

کنترل مسیریابی چاهک‌های متحرک برای حداکثر کردن مقدار داده جمع‌آوری شده و طول عمر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب

احسان خراطی^۱، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک - اراک - ایران - e-kharati@iau-arak.ac.ir

چکیده: این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی صحیح خطی مختلط برای تعیین مسیر بهینه و مکان اقامت چاهک‌ها با توجه به مهلت زمانی و مصرف انرژی ارائه داده تا مقدار داده جمع‌آوری شده را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب حداکثر کند. حل این مساله در زمان چندجمله‌ای به دلیل متمرکز بودن امکان‌پذیر نیست. لذا برای حل این مساله، یک روش اکتشافی حریصانه و کاملاً توزیع‌شده پیشنهاد شده تا مسیر و مکان اقامت چاهک‌ها را براساس حداکثر کردن مقدار داده‌های جمع‌آوری شده و نوع مهلت زمانی داده‌ها تعیین کند و تا زمانی که یک مکان، داده و انرژی داشته باشد، چاهک‌ها می‌توانند به‌طور مکرر به آنجا رفته و مقدار داده‌های جمع‌آوری شده را افزایش دهند. نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف مسیریابی با مدل و الگوریتم پیشنهادی در شرایط شبکه‌های پراکنده و متراکم و مهلت‌های زمانی سخت و نرم نشان داده که مقدار داده جمع‌آوری شده حداقل ۷۷ درصد بیشتر از روش‌های اکتشافی غیرآگاهانه TSP و LM و ۸۰ درصد بیشتر از روش RS است و مصرف انرژی حدود ۴۵ درصد کمتر از روش TSP است و تاخیر انتها به انتها حدود ۶۹ درصد کمتر از روش TSP است و بازدهی شبکه حدود ۲۳ درصد بیشتر از روش TSP است.

کلمات کلیدی: شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب، تحرک کنترل شده چاهک، طول عمر شبکه، مقدار داده جمع‌آوری شده.

Mobile Sink Routing Control to Maximize the Amount of Collected Data and Lifetime in Underwater Wireless Sensor Networks

Ehsan Kharati¹, Assistant Professor

1- Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran, Email: e-kharati@iau-arak.ac.ir

Abstract: This paper presents a mixed linear programming optimization model for determining the optimal path and location of sinks with respect to dead time and energy consumption, in order to maximize the amount of collected data in underwater wireless sensor networks. Solving this problem in polynomial time is not possible due to be centralizing. So, to solve this problem, a heuristic and greedy and fully distributed algorithm are proposed to determine the movement of sinks and their location based on maximizing the amount of collected data and the type of dead time of data. As long as be in a place data and energy, sinks can be repeatedly traveled to increase the amount of collected data. By comparing and simulating different routing methods with proposed model and algorithm, the collected data in the proposed method for sparse and dense networks and in the soft and hard dead time is at least 77% higher than the unaware heuristic methods such as TSP and LM and is 80 percent more than the RS method, and the energy consumption is about 45% lower than the TSP method, and the end-to-end delay is about 69% less than the TSP method, and network efficiency is about 23% more than the TSP method.

Keywords: Underwater Wireless Sensor Networks; Mobility of Sink Controlled; Network Lifetime; Amount of Collected Data.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴ و ۱۳۹۸/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱

نام نویسنده مسئول: احسان خراطی

نشانی نویسنده مسئول: اراک - سه راه خمین - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی کامپیوتر.

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی سیم زیر آب شامل گره‌هایی با قابلیت حس کردن و ارتباطات بی سیم هستند که داده‌ها را حس کرده و به یک یا چند چاهک^۱ با چند گره میانی ارسال می‌کنند و برای نظارت بر محیط زیست، نظارت بر زیر دریا، صنایع نفتی، کنترل آلودگی و حفظ میراث فرهنگی و ارتباطات راه دور و غیره استفاده می‌شوند [۱]. گره‌های چاهک به صورت دوره‌ای از گره‌های حسگر بازدید کرده و داده‌های آنها را از طریق مودم و کانال‌های صوتی و نوری جمع‌آوری می‌کنند و داده‌های جمع‌آوری شده را به صورت بی سیم به یک ایستگاه پایه در سطح آب منتقل می‌کنند [۲].

چالش این شبکه‌ها مربوط به ارتباطات صوتی و نوری طولانی مدت در زیر آب و محدودیت پهنای باند است [۳]. همچنین در گره چاهک منابع انرژی و پردازش و حافظه نامحدود است اما در گره‌های حسگر زیر آب با پایان یافتن انرژی، اغلب امکان شارژ و جایگزینی نبوده و اصطلاحاً آن گره می‌میرد و دیگر قادر به انجام حس کردن و ارتباط نیست [۴]. اگر چاهک به صورت ثابت باشد، آنگاه ارسال داده‌های حس شده از تمام حسگرها به چاهک، سبب افزایش بار روی گره‌های حسگر اطراف چاهک شده و انرژی آنها سریع‌تر از سایر گره‌ها تخلیه شده و سبب قطع اتصال شبکه می‌شود. همچنین باید مدنظر داشت که با افزایش تحرک چاهک‌ها، انرژی لازم برای ساخت و انتشار مسیر افزایش یافته و عمر شبکه کاهش می‌یابد. محدودیت‌های دیگر در این شبکه‌های حسگر بی سیم زیر آب شامل، میزان تحرک چاهک، پوشش مناطق، حداقل زمان اقامت چاهک و حدکثر مقدار داده جمع‌آوری شده است [۵].

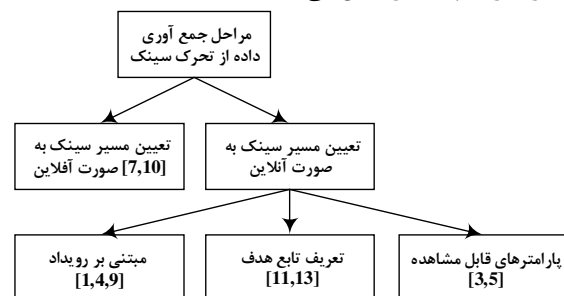
برای کاهش مصرف انرژی و افزایش مقدار داده جمع‌آوری شده در شبکه‌های حسگر بی سیم زیر آب نیاز به تعیین مسیر بهینه و مکان اقامت چاهک‌های متحرک است. در [۶] یک روش متمرکز برای کنترل تحرک چاهک ارائه داده است که سبب افزایش طول عمر شبکه‌های زیر آب می‌شود. مشکل تحرک در روش پیشنهادی این مقاله این است که هر بار چاهک به یک مکان جدید می‌رود، پیام سلام را به تمام گره‌های شبکه زیر آب به صورت سیل‌آسا منتشر کرده تا آنها را از مکان فعلی خود مطلع سازد. هر گره که پیام سلام را دریافت کرد، داده‌های خود را به سمت مکان جدید چاهک ارسال می‌کند. هر بار که چاهک مکان را ترک می‌کند، مجدداً پیام سلام را به تمام گره‌های حسگر به صورت سیل‌آسا منتشر کرده تا اعلان کند که دیگر در مکان قبلی قابل دسترسی نیست. هر گره حسگر پس از دریافت پیام دوم سلام، انتقال داده‌های خود را متوقف کرده و باقیمانده را ذخیره کرده و منتظر دریافت پیام جدید سلام از چاهک مانده تا انتقال داده‌های خود را ادامه دهد. چون پیام‌های سلام به صورت سیل‌آسا پس از هر بار جابجایی و توقف چاهک، ارسال می‌شود، این روش سبب افزایش سربار و مصرف عمده پهنای باند می‌شود [۷].

خلاصه کارهای مهم انجام شده در این مقاله نسبت به مقاله‌های قبلی شامل موارد زیر است.

- در اکثر مقالات قبلی فقط از یک چاهک متحرک برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده اما در مدل پیشنهادی این مقاله، می‌توان از چند گره چاهک برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده کرد.
 - در این مقاله یک مدل جدید برنامه‌ریزی صحیح خطی مختلط^۲ ارائه شده که مسیرهای چاهک و زمان اقامت در مکان‌های توقف برای مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی سیم زیر آب را تعیین می‌کند. مدل پیشنهادی مستقل از پروتکل مسیریابی و تراکم و استقرار گره‌های حسگر زیر آب و محل‌های توقف چاهک و اندازه و شکل منطقه جغرافیایی و ویژگی‌های فنی گره حسگر مانند شعاع انتقال و مدل انرژی و غیره است و پارامترهای آن شامل، هزینه انتقال چاهک، تأخیر ارسال داده‌ها به چاهک، میزان داده‌های ذخیره شده در حین حرکت چاهک، هزینه ساخت و انتشار مسیرها از حسگرهای زیر آب به موقعیت فعلی چاهک است. اما حل این مدل چون به صورت متمرکز انجام می‌شود، زمان و انرژی زیادی مصرف می‌کند.
 - در اکثر مقالات، هدف حداکثر کردن داده‌های جمع‌آوری توسط چاهک‌ها یا افزایش عمر شبکه بوده است اما در این مقاله علاوه بر این موضوع هدف تعیین مسیر بهینه چاهک‌ها و کاهش مصرف انرژی است.
 - در مقالات [۶، ۱۱، ۱۲] فرض کرده زمان حرکت چاهک‌ها بین نقطه پایانی و نقطه شروع ناچیز بوده و برنامه خدمات دهنده آن را نادیده می‌گیرد، اما مدل پیشنهادی، میزان مصرف انرژی برای تغییر مکان چاهک‌ها و زمان حرکت بین نقاط شروع و پایانی برای هر چاهک را در نظر می‌گیرد.
 - در این مقاله، الگوریتم‌های پیشنهادی، به صورت اکتشافی و حریصانه و توزیع شده، حرکت چاهک را کنترل کرده تا مدت زمان اقامت چاهک بر اساس بیشترین انرژی باقیمانده گره‌های حسگر زیر آب باشد و اگر انرژی یک مکان بالا بود، چاهک به طور مرتب در آن مکان حرکت کند. لذا در مدل پیشنهادی، می‌توان آنقدر تعداد ملاقات‌ها را افزایش داد تا طول عمر شبکه زیر آب حداکثر شود.
- بقیه مقاله به شرح زیر است: بخش ۲، شامل کارهای مربوط به تحرک چاهک‌ها و جمع‌آوری داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی سیم زیر آب بوده و بخش ۳، مساله تعریف شده و یک مدل ریاضی MILP برای مدل کردن و یافتن مسیرهای بهینه حرکت چاهک با هدف جمع‌آوری حداکثری داده ارائه می‌شود. در بخش ۴، الگوریتم‌های اکتشافی و حریصانه و توزیع شده برای مسیریابی آگاهانه و کنترل شده چاهک و جمع‌آوری حداکثری داده‌ها پیشنهاد می‌شود. بخش ۵، شامل شبیه‌سازی و ارزیابی و مقایسه عملکرد مصرف انرژی و تأخیر و مقدار داده جمع‌آوری شده در مدل بهینه و الگوریتم پیشنهادی و چند روش غیرآگاهانه و تصادفی مانند STATIC و RS^۳ و LM^۴ و الگوریتم TSP^۵ یا فروشنده دوره گرد در نرم‌افزار متلب^۶ است و در نهایت بخش ۶، شامل نتیجه‌گیری و بیان برخی مشکلات و کار در آینده مقاله است.

