*مقاله پژوهشی*

# یک روش نیمه‌متمرکز برای بهبود ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم واقعی با استفاده از خوشه‌بندی و چاهک‌های متحرک

فاطمه صادقی، سپیده آدابی و سحر آدابی

**چکیده: استفاده از یک راهکار مسیریابی سلسله‌مراتبی مبتنی بر تکنیک‌های خوشه‌بندی و چاهک متحرک می‌تواند انرژی مصرفی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به طرز قابل توجهی کاهش دهد. دو مسأله مهم در طراحی این راهکار سلسله‌مراتبی، انتخاب حسگر شایسته‌تر به عنوان سرخوشه و نیز تخصیص بهینه چاهک‌های متحرک به مناطق بحرانی (یعنی مناطقی که ریسک ایجاد حفره انرژی در آنها بالا است) می‌باشد. از آنجایی که چاهک‌های متحرک هزینه بالایی را به شبکه تحمیل می‌کنند، تعداد محدودی از آنها به کار گرفته می‌شوند. لذا تخصیص این تعداد محدود چاهک به شمار بالای درخواست‌های واصل‌شده از نقاط بحرانی در دسته مسایل NP-hard است. بیشتر راهکارهای موجود با تطبیق یک روش تکاملی و اجرای آن توسط حسگرها سعی در حل این مسأله داشته‌اند. این در حالی است که تکنولوژی به کار گرفته شده در طراحی حسگرهای امروزی و نیز منابع محاسباتی بسیار محدود آنها، اجرایی‌شدن این روش‌ها در شبکه‌های واقعی را دچار چالش می‌کند. به بیان دیگر، اجرای چنین ایده‌هایی از حد تئوری فراتر نمی‌رود. در نتیجه برای رسیدن به توازنی مناسب میان افزایش دقت و کاهش بار محاسباتی در مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی چاهک متحرک یک روش نیمه‌متمرکز بر اساس الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می‌کنیم. در این روش، محاسبات سبک‌وزن از سنگین‌وزن جدا شده و اجرای دسته اول محاسبات بر عهده حسگرها و دسته دوم بر عهده ایستگاه پایه گذاشته می‌شود. اقدامات روبه‌رو در طراحی راهکار پیشنهادی انجام شده است: ۱) انتخاب سرخوشه بر اساس پارامترهای تأثیرگذار محیطی و نیز تعریف تابع هزینه عضویت حسگر در خوشه، ۲) مدل‌سازی ریاضی شانس یک ناحیه برای دریافت چاهک متحرک و ۳) طراحی یک تابع برازش برای ارزیابی شایستگی هر تخصیص از چاهک‌های متحرک به مناطق بحرانی در الگوریتم ژنتیک. در اقدامات اخیراً ذکرشده مینیمم‌سازی تعداد و نیز طول پیام‌ها مورد توجه قرار گرفته است. به طور خلاصه، مزیت مهم روش پیشنهادی امکان اجرایی‌شدن آن در شبکه‌های حسگر واقعی (به دلیل جداسازی محاسبات سبک‌وزن از محاسبات سنگین‌وزن) در کنار ایجاد موازنه‌ای مناسب میان اهداف تعریف‌شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود در عملکرد روش پیشنهادی است.**

***کلیدواژه:* شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مدیریت انرژی، خوشه‌بندی، چاهک متحرک، الگوریتم ژنتیک.**

این مقاله در تاریخ ۴ آبان ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۴ فروردین ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

فاطمه صادقی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: f.sadeq@outlook.com).

سپیده آدابی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: sepideh_adabi@iau-tnb.ac.ir).

سحر آدابی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: adabi.sa@gmail.com).

## ۱- مقدمه

شبکه حسگر بی‌سیم (WSN)[1] متشکل از تعداد زیادی از حسگرهای همگن و یا غیر همگن است که وظیفه مانیتورکردن، جمع‌آوری داده‌ها از محیط، پردازش و ارسال آنها به یک ایستگاه مرکزی برای تحلیل بیشتر را بر عهده دارند. امروزه این شبکه‌ها در حوزه‌های بسیار متنوعی به کار گرفته می‌شوند. مراقبت از بیماران و سالمندان، نظارت بر ایمنی سازه‌های عمرانی نظیر پل‌ها، تونل‌ها و سدها، تشخیص نشت مواد شیمیایی و سمی و شناسایی نقاط آتش‌سوزی در جنگل‌ها، نمونه‌هایی از کاربرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم است [۱]. در عین حال، طراحی و پیاده‌سازی چنین شبکه‌هایی با چالش‌های متنوعی روبه‌رو است. از جمله مهم‌ترین چالش‌ها، مدیریت مصرف انرژی حسگرها است. باتری محور بودن حسگرها و نیز عدم امکان شارژ مجدد و یا تعویض باتری (در بسیاری از کاربردها) همواره پژوهشگران را بر آن داشته که به تحقیق بیشتر به منظور یافتن راهکارهای بهبودیافته در مدیریت مصرف انرژی حسگرها ادامه دهند، به طوری که خروجی فعالیت آنها توازن مناسبی میان کارایی و طول عمر شبکه تأمین نماید.

بنا بر تحقیقات پیشین، خوشه‌بندی شبکه و استفاده از چاهک متحرک (به عنوان حسگر میانی در ارسال داده‌های حسگرها به ایستگاه پایه) دو راهکار متداول و مؤثر در مدیریت مصرف انرژی حسگرها است [۲] تا [۵]. بسیاری از روش‌های پیشنهادی به منظور افزایش دقت در حل مسأله مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی چاهک متحرک از متدهایی با بار محاسباتی بالا مانند الگوریتم‌های تکاملی، سیستم‌های فازی و شبکه عصبی استفاده کرده‌اند. این در حالی است که پیاده‌سازی این متدها در شبکه‌های حسگر مستقر در محیط‌های واقعی امکان‌پذیر نیست. دلیل این مسأله تکنولوژی به کار گرفته شده در طراحی حسگرهای امروزی و نیز منابع محاسباتی بسیار محدود آنها است. لذا در این مقاله به دنبال رسیدن به توازنی مناسب میان دقت و بار محاسباتی در روش مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی چاهک متحرک هستیم تا بتوان آن روش را در شبکه‌های حسگر واقعی به سادگی پیاده‌سازی کرد. برای این منظور، می‌بایست بر روی طراحی یک روش نیمه‌متمرکز معطوف شویم که در آن محاسبات سنگین‌وزن‌تر به ایستگاه پایه (که دارای محدودیت منابع محاسباتی نیست) منتقل شده و در عین حال نیازمند تبادل حجم بالایی از پیام‌ها بین حسگرها و ایستگاه پایه نباشد. در نتیجه، ابتدا دقت انتخاب سرخوشه را با لحاظ معیارهایی مناسب بالا می‌بریم و سپس با کاهش تعداد و طول پیام‌ها، ایستگاه پایه را از وضعیت مناطق بحرانی مطلع کرده و در پایان با

1. Wireless Sensor Network

تطبیق یک روش تکاملی با نام الگوریتم ژنتیک و بر اساس داده‌های به دست آمده از محیط، یک تخصیص نزدیک به بهینه از تعداد محدود چاهک به تعداد بالای مناطق بحرانی (تخلیه انرژی شده) را اجرایی می‌کنیم. به دلیل آن که ذات این مسأله NP-hard است، خانواده الگوریتم‌های تکاملی راه حل مناسبی را در اختیار قرار می‌دهند.

ساختار مقاله به صورت روبه‌رو است: در بخش ۲ به بررسی کارهای مرتبط پیشین می‌پردازیم و در بخش ۳ مدل سیستم و مفروضات شبکه شرح داده می‌شوند. در بخش ۴ جزئیات الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر دو تکنیک خوشه‌بندی و استفاده از چاهک متحرک به منظور مدیریت مصرف انرژی بیان شده و سپس در بخش ۵ ارزیابی روش پیشنهادی در بستر شبیه‌سازی و بحث در خصوص نتایج حاصل ارائه می‌گردد. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی در بخش ۶ بیان می‌شوند.

## ۲- کارهای پیشین

در این بخش، برخی کارهای پیشین در زمینه خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بررسی می‌شوند.

در [۲] پروتکل جدید فازی و چندپرشی به نام FMSFLA با استفاده از الگوریتم SFLA پیشنهاد شده که این پروتکل شامل دو فاز انتخاب سرخوشه و انتخاب والد می‌باشد. در هر دو فاز، به منظور توازن میان انرژی و تأخیر، قواعد فازی با استفاده از SFLA بهینه شده است. پارامترهای مورد استفاده به ترتیب روبه‌رو است: ۱) انرژی، ۲) فاصله از ایستگاه پایه، ۳) تعداد همسایگان، ۴) فاصله واقعی از ایستگاه پایه، ۵) متوسط بار مسیر، ۶) هم‌پوشانی و ۷) مشکل hot spotها. محدودیت‌های FMSFLA به قرار: ۱) پیچیدگی زمانی بالا و ۲) مصرف انرژی بالا برای اجرای ایده پیشنهادی در حسگرهای واقعی است. بنابراین به دلیل محدودیت قدرت پردازش، حافظه و انرژی حسگرها، FMSFLA نمی‌تواند توسط تمام حسگرها اجرا شود.

سینگ مهرا و همکاران [۳] الگوریتم فازی‌محور FBECS را برای انتخاب سرخوشه پیشنهاد کرده‌اند. ایده آنها بر اساس شاخصه‌های فازی همچون تراکم حسگرها، فاصله از ایستگاه پایه و باقیمانده انرژی حسگرها شکل گرفته است. اگرچه نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب روش پیشنهادی از نظر معیارهای میزان پایداری، انرژی شبکه و توان عملیاتی را نشان می‌دهد، اما امکان اجرای آن بر روی حسگرهای واقعی به دلیل محدودیت در قدرت پردازش، حافظه و انرژی وجود ندارد. از این گذشته، میزان انرژی مصرف‌شده برای اجرای روش فازی در گزارش نتایج خروجی در نظر گرفته نشده است. لذا محاسبات و نتایج گزارش‌شده در [۳] قابل اعتماد نیستند.

