. Barati, EGRPM: Energy efficient geographic routing protocol based on mobile sink in wireless sensor networks. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020. 25: p. 100377. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100377

[27] Prasanth, K., Weighted rendezvous planning on Q-learning based adaptive zone partition with PSO based optimal path selection. Wireless Personal Communications, 2020. 110(1): p. 153-167. https://doi.org/10.1007/s11277-019-06717-z.

[28] Moussa, N. and A. El Belrhiti El Alaoui, IARP: An Intelligent ACO-Based Routing Protocol with Multiple Mobile Sinks Support for Wireless Sensor Networks. Wireless Personal Communications, 2021. 120(1): p. 545-563. https://doi.org/10.1007/s11277-021-08475-3.

[29] Al-Kaseem, B.R., et al., Optimized Energy–Efficient Path Planning Strategy in WSN With Multiple Mobile Sinks. IEEE Access, 2021. 9: p. 82833-82847. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087086.

[30] Moussa, N., D. Benhaddou, and A. El Belrhiti El Alaoui, EARP: An enhanced ACO-based routing protocol for wireless sensor networks with multiple mobile sinks. International Journal of Wireless Information Networks, 2022. 29(1): p. 118-129. https://doi.org/10.1007/s10776-021-00545-4.

[31] Liu, C. and L. Guo, MMSCM: A multiple mobile sinks coverage maximization based hierarchical routing protocol for mobile wireless sensor networks. IET Communications, 2023. 17(10): p. 1228-1242. https://doi.org/10.1049/cmu2.12616.

[32] Azizi, M. and A. Naseri, A Routing Method In IoT Networks Based On Fuzzy Logic And Clustering For Intelligent Transportation. Scientific Journal of Electronic & Cyber Defense, 2024. 11. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.4.11.8. (In Persian)