۲- پیشینه تحقیق و کارهای مرتبط

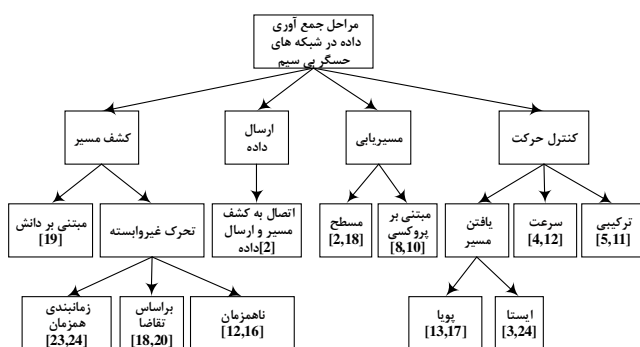
هدف اصلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیرآب، ایجاد تعادل در ترافیک بار و توازن مصرف انرژی بین گره‌های حسگر برای افزایش عمر این شبکه‌ها است. پروتکل‌های تحرک چاهک اغلب غیر قابل کنترل یا تصادفی و کنترلی یا قطعی هستند که بر اساس کاربرد و شرایط شبکه مانند ترافیک داده یا انرژی باقیمانده گره می‌توان از آنها استفاده کرد [۸]. سه حالت کلی برای تحرک قابل کنترل در شبکه حسگر بی‌سیم وجود دارد [۹]. در حالت اول خود چاهک در میان گره‌های حسگر حرکت کرده و داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند. در حالت دوم برای جمع‌آوری داده‌ها و ارسال به چاهک ثابت از رله‌های متحرک استفاده شده و در حالت سوم از تحرک گره‌های حسگر استفاده می‌شود. در دو حالت اول چون چاهک و رله‌ها محدودیت انرژی ندارند، سبب افزایش کارایی و عمر شبکه زیرآب شده اما حرکت گره‌های حسگر سبب مصرف زیاد انرژی و کاهش عمر شبکه زیرآب می‌شود [۱۰]. در [۱۱]، نشان داده که استفاده از فقط یک چاهک سبب افزایش تاخیر و عدم تعادل مصرف انرژی و نیاز به حافظه بافر می‌شود و استفاده از چند چاهک سبب افزایش هزینه و سخت‌افزار می‌شود. در [۱۲]، اثبات کرده که تحرک چاهک در اطراف حاشیه شبکه زیرآب سبب افزایش تعادل در مصرف انرژی می‌شود. در [۱۳] از رله‌های متحرک یا حامل‌های داده^۶ و ارتباط با یک گره میانی برای ارسال و جمع‌آوری داده‌ها از گره‌های حسگر به چاهک استفاده کرده که سبب صرفه‌جویی و تعادل در مصرف انرژی و کاهش تاخیر می‌شود. در [۱۴] به بررسی سرریز بافر گره‌های حسگر زیرآب و حداقل کردن سرعت رله متحرک پرداخته و نشان داده که چون هر گره حسگر زیرآب، مکان فعلی گره رله را می‌داند، سبب بهبود مسیریابی و عمر شبکه زیرآب و کاهش تاخیر تا چهار برابر نسبت به ثابت بودن چاهک می‌شود. در [۱۵] به مساله ساخت و نگهداری مسیرها با یک چاهک متحرک پرداخته که مسیریابی در آن به صورت غیر قابل پیش‌بینی و غیر قابل کنترل است. در [۱۶] از چاهک‌های متحرک با تحرک قابل پیش‌بینی و کاملاً قابل کنترل استفاده کرده که چاهک یک هواپیما بوده و روی منطقه پرواز می‌کند و داده‌های حس شده را به صورت دوره‌ای جمع‌آوری می‌کند. در [۱۷] از وسایل نقلیه بدون سرنشین برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده کرده و گره‌های حسگر از طریق مسیریابی با چند گره میانی اطلاعات خود را به سرخوشه‌های نزدیک خود ارسال می‌کنند که سبب کاهش زمان ارسال داده از یک گره حسگر به یک سرخوشه می‌شود و چاهک به صورت غیر قابل کنترل فقط از سرخوشه‌ها بازدید می‌کند. شکل ۱، مراحل جمع‌آوری داده‌ها از تحرک چاهک را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مراحل جمع‌آوری داده‌ها از تحرک چاهک

در [۱۸] به بررسی الگوریتم‌های متمرکز حرکت چاهک در میان گره‌های حسگر ثابت زیرآب و توقف آن در مکان‌های خاص و جمع‌آوری اطلاعات از طریق چند گره میانی پرداخته تا مصرف انرژی کاهش و عمر شبکه حسگر زیرآب حداکثر شود. برای این منظور در ابتدای هر دور، اطلاعات مربوط به انرژی باقیمانده گره‌ها به طور مرکزی جمع‌آوری شده و از طریق حل یک مدل MILP، بهترین مکان‌ها برای توقف چاهک مشخص می‌شود. بهبود عمر شبکه در این روش، حدود پنج برابر زمانی است که چاهک در چهار گوشه و قسمت مرکزی شبکه زیرآب باشد. در [۱۹] حداکثر سازی عمر شبکه زیرآب را به صورت یک مساله حداقل-حداکثر تعریف کرده تا با تحرک چاهک در شبکه سبب تعادل بار شده و عمر را تا ۵۰۰ درصد نسبت به زمانی که چاهک در مرکز شبکه قرار دارد افزایش می‌دهد. در [۲۰]، برای تعیین مسیر بهینه چاهک و مدت زمان اقامت آن در نقاط توقف، یک مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح مختلط یا MILP ارائه داده و اثبات کرده که حل این مساله NP-hard است و برای حل آن و کاهش محاسبات از الگوریتم‌های اکتشافی استفاده می‌کند.

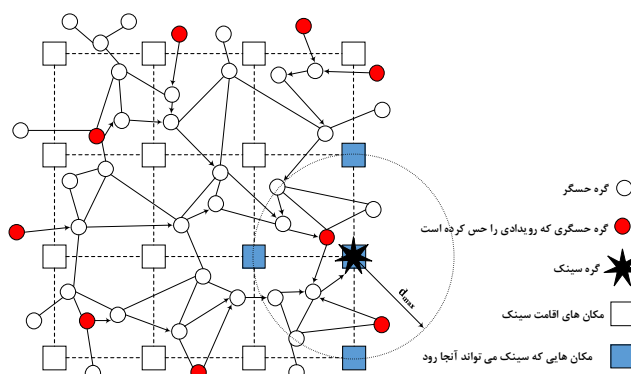
در [۲۱] نشان داده که کارایی سیستم وابسته به شرایط کانال و فاصله چاهک و ارتباطات نوری و صوتی است و برای پیاده‌سازی پروتکل شبکه از چند ماژول و لایه استفاده کرده و از غواصان و یک وسیله نقلیه زیر دریایی از راه دور استفاده کرده است. در [۲۲] از ۸ گره حسگر زیرآبی استفاده کرده و چاهک یک مسیر از پیش تعیین شده در جهت چرخش ساعت را دنبال می‌کند و از ارتباط چند گره میانی به صورت دوره‌ای استفاده می‌کند. در [۲۳] از نرخ داده ۱۰ مگابیت در ثانیه و ارتباطات صوتی برای مسیریابی چاهک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیرآبی استفاده کرده و از پروتکل MURAO برای ارتباط چند منظوره دستگاه‌ها و بارگیری داده‌ها استفاده کرده که این پروتکل دو لایه بوده که وظیفه لایه پایین، بازیابی داده‌ها از طریق مسیریابی با چند گره میانی روی کانال نوری است و وظیفه لایه بالا ارتباطات صوتی با پهنای باند کم برای هماهنگ کردن مسیریابی گره‌ها است. برای این منظور نیاز به اتصال کافی گره‌ها و ایجاد توپولوژی برای جمع‌آوری داده روی لینک‌های نوری است. این روش به دلیل کوتاه بودن محدوده و گران قیمت بودن استفاده همزمان نور و صوت، برای برخی برنامه‌های کاربردی و شبکه‌های بزرگ غیر عملی است. شکل ۲، مراحل روش‌های جمع‌آوری داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را نشان می‌دهد.



شکل ۲: انواع روش‌های جمع‌آوری داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

کردن مانند فیلم گرفتن را به صورت پیوسته انجام دهند. شکل ۳، یک سناریو از شبکه $>$ سگر بی سیم زیرآب را نشان داده که شامل ۴۴ گره حسگر به صورت تصادفی و یکنواخت در یک منطقه جغرافیایی مشخص دو بعدی پراکنده هستند و ۱۶ مکان برای اقامت چاهک به صورت توری 4×4 در نظر گرفته شده است. همچنین چون فرض کرده ایم که انرژی هر چاهک نامحدود است، انرژی لازم برای تغییر مکان چاهک و جمع آوری داده‌ها را در نظر نمی‌گیریم. در ضمن چون گره‌های حسگر به صورت ثابت در شبکه و زیردیا قرار دارند، فاصله هر گره حسگر تا مکان اقامت چاهک در یک محدوده خاص قرار گرفته و نمی‌تواند کاملاً متغیر باشد و ما در محاسبات بیشترین فاصله هر گره $>$ سگر تا مکان اقامت را به عنوان فاصله گره‌های حسگر تا مکان‌های اقامت چاهک در نظر می‌گیریم. همچنین مدل پیشنهادی، زمان لازم برای پردازش داده‌ها و وجود موانع در شبکه و انرژی لازم برای جمع‌آوری و پردازش را در نظر نگرفته و فرض کرده پوشش رادیویی کاملاً منظم است.

مدل پیشنهادی، از چند چاهک متحرک برای بازدید گره‌ها و جمع‌آوری داده‌های حس شده استفاده کرده تا در طی زمان T ، به طور دوره‌ای داده‌ها را به صورت بی‌سیم به ایستگاه پایه ارسال کند و شروع و پایان حرکت چاهک از روی سطح آب است. کل مدت زمان عملیات شبکه برابر T است که به واحدهای زمانی از 0 تا $T-1$ تقسیم می‌شود. اگر یک گره یک داده را در زمان $t < T-1$ به چاهک منتقل کند، چاهک در زمان $t+1$ داده‌ها را دریافت کرده و در آخرین برش زمانی، داده‌ها از چاهک به ایستگاه پایه ارسال می‌شود که $0 \leq t < T$ است. حداقل زمان لازم برحسب ثانیه که چاهک باید در یک مکان اقامت کند برابر t_{min} است که با افزایش آن، زمان اقامت چاهک در هر مکان بیشتر شده و لذا سربارهای ساخت و انتشار مسیر کاهش یافته و مصرف انرژی کاهش می‌یابد و طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. برای فرموله کردن مساله فوق، از مدل‌سازی ریاضی و یک فرمول برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط استفاده کرده تا به صورت توزیع شده مسیر بهینه چاهک را یافته و مقدار داده جمع‌آوری شده و طول عمر شبکه را حداکثر کند.



شکل ۳: یک شبکه حسگر بی‌سیم زیرآب شامل گره‌های حسگر و یک چاهک متحرک و مکان‌های اقامت آن

در مدل پیشنهادی مطابق شکل ۳، فرض کرده که ابتدا چاهک‌ها از یک مکان فرضی مانند 0 یا مبدا شروع به حرکت کرده و در برخی از

در [۱۴] به فواید ترکیب ارتباط‌های نوری و صوتی در مسیریابی و بازیابی داده‌های زیرآب پرداخته و از یادگیری ماشین برای تصمیم‌های ارتباطی و مسیریابی با چند گره میانی استفاده کرده است. همچنین فرض کرده که داده تولید شده در گره‌ها با نرخ ثابت و مهلت زمانی نرم و سرریز است و مسیر چاهک از پیش تعریف و تعیین شده است و به صورت پیوسته گره‌ها را بازدید و دنبال می‌کند. در [۱۵] به قابلیت‌های ارتباطات نوری در افزایش پهنای باند در مسیریابی سطح تا زیر دریایی CORK پرداخته و از حالت خواب برای کاهش مصرف انرژی استفاده کرده که فقط قادر به گوش دادن یک درخواست بیدارباش صوتی برای آماده شدن و جمع‌آوری داده‌ها است. در [۱۶] از کانال نوری برای انتقال داده به چاهک و از کانال صوتی با یک مسیر ثابت برای انتقال مستقیم داده‌ها به ایستگاه پایه استفاده می‌کند و از داده شرطی استفاده کرده که با گذشت زمان از بین می‌رود و به برنامه‌ریزی بین انتقال صوتی و نوری پرداخته است.

در [۱۷] از تحرک چاهک برای جمع‌آوری داده‌ها از گره‌های ثابت در شبکه‌های زیرآب استفاده کرده که اتصال بین آنها به صورت نوری است و ارسال داده‌ها به ایستگاه پایه از طریق ارتباطات بی‌سیم هوایی است و برای کنترل و هماهنگی چاهک یا انتقال داده‌ها از ارتباطات صوتی با پهنای باند کم استفاده شده است و سیستم عامل گره‌های حسگر، TinyOS است. در [۱۸] برای بهبود عملکرد شبکه‌های $>$ سگر بی سیم زیرآبی و کاهش مصرف انرژی و افزایش جمع‌آوری داده‌ها به صورت نوری از مسیر پویا برای چاهک‌ها با چند مازول استفاده کرده است. همچنین از نظریه بازی برای تصمیم‌گیری چاهک بین گره‌ها و داده‌ها استفاده کرده و هر داده را به عنوان بازیکن با ارزش مشخص مدل‌سازی می‌کند. زیرا سرعت داده‌های حسگر زیرآبی وابسته به کانال‌های زیرآب و مقدار و مهلت زمانی داده است. در [۱۹] از کیفیت اطلاعات^۸ برای یافتن مسیر چاهک استفاده کرده که پارامترهای آن شامل دقت، تاخیر و ارتباط فضایی و زمانی و انرژی لازم برای تعیین مسیر چاهک است. اما مهلت زمانی را در نظر نمی‌گیرد. در [۲۰] از خود داده‌ها به عنوان اطلاعات و گرفتن تصمیم مسیریابی بهینه استفاده کرده و چون ارتباط بین گره‌ها و چاهک فقط از طریق ارتباطات صوتی است، لذا کیفیت کانال صوتی روی تعداد بسته‌های صحیح دریافت شده موثر است.