آدابی و همکاران [۴] پروتکل جدید سلسله‌مراتبی مسیریابی مبتنی بر استفاده از چاهک متحرک و تکنیک‌های خوشه‌بندی شبکه را ارائه کرده‌اند. نوآوری‌های این روش به صورت: ۱) استفاده از روش فازی‌محور جدید برای انتخاب سرخوشه و ۲) استفاده از روش پیش‌بینی خطی برای پیش‌بینی مکان بعدی چاهک متحرک با هدف کاهش سربار پیام‌های کنترلی است. شاخصه‌های فازی انتخاب‌شده در [۴]، دقت الگوریتم انتخاب سرخوشه را افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد مطلوبی را از نظر معیارهای انرژی باقیمانده و شاخص‌های تأخیر نشان می‌دهد. با این حال، ساختار فازی طراحی‌شده توسط نویسندگان [۴] ثابت است که این امر عدم عملکرد مناسب روش پیشنهادی در پیکربندی‌ها و انواع متفاوت شبکه را به همراه خواهد داشت.

گوش و همکاران [۵] بر اساس چاهک متحرک و تکنیک‌های خوشه‌بندی، پروتکل مسیریابی سلسله‌مراتبی جدیدی را ارائه کرده‌اند. برای این منظور، یک روش جدید انتخاب سرخوشه بر اساس متد فازی و با هدف متعادل‌سازی مصرف انرژی پیشنهاد شده است. سپس یک روش مبتنی بر PSO[1] برای بهینه‌کردن توابع عضویت فازی تطبیق داده شده است. علاوه بر این، یک روش بهینه کلونی مورچه برای کنترل حرکت چاهک‌های متحرک پیشنهاد شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این روش عملکرد مناسبی از نظر معیارهای کارایی عمر شبکه و نرخ تحویل بسته داشته است. مهم‌ترین محدودیت‌های روش فوق عبارتند از: ۱) شبکه‌های reactive را پشتیبانی نمی‌کند، ۲) برخی مفروضات غیر واقعی در مورد چاهک‌های متحرک در آن فرض گرفته شده است، ۳) پوشش شبکه به صورت کامل ارضا نمی‌شود و ۴) به دلیل محدودیت قدرت پردازش، حافظه و انرژی حسگرها، قابل اجرا در تمامی حسگرهای واقعی و چاهک‌های متحرک نیست.

یک روش خوشه‌بندی توزیع‌شده تقاضامحور در [۶] پیشنهاد شده است. دو نوآوری [۶] به قرار: ۱) طراحی تکنیک‌های خوشه‌بندی با تنظیم شعاع خوشه به صورت پویا با استفاده از روش ADMM[2] و ۲) طراحی الگوریتم خوشه‌بندی OPTIC[3] برای انتخاب سرخوشه است. الگوریتم خوشه‌بندی مجدد بر اساس تشخیص رخداد صورت می‌گیرد. برخی فاکتورهای واقعی مانند مدل باتری حسگرها در این روش مورد توجه بوده است، اما اجرای این روش در محیط واقعی WSN پیچیده و دشوار است.

استفان و همکاران [۷] یک روش خوشه نابرابر آگاه از انرژی با نام ESUCR را پیشنهاد کرده‌اند. در خوشه‌بندی برابر، تعداد نودها به ازای هر خوشه یکسان است و بنابراین اندازه خوشه‌ها هم مساوی است. اما در خوشه‌بندی نابرابر اندازه خوشه متناسب با فاصله تا ایستگاه پایه، متغیر است. برخلاف خوشه‌بندی برابر، خوشه‌بندی نابرابر مشکل hot spot را مرتفع می‌سازد. هدف این روش، افزایش بهره‌وری ارتباطات و کاهش مصرف انرژی است و گام‌های روبه‌رو را شامل می‌شود: ۱) انتخاب کانال بهینه با استفاده از تکنیک جدید رتبه‌بندی که میزان انرژی، فاصله کانال و پارامترهای همسایه را در نظر می‌گیرد، ۲) تطبیق تکنیک انرژی کارای spectrum sensing برای بهبود دقت، ۳) انتخاب سرخوشه با استفاده از تکنیک هوشمند و ۴) انتخاب درگاه مناسب برای ارسال داده به ایستگاه پایه. علی‌رغم محاسن روش [۷]، عملکرد مطلوب آن را در سناریوهای مختلف شبکه نمی‌توان تضمین کرد.

در [۸] برای مرتفع‌کردن مشکل امنیت داده و توازن انرژی، از یک روش انرژی‌آگاه با نام CHA برای شناسایی نقاط تجمیع داده استفاده شده است. نود لنگر نوعی حسگر است که وظیفه ارسال داده سایر حسگرها به چاهک متحرک را بر عهده دارد و بر اساس انرژی باقیمانده و فاصله انتخاب می‌شود. در این روش، داده‌ها از طریق رمزنگاری منحنی بیضوی ارسال می‌شوند. روش پیشنهادی در [۸] نقص‌هایی دارد از جمله این که برخی مفروضات غیر واقعی در مورد چاهک متحرک در طراحی آن لحاظ شده است. همچنین توازن میان هزینه و انرژی مصرفی به واسطه استفاده از چاهک‌ها به عنوان رابط بین نودها برای ارسال داده را نادیده گرفته است.

در [۹] یک الگوریتم مسیریابی درون و برون‌خوشه‌ای مبتنی بر چاهک متحرک ارائه شده است. هدف نویسندگان توازن مصرف انرژی میان

1. Particle Swarm Optimization
2. Alternating Direction Method of Multiplier
3. On_Demand Optimal Clustering

سرخوشه‌ها و نیز توازن مصرف انرژی اعضای خوشه است. نوآوری مهم این روش آن است که در بهینه‌کردن محل استقرار، محدودیت زمانی را برای ارتقای عملکرد شبکه در نظر گرفته است. اگرچه این روش، عملکرد بهتری از نظر معیارهای عمر شبکه، تعداد نودهای زنده و زمان پوشش دارد، اما همچنان استفاده از چاهک‌های متحرک به عنوان نودهای رابط برای ارسال داده به ایستگاه پایه برای ایجاد موازنه‌ای میان هزینه و انرژی مصرفی را نادیده گرفته است.

وانگ و همکاران [۱۰] دو الگوریتم به نام‌های EMCA[1] و MECA[2] برای بهینه‌کردن الگوریتم خوشه‌بندی و استراتژی استقرار نودهای چاهک، پیشنهاد کرده‌اند که در آن، تابع هزینه به منظور یافتن تعداد بهینه چاهک متحرک در مقیاس‌های مختلف WSN در نظر گرفته شده است. از جمله اشکالات این روش، سربار زیاد و عمر کوتاه شبکه است.

در [۱۱] راهکار جدیدی به نام MASP[3] برای جمع‌آوری داده ارائه شده است. MASP به صورت مسأله بهینه‌سازی خطی عدد صحیح ارائه شده که با الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. ایده اصلی آن است که با استفاده از الگوهای حرکتی از پیش تعیین شده، مشکلات مربوط به حرکت تصادفی چاهک‌های متحرک حل شود. برای این کار، محدوده به دو بخش تقسیم می‌شود: محیط ارتباط مستقیم برای حسگرهایی با فاصله یک پرش تا چاهک متحرک و محیط ارتباط چندپرشی برای حسگرهای دور از چاهک متحرک. نتایج شبیه‌سازی حاکی از موفقیت این روش در افزایش میزان داده‌های دریافتی توسط چاهک متحرک و توازن مصرف انرژی است. اما این روش، نیازمند تعداد زیادی ارتباطات چندپرشی بوده و عمر شبکه را در برخی از انواع شبکه، کاهش می‌دهد.

خداشاهی و همکاران [۱۲] پروتکل مسیریابی سلسله‌مراتبی را مبتنی بر چاهک متحرک و تکنیک‌های خوشه‌بندی ارائه داده‌اند. هدف اصلی روش پیشنهادی آنها طراحی الگوریتم توزیع‌شده برای تعیین مکان جدید ایستگاه پایه متحرک بر اساس بهینه‌ترین مصرف انرژی برای ارسال داده‌های سرخوشه‌ها است. نتایج شبیه‌سازی، کارآمدی این روش را نشان می‌دهد اما این روش به دلیل آن که فقط از یک ایستگاه پایه متحرک استفاده می‌کند و نمی‌تواند شبکه‌های بزرگ را پوشش دهد، مقیاس‌پذیر نیست و سربار پیام در آن زیاد است.

مارتا و کاردی [۱۳] جهت حل مشکل hotspot، روشی برای حرکت چاهک‌ها در محدوده‌ای شش‌ضلعی پیشنهاد داده‌اند. این روش موفق شده که به نحو کارامدی، توازن انرژی شبکه میان حسگرها را برقرار کند و عمر فعالیت شبکه را افزایش دهد. با این حال، روش [۱۳] بر پایه مفروضاتی غیر واقعی استوار است. به عنوان مثال، چنین فرض شده که چاهک‌های متحرک در فضایی آزاد حرکت می‌کنند و بنابراین کارامدبودن روش آنها در محیط‌هایی که موانع دارد، قابل تردید است.

در [۱۴] نسخه تغییریافته LEACH پیشنهاد شده که دارای دو فاز راه‌اندازی و حالت ثبات می‌باشد. در فاز راه‌اندازی، پارامترهای روبه‌رو در نظر گرفته شده است: ۱) انرژی باقیمانده، ۲) مدت زمان سرخوشه بودن، ۳) فاصله میان سرخوشه و ایستگاه پایه، ۴) تعداد همسایگان و ۵) متوسط انرژی حسگرها در هر دور. این روش برخلاف LEACH، در مرحله ثبات یک TDMA اصلاح‌شده را ارائه کرده است. از نظر پیشنهاددهندگان این روش، مدت زمان فاز ثبات برای هر خوشه برابر نیست. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که [۱۴] از نظر طول عمر شبکه، گذردهی و تعداد سرخوشه‌ها بهتر از LEACH، VLEACH و ALEACH عمل می‌کند. مشکل اصلی این روش آن است که اگر هر کدام از سرخوشه‌ها غیر فعال شوند، آن خوشه نیز از کار خواهد افتاد.