اخیرا در [۱]، برای تعیین مسیر بهینه چاهک و زمان اقامت چاهک در هر مکان اقامت، یک مدل MILP ترکیبی براساس حداکثر فاصله بین دو مکان متوالی توقف چاهک ارایه داده و برای حل آن یک الگوریتم اکتشافی توزیع شده پیشنهاد داده است. در [۲]، برای تعیین مسیر بهینه چاهک و کاهش تاخیر و تعادل در مصرف انرژی، یک الگوریتم پیشنهاد داده و اثربخشی آن را نسبت به حالت یک چاهک با شبیه‌سازی و آزمایش اثبات کرده است.

۳- مدل بهینه‌سازی مساله

در این مساله، فرض کرده گره‌های حسگر به طور ثابت و سه بعدی در زیرآب به صورت دستی و محلی نصب شده‌اند تا عملیات نظارت و حس

انتقال داده‌های جمع‌آوری شده از گره حسگر i به J_i یا همسایگان گره حسگر i است.

$$E_i = \begin{cases} f(\alpha + \beta_{fs} \cdot d_i^2) d_i \leq d_0 \\ f(\alpha + \beta_{mp} \cdot d_i^4) d_i \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

که اگر d_i یا محدوده ارسال گره i بیشتر از مقدار ثابت d_0 باشد، از مدل انرژی چند مسیری^۹ و درغیراین صورت از مدل انرژی فضای آزاد^{۱۰} استفاده می‌شود [۱۸] که در آن f نرخ ثابت انتقال برحسب بیت بر ثانیه است و افزایش آن سبب افزایش عمر گره‌های فعال می‌شود و α ، ثابت غیرمنفی و غیرقطعی برحسب ژول بر بیت بوده و وابسته به انرژی الکترونیکی است و β_{fs} مصرف انرژی تقویت‌کننده در مدل فضای آزاد برحسب $joule/bit/m^2$ است و β_{mp} مصرف انرژی تقویت‌کننده در مدل چندمسیری برحسب $joule/bit/m^4$ بوده و d_0 یک مقدار آستانه و برابر $\sqrt{(\beta_{fs}/\beta_{mp})}$ است [۱۳].

در این مقاله چون ناحیه منطقه محدود است، مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی را می‌توان در هر دو مدل فضای آزاد و چندمسیری اجرا کرد که اغلب از مدل فضای آزاد استفاده می‌شود. بنابراین کل انرژی لازم برای ارسال داده‌ها در گره i به چاهک s در طول همه برش‌های زمانی t_c به صورت زیر است که این مقدار انرژی باید کمتر از $e0_i$ یا انرژی اولیه گره i باشد که t مجموعه همه برش‌های زمانی اقامت چاهک در هر مکان است [۱۳].

$$\sum_{t_c \in T} E_i \cdot \tau_c \cdot R_{i,J_i}^s \leq e0_i \quad (2)$$

بنابراین برای حداکثر شدن عمر کل گره‌های حسگر و شبکه، باید رابطه (۳) برقرار باشد.

$$\sum_{i \in N} \sum_{t_c \in T} E_i \cdot \tau_c \cdot R_{i,J_i}^s \leq e0_i \quad (3)$$

۳-۲- تعیین مسیر بهینه و پیوسته برای چاهک‌های متحرک

برای ارایه یک مدل ریاضی برای مسیریابی و ارسال داده‌ها فرض می‌کنیم که x و y مکان‌های اقامت چاهک‌ها و عضو V باشند و Ψ_{xy}^s یک متغیر دودویی بوده که اگر چاهک $s \in S$ از مکان اقامت x به y برود، برابر ۱ و درغیراین صورت برابر ۰ است و متغیر Φ_x^s یک متغیر دودویی بوده که اگر چاهک $s \in S$ در مکان x اقامت کند، برابر ۱ و درغیراین صورت برابر ۰ است. متغیر $D_i^{T_c}$ ، یک متغیر دودویی بوده که اگر داده از گره i در کمتر از مهلت زمانی ارسال شود، برابر یک و درغیراین صورت برابر ۰ است. متغیر C_i^t ، یک متغیر دودویی بوده که اگر داده از گره i در زمان t جمع‌آوری شود، برابر یک و درغیراین صورت برابر ۰ است. درنهایت مدل بهینه‌سازی پیشنهادی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش مقدار داده جمع‌آوری شده به صورت زیر خواهد بود که اکثر این محدودیت‌ها در [۲]-۴، ۲۳، ۱۳ آمده است.

$$\text{maximize: } \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} \sum_{t \in [0, T-1]} R_{i,J_i}^s \cdot D_i^{T_c} \quad \forall i \in N, s \in S, t \in [0, T-1] \quad (4)$$

$$\text{subject to: } \Psi_{xy}^s \in \{0,1\}, \Phi_x^s \in \{0,1\}, D_i^{T_c} \in \{0,1\}, C_i^t \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{t_c \in T} E_i \cdot \tau_c \cdot R_{i,J_i}^s \leq e0_i \quad \forall i \in N, \tau_c \in t, s \in S \quad (6)$$

مکان‌ها برای جمع‌آوری داده‌های حس شده اقامت کرده و مکان و زمان اقامت خود را به همه گره‌های حسگر به صورت سیل آسا اطلاع می‌دهند. اگر چاهک در حال حرکت باشد، گره‌های حسگر، داده‌های خود را به گره همسایه میانی نزدیک به مکان چاهک ارسال کرده تا با چند گره میانی به چاهک‌های متحرک ارسال شود که سبب کاهش تاخیر انتها به انتها و مقدار داده ذخیره شده در بافر می‌شود

برای مدل‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم از ابرگراف جهت‌دار $G(N,A)$ استفاده کرده که یک تعمیم گراف جهت‌دار است که در آن N مجموعه گره‌های حسگر به صورت ایستا و ثابت و A مجموعه‌ای از ابريال‌ها است و هر لبه می‌تواند با چند گره در ارتباط باشد. هر ابريال $i:J_i$ شامل چندین یال از گره حسگر i به J_i یا مجموعه‌ای از همسایگان گره حسگر i است که وابسته به d_i یا محدوده ارسال گره حسگر i و حرکت چاهک‌ها است که $i, j \in N, j \in J_i$ است. جدول ۱، شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل بهینه‌سازی است.

جدول ۱: مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

نماد	تعریف
N	مجموعه گره‌های حسگر فعال
S	مجموعه گره‌های چاهک متحرک
V	مجموعه مکان‌های اقامت چاهک
A	مجموعه‌ای از ابريال‌ها
t	مجموعه همه برش‌های زمانی اقامت چاهک در هر مکان
J_{N_i}	مجموعه‌ای از همسایگان گره حسگر فعال N_i
f	نرخ ثابت انتقال برحسب بیت بر ثانیه
α	ثابت غیرمنفی و غیرقطعی برحسب ژول بر بیت
β	مصرف انرژی تقویت‌کننده در مدل فضای آزاد برحسب $joule/bit/m^2$
τ_c	مدت زمانی برش زمانی
d_{Max}	حداکثر فاصله بین دو مکان اقامت چاهک
d_i	محدوده ارسال گره حسگر فعال N_i
$e0_i$	انرژی اولیه گره حسگر فعال N_i
E_i	حداقل انرژی لازم برای انتقال داده‌های جمع‌آوری شده از گره حسگر i
C_i	حداکثر ظرفیت گره حسگر فعال N_i
$N_i: J_{N_i}$	یک ابريال که شامل چندین یال از گره حسگر فعال N_i به J_{N_i}
R_{i,J_i}^s	مقدار داده جمع‌آوری شده از گره حسگر i به J_i به مقصد چاهک $s \in S$

۳-۱- تعیین مدل شبکه و کاهش مصرف انرژی

در این قسمت، ابتدا انرژی لازم برای ارسال یک واحد داده را تعیین کرده و سپس یک مدل ریاضی برای مسیریابی و ارسال داده‌ها براساس انرژی مصرف شده ارایه می‌دهیم. چون مسیر بین گره‌های حسگر و چاهک‌های متحرک در هر برش زمانی یا τ_c در حال تغییر است، نیاز به تعیین مقدار داده جمع‌آوری شده در هر برش زمانی است که R_{i,J_i}^s مقدار داده جمع‌آوری شده از گره حسگر i به J_i یا مجموعه‌ای از همسایگان گره حسگر i به مقصد چاهک $s \in S$ است که وابسته به حداکثر مقدار داده جمع‌آوری شده در هر اتصال است. معادله (۱)، محاسبه E_i یا حداقل انرژی لازم برای

یافته و مصرف انرژی کاهش می‌یابد و عمر شبکه زیرآب افزایش می‌یابد. محدودیت (۱۴)، بیان کرده که چاهک $s \in S$ باید تا زمان t در مکان $x \in V$ بماند تا داده‌ها را جمع‌آوری کند.

چون در این مدل، متغیرهای گسسته و پایدار وجود دارد، این مدل، یک مساله خطی صحیح مختلط است که پیچیدگی زمانی و محاسباتی برای حل از نوع NP-hard بوده و در زمان چندجمله‌ای حل نمی‌شود [۷]. برای رفع این مشکل و بهینه‌سازی مسیر چاهک‌های متحرک در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیرآب براساس کاهش مصرف انرژی، چند الگوریتم به‌صورت اکتشافی و حریصانه و توزیع‌شده در قسمت بعد پیشنهادی داده که پیچیدگی زمانی مناسبی دارند. در نهایت در قسمت شبیه‌سازی مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی را با یکدیگر و با روش‌های ایستا و تصادفی تعیین مسیر بهینه چاهک‌ها از نظر مصرف انرژی و مقدار داده‌های جمع‌آوری شده و عمر شبکه مقایسه و ارزیابی می‌کنیم.

۴- الگوریتم پیشنهادی

حل مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در قسمت قبل، پیچیدگی زمانی آن از نوع نمایی بود. در این قسمت برای حداقل کردن مصرف انرژی و حداکثر کردن مقدار داده جمع‌آوری شده در شبکه زیرآب و حل آن در زمان چندجمله‌ای، سه الگوریتم اکتشافی و حریصانه و توزیع‌شده پیشنهاد می‌کنیم. در این الگوریتم‌ها برای تعادل مصرف انرژی در طولانی‌تر شدن عمر شبکه زیرآب، چاهک‌ها به صورت حریصانه، مکانی را برای اقامت انتخاب می‌کنند که در آنجا مقدار داده جمع‌آوری شده بیشتر و مهلت زمانی کمتری با توجه به انرژی باقیمانده گره‌های حسگر اطراف آنجا وجود داشته باشد. همچنین هر چاهک در برش زمانی یا پس از مدت t_{min} تصمیم گرفته به سمت یکی از مکان‌های مجاور حرکت کند و یا همانجا متوقف بماند.

۴-۱- تعیین مسیر بهینه چاهک

هر چاهک موقعیت فعلی و جدید خود را به صورت سیل آسا در محدوده انتقال منتشر کرده و هر گره با اطلاع از موقعیت فعلی و جدید چاهک، از مجاورت با چاهک مطلع شده و یک بسته پاسخ همراه با انرژی باقیمانده و مقدار داده جمع‌آوری شده و نوع مهلت زمانی داده‌های خود به چاهک ارسال می‌کند. هر چاهک پس از جمع‌آوری بسته‌های پاسخ، تصمیم گرفته که به کدام مکان اقامت همسایه خود برود یا هنوز در همانجا بماند. این روش سبب محلی‌سازی و همبندی مسیر حرکت چاهک می‌شود. الگوریتم‌های پیشنهادی، مکان و زمان وقایع در گره‌ها را پیش‌بینی کرده و بازدید چاهک از گره‌ها براساس حداکثر مقدار داده جمع‌آوری شده است که مبدا و مقصد چاهک، روی سطح آب است. هرگاه رویداد جدیدی رخ داد، هر گره حسگری که آن را حس کرد، با یک بسته کوچک و حداکثر از طریق یک گره میانی به صورت سیل آسا در کانال صوتی به چاهک اطلاع می‌دهد.

برای افزایش طول عمر شبکه و مقدار داده جمع‌آوری شده در الگوریتم‌های پیشنهادی، چاهک می‌تواند چندین بار در یک مکان،

$$\Psi_{xy}^s \times d_{xy} \leq d_{Max} \quad \forall x, y \in V, s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{x \in V} \Psi_{0x}^s = 1 \quad \forall x \in V, s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{x \in V} \Psi_{xq}^s = 1 \quad \forall x \in V, s \in S \quad (9)$$

$$\Psi_{0x}^s + \sum_{x \in \Delta_y} \Psi_{xy}^s = \Psi_{xq}^s + \sum_{y \in \Delta_x} \Psi_{xy}^s \quad \forall x, y \in V, s \in S \quad (10)$$

$$\Psi_{0x}^s + \sum_{x \in \Delta_y} \Psi_{yx}^s = \Phi_x^s \quad \forall x, y \in V, s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{s \in S} \Phi_x^s \leq 1 \quad \forall x \in V, s \in S \quad (12)$$

$$t_{min} \cdot \Phi_x^s \leq t \leq M \cdot \Phi_x^s \quad \forall x \in V, s \in S, t \in [0, T-1] \quad (13)$$

$$C_x^t \leq \Phi_x^s \quad \forall x \in V, s \in S, t \in [0, T-1] \quad (14)$$

تابع هدف (۴)، برای حداکثر کردن مقدار داده جمع‌آوری شده از همه گره‌های h سگر زیرآب مانند $i \in N$ به J_i یا مجموعه‌ای از هم‌سایگان گره i توسط همه چاهک‌های $s \in S$ از زمان صفر تا زمان $T-1$ یا یک مرحله مانده تا پایان عمر شبکه زیرآب است. محدودیت (۵)، بیانگر دودویی بودن متغیرهای Ψ_{xy}^s و Φ_x^s و D_i^{tc} و C_i^t است. اگر $\Phi_x^s = 1$ باشد، آنگاه باید دقیقاً یک مکان مانند y وجود داشته باشد که $\Psi_{xy}^s = 1$ باشد و برعکس یعنی اگر $\Psi_{xy}^s = 1$ باشد، آنگاه باید چاهک در مکان x اقامت کرده باشد، یعنی $\Phi_x^s = 1$ باشد. همچنین اگر $\Phi_x^s = 0$ باشد، آنگاه نباید هیچ ورودی از چاهک s به مکان x باشد و برای هر مکان y نیز باید $\Psi_{yx}^s = 0$ باشد. محدودیت (۶)، بیانگر شرایط بین انرژی مصرفی و انرژی موجود در همه گره‌های حسگر در شبکه زیرآب است.

محدودیت (۷)، حداکثر فاصله‌ای را که چاهک $s \in S$ می‌تواند بین دو مکان دلخواه $x, y \in V$ در مسیر بهینه شبکه زیرآب حرکت کند را محدود به d_{Max} یا حداکثر فاصله بین دو مکان اقامت چاهک می‌کند. محدودیت (۸)، بیانگر مسیر حرکت بهینه چاهک $s \in S$ از مکان مجازی و ثابت و دلخواه $0 \in V$ به عنوان مبدا از روی سطح آب به مکان دلخواه $x \in V$ است. محدودیت (۹)، بیانگر مسیر حرکت بهینه چاهک s از مکان دلخواه $x \in V$ به مقصد یا آخرین مکان مجازی $q \in V$ در سطح آب در پایان عمر شبکه حسگر است. محدودیت (۱۰)، نشان داده که باید تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها به یک مکان اقامت چاهک برابر باشند که Δ_i مجموعه‌ای از مکان‌های اقامت چاهک است که فاصله آنها تا مکان x کمتر از d_{Max} است.

محدودیت (۱۱)، نشان داده که چاهک $s \in S$ می‌تواند در هر مکان اقامت x بیش از یک بار اقامت کند. به عبارت دیگر، سمت چپ t ساوی، تعداد ورودی‌های چاهک s به مکان اقامت x را شمارش کرده و سمت راست این مقدار به حداکثر مقدار یک از طریق متغیر باینری Φ_x^s محدود می‌شود. محدودیت (۱۲)، بیان کرده چند چاهک مانند $s \in S$ می‌تواند در یک برش زمانی هم‌زمان در یک مکان مانند $x \in V$ اقامت کنند. محدودیت (۱۳)، بیانگر محدوده زمان پیوسته توقف یا t بوده که اگر چاهک $s \in S$ در مکان $x \in V$ ساکن شود، متغیر دودویی Φ_x^s برابر یک شده و t_{min} حداقل زمان اقامت و M یک عدد بزرگ است. با افزایش t_{min} زمان اقامت چاهک در هر مکان بیشتر شده و لذا سربارهای ساخت و انتشار مسیر کاهش

الگوریتم، اولین مکان اقامت چاهک براساس SD یا امتیاز مقدار داده جمع‌آوری شده است. خطوط ۳ و ۴، با استفاده از الگوریتم DFN، مقادیر داده جمع‌آوری شده از هر دو مکان را محاسبه کرده تا در خط ۵، امتیاز مقدار داده جمع‌آوری شده حاصل از بازدید مکان اقامت $x \in V$ قبل از مکان y تعیین شود. مجدداً در خطوط ۶ تا ۹ امتیاز داده جمع‌آوری شده حاصل از بازدید مکان y قبل از مکان اقامت $x \in V$ تعیین می‌شود.

در خط ۱۰، دو امتیاز داده جمع‌آوری شده با هم مقایسه شده تا برحسب بیشترین امتیاز، اولین مکان اقامت بعدی مشخص شود. به‌عنوان مثال، اگر چاهک، سه داده را از سه مکان اقامت $x, y, z \in V$ جمع‌آوری کند، ابتدا چاهک از طریق فرمول ۱۵، امتیاز داده جمع‌آوری شده از هر سه مکان را محاسبه می‌کند. اگر مکان اقامت $x \in V$ بیشترین امتیاز را داشت، الگوریتم CSD یکبار با ورودی (x, y) و یکبار با ورودی (x, z) اجرا می‌شود. اگر خروجی دو اجرا به ترتیب $(x, 15, M_x)$ و $(z, 18, M_z)$ باشد، ابتدا چاهک به مکان اقامت z از مسیر M_z رفته و داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند و سپس مجدداً چاهک تصمیم گرفته که به کدام مکان اقامت $x, y \in V$ برود.

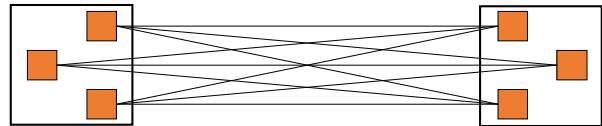
از الگوریتم NS برای تعیین مکان اقامت بعدی چاهک در پایان هر بار بازدید و جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌شود. ورودی این الگوریتم، همه داده‌های جمع‌آوری شده در شبکه است و خروجی آن z یا مکان اقامت بعدی چاهک است. این الگوریتم، در خطوط ۱ و ۲، ابتدا V یا مجموعه‌ای از مکان‌های اقامت چاهک‌ها را انتخاب کرده و بیشترین مقدار داده جمع‌آوری شده از هر مکان اقامت $x \in V$ را محاسبه می‌کند. در خط ۴، امتیاز داده جمع‌آوری شده، همه جفت مکان‌های ممکن x و y با استفاده از الگوریتم CSD محاسبه شده تا در خط ۶ مکان اقامت بعدی z با بیشترین امتیاز را برای اولین بازدید مشخص کند.

۴-۳- محاسبه پیچیدگی زمانی و سرعت همگرایی

اگر $|N|$ تعداد گره‌های حسگر در شبکه و $|T|$ تعداد برش‌های زمانی باشد، تحت شرایط پیشنهادی، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی DFN، خطی و برابر طول لیست داده‌های جمع‌آوری شده برای همه رویدادهای حس شده یا $O(|L_{dl}|)$ است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم CSD نیز مشابه الگوریتم DFN، خطی و چندجمله‌ای و برابر طول لیست داده جمع‌آوری شده برای همه رویدادهای حس شده یا $O(|L_{dl}|)$ است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم NS برابر $O(|V||L_{dl}^{\max}|)$ است که L_{dl}^{\max} طولانی‌ترین لیست سوابق داده‌های جمع‌آوری شده در میان همه مکان‌های اقامت چاهک در V است.

در نتیجه پیچیدگی زمانی الگوریتم‌های پیشنهادی برابر $O(|T||N|)$ است و پیچیدگی پیام هر سه الگوریتم در بدترین حالت برابر $O(|N|)$ است. زیرا در هر سه الگوریتم، چاهک پیام‌های سر شماری را در ابتدای هر بازه زمانی پخش می‌کند و فقط گره‌های حسگر که قادر به انتقال داده‌ها در بازه زمانی فعلی هستند به پیام پاسخ می‌دهند. پس از دریافت پیام‌های پاسخ، چاهک مقدار داده جمع‌آوری شده را در دو برش زمانی متوالی در زمان $O(|N|)$ محاسبه می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی یافتن گره‌های حسگر به ترتیب حداکثر مقدار داده جمع‌آوری شده در دو برش زمانی متوالی نیز در زمان $O(|N|)$ انجام می‌شود زیرا بررسی هر یک از

اقامت کند. برای این منظور مکانی که قرار است چاهک چندین بار اقامت یا عبور کند را یک مکان منطقی نامیده که هیچ لبه‌ای بین مکان‌های منطقی وجود ندارد و هر مکان منطقی، به مکان‌های فیزیکی مجاور متصل است. شکل ۴، دو مکان فیزیکی مجاور و شش مکان منطقی با اتصالات آنها را نشان داده که در هر مکان فیزیکی، امکان ۳ بار ملاقات مجدد وجود دارد. لذا در الگوریتم‌های پیشنهادی، می‌توان آنقدر تعداد ملاقات‌ها را افزایش داد تا مقدار داده جمع‌آوری شده حداکثر شود.



شکل ۴: دو مکان فیزیکی مجاور و شش مکان منطقی و اتصال بین آنها

۴-۲- مراحل الگوریتم پیشنهادی

از الگوریتم پیشنهادی DFN برای تعیین روش حداکثر مقدار داده جمع‌آوری شده از زمان آغاز به کار شبکه تا T یا زمان پایان عملیات شبکه توسط چاهک استفاده می‌کنیم. ورودی این الگوریتم، شامل x یا مکان اقامت چاهک، t_s یا زمان لازم برای ذخیره‌سازی داده جمع‌آوری شده، VOD یا مقدار داده جمع‌آوری شده، t یا زمان لازم برای پیش‌بینی، t_c یا زمان لازم برای تولید داده است. خروجی این الگوریتم شامل $R_{x:j_x}^s(t)$ یا مقدار داده جمع‌آوری شده از مکان اقامت x در زمان t یا t_{fx} یا زمان لازم برای ارسال داده به چاهک $s \in S$ و M_x یا روش جمع‌آوری و ارسال داده‌ها است. زمان لازم برای تولید یک داده وابسته به نوع مهلت زمانی نرم یا سخت و فاصله چاهک تا مکان اقامت بعدی است. به‌عنوان مثال، اگر مقدار داده دو مکان اقامت یکسان باشند، امتیاز بازدید برای مکان اقامتی بیشتر است که داده‌های نزدیک آنجا مهلت زمانی کمتری داشته باشند. فلوچارت‌های الگوریتم‌های پیشنهادی در شکل ۵ و شبه کدهای الگوریتم‌های پیشنهادی نیز در شکل ۶ آمده است.

در خط ۱ الگوریتم DFN، براساس داده‌های جمع‌آوری شده از مکان‌های اقامت، لیست L_{dl} ایجاد شده که طول آن برابر $|L_{dl}| = \lceil t/t_s \rceil$ است. در خطوط ۴ تا ۱۲، حلقه for به‌طور اکتشافی و مکرر، بیشترین داده جمع‌آوری شده از مکان اقامت $x \in V$ را برای چند روش در هر زمان محاسبه و مقایسه می‌کند. تا زمانی که داده‌های جمع‌آوری شده L_{dl} در یک زمان قابل تکه‌تکه شدن باشند یا t_{fx} یا زمان ارسال نهایی کوچکتر از T یا زمان پایان عملیات شبکه باشد، بررسی روش‌های جدید ادامه می‌یابد. امتیاز مقدار داده جمع‌آوری شده یا SD را در مکان اقامت $x \in V$ به صورت فرمول (۱۵) با استفاده از مقادیر محاسبه شده $R_{x:j_x}^s(t)$ و t_{fx} از الگوریتم فوق، قابل محاسبه است.

$$SD_x = \frac{R_{x:j_x}^s(t)}{t_{fx} - t_{now}} \quad \forall x \in V, s \in S, t \in [0, T-1] \quad (15)$$

اگر یک چاهک، همزمان داده‌ها را از هر دو مکان اقامت $x, y \in V$ جمع‌آوری کند، از الگوریتم CSD برای تعیین اولین مکان اقامت نزدیک به آنها استفاده می‌کنیم. ورودی این الگوریتم، شناسه‌های دو مکان اقامت $x, y \in V$ و t یا مدت زمان پیش‌بینی آنها از وقایع است. و خروجی این

Algorithm DFN ($x, t_s, VCCD, t, t_c$)
 Begin
 1. $L_d = VCCD$ based on queue of data info;
 2. $R_{x:J_x}^s(t) = 0$;
 3. $t_{fx} = 0$;
 4. for $\varphi=1$ to $|L_d|$ do
 5. Begin
 6. $VCCD_\varphi = \sum VCCD$ Transferred φ at a time;
 7. t_φ = time it takes to collect and transfer all data;
 8. if $VCCD \geq R_{x:J_x}^s(t)$ then
 9. Begin $t_{fx} = t_c + t_\varphi$; End
 10. if $t_{fx} > T$ then
 11. Begin break; End
 12. $R_{x:J_x}^s(t) = VCCD_\varphi$;
 13. M_x = Transfer φ data at a time;
 14. End
 15. return ($R_{x:J_x}^s(t), t_{fx}, M_x$);
 End.