وانگ و همکاران [۱۵] با هدف کاهش هزینه بازسازی مسیر حسگرها و حفظ مسیرهای بهینه به سمت آخرین مکان چاهک‌های متحرک، یک روش جدید را پیشنهاد کرده‌اند. در این روش، حسگرها همگن و ثابت بوده و می‌توانند قدرت انتقال خود را با توجه به فاصله دریافت‌کننده تنظیم نمایند. چاهک‌های متحرک نیز انرژی کافی داشته و محدودیتی از این لحاظ ندارند. در روش پیشنهادی [۱۵] شبکه به چندین خوشه مساوی تقسیم شده و سرخوشه‌های در هر خوشه انتخاب می‌گردد و سپس پیام سرخوشه به اعضا ارسال می‌شود. اگر فاصله میان حسگر و سرخوشه کمتر از شعاع ارتباط باشد، حسگر مستقیماً با سرخوشه ارتباط برقرار می‌کند. اما اگر بیش از شعاع ارتباطی باشد، آن گاه حسگر واسطه‌ای را یافته و از طریق آن با چند گام با سرخوشه ارتباط می‌گیرد. بدین ترتیب، حسگرهایی که در فاصله دورتر قرار دارند، نیازی به ارتباط مستقیم نداشته و انرژی کمتری مصرف می‌کنند که در نهایت در افزایش و بهبود طول عمر شبکه مؤثر است. نتایج شبیه‌سازی این روش نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی موجب افزایش طول عمر شبکه می‌شود. در [۱۵] اندازه خوشه‌ها ثابت است، لذا تخلیه انرژی در خوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه بسیار محتمل است که به این پدیده حفره انرژی می‌گویند. همچنین در انتخاب سرخوشه تنها معیار انرژی باقیمانده لحاظ می‌شود، لذا تأثیر سایر پارامترهای مؤثر (مانند تعداد دفعات سرخوشه شدن و فاصله تا نقاط دسترسی) مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در پایان، بیان می‌کنیم که الگوی حرکتی چاهک‌های متحرک رخدادگرا نبوده و این امر انعطاف‌پذیری روش را در شرایط مختلف شبکه دچار چالش می‌کند.

در [۱۶] یک سیستم فازی با نام LEACH-SF و با سه ورودی: انرژی باقیمانده حسگر، فاصله حسگر از سینک و فاصله حسگر از مرکز خوشه برای تعیین سرخوشه طراحی شده است. هر حسگر به این سیستم مجهز بوده و در مواقع نیاز برای تعیین سرخوشه، سیستم فازی را اجرا می‌کند. اگرچه از منظر آکادمیک اجرای چنین سیستمی روی حسگرها امکان‌پذیر است، اما با توجه به محدودیت‌های منابع و ویژگی‌های حسگرهای امروزی اجرای این سیستم در واقعیت عملیاتی نیست. از این گذشته، محاسبات مرتبط با انرژی مصرفی در [۱۶] دارای خطا است و این امر به آن دلیل است که روش پیشنهادی در [۱۶] انرژی لازم برای اجرای سیستم فازی بر روی حسگرها را محاسبه نمی‌نماید.

می‌توان نتیجه گرفت که طراحی الگوریتم مسیریابی سلسله‌مراتبی با توجه به مزیت‌های تکنیک‌های خوشه‌بندی و نیز چاهک‌های متحرکی که در آن خصوصیات فنی حسگرهای واقعی در آن در نظر گرفته شده باشد، مورد نیاز است. در چنین الگوریتمی، سربار ارتباطات هم باید کم باشد.

## ۳- مدل سیستم

در ادامه، مفروضات شبکه و نمادهای تعریف‌شده در این پژوهش به ترتیب در بخش‌های ۳-۱ و ۳-۲ شرح داده می‌شوند.

### ۳-۱ مفروضات

در پژوهش حاضر، حسگرهای حساس به انرژی در یک محیط با ابعاد $L\times Lm^2$ به صورت تصادفی توزیع می‌شوند. فرض می‌کنیم که تمامی حسگرها همگن بوده و پس از جایابی اولیه در مکان خود ثابت می‌مانند.

1. Energy_Efficient Multi-Sink Clustering Algorithm
2. Mobile-Sink Based Energy_Efficient Clustering Algorithm
3. Maximum Amount Shortest Path

جدول ۱: نمادهای به کار گرفته شده در راهکار پیشنهادی و توضیحات آنها.

| نام نماد | توضیح |
|---|---|
| $c_j$ | سرخوشه $j$ |
| $chance_a$ | شانس هر ناحیه $a$ برای دریافت چاهک متحرک |
| $CH_Neighbor_{cj}$ | مجموعه سرخوشه‌هایی است که در محدوده ارتباط سرخوشه $c_j$ قرار دارند |
| $Ch_winner_l$ | شناسه حسگر $l$ که در رقابت سرخوشگی برنده شده است |
| $CLR_i$ | شعاع خوشه حسگر $i$ |
| $Cost(CH_winner_l, s_i)$ | هزینه عضویت حسگر $i$ در خوشه‌ای که توسط $CH_winner_l$ ساخته خواهد شد |
| $CR_i$ | شعاع ارتباط حسگر $i$ |
| $CroL$ | طول کروموزوم |
| $CRSet_i$ | مجموعه‌ای از حسگرها که در محدوده شعاع ارتباط $CR_i$ قرار دارند |
| $Dis_i^{BS}$ | فاصله حسگر $i$ تا ایستگاه پایه |
| $Dis_i^{MS}$ | فاصله حسگر $i$ تا چاهک متحرک |
| $Dis_i^{Neighbor}$ | فاصله حسگر $i$ تا همسایگانش |
| $Dis_i^{BS,MS,Neighbor}$ | فاصله حسگر $i$ تا ایستگاه پایه، چاهک‌های متحرک و نودهای همسایه |
| $F_{CH_winner_l}$ | عدد شایستگی $CH_winner_l$ برای انجام وظایف سرخوشگی |
| $NCH_i$ | تعداد دفعات انتخاب حسگر $i$ به عنوان سرخوشه |
| $NCHP_i$ | تعداد کل دفعات شرکت حسگر $i$ در فرایند انتخاب سرخوشه |
| $Neighbor_i$ | تعداد همسایگان حسگر $i$ |
| $NMS$ | تعداد چاهک‌های متحرک |
| $RE_i$ | انرژی باقیمانده حسگر $i$ |
| $RE_{i,n}$ | میانگین انرژی باقیمانده حسگر $i$ و همسایگانش |
| $\overline{REA_a}$ | میانگین انرژی باقیمانده ناحیه $a$ |
| $\overline{REC_j}$ | میانگین انرژی باقیمانده خوشه $j$ |
| $S_i$ | حسگر $i$ |
| $\overline{Unstability_a}$ | میانگین ناپایداری ناحیه $a$ |

این حسگرها دارای حافظه برای ذخیره اطلاعاتی مانند مکان حسگرهای ثابت مستقرشده در شبکه، انرژی اولیه و مانند آن هستند. وظیفه جمع‌آوری داده‌ها در بازه‌های زمانی مشخص از پیش تعریف شده بر عهده حسگر است. در این محیط، یک ایستگاه پایه (BS)[1] که در مرکز شبکه قرار گرفته است مسئولیت تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرها را بر عهده دارد. حسگر $i$ بر اساس شعاع حس $SR_i$ (که متناظر با پیکربندی سخت‌افزاری حسگر تعیین می‌شود) قادر به مانیتورکردن محیط پیرامون خود است. از این گذشته، ارسال/ دریافت داده‌ها و پیام‌ها به/ از نودهایی که در شعاع $CR_i$ از حسگر $i$ قرار دارند (به طوری که $SR_i \ll CR_i$) انجام می‌شود. همچنین بدون آن که از کلیت مسأله کم شود، فرض می‌کنیم هر حسگر دارای یک شناسه (ID) است و به GPS مجهز است، لذا نسبت به موقعیت جغرافیایی خود که به صورت $(x, y)$ نشان داده می‌شود آگاهی دارد. متریک فاصله در شبکه مورد بررسی، فاصله اقلیدسی است. هر حسگر توانایی محاسبه فاصله اقلیدسی بین خود و هر مقصد ارسال داده را بر اساس اندازه‌گیری قدرت سیگنال دریافتی (RSSI) دارد.

محیط شبکه بر اساس (۱) به تعداد $K$ ناحیه (یا همان grid) تقسیم می‌شود

$$k = \begin{cases} ۲^۲ & , \ N \le ۱۰۰ \\ ۳^۲ & , \ ۱۰۰ < N \le ۲۰۰ \\ ۴^۲ & , \ ۲۰۰ < N \le ۳۰۰ \end{cases} \quad (۱)$$

به طوری که $N$ تعداد حسگرهای توزیع‌شده در محیط شبکه است. با این اقدام، مدیریت شبکه به صورت محلی با سهولت بیشتری امکان‌پذیر است. در ادامه، هر حسگر $i$ بر اساس (۲) به صورت محلی تعیین می‌کند که به کدام ناحیه تعلق دارد

$$grid_x = [\frac{x}{\frac{L}{\sqrt{k}}}] = [\frac{x\sqrt{k}}{L}]$$
$$grid_y = [\frac{y}{\frac{L}{\sqrt{k}}}] = [\frac{y\sqrt{k}}{L}] \quad (۲)$$

به طوری که $x$ و $y$ طول و عرض جغرافیایی حسگر، $K$ تعداد ناحیه‌ها و $L$ طول ضلع محیط شبکه هستند.

به منظور مدیریت کارایی انرژی، تعدادی چاهک متحرک در محیط به کار گرفته می‌شوند. این چاهک‌ها محدودیت منابع ندارند و می‌توانند به عنوان رله در ارسال داده از حسگرها به ایستگاه پایه نقش داشته باشند. از میان دو الگوی متداول حرکتی چاهک متحرک با نام‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده، روش کنترل‌شده را برای مدل حرکتی چاهک متحرک در نظر می‌گیریم. در مدل حرکتی کنترل‌نشده، چاهک به صورت تصادفی و بدون لحاظ‌کردن پارامترهای شبکه مانند انرژی باقیمانده و ترافیک محیطی حرکت می‌کند، حال آن که در مدل حرکتی کنترل‌شده شرایط شبکه برای حرکت در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، انتخاب مدل حرکتی کنترل‌نشده در این پژوهش منجر به اخذ تصمیمات دقیق‌تر و منعطف‌تر در اعزام چاهک متحرک خواهد شد.