Algorithm CSD (x, t, y, t')
 Begin
 1. t_s = recording time of a data;
 2. t_{now} = current time;
 3. ($R_{x:J_x}^s(t), t_{fx}, M_x$) = DFN ($y, t_s, VCCD, t', t_{fx}$);
 4. ($R_{x:J_x}^s(t'), t_{fx}, M_x$) = DFN ($x, t_s, VCCD, t, t_{now}$);
 5. $SD_{xy} = \frac{R_{x:J_x}^s(t) + R_{x:J_x}^s(t')}{t_{fx} - t_{now}}$;
 6. t_{now} = current time;
 7. ($R_{x:J_x}^s(t), t_{fx}, M_x$) = DFN ($x, t_s, VCCD, t, t_{fx}$);
 8. ($R_{x:J_x}^s(t'), t_{fx}, M_x$) = DFN ($y, t_s, VCCD, t', t_{now}$);
 9. $SD_{yx} = \frac{R_{x:J_x}^s(t) + R_{x:J_x}^s(t')}{t_{fx} - t_{now}}$;
 10. if $SD_{xy} > SD_{yx}$ then return (x, SD_{xy}, M_x);
 11. else return (y, SD_{yx}, M_y);
 End.

Algorithm NS ($VCCD$)
 Begin
 1. V = Set of Sink Residential locations;
 2. x = location in V with the highest $R_{x:J_x}^s(t)$;
 3. (z, SD_z) = (0, 0);
 4. for $y \in V, y \neq x$ do
 5. Begin
 6. (xy, SD_{xy}) = CSD(x, t, y, t');
 7. if $SD_{xy} > SD_z$ then
 8. Begin (z, SD_z) = (xy, SD_{xy}); End
 9. End
 10. return z ;
 End.

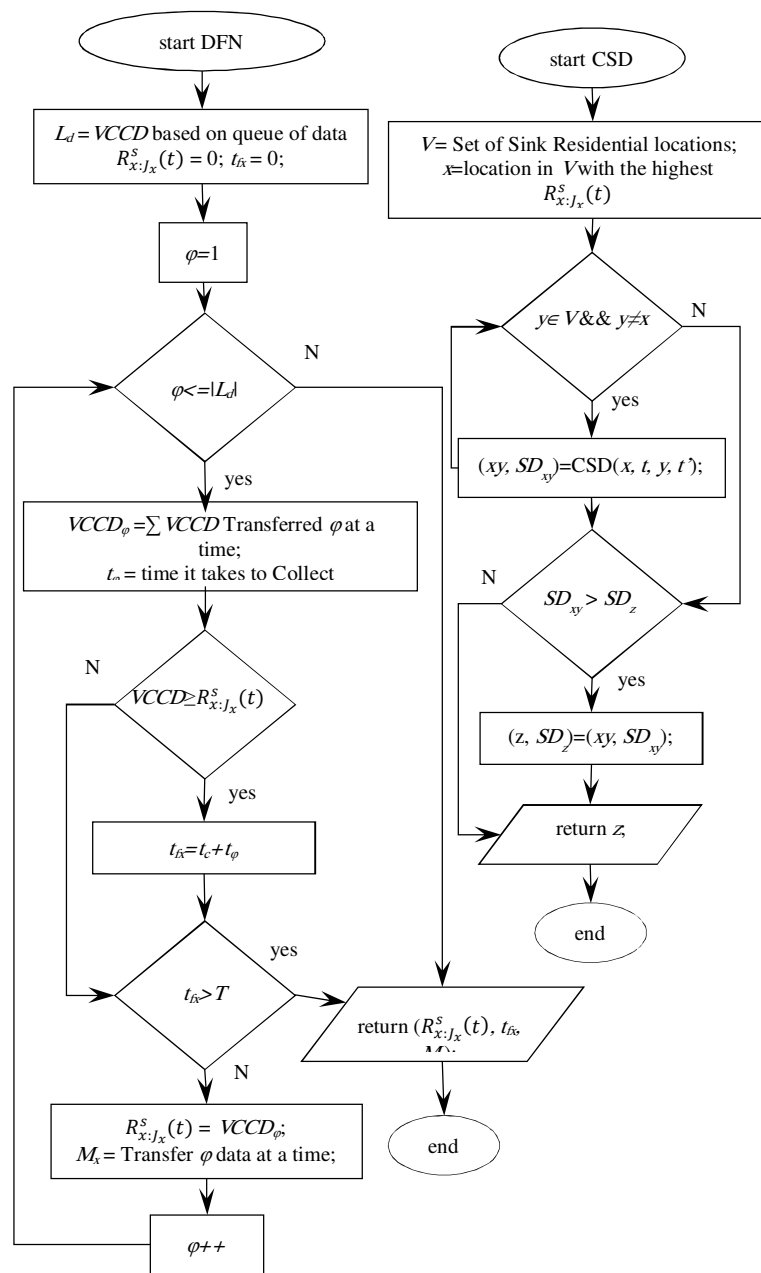
شکل ۶: شبکه‌های الگوریتم‌های پیشنهادی

۵- ارزیابی کارایی و شبیه‌سازی

این بخش شامل معرفی سناریوهای شبیه‌سازی و پارامترهای آنها و آرایه نتایج و مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل و الگوریتم پیشنهادی با روش‌های OPT و STATIC و RS و TSP و LM در نرم‌افزار متلب است. روش OPT یا مدل بهینه که از طریق مدل MILP بدست آمده است، بهترین عملکرد را داشته و پارامترهای اصلی آن به درستی تنظیم شده‌اند و چاهک در طول مسیر بهینه حرکت می‌کند. در حالت ایستا^{۱۱}، چاهک به طور ثابت و مطلوب در مرکز شبکه است تا طول عمر شبکه را به حداکثر رساند اما انرژی باقیمانده گره‌های حسگری که در مرکز شبکه قرار دارند بسیار سریع تخلیه شده و چاهک از شبکه زیرآب منفصل می‌شود و لذا در این حالت، طول عمر شبکه، مستقل از حداقل زمان اقامت یا t_{min} است [۸]. روش‌های RS و TSP یا فروشنده دوره‌گرد و LM چند روش اکتشافی غیرآگاهانه و تصادفی برای مسیریابی چاهک هستند که برای ارزیابی و مقایسه با روش پیشنهادی استفاده می‌شوند [۷].

شرطها در الگوریتم پیشنهادی نیاز به $O(1)$ زمان دارد.

بنابراین، پیچیدگی زمانی الگوریتم پیشنهادی برابر $O(|T||N| + |T||N| + |T|) = O(|T||N|)$ است. در همان شرایط، پیچیدگی زمانی الگوریتم C-Schedule با شرایط پیشنهادی در این مقاله نیز در بدترین حالت برابر $O(2|T||N|) = O(|T||N|)$ است [۱۷]. اما پیچیدگی زمانی الگوریتم تقریب مبتنی بر GAP [18]، در بدترین حالت به صورت $\sum_{n_1 \in N} O(T_{max} + |N|T_{max})$ است که حداکثر تعداد برش‌های زمانی احتمالی است که می‌توان به هر گره حسگر اختصاص داد [۱۸]. براساس شرط‌های پیشنهادی در این مقاله، پیچیدگی الگوریتم تقریب مبتنی بر GAP برابر $O(2|N| + 2|N|^2) = O(|N|^2)$ است. چون در کاربردهای واقعی $|T| < |N|$ است، در نتیجه در بدترین حالت، پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی یک مرتبه کمتر از الگوریتم تقریب مبتنی بر GAP است.



شکل ۵: فلوچارت‌های الگوریتم‌های پیشنهادی

بعنوان مثال، اگر فرض کنیم مدت زمان ذخیره هر بسته داده ۹ مگابیتی، ۵ دقیقه باشد، برای یک رویدادی که ۲۳ دقیقه است، نیاز به تولید ۴ بسته داده کامل و یک بسته داده ۳ دقیقه‌ای است. انرژی اولیه هر گره حسگر برابر ۵۰ ژول و نرخ ظرفیت کانال ۲۵۰ کیلوبیت بر ثانیه و پارامتر t_{min} از ۵۰ ثانیه تا ۲ هزار ثانیه تغییر می‌کند. حداکثر محدوده انتقال گره‌های حسگر یا d_{max} از ۱۴۲ تا ۱۰۰۰ متر قابل تغییر بوده که با افزایش d_{max} ، تعداد همسایه‌ها و مسیرها از ۸ به ۲۴ افزایش یافته و اگر مقدار d_{max} بیش از حد زیاد شود، سبب تحرک نامحدود چاهک‌ها می‌شود. تولید داده در هر گره مطابق فرآیند پواسون با نرخ ورود $\lambda=1$ ساعت به صورت تصادفی و یکنواخت در شبکه است و حداقل برابر ۰٫۵ بیت بر ثانیه است یعنی در هر ۱۳ دقیقه، حداقل یک بسته به شبکه تزریق می‌شود. مقدار داده اولیه هر رویداد غیرمهم، ۰٫۴ بایت است و حداکثر مقدار آن براساس توزیع گاوسی در مجموعه $\{20, 50, 100, 200\}$ بایت است که وابسته به اهمیت رویداد و فاصله گره حسگر و محل رویداد است [۱۳].

اگر زمان τ_c بیش از حد طولانی شود، قبل از اینکه چاهک‌های متحرک بتوانند از همه مکان‌های اقامت عبور کنند، عمر شبکه پایان یافته و منجر به عدم تعادل مصرف انرژی در گره‌ها می‌شود. اما اگر زمان τ_c خیلی کوتاه باشد، قبل از پایان عمر شبکه، چاهک‌های متحرک از همه مکان‌های اقامت عبور کرده و در آخرین مکان توقف می‌مانند. لذا مطابق برخی آزمایشات برای داشتن بهترین عملکرد، زمان τ_c را برابر ۴ ثانیه و مدت زمان اجرای همه شبیه‌سازی‌ها را برابر ۴ هزار ثانیه در نظر می‌گیریم. جدول ۲، شامل مقادیر سایر پارامترهای شبیه‌سازی مانند منابع [۳، ۶، ۱۵] است.

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی

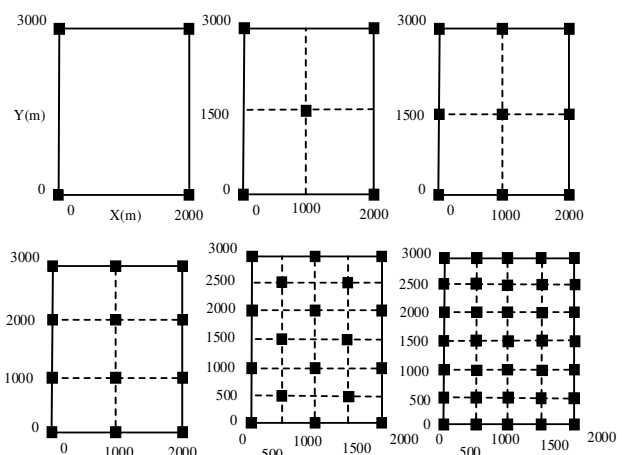
پارامترهای شبیه‌سازی	مقدار
d_{Max}	۲۵ متر
eO_i	۷ ژول
C_i	10kbps
α	100pJ/sec.m
β_{fs}	1nJ/sec
مدت زمان کل عملیات شبکه یا T	۱۲ ساعت
سرعت حرکت چاهک	۱٫۸ متر بر ثانیه
سرعت ارسال بسته‌های رویداد از گره حسگر به چاهک از طریق کانال صوتی	۴ کیلوبیت بر ثانیه
نرخ انتقال داده‌های نوری و بی‌سیم	۱۰ مگا بیت بر ثانیه
انرژی لازم برای ارسال	۰٫۳ ژول
انرژی لازم برای دریافت	۰٫۵ ژول
انرژی لازم برای مبادله داده‌های نوری	۳ وات

در حالت مهلت زمانی سخت فرض کرده حداکثر زمان لازم برای رسیدن چاهک به نقطه توقف ۳۰ دقیقه و در حالت مهلت زمانی نرم آخرین مهلت زمانی برای داده‌ها ۶۰ دقیقه باشد. لذا امکان از بین رفتن داده‌ها تا قبل از رسیدن چاهک به نقطه توقف وجود دارد. در نتیجه جمع‌آوری و تحویل چنین داده‌هایی برای چاهک منطقی نخواهد بود. همچنین برای ساخت مسیر و تحویل داده‌ها به چاهک از پروتکل

در روش RS، چاهک در هر t_{min} به صورت غیرقابل کنترل و تصادفی و یکنواخت، مکان جدید اقامت خود را از میان تمام مکان‌های اقامت درون d_{max} در شکل ۳، انتخاب می‌کند. این پروتکل برای مسیریابی از گره‌های میانی و برای جمع‌آوری داده‌ها از حمال‌های داده استفاده کرده و در اغلب مقالات برای مقایسه با روش پیشنهادی استفاده می‌شود [۱۳].

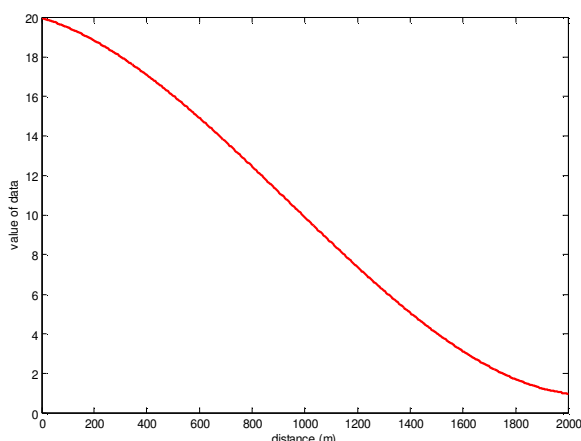
در این آزمایش‌ها، گره‌های حسگر در یک شبکه توری مربعی به ابعاد 3×3 کیلومتر مانند شکل ۳ قرار گرفته‌اند و هر گره حسگر حداکثر چهار همسایه دارد در مرکز هر چهار حسگر، یک مکان‌های اقامت چاهک قرار دارد که چاهک‌ها به صورت تصادفی در آنها قرار می‌گیرند. ما فرض می‌کنیم که هر چاهک متحرک می‌تواند در بین مکان‌ها حرکت کرده و اقامت کند و دو یا چند چاهک در یک مکان اقامت کنند. همچنین در مدل شبیه‌سازی شبکه فرض کرده، مکان رخ دادن رویدادها به صورت تصادفی و یکنواخت است و نقطه شروع حرکت چاهک‌ها، نزدیک به مرکز شبکه است و کانال ایده‌آل بوده و از سال بین گره‌های حسگر به صورت هماهنگ از لایه کنترل دسترسی رسانه 12 کنترل شده بوده و هیچ برخورد و خطای داده‌ای رخ نمی‌دهد و گره‌های حسگر تولیدکننده یا منبع، به‌طور دوره‌ای داده‌ها را براساس فرآیند پواسون هر ۳۰ دقیقه با سرعت ۱۰ بیت بر ثانیه تولید کرده و به همه چاهک‌ها ارسال می‌کنند. همچنین فرض کرده اگر بین گره حسگر و چاهک ارتباط مستقیمی نباشد، بسته‌های رویداد به صورت سیل آسا منتشر می‌شوند. اگر فاصله بین گره حسگر و چاهک کمتر از ۱۰۰ متر باشد، برای ارسال و دریافت داده‌ها می‌توانند از ارتباطات نوری استفاده کنند [۱۲].

شکل ۷، توپولوژی‌های مورد بررسی در آزمایش‌ها و قرارگیری گره‌های حسگر در یک شبکه توری ۲ در ۳ کیلومتر در عمق ۵۰ تا ۲۰۰ متر زیر آب را نشان داده که تعداد ۴، ۵، ۹، ۱۲، ۱۸ و یا ۳۵ گره حسگر در زیر آب به صورت تصادفی و یکنواخت قرار گرفته‌اند و هر گره حسگر حداکثر چهار همسایه دارد که مکان‌های توقف چاهک‌ها در بین آنها است. همچنین فرض کرده اندازه هر بسته، برابر ۱۰ بایت بوده که حاوی سرآیند همه لایه‌های شبکه تا فیزیکی پروتکل است و تاخیر ارسال بسته رویداد به چاهک شامل تاخیر حرکت چاهک برای جمع‌آوری داده‌ها است.

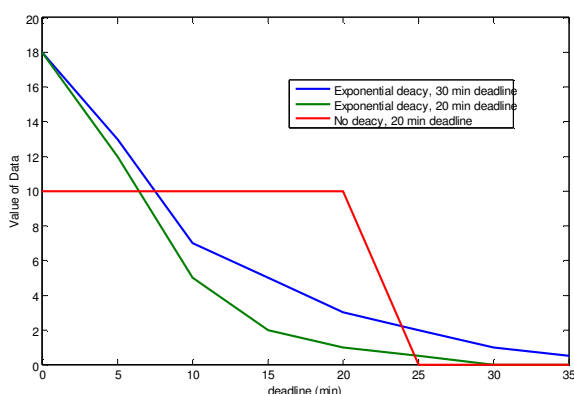


شکل ۷: توپولوژی‌های مورد بررسی و قرارگیری گره‌های حسگر منبع در یک شبکه توری ۲ در ۳ کیلومتر [۲۰]

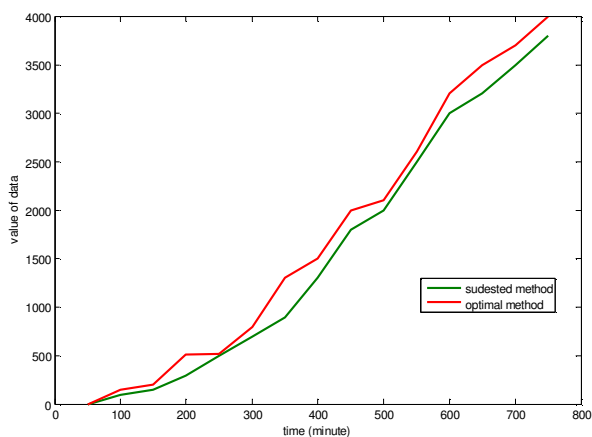
داده‌های جمع‌آوری شده با زمان کاهش نمی‌یابد و از حالت مهلت زمانی نمایی برای تحویل سریع داده‌های تولید شده استفاده می‌شود. شکل ۱۱، مقدار داده جمع‌آوری شده در روش پیشنهادی و مدل بهینه‌سازی پیشنهادی OPT طی ۷۵۰ دقیقه با مهلت زمانی سخت را نشان داده که نرخ رخ دادن رویدادها براساس فرآیند پواسون هر ۳۰ دقیقه است که تقریباً روند مشابهی دارند.



شکل ۹: مقدار داده جمع‌آوری شده از هر رویداد توسط گره حسگر در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی OPT



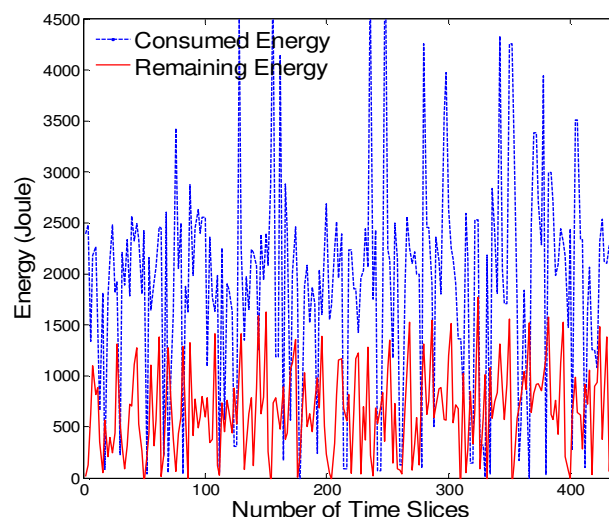
شکل ۱۰: مقدار داده جمع‌آوری شده با انواع مختلف مهلت زمانی



شکل ۱۱: مقدار داده جمع‌آوری شده برحسب بیت در روش‌های پیشنهادی و OPT در طول ۷۵۰ دقیقه

مسیریابی [5] GeRaF استفاده کرده و از تنظیمات MAC برای شبکه‌های حسگر معمولی CSMA/CA استفاده می‌کنیم [۱۶]. مدل انرژی مورد استفاده در آزمایشات، براساس مشخصات ترانزیستور رادیویی TR 1000 از [7] RF Monolithics است که مصرف انرژی برای انتقال، برابر ۱۴،۸ مگاوات، برای دریافت، برابر ۱۲،۵ مگاوات و در حالت خواب، برابر ۰،۰۱ میلی‌وات است [۱۸]. شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب روی رایانه‌ای با پردازنده ۵ هسته‌ای اینتل ۲،۵ گیگاهرتز و حافظه رم ۶ گیگابایت اجرا شده است و برای حل مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در بخش ۳، از نرم‌افزار AMPL [4] استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاصل ۲۰ بار اجرا و تکرار است و یا شبیه‌سازی را آنقدر تکرار کرده تا انرژی اولین گره حسگر فعال خاتمه یابد و لذا نتایج با اطمینان ۹۵٪ و دقت ۵٪ است.

شکل ۸، میزان مصرف انرژی و انرژی باقیمانده در گره‌های حسگر در برش‌های زمانی مختلف را برای جمع‌آوری داده‌ها توسط چاهک متحرک در یک دور برحسب تعداد برش‌های زمانی به‌صورت پویا در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل ۸: میزان انرژی مصرف‌شده و باقیمانده در گره‌های حسگر در برش‌های زمانی مختلف

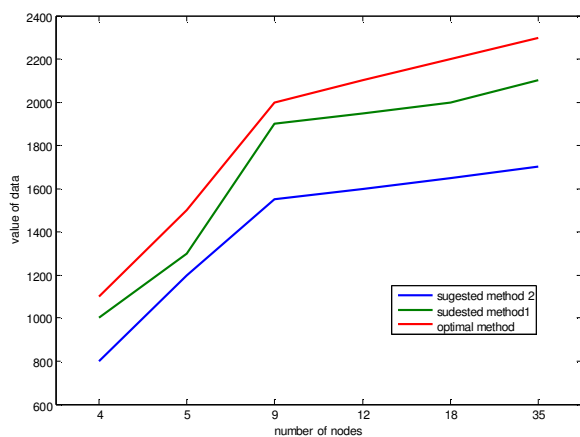
۵-۱- ارزیابی و بررسی مقدار داده جمع‌آوری شده

مقدار داده‌های جمع‌آوری شده در حالت مهلت زمانی سخت بسیار کمتر از حالت مهلت زمانی نرم است، لذا در حالت مهلت زمانی سخت باید داده‌ها سریع جمع‌آوری شوند. مقدار داده جمع‌آوری شده از هر گره حسگر به یک گره میانی و یا چاهک، با فاصله بین آنها نسبت عکس دارد و هرچه فاصله بین گره‌ها بیشتر می‌شود، مقدار داده جمع‌آوری شده کاهش می‌یابد. شکل ۹، مقدار داده جمع‌آوری شده از یک گره حسگر برحسب بیت با مقدار اولیه ۲۰ بیت را متناسب با فاصله برحسب متر در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی نشان داده که براساس یک توزیع گاوسی در حال اربین رفتن یا تباهی است.

شکل ۱۰، مقدار داده جمع‌آوری شده را پس از یک مهلت مشخص با سه حالت مهلت زمانی ۲۰ و ۳۰ دقیقه و بدون مهلت زمانی یا با مهلت ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد. در حالت مهلت زمانی نرم مقدار

فاصله‌های حرکت چاهک کاهش می‌یابد. حالت ۵ گره حسگر منبع، مانند حالت ۴ گره حسگر منبع بوده که گره پنجم در مرکز شبکه قرار دارد که در این دو حالت، تراکم گره‌های حسگر منبع کمتر است و لذا داده‌های کمتری تولید و جمع‌آوری شده و نیاز به تحرک بیشتر چاهک‌ها است. در حالت مهلت زمانی نرم، اختلاف مقدار داده جمع‌آوری شده در مدل OPT و الگوریتم پیشنهادی بسیار کمتر از حالت مهلت زمانی سخت است. زیرا اگر تا دقیقه ۲۰، داده‌ها از بین نروند، چاهک می‌تواند قبل از مهلت زمانی، داده‌های بسیار بیشتری را جمع‌آوری کند.