از این گذشته، توپولوژی شبکه در این پژوهش سلسله‌مراتبی[2] است. در این توپولوژی، شبکه به تعدادی خوشه تقسیم شده و برای هر خوشه یک سرخوشه تعیین می‌گردد. سپس اعضای خوشه داده‌های حس‌شده را به سرخوشه متناظر خود ارسال می‌کنند. در ادامه، سرخوشه‌ها داده را تجمیع کرده و از طریق ارتباط یک‌پرشی[3] یا چندپرشی[4] به ایستگاه پایه، چاهک متحرک و یا سرخوشه نزدیک دیگری ارسال می‌کنند. این تصمیم بر اساس پارامترهایی نظیر فاصله و انرژی باقیمانده اخذ می‌شود. انتخاب توپولوژی سلسله‌مراتبی به هدف افزایش کارایی مدیریت مصرف انرژی و نیز طول عمر شبکه انجام پذیرفته است.

## ۳-۲ نمادگذاری

برای فهم بهتر خوانندگان، مجموعه نمادهای تعریف‌شده در این تحقیق و توضیحات مرتبط با هر یک در جدول ۱ خلاصه شده است.

1. Base Station
2. Hierarchical
3. Single-Hop
4. Multi-Hop

## ٤- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از یک روش خوشه‌بندی و اعزام چاهک‌های متحرک به خوشه‌هایی است که در ارسال داده به ایستگاه پایه با مشکل مواجه شده‌اند.

الگوریتم خوشه‌بندی از دو فاز تشکیل خوشه و مسیریابی برای ارسال داده و زمان‌بندی ارسال داده به خوشه تشکیل شده است. در این پژوهش، تمرکز اصلی نویسندگان بر روی فاز اول است. این فاز از سه قدم محاسبه محدوده خوشه، انتخاب سرخوشه و راه‌اندازی تشکیل شده است. در قدم اول، شعاع خوشه با توجه به فاصله تا ایستگاه پایه تعیین می‌شود. به عبارت دیگر برای جلوگیری از رخداد حفره انرژی در شبکه و نیز افزایش بار بر روی نودهای نزدیک ایستگاه پایه (که نتیجه آن تخلیه زودهنگام انرژی این نودها و شکست در شبکه است)، نودهای نزدیک ایستگاه پایه شعاع خوشه کوچک‌تری را به نسبت نودهای دورتر از ایستگاه پایه خواهند داشت. جزئیات مربوط به قدم اول در بخش ۴-۱ بیان شده است. در تشکیل خوشه (یعنی قدم دوم)، مسأله مهم محاسبه شایستگی هر حسگر برای انجام وظایف سرخوشگی است. برای این منظور، تابعی با نام $F_{s_i}$ برای محاسبه شایستگی نود $i$ برای انجام وظایف سرخوشگی طراحی می‌شود. جزئیات مربوط به این تابع در بخش ۴-۲ شرح داده شده است. هر حسگر بر اساس تابع برازش طراحی‌شده میزان شایستگی خود را محاسبه و آن را در محدوده خوشه منتشر می‌کند. اگر شایستگی حسگر از عدد دریافتی کمتر باشد از رقابت تعیین سرخوشه کنار می‌رود. نودی که بیشترین شایستگی را در این رقابت دارد مقدار متغیر $NCH_i$ (یعنی تعداد دفعات انتخاب حسگر $i$ به عنوان سرخوشه) را یک واحد افزایش داده و با انتشار پیام Member_req برای عضوگیری اعلام آمادگی می‌کند. این پیام حاوی شناسه حسگر و ارزش شایستگی آن است. لازم به ذکر است، هر حسگر $i$ پس از شرکت در فرایند ساخت خوشه، مستقل از این که به عنوان سرخوشه انتخاب بشود یا خیر، مقدار $NCHP_j$ را یک واحد افزایش می‌دهد. مقدار $NCHP_j$ نشان‌دهنده تعداد دفعاتی است که حسگر $i$ در فرایند انتخاب سرخوشه شرکت کرده است.

در این سناریو ممکن است یک حسگر در رقابت سرخوشگی شکست بخورد اما پیام Member_req را از بیش از یک حسگر دریافت کند. از آنجایی که یک حسگر تنها می‌تواند متعلق به یک خوشه باشد می‌بایست تصمیم بگیرد که پیام درخواست عضویت در خوشه با نام Join-req را برای کدام نودی که برای سرخوشگی اعلام آمادگی کرده است ارسال کند که برای این منظور تابعی با نام $Cost(CH_winner_l, s_i)$ طراحی می‌شود. این تابع، هزینه عضویت گره $i$ را در خوشه‌ای که توسط $CH_winner_l$ ساخته خواهد شد محاسبه می‌کند. $CH_winner_l$ نشان‌دهنده $l$امین حسگری است که آمادگی سرخوشه‌بودن را اعلام کرده و بدیهی است، حسگر $i$ به عضویت خوشه متناظر $CH_winner_l$ که هزینه کمتری داشته باشد، خواهد درآمد.

جزئیات مربوط به این تابع در بخش ۴-۳ شرح داده شده است. بعد از انتخاب سرخوشه و تشکیل خوشه، حسگرها داده‌های اطراف خود را جمع‌آوری می‌کنند و پس از اتمام یک دوره زمانی از پیش تعریف شده آنها را از طریق ارتباط تک‌گام یا چندگام برای سرخوشه متناظر خود ارسال می‌کنند. در ادامه، سرخوشه داده‌های دریافتی را تجمیع کرده، داده‌های تکراری را حذف می‌کند و برای ارسال داده به ایستگاه پایه آماده می‌شود. سه سناریو برای ارسال داده‌های تجمیع‌شده به ایستگاه پایه وجود دارد: الف) ارسال مستقیم به ایستگاه پایه (تک‌پرشی)، ب) ارسال از طریق سرخوشه‌های دیگر (چندپرشی) و ج) ارسال به کمک چاهک‌های متحرک مستقر در محیط. هر سرخوشه هزینه متناظر با سه سناریوی ذکرشده (در صورت وجود) را محاسبه و سناریویی با کمترین هزینه را برای ارسال داده به ایستگاه پایه انتخاب می‌کند. جزئیات مربوط به محاسبه هزینه‌های ذکرشده در بخش ۴-۴ شرح داده شده است.

در پایان هر دور، سرخوشه‌ها انرژی باقیمانده خود را بررسی می‌کنند. در صورتی که انرژی باقیمانده آنها کوچک‌تر مساوی ۵۰٪ انرژی اولیه باشد، پیام Quit را در شعاع محدوده خوشه خود منتشر می‌کنند. با این اقدام، تمام حسگرهایی که این پیام را دریافت می‌کنند در فرایند تعیین سرخوشه جدید شرکت می‌کنند.

به صورت منطقی، با گذشت زمان انرژی حسگرها کاهش یافته و دیگر قادر به ارسال داده‌ها در فواصل دور نخواهند بود. لذا برای آن که کارکرد شبکه در این شرایط همچنان حفظ شود از مزایای چاهک‌های متحرک در این پژوهش استفاده می‌شود. برای این منظور بر اساس یک بازه زمانی از قبل تعیین شده، سرخوشه با ارسال پیام Energy_evalutation انرژی باقیمانده اعضای خود را دریافت و میانگین انرژی باقیمانده خوشه (یعنی $\overline{REC_j}$) را بر اساس مقادیر دریافتی محاسبه می‌کند. اگر میانگین انرژی باقیمانده خوشه کوچک‌تر مساوی ۳۰٪ ماکسیمم انرژی خوشه باشد پیام Help_req را برای ایستگاه پایه ارسال می‌کند. این مقدار به گونه‌ای انتخاب شده که حسگر انرژی لازم برای ارسال پیام Help_req به ایستگاه پایه را داشته باشد.

یک پیام Help_req حاوی شناسه سرخوشه، شماره ناحیه سرخوشه، $\overline{REC_j}$ و $NCHP_j$ است. مقدار $NCHP_j$ در محاسبه میزان پایداری یک خوشه مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از آنجایی که استفاده از چاهک‌های متحرک هزینه راه‌اندازی و کارکرد شبکه را بالا می‌برد، عموماً تعداد محدودی از آنها به کار گرفته می‌شود. لذا شمار سناریوهایی که در آنها می‌بایست عمل تخصیص تعداد محدودی چاهک به تعداد فراوانی پیام از نوع Help_req انجام شود، بسیار بالا است. چنین مسأله‌ای یک مسأله NP-hard است که برای حل آن نیازمند روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک هستیم. جزئیات مرتبط با چگونگی نگاشت الگوریتم ژنتیک به مسأله ذکرشده در بخش ۴-۵ شرح داده شده است.

### ٤-١ محاسبه شعاع خوشه برای هر حسگر

شعاع خوشه برای حسگر $s_i$ بر اساس (۳) محاسبه می‌شود

$$CLR_i = (1 - c \times \frac{Dis_{\max} - Dis_i^{BS}}{Dis_{\max} - Dis_{\min}}) \times R_c^c \qquad (۳)$$

به طوری که $Dis_i^{BS}$، $R_c^c$، $Dis_{\max}$ و $Dis_{\min}$ به ترتیب نشان‌دهنده فاصله حسگر $i$ تا ایستگاه پایه، حداکثر شعاع رقابت، حداکثر و حداقل فاصله حسگرها تا ایستگاه پایه است. از (۳)، $R_c^c(1-c) < CLR_i < R_c^c$ مشخص است. با به کارگیری (۳)، اندازه خوشه‌ها بر اساس فاصله از ایستگاه پایه تنظیم می‌شوند و همچنین برای تضمین ارتباط بین سرخوشه‌ها لازم است رابطه $R_c^c \le CR_i/\sqrt{3}$ برقرار باشد.

این بدان معنا است که محدوده خوشه‌ها در نقطه وسط مثلث متساوی‌الاضلاع فرضی به یکدیگر می‌رسند و در نتیجه پوشش تا حد ممکن تضمین می‌شود. یادآوری می‌شود $CR_i$ برابر شعاع ارتباطی حسگر $i$ است.

### ٤-٢ تابع انتخاب سرخوشه

همان طور که پیشتر بیان شد، حسگرها باتری‌گرا هستند و همچنین حسگرهایی که امروزه به کار گرفته می‌شوند، محدودیت حافظه و پردازنده

دارند. لذا هر مکانیزم انتخاب سرخوشه می‌بایست از نظر محاسباتی سبک‌وزن باشد. برای این منظور، شایستگی هر حسگر برای انجام وظایف سرخوشگی بر اساس یک ترکیب خطی ساده اما دقیق محاسبه می‌شود (رابطه (۴))

$$F_{s_i} = \sigma Neighbor_i \times \frac{RE_i}{\overline{RE_{i,n}}} \times \frac{1}{\sigma Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}} \times \frac{1}{NCH_i} \quad (۴)$$

به طوری که $\sigma Neighbor_i$، $RE_i$، $\overline{RE_{i,n}}$، $NCH_i$ و $Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}$ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد همسایگان حسگر $i$، انرژی باقیمانده حسگر $i$، میانگین انرژی باقیمانده حسگر $i$ و همسایگانش، تعداد دفعات سرخوشگی و فاصله حسگر $i$ تا ایستگاه پایه، چاهک‌های متحرک و همسایگانش است. حسگر با بالاترین $F_{s_i}$ به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. در ادامه، چگونگی محاسبه هر یک از پارامترهای ذکرشده توضیح داده می‌شوند.

**تعداد همسایگان ($\sigma Neighbor_i$)**

مجموعه‌ای از حسگرهایی است که در محدوده شعاع خوشه $CLR_i$ قرار دارند به طوری که

$$Neighbor_i = \{S_j \,|\, dis(s_i, s_j) \le CR_i \Delta S_i \in \{S - S_i\}\} \quad (۵)$$

که $\sigma Neighbor_i$ نشان‌دهنده مقدار نرمال‌شده $Neighbor_i$ است که بر اساس $Neighbor_i/(N+1)$ محاسبه می‌شود به طوری که $N$ تعداد کل حسگرهای اولیه مستقرشده در محیط است.

حسگری که به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود باید در موقعیتی قرار داشته باشد که به تعداد کافی حسگر در همسایگی خود ببیند. بنابراین حسگری مانند $i$ که دارای بیشترین همسایه است می‌بایست شانس بیشتری برای سرخوشگی داشته باشد. این بدان معنا است که

$$F_{s_i} \propto Neighbor_i \quad (۶)$$

**نسبت انرژی باقیمانده حسگر به میانگین انرژی باقیمانده حسگر و همسایگانش ($RE_i/\overline{RE_{i,n}}$)**

از آنجایی که سرخوشه برای انجام وظایف سرخوشگی نیاز به مصرف مقدار انرژی بیشتری دارد، حسگری مانند $i$ که دارای انرژی باقیمانده بیشتری است می‌بایست شانس بیشتری برای سرخوشگی داشته باشد. این بدان معنا است که

$$F_{s_i} \propto \frac{RE_i}{\overline{RE_{i,n}}} \quad (۷)$$

تعریف (۴) بر اساس $RE_i/\overline{RE_{i,n}}$ به جای $RE_i$ باعث می‌شود که شانس سرخوشگی حسگری که ارزش پایین $RE_i$ دارد اما ارزش $Neighbor_i$ آن بالا است کاهش یابد.

**فاصله حسگر تا ایستگاه پایه، همسایگان و چاهک‌های متحرک ($Dis_i^{BS,MS,Neighbor}$)**

پارامتر فاصله بر اساس سه مفهوم فاصله حسگر تا ایستگاه پایه، فاصله حسگر تا چاهک‌های متحرک در دسترس و فاصله حسگر تا سایر حسگرهای همسایه محاسبه می‌شود. به یاد داشته باشید که حسگرها و ایستگاه پایه ثابت هستند و موقعیت مکانی همه آنها در حافظه هر حسگر قرار دارد. همچنین فاصله حسگر تا چاهک‌های متحرک در دسترس بر اساس RSSI محاسبه می‌شود. در نتیجه برای محاسبه فاصله از (۸) استفاده می‌شود

$$Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i} = \frac{Dis_i^{BS} + \overline{Dis_i^{MS}} + \overline{Dis_i^{Neighbor_i}}}{3} \quad (۸)$$

به طوری که $Dis_i^{BS}$، $\overline{Dis_i^{MS}}$ و $\overline{Dis_i^{Neighbor_i}}$ به ترتیب نشان‌دهنده فاصله تا ایستگاه پایه، میانگین فاصله تا چاهک‌های متحرک و میانگین فاصله تا حسگرهای همسایه است.

$\sigma Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}$ نشان‌دهنده مقدار نرمال‌شده $Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}$ است که بر اساس $Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}/Dis_{\max}$ محاسبه می‌شود. به طوری که $Dis_{\max}$ برابر با بیشترین فاصله ممکن میان یک حسگر و یک نقطه دسترسی است (یعنی برابر با قطر محیط عملیاتی شبکه). همچنین هرچه یک حسگر در فاصله دورتری قرار داشته باشد نیازمند صرف انرژی بیشتری برای انجام وظایف سرخوشگی است، لذا شایستگی کمتری خواهد داشت. این بدان معنا است که

$$F_{s_i} \propto \frac{1}{Dis_i^{BS,MS,Neighbor_i}} \quad (۹)$$

**تعداد دفعات سرخوشگی ($NCH_i$)**

تعداد دفعاتی است که یک حسگر به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. به منظور ایجاد تعادل در محول‌کردن وظایف سرخوشگی (با هدف جلوگیری از تخلیه زودهنگام انرژی برخی از حسگرها و متعاقباً ایجاد حفره در شبکه)، می‌بایست شانس حسگر برای سرخوشگی مجدد با افزایش تعداد دفعات سرخوشگی کاهش یابد و این بدان معنا است که

$$F_{s_i} \propto \frac{1}{NCH_i} \quad (۱۰)$$

در صورتی که حسگر پیشتر سرخوشه نشده باشد این مقدار برابر با ۱ و همچنین در صورتی که حسگر تنها یک بار سرخوشه شده باشد این مقدار برابر ۱/۵ تنظیم می‌شود.

## ۴-۳ محاسبه هزینه عضویت در یک خوشه

همان طور که پیشتر بیان شد، ممکن است پیام Member_req از بیش از یک حسگر دریافت شود. از آنجایی که حسگر تنها می‌تواند متعلق به یک خوشه باشد می‌بایست در خصوص عضویت در خوشه یکی از سرخوشه‌هایی که پیام Member_req را از او دریافت کرده است تصمیم‌گیری کند. برای این منظور هزینه عضویت حسگر $i$ در خوشه‌ای که توسط $CH_winner_l$ ساخته خواهد شد، طبق (۱۱) محاسبه می‌شود

$$Cost(CH_winner_l, s_i) = \frac{1}{\sigma F_{CH_winner_l} \times \sigma Dis_{CH_winner_l}^{BS}} \quad (۱۱)$$

به طوری که $F_{CH_winner_l}$ و $Dis_{CH_winner_l}^{BS}$ به ترتیب نشان‌دهنده عدد شایستگی $CH_winner_l$ برای انجام وظایف سرخوشگی و فاصله آن تا ایستگاه پایه هستند. به یاد داشته باشید که موقعیت مکانی تمامی حسگرها و نیز ایستگاه پایه در حافظه هر حسگر قرار دارد. نماد $\sigma A$ نشان‌دهنده مقدار نرمال‌شده پارامتر $A$ است. حسگر، عضو خوشه سرخوشه‌ای می‌شود که هزینه عضویت کمتری داشته باشد.

حسگرهایی که به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند باید داده‌های سایر اعضای خوشه را به ایستگاه پایه انتقال دهند که این کار منجر به مصرف انرژی زیادی می‌شود. اگر این حسگرها در نزدیکی ایستگاه پایه قرار

داشته باشند و همچنین تعداد اعضای خوشه متناظرشان بالا باشد، دچار تخلیه زودهنگام انرژی می‌شوند و این امر منجر به شکست شبکه خواهد شد. این بدان معنا است که حتی اگر داده‌های حس‌شده از سایر نقاط شبکه جمع‌آوری شوند، به ایستگاه پایه نخواهند رسید. در نتیجه، به طور منطقی می‌بایست تعداد اعضای خوشه با نزدیک‌شدن به ایستگاه پایه کاهش یابد و بنابراین

$$Cost(CH_winner_l, s_i) \propto \frac{1}{Dis^{BS}_{CH_winner_l}} \qquad (۱۲)$$

همچنین عضویت حسگر $i$ در خوشه‌ای که توسط سرخوشه‌ای با عدد شایستگی بالاتر ساخته می‌شود هزینه کمتری دارد و این بدان معنا است

$$Cost(CH_winner_l, s_i) \propto \frac{1}{F_{CH_winner_l}} \qquad (۱۳)$$

## ٤-٤ محاسبه هزینه مسیر برای ارسال داده از سرخوشه به ایستگاه پایه

انتخاب یک مسیر برای ارسال داده در بسیاری از مطالعات پیشین مورد تمرکز قرار گرفته است. از آنجایی که این موضوع خارج از محدوده تحقیق جاری است، به جای انتخاب یک مسیر برای ارسال داده، نقاط دسترسی مناسب برای ارسال داده را انتخاب می‌کنیم. این در حالی است که بدون آن که از کلیت راهکار پیشنهادی کم شود، هر روش مسیریابی می‌تواند در الگوریتم پیشنهادی ما تطبیق داده شود. نقاط دسترسی یک سرخوشه برای ارسال داده از انواع روبه‌رو است: ۱) سرخوشه دیگر، ۲) ایستگاه پایه (دسترسی به صورت مستقیم)، و ۳) چاهک‌های متحرک. تصمیم‌گیری به منظور انتخاب نقطه دسترسی مناسب برای ارسال داده بر اساس هزینه ارسال که تابعی از فاصله حسگر تا نقطه دسترسی است انجام می‌پذیرد. در صورتی که بیش از نیمی از حسگرهای شبکه (بر اساس نتایج تجربی به دست آمده از شبیه‌سازی) زنده نباشند، احتمال آن که سرخوشه‌ها بتوانند در رله‌کردن داده‌های سرخوشه‌ای دیگر موفق عمل کنند پایین می‌آید. لذا با رسیدن به چنین وضعیتی، ایستگاه پایه یک پیام را برای تمام حسگرهای شبکه به منظور اطلاع آنها از شرایط بحرانی ارسال می‌کند. با دریافت پیام مذکور در صورتی که انرژی باقیمانده حسگر از آستانه از پیش تعریف شده کمتر بود، آن حسگر نقاط دسترسی از نوع چاهک متحرک و ایستگاه پایه را در اولویت انتخاب قرار می‌دهد (شایان ذکر است با بحرانی‌شدن شرایط، تعداد چاهک‌های متحرک در شبکه افزایش می‌یابد). این بدان جهت است که بررسی وضعیت خوشه‌های همسایه نیازمند ارسال و دریافت پیام است. می‌دانیم مقدار قابل توجهی از انرژی حسگرها به واسطه ارسال و دریافت پیام مصرف می‌شود. لذا با مرگ نیمی از حسگرهای شبکه و نیز میزان کم انرژی باقیمانده در حسگر، به جای بررسی تمام مقصدهای احتمالی ارسال داده در هر دور تصمیم‌گیری (که ممکن است به دلایل ذکرشده در بالا در نتیجه نهایی بی‌تأثیر باشد)، سعی در انتخاب گزینه‌های مناسب موجود از نوع چاهک متحرک و ایستگاه پایه دارد. بدیهی است در صورت نبود انرژی کافی برای ارسال داده به نقاط دسترسی بررسی‌شده، سایر گزینه‌ها برای ارسال داده بررسی خواهند شد.