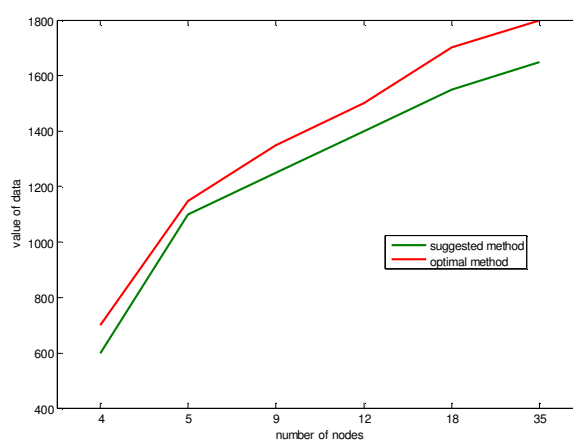
شکل ۱۴، مقدار داده جمع‌آوری شده با حالت مهلت زمانی سخت در مدل بهینه‌سازی OPT و الگوریتم‌های پیشنهادی اول DFN و دوم CSD را متناسب با تعداد گره‌های حسگر منبع نشان می‌دهد. مقدار داده جمع‌آوری شده الگوریتم اول در شبکه‌های پراکنده و تعداد گره‌های حسگر منبع کم، ۱۱ درصد کمتر از مدل بهینه‌سازی OPT است و در شبکه‌های متراکم و تعداد گره‌های حسگر منبع زیاد، ۸ درصد کمتر از مدل بهینه‌سازی OPT است و مقدار داده جمع‌آوری شده الگوریتم پیشنهادی دوم CSD، ۲۰ درصد کمتر از الگوریتم پیشنهادی اول DFN است. زیرا الگوریتم پیشنهادی دوم CSD، برای جمع‌آوری داده‌ها فقط از حرکت و انتخاب مسیر چاهک براساس امتیاز داده یا SD استفاده کرده و ابتدا چاهک به گرهی حرکت کرده که داده‌های آن با مهلت زمانی سخت باشد و سپس به گرهی حرکت کرده که هنوز مهلت دارد. مشاهده شده بین افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع، اختلاف داده جمع‌آوری شده بین الگوریتم‌ها و مدل افزایش می‌یابد.



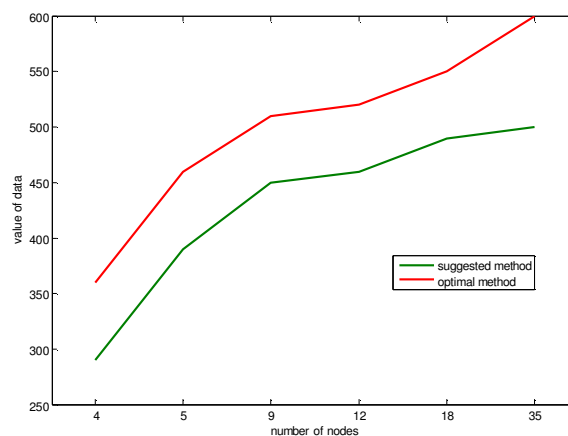
شکل ۱۴: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی مقدار داده جمع‌آوری شده بر حسب بیت در حالت مهلت زمانی سخت

چون فرض کرده‌ایم که چاهک‌ها از مرکز شبکه شروع به حرکت می‌کنند، اگر تعداد گره‌های حسگر منبع برابر ۴ باشد، چاهک‌ها مجبورند که فاصله‌های بیشتری را از ۴ گوشه شبکه طی کنند که امکان دارد مهلت زمانی برخی داده‌ها پایان یابد. اما با افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع مانند ۳۵ گره، استقرار گره‌های حسگر منبع در مرکز بیشتر شده و فاصله چاهک‌ها تا گره‌های حسگر منبع کاهش یافته و چاهک‌ها می‌توانند قبل از مهلت زمانی، داده‌های بسیار بیشتری را جمع‌آوری کنند و لذا با

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقدار داده جمع‌آوری شده توسط چاهک را متناسب با تعداد گره‌های حسگر منبع در به ترتیب برای مهلت زمانی نرم و سخت نشان می‌دهند. مشاهده شده که با افزایش تراکم تعداد گره‌های حسگر منبع، در همه روش‌ها و در دو حالت مهلت زمانی نرم و سخت، مقدار داده جمع‌آوری شده افزایش می‌یابد که مستقل از اندازه شبکه و زمان ذخیره‌سازی داده‌ها است. همچنین چون مدل بهینه‌سازی پیشنهادی یا OPT از حرکت آگاهانه چاهک برای رسیدن به رویدادهای رخ داده شده در شبکه استفاده می‌کند، سبب کاهش مسافت حرکت چاهک و افزایش مقدار داده جمع‌آوری شده می‌شود و از الگوریتم پیشنهادی بهتر عمل می‌کند. در هر دو حالت مهلت زمانی سخت و نرم، الگوریتم پیشنهادی فقط ۲۰ درصد کمتر از مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند.



شکل ۱۲: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی مقدار داده جمع‌آوری شده بر حسب بیت در حالت مهلت زمانی نرم



شکل ۱۳: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی مقدار داده جمع‌آوری شده بر حسب بیت در حالت مهلت زمانی سخت

در حالت ۴ گره حسگر منبع که در چهار گوشه شبکه قرار دارند چاهک‌ها مجبورند فاصله‌های بیشتری را از گوشه شبکه طی کنند که سبب پایان یافتن مهلت زمانی برخی داده‌ها می‌شود اما با افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع در شبکه، استقرار گره‌ها در مرکز بیشتری شده و

مشاهده شده که چون در مدل بهینه‌سازی و الگوریتم پیشنهادی، مسیریابی حرکت چاهک‌ها به صورت آگاهانه است و هر چاهک از قبل می‌داند که باید به کدام مکان اقامت برود، بنابراین ابتدا چاهک‌ها به سمت مکان‌هایی برای جمع‌آوری داده‌ها حرکت می‌کنند که مهلت زمانی آنها سخت باشد و سپس به مکان‌هایی حرکت کرده که آن داده‌ها هنوز مهلت زمانی کافی را دارند. در نتیجه در مدل بهینه‌سازی و الگوریتم پیشنهادی چاهک‌ها مکان‌های بیشتری را بازدید کرده و مقدار داده بیشتری را جمع‌آوری می‌کنند. همچنین مشاهده شده که با افزایش تعداد گره حسگر منبع در شبکه، اختلاف مقدار جمع‌آوری داده بین روش‌ها بیشتر می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع و تراکم شبکه، مقدار داده جمع‌آوری شده در همه روش‌ها و در دو حالت مهلت زمانی نرم و سخت افزایش می‌یابد، زیرا سبب نزدیک‌تر شدن رویدادهای رخ داده شده به چاهک‌ها شده و لذا چاهک مسافت کمتری را حرکت کرده و در نتیجه سبب کاهش مقدار از بین رفتن داده‌ها و افزایش مقدار داده جمع‌آوری شده می‌شود. به عنوان مثال، برای شبکه‌ای با ۴ گره حسگر منبع و در حالت مهلت زمانی سخت، مقدار داده جمع‌آوری شده در روش پیشنهادی، حداقل ۷۷ درصد بیشتر از روش‌های اکتشافی غیر آگاهانه TSP و LM و ۸۰ درصد بیشتر از روش RS است که کمترین داده را جمع‌آوری می‌کند و در حالت مهلت زمانی نرم، حدود ۵۴ درصد بیشتر از سایر روش‌ها است. همچنین برای شبکه‌های متراکم، مانند ۳۵ گره حسگر منبع، مقدار داده جمع‌آوری شده با روش پیشنهادی در حالت مهلت زمانی سخت، حدود ۵۷ درصد و در حالت مهلت زمانی نرم، حدود ۴۰ درصد بیشتر از سایر روش‌ها است.

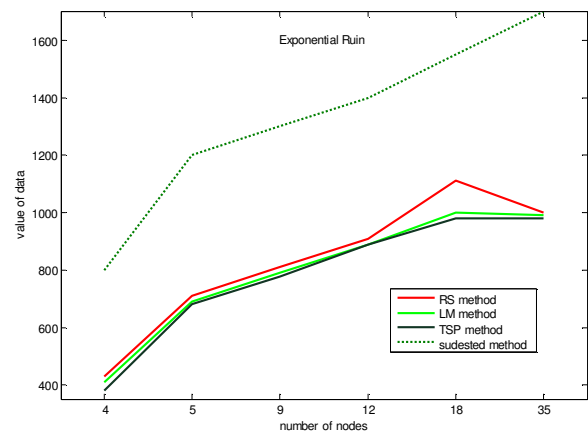
۵-۲- ارزیابی و بررسی مجموع انرژی مصرف شده

انرژی مصرف شده شامل انرژی لازم برای انتقال داده‌ها به چاهک به صورت نوری و انرژی لازم برای انتقال داده‌ها به صورت صوتی و به شکل سیل آسا و انرژی لازم برای حرکت چاهک است که مستقل از اندازه شبکه زیرآب و چگونگی از بین رفتن داده است و ۹۷ درصد انرژی برای حرکت چاهک مصرف می‌شود. چون عملکرد روش TSP همواره از روش‌های غیر آگاهانه RS و LM بهتر است، برای ارزیابی میزان مصرف انرژی فقط الگوریتم پیشنهادی و TSP را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

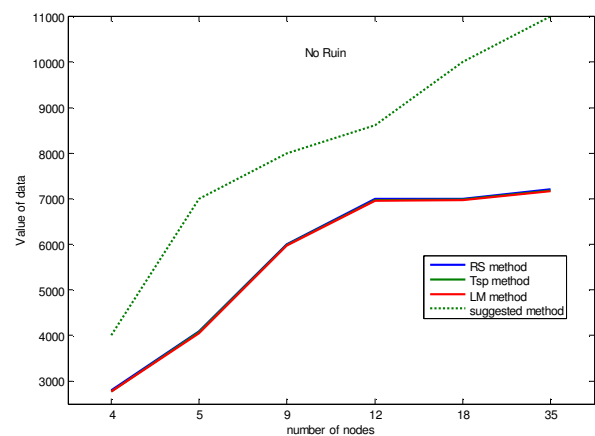
شکل‌های ۱۷ و ۱۸، انرژی مصرف شده را به ترتیب برای حالت مهلت زمانی سخت و نرم داده‌ها تا دقیقه ۲۰ با چاهک را نشان داده که انرژی مصرف شده در الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌های پراکنده، حدود ۷۰ درصد و برای شبکه‌های متراکم حدود ۴۵ درصد کمتر از روش TSP است. مشاهده شده که با افزایش یکنواخت تراکم و تعداد گره‌های حسگر منبع در شبکه، بار ترافیکی و مقدار داده‌های تولید و ارسال و حس شده افزایش یافته و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می‌یابد و عمر شبکه کاهش می‌یابد. اما استفاده از مدل و الگوریتم پیشنهادی سبب کاهش تعداد ارسال‌ها و در نتیجه کاهش ترافیک داده‌ها و تعداد برخوردها و خطای

افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع، اختلاف جمع‌آوری داده بین مدل بهینه‌سازی پیشنهادی و روش‌ها افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶، مقدار داده جمع‌آوری شده توسط چاهک‌ها متناسب با تعداد گره‌های حسگر را به ترتیب برای حالت‌های مهلت زمانی سخت و نرم در طول زمان عملیات شبکه تا دقیقه ۲۰ بین روش‌های مختلف نشان می‌دهند. در روش انتخاب تصادفی یا RS، چاهک به طور تصادفی و یکنواخت به یک گره حسگر که یک رویداد را حس کرده رفته و داده‌های آن را جمع‌آوری می‌کند. در روش TSP یا فروشنده دوره‌گرد، چاهک قبل از حرکت، مسیر بین گره‌ها را براساس فاصله مشخص می‌کند. مشکل این روش آن است که اگر یک گره در ادامه مسیر رویدادی را حس نکند، کل مسیر از بین می‌رود. در روش LM، چاهک، گره‌های حسگر را از پایین به بالا و چپ به راست به صورت خط به خط در توپولوژی بازدید می‌کند. اما روش پیشنهادی، آگاهانه بوده و چاهک از قبل می‌داند که کدام گره قرار است یک رویداد را حس کند و مانند OPT از ۹۰ درصد گره‌ها بازدید کرده و مقدار داده جمع‌آوری شده آن نزدیک به مقدار مطلوب است.

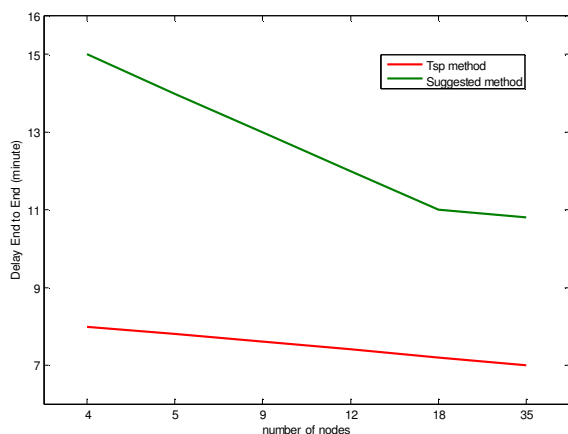


شکل ۱۵: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی مقدار داده جمع‌آوری شده بر حسب بیت در حالت مهلت زمانی سخت



شکل ۱۶: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی مقدار داده جمع‌آوری شده بر حسب بیت در حالت مهلت زمانی نرم

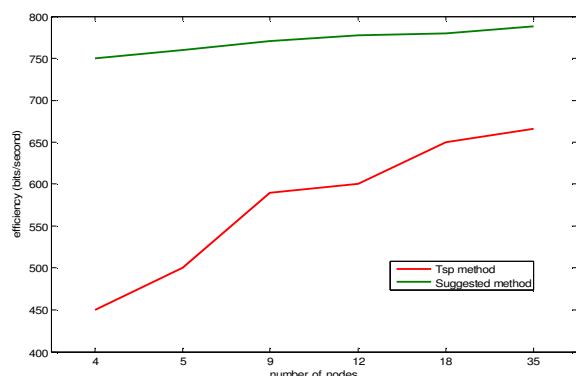
تاخیر و زمان لازم برای رسیدن داده‌های جمع‌آوری شده به چاهک افزایش می‌یابد. همچنین چون روش پیشنهادی از امتیاز جمع‌آوری داده برای مسیریابی چاهک استفاده می‌کند، برای شبکه‌های پراکنده، حدود ۶۹ درصد و برای شبکه‌های متراکم حدود ۵۷ درصد به‌طور پیوسته تاخیر کمتری نسبت به روش TSP دارد.