همان طور که پیشتر گفته شد هزینه ارسال، تابعی از فاصله حسگر تا نقطه دسترسی است. برای محاسبه هزینه ارسال به صورت روبه‌رو عمل می‌کنیم: ابتدا بین فاصله حسگر تا ایستگاه پایه و نیز چاهک‌های متحرک اطراف آن مینیمم گرفته می‌شود. سپس بر اساس مدل مصرف انرژی حسگرها [۴] مقدار محاسبه‌شده به انرژی مصرفی برای ارسال داده در آن فاصله تبدیل می‌شود. در ادامه، در صورتی که شرایط اخیراً ذکرشده برقرار نباشد، با ارسال پیامی وضعیت سرخوشه‌های مجاور بررسی می‌شود و بین فواصل به دست آمده تا سرخوشه‌های مجاور، ایستگاه پایه و چاهک‌های متحرک مینیمم گرفته می‌شود. نقطه دسترسی متناظر با مقدار مینیمم حاصل‌شده به عنوان مقصد ارسال داده انتخاب می‌شود.

## ٤-٥ مکان‌یابی چاهک متحرک

داده‌های لازم برای اجرایی‌شدن این فاز، با ارسال پیام Help_req در اختیار ایستگاه پایه قرار می‌گیرد. ابتدا پیام‌های مربوط به یک ناحیه توسط ایستگاه پایه دسته‌بندی می‌شوند و سپس در هر ناحیه مانند $a$ مقدار $\overline{REA_a} = \sum_{z=1}^{NHM_a} \overline{REC_z} \Big/ NHM_a$ محاسبه می‌شود.

$NHM_a$ نشان‌دهنده تعداد پیام‌های دریافتی از سرخوشه‌های مستقر در ناحیه $a$ است. همچنین $\overline{REC_z}$ میانگین انرژی خوشه متناظر با سرخوشه $z$ مستقر در ناحیه $a$ است. در ادامه، میانگین ناپایداری خوشه‌های ناحیه $a$ بر اساس (۱۴) محاسبه می‌شود

$$\overline{UnStability_a} = \frac{\sum_{s=1}^{NHM_a} \overline{NCHP_s}}{NHM_a} \qquad (۱۴)$$

به یاد داشته باشیم، $NCHP_S$ نشان‌دهنده تعداد تکرارهای متناظر با فرایند ساخت خوشه است که سرخوشه $s$ در آن شرکت داشته است.

ایستگاه پایه بر اساس نتایج به دست آمده از تمام نواحی، مقادیر $\overline{REA_a}$ و $\overline{UnStability_a}$ را نرمال می‌کند. در پایان، شانس هر ناحیه مانند $a$ برای دریافت چاهک متحرک بر اساس (۱۵) محاسبه می‌شود

$$Chance_a = (\gamma \times \frac{1}{\sigma \overline{REA_a}}) + (\beta \times \sigma \overline{Unstability_a}) \qquad (۱۵)$$

که $\gamma$ و $\beta$ ضرایب ثابتی هستند که مقدار آنها به صورت تجربی برابر ۰/۷ و ۰/۳ تعیین می‌شوند. بر اساس تحقیقات میدانی انجام‌شده از متخصصین حوزه شبکه، $\gamma$ به مقداری بزرگ‌تر از $\beta$ تنظیم می‌شود و این بدان معنا است که در ساخت چنین تصمیمی فاکتور انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجایی که بالاتربودن مقدار $\overline{UnStability_a}$ نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر ناحیه $a$ است، این ناحیه با احتمال بالاتری نیازمند استفاده از چاهک متحرک در ارسال داده به ایستگاه پایه است. اتمام انرژی حسگرهای عضو خوشه‌های یک ناحیه می‌تواند یکی از دلایل مهم برای افزایش ناپایداری آن ناحیه باشد. همچنین هرچه میانگین انرژی باقیمانده ناحیه رو به کاهش باشد، می‌بایست شانس بیشتری در استفاده از چاهک متحرک داشته باشد و در نتیجه

$$Chance_a \propto \frac{1}{\sigma \overline{REA_a}}$$
$$Chance_a \propto \sigma \overline{UnStability_a} \qquad (۱۶)$$

در صورتی که تعداد چاهک‌های فعال در نظر گرفته شده (یعنی $NMS$) از تعداد نواحی بحرانی بیشتر باشد، به هر ناحیه یک چاهک متحرک اختصاص می‌یابد. تصمیم مرتبط با تعیین تعداد چاهک‌هایی که می‌تواند در یک بازه زمانی در شبکه به کار گرفته شود اغلب متاثر از سیاست‌های سازمان و یا مدیر پیکربندی شبکه است. به عنوان مثال، ممکن است دوره زمانی بازبینی فنی برخی از چاهک‌ها به سر رسیده و مجبور به خارج‌کردن موقت آنها از شبکه باشیم. همچنین ممکن است نیاز به استفاده از برخی چاهک‌ها در سایر عملیات در حال اجرا در سازمان باشد. تعیین مقدار

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی و توضیحات مربوط به آنها.

| متغیرها | مقدار |
|---|---|
| سایز شبکه | ۴۰۰×۴۰۰ $m^2$ |
| تعداد حسگرها | ۵۰ تا ۴۰۰ تولید تصادفی |
| مدل توزیع حسگر | تصادفی |
| انرژی اولیه حسگرها | ۰٫۵ J |
| شعاع ارسال | ۵۰ متر |
| شعاع ارتباطی چاهک متحرک | ۴۰ متر |
| سایز بسته داده | ۲۰۰۰ بیت |
| سایز بسته کنترلی | ۵۰ بیت |
| انرژی مصرفی در مدار (Eelc) | ۵۰ nJ/bit |
| پارامتر کانال فضای آزاد (εfs) | ۱۰ $pJ/bit/m^2$ |
| پارامتر کانال چندمسیره (εmp) | ۰٫۰۰۱۳ $pJ/bit/m^4$ |

*NMS* به صورت دستی و توسط مدیر شبکه انجام می‌پذیرد و همچنین مقادیر مختلف آن، هیچ اثر نامطلوب جانبی در الگوریتم پیشنهادی ندارد.

چالش زمانی رخ می‌دهد که تعداد نواحی بحرانی بیشتر از تعداد چاهک‌های در نظر گرفته شده توسط مدیر شبکه باشد. در این حالت می‌بایست به دنبال تخصیصی از چاهک‌های متحرک به نواحی بحرانی باشیم که بهترین جواب را به دست دهد. تعداد ترکیب‌های ممکن از راه حل می‌تواند بسیار زیاد باشد. برای غلبه بر این مشکل، یک الگوریتم تکاملی با نام الگوریتم ژنتیک را در مسأله تعیین مکان‌های نزدیک به بهینه برای استقرار چاهک‌ها تطبیق می‌دهیم. الگوریتم ژنتیک دقت مناسبی دارد اما نیازمند محاسباتی است که اجرای آن از توان عملیاتی حسگرها خارج است، لذا محول‌کردن فاز مربوط به مکان‌یابی چاهک متحرک به ایستگاه پایه تصمیم عاقلانه‌ای است. به این ترتیب، پیاده‌سازی ایده این تحقیق در شبکه‌های مستقر در محیط‌های واقعی عملیاتی است. در ادامه، جزئیات مرتبط با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توضیح داده می‌شود.

قدم‌های الگوریتم ژنتیک تطبیق داده شده به صورت زیر است:

۱) کدگذاری: هر کروموزوم متشکل از تعدادی ژن است و طول یک کروموزوم (یعنی $CroL$) متناظر با تعداد چاهک‌های فعال قابل تخصیص و هر ژن آن متناظر با شناسه یک ناحیه بحرانی است.

۲) ایجاد جمعیت اولیه: ساخت گروهی از راه حل‌های (کروموزوم‌های) ممکن در حل مسأله اخیراً ذکرشده است.

۳) تعریف تابع برازش: این تابع میزان شایستگی هر راه حل پیشنهادی را بررسی می‌کند. تابع برازش متناظر با اهداف این پژوهش به صورت (۱۷) تعریف می‌شود

$$Fitness(chrom) = \sum_{g=1}^{CroL} (Chance_a + \sigma Distance_a^{BS})_g \quad (۱۷)$$

به طوری که $Chance_a$، $\sigma Distance_a^{BS}$ و $g$ به ترتیب نشان‌دهنده شانس ناحیه $a$ برای دریافت چاهک، فاصله مرکز ناحیه $a$ تا ایستگاه پایه (نرمال‌شده بر اساس بیشینه فاصله ممکن که برابر طول قطر ناحیه است) و شماره ژن است.

بدیهی است کروموزومی شایسته‌تر است که مقدار *Fitness* بیشتری داشته باشد. این بدان معنا است کروموزومی که نواحی تشکیل‌دهنده آن شانس بیشتری در دریافت چاهک دارند و نیز فاصله بیشتری تا ایستگاه پایه دارند در اولویت انتخاب است. با تخصیص چاهک به نواحی دورتر از ایستگاه پایه سربار نواحی نزدیک به ایستگاه پایه برای رله‌کردن داده‌های نواحی دورتر را کاهش می‌دهیم. این امر احتمال شکست زودهنگام شبکه را کاهش می‌دهد.

۴) ساخت جمعیت بعدی: این مرحله با استفاده از استراتژی انتخاب انجام می‌پذیرد. متد انتخاب Tournament در این مقاله استفاده شده و برنده کسی است که بیشترین سازگاری را داشته باشد.

۵) به کارگیری اپراتور برش: این اپراتور بر روی دو والد تولیدشده در انتهای قدم سوم کار می‌کند. از اپراتور برش Uniform در این مقاله استفاده می‌شود و ارزش احتمال برش برابر با ۰٫۴۵ تنظیم می‌گردد.

۶) به کارگیری اپراتور جهش: این اپراتور بر روی دو والد تولیدشده از عمل برش عمل می‌کند. از اپراتور پرش Uniform در این مقاله استفاده می‌شود. ارزش احتمال پرش برابر با ۰٫۰۰۸ تنظیم می‌گردد.

۷) انتخاب معیار خاتمه: تعداد ماکسیمم تکرارها به عنوان خاتمه در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، تعداد ماکسیمم سایز نسل برابر ۴۰ تنظیم می‌گردد.

پس از این مرحله و انتخاب راه حل توسط الگوریتم ژنتیک، استراتژی زیر در تعیین موقعیت جغرافیایی چاهک‌های اختصاص داده شده به نواحی بحرانی اتخاذ می‌شود:

- اگر تنها یک خوشه بحرانی در ناحیه‌ای که چاهک دریافت کرده است وجود داشته باشد، آن گاه موقعیت جغرافیایی چاهک برابر با مرکز آن خوشه تعیین می‌شود.
- اگر بیش از یک خوشه بحرانی در ناحیه‌ای که چاهک دریافت کرده است وجود داشته باشد، آن گاه موقعیت جغرافیایی چاهک برابر با مرکز ثقل خوشه‌های بحرانی تعیین می‌شود.

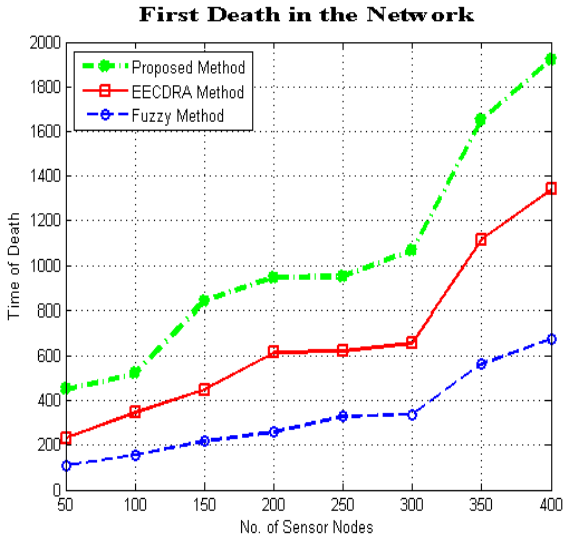
## ۵- ارزیابی کارایی

شبیه‌سازی روش پیشنهادی در مقایسه با دو الگوریتم EECDRA [۱۵] و LEACH-SF [۱۶] در شبیه‌ساز Matlab انجام می‌شود. در هر دو الگوریتم انتخابی برای مقایسه، خوشه‌بندی و استفاده از چاهک‌های متحرک (به عنوان حسگرهای واسط میان حسگرها و ایستگاه پایه) به کار گرفته شده‌اند، لذا هر دو مورد مبنای مناسبی برای مقایسه هستند.

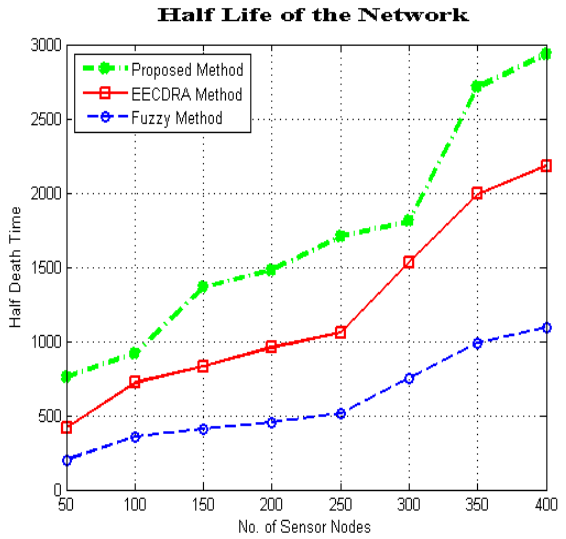
در ارزیابی‌های پیش رو، انرژی مصرفی توسط حسگرها برای اجرای دو روش مبنایی مقایسه و نیز روش پیشنهادی بر اساس [۴] محاسبه و اعمال می‌شود تا بتوان عملکرد هر روش را بر روی حسگرهای واقعی ارزیابی کرد. در نتیجه، بهبودهای به دست آمده در روش پیشنهادی ما (که در ادامه گزارش شده است) به نسبت روش LEACH-SF [۱۶] که پیچیدگی محاسباتی بالاتری دارد، همواره محسوس‌تر است.

پارامترهای مورد نیاز برای تنظیم بستر شبیه‌سازی و مقادیر هر یک در جدول ۲ خلاصه شده و این مقادیر عمدتاً بر مبنای [۱۳] تنظیم گردیده است. در تنظیم محیط شبیه‌سازی سعی بر آن است تا محیط چندان متراکم نباشد تا بتوان عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط بحرانی را بهتر ارزیابی کرد. همچنین پنج معیار روبه‌رو برای ارزیابی کارایی در این پژوهش در نظر گرفته می‌شوند: ۱) زمان مرگ اولین حسگر، ۲) زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه، ۳) میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها، ۴) متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها و ۵) تأخیر شبکه.

در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با لحاظ هر یک از فاکتورهای ارزیابی کارایی اخیراً ذکرشده گزارش و دلایل بحث می‌شوند.




شکل ۱: ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با EECDRA و LEACH-SF با توجه به معیار زمان مرگ اولین حسگر.




شکل ۲: ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با EECDRA و LEACH-SF با توجه به معیار زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه.

جدول ۳: مقایسه زمان مرگ اولین حسگر در روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF.

| تعداد حسگرها | زمان مرگ اولین حسگر (s) | | |
|---|---|---|---|
| | روش پیشنهادی | EECDRA | LEACH-SF |
| ۵۰ | ۴۵۱ | ۲۳۳ | ۱۱۰ |
| ۱۰۰ | ۵۲۲ | ۳۴۶ | ۱۵۷ |
| ۱۵۰ | ۸۴۱ | ۴۵۰ | ۲۱۷ |
| ۲۰۰ | ۹۴۵ | ۶۱۵ | ۲۵۹ |
| ۲۵۰ | ۹۴۸ | ۶۲۲ | ۳۲۸ |
| ۳۰۰ | ۱۰۶۵ | ۶۵۷ | ۳۳۷ |
| ۳۵۰ | ۱۶۵۰ | ۱۱۱۵ | ۵۶۴ |
| ۴۰۰ | ۱۹۲۰ | ۱۳۴۰ | ۶۷۶ |

جدول ۴: مقایسه زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه در روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF.

| تعداد حسگرها | زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه (s) | | |
|---|---|---|---|
| | روش پیشنهادی | EECDRA | LEACH-SF |
| ۵۰ | ۷۶۱ | ۴۱۹ | ۲۰۱ |
| ۱۰۰ | ۹۱۴ | ۷۲۲ | ۳۵۶ |
| ۱۵۰ | ۱۳۶۴ | ۸۳۲ | ۴۱۰ |
| ۲۰۰ | ۱۴۸۰ | ۹۵۷ | ۴۵۳ |
| ۲۵۰ | ۱۷۱۰ | ۱۰۵۹ | ۵۱۷ |
| ۳۰۰ | ۱۸۱۱ | ۱۵۳۴ | ۷۵۴ |
| ۳۵۰ | ۲۷۱۲ | ۱۹۹۲ | ۹۹۰ |
| ۴۰۰ | ۲۹۳۴ | ۲۱۸۱ | ۱۰۹۴ |

## ۵-۱ زمان مرگ اولین حسگر

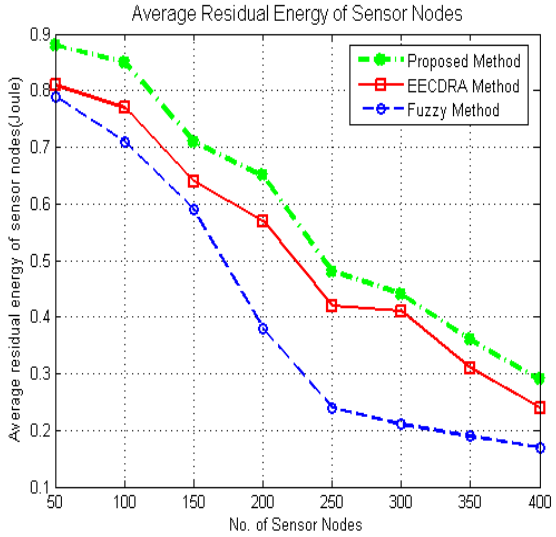
زمان مرگ اولین حسگر، یکی از نشانه‌های میزان موفقیت الگوریتم در مدیریت هرچه بهتر انرژی مصرفی حسگرها است. ارزش بالای این زمان، کارایی بیشتر الگوریتم را تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF با رویکرد معیار زمان مرگ اولین حسگر در جدول ۳ خلاصه شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشخص است، به صورت میانگین و با لحاظ تعداد متفاوت حسگرها، زمان مرگ اولین حسگر در روش پیشنهادی به نسبت دو روش EECDRA و LEACH-SF به ترتیب ۵۵٫۱۴٪ و ۲۱۵٪ بهبود داشته است. متد پیشنهادی به منظور اعزام و جایابی چاهک‌ها کمک مهمی در مدیریت مصرف انرژی حسگرها کرده است. از این گذشته، طراحی یک متد دقیق اما سبک و قابل اجرا بر روی حسگرها در ذخیره‌سازی باتری حسگرها تأثیری بسزا داشته است. در پایان، خاطرنشان می‌کنیم که اگرچه محول‌کردن تصمیم‌گیری در خصوص اعزام چاهک به ایستگاه پایه بار محاسباتی حسگرها را سبک کرده است اما این اقدام زمانی ارزشمند است که ارتباط با ایستگاه پایه و جمع‌آوری داده‌های محیطی نیاز به تبادل پیام‌های زیاد میان حسگرها و آن ایستگاه نداشته باشد. طراحی روش پیشنهادی در ارسال داده رخدادگرا است، لذا به جای ارسال دوره‌ای داده، ارسال بر مبنای وقوع رخداد (رسیدن به شرایط بحرانی) و با حداقل طول پیام انجام می‌پذیرد. برای فهم بهتر خوانندگان، منحنی‌های حاصل از این نتایج در شکل ۱ رسم شده است. نتایج شکل ۱ نشان‌دهنده حفظ کارکرد روش پیشنهادی در تعداد متفاوت حسگرها است. این بدان علت است که انتخاب سرخوشه در روش پیشنهادی توزیع شده است حال آن که تصمیمات مرتبط با اعزام چاهک در ایستگاه پایه‌ای که مجهز به منابع محاسباتی بسیار قوی است انجام می‌پذیرد.