شکل ۱۹: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی تاخیر شبکه برحسب ثانیه با ۴ چاهک و محدوده ارسال ۲۰ متر بین دو روش پیشنهادی و TSP

۴-۵- ارزیابی و بررسی بازدهی شبکه

بازدهی شبکه همان تعداد بایت‌های ارسالی در طول زمان عملیات شبکه از چاهک به ایستگاه پایه است. در این آزمایش، تعداد چاهک‌ها را برابر ۴ و محدوده ارسال هر گره حسگر را برابر ۲۰ متر در نظر می‌گیریم. شکل ۲۰، نتایج ارزیابی و بررسی تاثیر افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع روی بازدهی شبکه با الگوریتم پیشنهادی و روش TSP را نشان می‌دهد. مشاهده شده که برای شبکه‌های پراکنده روش پیشنهادی حدود ۲۳ درصد و برای شبکه‌های متراکم حدود ۱۸ درصد، بازدهی بهتری از روش TSP دارد.

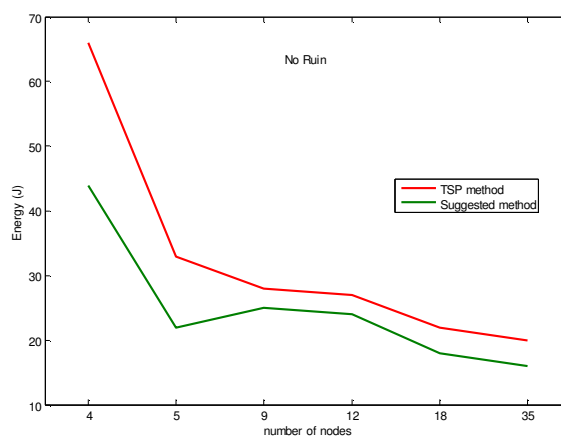


شکل ۲۰: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی بازدهی ارسال داده‌ها بین دو روش پیشنهادی و TSP با ۴ گره چاهک و محدوده ارسال ۲۰ متر

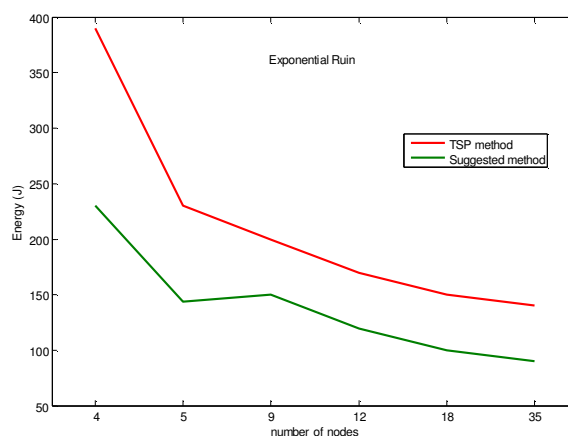
۶- نتیجه‌گیری

استفاده از چاهک‌های متحرک سبب کاهش مصرف انرژی و افزایش

پذیرش و در نتیجه سبب کاهش مصرف انرژی و افزایش عمر شبکه می‌شود. همچنین مشاهده شده که با افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع، تفاوت بین روش‌ها بیشتر مشخص می‌شود.



شکل ۱۷: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی میانگین مصرف انرژی برحسب میلی ژول با ۵ گره چاهک برای حالت مهلت زمانی نرم



شکل ۱۸: تاثیر تعداد گره‌های حسگر منبع روی میانگین مصرف انرژی برحسب میلی ژول با ۵ گره چاهک برای حالت مهلت زمانی سخت

۳-۵- ارزیابی و بررسی تاخیر پایان تا پایان

تاخیر پایان تا پایان داده‌ها وابسته به اندازه بافر، بار ترافیکی و تعداد گره‌های میانی بین گره حسگر منبع و چاهک‌ها است. در این آزمایش، اندازه بافر گره‌های حسگر منبع را برابر ۱۰۰ کیلوبایت و حجم داده‌های حس شده و تولید شده در فواصل تصادفی با توزیع نمایی را برابر ۱۰۰ بایت و تعداد چاهک‌ها را برابر ۴ و محدوده ارسال هر گره حسگر را برابر ۲۰ متر در نظر گرفته و شبیه‌سازی را ۱۰۰ بار تکرار برابر سپس میانگین همه تاخیرهای پایان تا پایان را محاسبه می‌کنیم.

شکل ۱۹، نتایج ارزیابی و بررسی تاثیر افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع روی تاخیر پایان تا پایان ارسال داده‌ها برحسب ثانیه یا مدت زمان لازم از تولید یک داده تا جمع‌آوری آن توسط چاهک با الگوریتم پیشنهادی و روش TSP را نشان می‌دهد. مشاهده شده که با افزایش تعداد گره‌های حسگر منبع، میزان داده‌ها در سطح شبکه افزایش یافته و

- [7] S. Arnon, "Underwater optical wireless communication network," *Optical Engineering*, vol. 49, no. 1, pp. 015001, 2010.
- [8] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, "Underwater sensor networks: applications, advances and challenges," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, no. 1958, pp. 158-175, 2012.
- [9] G. A. Hollinger, S. Choudhary, P. Qarabaqi, C. Murphy, U. Mitra, G. S. Sukhatme, M. Stojanovic, H. Singh, and F. Hover, "Underwater data collection using robotic sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 5, pp. 899-911, 2012.
- [10] F. Tashtarian, M. H. Y. Moghaddam, K. Sohraby, and S. Effati, "On maximizing the lifetime of wireless sensor networks in event-driven applications with mobile sinks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 7, pp. 3177-3189, 2014.
- [11] S. Basagni, C. Petrioli, R. Petrocchia, and D. Spaccini, "CARP: A channel-aware routing protocol for underwater acoustic wireless networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 34, pp. 92-104, 2015.
- [12] M. Dong, K. Ota, A. Liu, and M. Guo, "Joint optimization of lifetime and transport delay under reliability constraint wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 225-236, 2015.
- [13] A. Mehrabi, and K. Kim, "Maximizing data collection throughput on a path in energy harvesting sensor networks using a mobile sink," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 3, pp. 690-704, 2015.
- [14] C. Petrioli, R. Petrocchia, J. R. Potter, and D. Spaccini, "The SUNSET framework for simulation, emulation and at-sea testing of underwater wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 34, pp. 224-238, 2015.
- [15] Z. Fei, B. Li, S. Yang, C. Xing, H. Chen, and L. Hanzo, "A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 550-586, 2016.
- [16] C. Abreu, F. Miranda, and P. Mendes, "Smart context-aware QoS-based admission control for biomedical wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 88, pp. 134-145, 2017.
- [17] P. Gjanci, C. Petrioli, S. Basagni, C. A. Phillips, L. Bölöni, and D. Turgut, "Path finding for maximum value of information in multimodal underwater wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 2, pp. 404-418, 2017.
- [18] N. Javaid, S. Hussain, A. Ahmad, M. Imran, A. Khan, and M. Guizani, "Region based cooperative routing in underwater wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 92, pp. 31-41, 2017.
- [19] N. Sabor, S. Sasaki, M. Abo-Zahhad, and S. M. Ahmed, "A comprehensive survey on hierarchical-based routing protocols for mobile wireless sensor networks: review, taxonomy, and future directions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, 2017.
- [20] R. Logambigai, S. Ganapathy, and A. Kannan, "Energy-efficient grid-based routing algorithm using intelligent fuzzy rules for wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 68, pp. 62-75, 2018.
- [21] C. Lv, Q. Wang, W. Yan, and J. Li, "A sparsity feedback-based data gathering algorithm for Wireless Sensor Networks," *Computer Networks*, vol. 141, pp. 145-156, 2018.
- [22] I. L. Vasconcelos, I. C. Martins, C. M. Figueiredo, and A. L. Aquino, "A data sample algorithm applied to wireless sensor network with disruptive connections," *Computer Networks*, vol. 146, pp. 1-11, 2018.
- [23] Zhang, J., "Dynamic routing for data integrity and delay differentiated services in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, pp. 328-343, 2014.
- [24] A. Alsaafin, A. M. Khedr and Z. Aghbari, "Distributed trajectory design for data gathering using mobile sink in wireless sensor networks," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 96, pp. 1-12, 2018.

زیر نویس ها

⁸ QoI: Quality of Information

⁹ Multi path

¹⁰ Free Space

¹¹ Static

¹² MAC

مقدار داده جمع آوری شده در شبکه‌های حسگر بی سیم می شود. در این مقاله، مساله تعیین مسیر بهینه و یافتن مکان های بهینه اقامت چاهک های متحرک با توجه به مهلت زمانی و مصرف انرژی، به عنوان یک مدل خطی عدد صحیح مختلط در شبکه های حسگر زیر آب مطرح شده است که نرخ ارتباطات داده ها، فاصله ها و محدودیت های سطح آب را در نظر گرفته و مقدار بهینه را بدست می آورد. اما حل این مدل چون به صورت متمرکز است در زمان چند جمله ای انجام نمی شود. لذا برای رفع این مشکل و برای مسیریابی چاهک و جمع آوری حداکثری داده ها چندین الگوریتم اکتشافی حریصانه پیشنهاد داده شده است.

اثر بخشی مدل بهینه سازی پیشنهادی و الگوریتم های اکتشافی حریصانه پیشنهادی با چندین بار اجرای شبیه سازی بر حسب زمان و تعداد گره های حسگر منبع بررسی شده و طبق آزمایش و شبیه سازی نشان داده که با افزایش تعداد گره های حسگر منبع در شبکه، الگوریتم پیشنهادی نیز مانند مدل بهینه سازی، مسیرهای بهینه را تقلید کرده و مقدار داده جمع آوری شده فقط ۲۰ درصد کمتر از مدل بهینه سازی است. همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با روش های جستجوی دیگر نظیر انتخاب تصادفی یا RS و فروشنده دوره گرد یا TSP و LM مقایسه کرده که نتایج نشان داده که روش پیشنهادی، ۷۷ درصد بیشتر از روش TSP، داده جمع آوری کرده و ۷۰ درصد انرژی کمتری مصرف می کند که دلیل آن کنترل و حرکت آگاهانه چاهک است. کاردراينده این مقاله شامل در نظر گرفتن تابع هدف چند گانه و مدل سازی و شبیه سازی در شرایط واقعی تر است.

مراجع

- [1] E. Kharati, M. Khalily, H. Karmajani, "Increasing the Value of Collected Data and Reducing Energy Consumption by Using Network Coding and Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," *AUT Journal of Modeling and Simulation*, doi: 10.22060/miscj.2019.15417.5133, 2019.
- [2] E. Kharati, M. Khalily, H. Karmajani, "Optimized sink control to increase the lifetime of underwater wireless sensor networks," *Computer and Knowledge Engineering*, <https://doi.org/10.76366/cke.v1i2.60404>, 2019.
- [۳] سیدهدادی اقدسی و مقصود عباس پور، «الگوریتم توزیع شده جهت فراهم آوردن پوشش چندجانبه از هدف در شبکه های حسگر بصری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۲، شماره ۲، صفحه ۶۳-۵۳، ۱۳۹۲.
- [۴] محمود پرند و سیدهدادی اقدسی علمداری، «ارائه پروتکل ارسال داده انرژی-کارا مبتنی بر موقعیت برای شبکه های حسگر بصری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۳۸-۲۹، ۱۳۹۶.
- [5] F. Hanson, and S. Radic, "High bandwidth underwater optical communication," *Applied optics*, vol. 47, no. 2, pp. 277-283, 2008.
- [6] D. Anguita, D. Brizzolara, and G. Parodi, "Prospects and problems of optical diffuse wireless communication for underwater wireless sensor networks (UWSNs)," *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*, pp. 275-300, 2010.

¹ Sink

² MILP: Mixed Integer Linear Programming

⁴ RS: Random Selection

⁴ LM: Lown Mower

⁵ TSP: Travelling Salesman Problem

⁶ Matlab

⁷ MULE