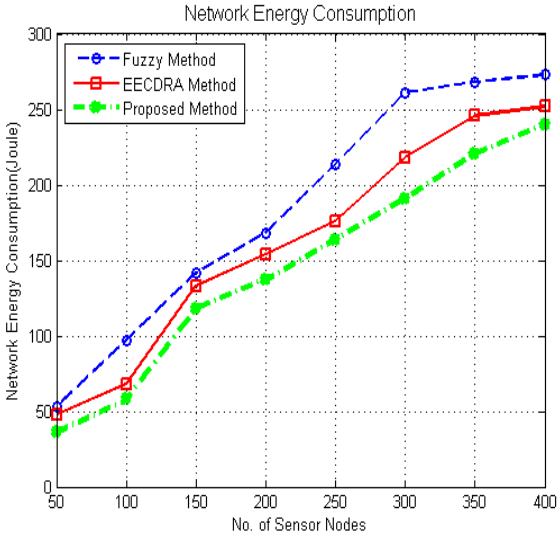
## ۵-۲ زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه

زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه، نشانه‌ای دیگر از میزان موفقیت در مدیریت مصرف انرژی حسگرها است و ارزش بالای این زمان، کارایی بیشتر الگوریتم را تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF با رویکرد معیار زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه در جدول ۴ خلاصه شده است. همان طور که در جدول ۴ مشخص است، به صورت میانگین و با لحاظ تعداد متفاوت حسگرها، زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه در روش پیشنهادی به نسبت دو روش EECDRA و LEACH-SF به ترتیب ۴۱٫۱۰٪ و ۱۸۶٫۵۱٪ بهبود داشته است. دلایل رسیدن به این نتایج، مشابه توضیحات ارائه‌شده در بخش ۵-۱ است.

برای فهم بهتر خوانندگان، منحنی‌های حاصل از این نتایج در شکل ۲ رسم شده است. نتایج شکل ۲ نشان‌دهنده حفظ کارکرد روش پیشنهادی در تعداد متفاوت حسگرها است. از این گذشته، همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد حسگرها، عملکرد روش پیشنهادی از نقطه نظر




شکل ۳: ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با EECDRA و LEACH-SF با توجه به متوسط انرژی باقیمانده در حسگرها.




شکل ۴: ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با EECDRA و LEACH-SF با توجه به متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها.

جدول ۵: مقایسه میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها در روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF.

| تعداد حسگرها | میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها (J) | | |
|---|---|---|---|
| | روش پیشنهادی | EECDRA | LEACH-SF |
| ۵۰ | ۰٫۸۸ | ۰٫۸۱ | ۰٫۷۹ |
| ۱۰۰ | ۰٫۸۵ | ۰٫۷۷ | ۰٫۷۱ |
| ۱۵۰ | ۰٫۷۱ | ۰٫۶۴ | ۰٫۵۹ |
| ۲۰۰ | ۰٫۶۵ | ۰٫۵۷ | ۰٫۳۸ |
| ۲۵۰ | ۰٫۴۸ | ۰٫۴۲ | ۰٫۲۴ |
| ۳۰۰ | ۰٫۴۴ | ۰٫۴۱ | ۰٫۲۱ |
| ۳۵۰ | ۰٫۳۶ | ۰٫۳۱ | ۰٫۱۹ |
| ۴۰۰ | ۰٫۲۹ | ۰٫۲۴ | ۰٫۱۷ |

معیار تحت بررسی بهبود یافته است. علت این امر ذات رفتاری الگوریتم ژنتیک است. هنگامی که تعداد حسگرها افزایش می‌یابد، الگوریتم پیشنهادی جمعیت اولیه را با دقت بالاتری ایجاد کرده و عملکرد عملگرهای ژنتیک برای ایجاد نسل‌های بعدی نتایج مناسب‌تری به دنبال خواهد داشت.

## ۵-۳ میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها

میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها نشان‌دهنده آن است که الگوریتم طراحی‌شده تا چه اندازه در مصرف انرژی صرفه‌جویی داشته است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF با رویکرد معیار متوسط انرژی باقیمانده در حسگرها در جدول ۵ خلاصه شده است.

همان طور که در جدول ۵ مشخص است، الگوریتم پیشنهادی در برابر دو روش انتخابی از نقطه‌نظر معیار میانگین انرژی باقیمانده در حسگرها کارایی بهتری دارد. برخی از دلایل رسیدن به این نتایج، مشابه توضیحات ارائه‌شده در بخش ۵-۱ است. از دیگر دلایل چنین نتایجی، فاکتورهای لحاظ‌شده در تعریف (۱۵) است. در (۱۵) محاسبه $Chance_a$ برای دریافت چاهک متحرک بر اساس میزان ناپایداری درون خوشه‌ای (یعنی $\overline{UnStability_a}$) که می‌تواند با احتمال بالایی به جهت تخلیه انرژی بیشتر حسگرهای خوشه رخ داده باشد، انجام می‌پذیرد. لذا با کمک‌رسانی چاهک‌های متحرک به مناطقی که ناپایداری بیشتری را تجربه می‌کنند فاصله ارسال داده‌ها از حسگرها به ایستگاه پایه کاهش می‌یابد و در نتیجه انرژی کمتری مصرف می‌شود. از این گذشته، عدم ایجاد سربار بر روی خوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه و در نتیجه کاهش رخداد شکست در شبکه خود دلیل مهم دیگری برای رسیدن به چنین دستاوردهایی است.

برای فهم بهتر خوانندگان، منحنی‌های حاصل از این نتایج در شکل ۳ رسم شده است. نتایج شکل ۳ نشان‌دهنده حفظ کارکرد روش پیشنهادی در تعداد متفاوت حسگرها است.

## ۵-۴ متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها

نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF با رویکرد معیار متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها در شکل ۴ نشان داده شده است.

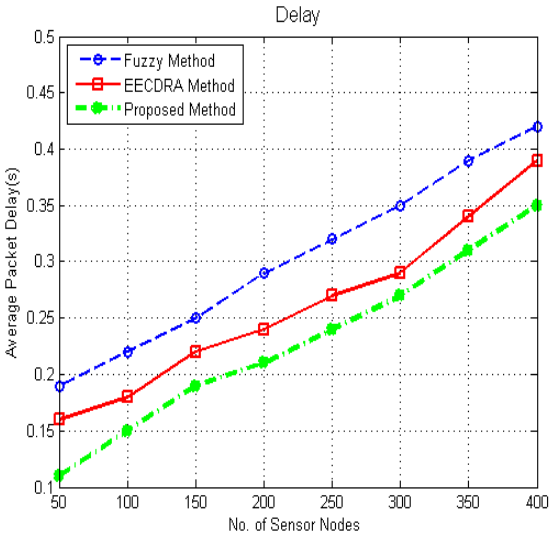
همان طور که قابل مشاهده است، به صورت میانگین و با لحاظ تعداد متفاوت حسگرها، متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها در روش پیشنهادی به نسبت دو روش EECDRA و LEACH-SF به ترتیب ۱۱٫۱۵٪ و ۲۶٫۶۹٪ بهبود داشته است.

دلایل چنین بهبودی متناظر با توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۳ است. همان طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، با افزایش تعداد حسگرها شبکه طول عمر طولانی‌تری دارد و در نتیجه، روش پیشنهادی عموماً با تواتر بالاتری اقدام به استفاده از چاهک و حفظ کارکرد شبکه کرده است. لذا با افزایش تعداد حسگرها عملکرد الگوریتم پیشنهادی و خصوصاً ایده نویسندگان در جایابی چاهک متحرک بیشتر محسوس شده است.

## ۵-۵ تأخیر در شبکه

تأخیر در شبکه برابر با فاصله زمانی ارسال بسته از مبدأ تا رسیدن به مقصد است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در برابر EECDRA و LEACH-SF با رویکرد معیار تأخیر شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است، به صورت میانگین و با لحاظ تعداد متفاوت حسگرها، تأخیر در شبکه در روش پیشنهادی به نسبت دو روش EECDRA و LEACH-SF به ترتیب ۲۰٫۱۴٪ و ۶۹٫۲۴٪ بهبود داشته است.

دو دلیل مهم برای کاهش تأخیر شبکه به واسطه استفاده از روش




شکل ۵: ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با EECDRA و LEACH-SF با توجه به تأخیر شبکه.

پیشنهادی به صورت روبه‌رو است: ۱) در هر تصمیم و انتخابی (شامل عضویت در خوشه و نیز استقرار چاهک متحرک در محیط) همواره در نظر داشته‌ایم که سایز خوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه به نسبت خوشه‌های دورتر از ایستگاه پایه در پایین‌ترین حد ممکن نگه داشته شود. با این تمهید سعی در جلوگیری از افزایش ازدحام بر روی حسگرهای خوشه‌های نزدیک به ایستگاه پایه و در نتیجه کاهش نرخ شکست شبکه داریم. ۲) تأخیر در شبکه رابطه‌ای مستقیم با مسافت بین مبدأ ارسال بسته و مقصد دریافت آن دارد. در روش پیشنهادی، تمام تصمیمات مرتبط با انتخاب سرخوشه، تعریف تابع به منظور محاسبه شایستگی نواحی بحرانی برای دریافت چاهک، اعزام چاهک و نیز مستقرکردن چاهک، با توجه خاصی نسبت به معیار فاصله اخذ شده است. جایگاه معیار فاصله در روابط طراحی‌شده، مؤید این مسأله است.

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، یک راهکار سلسله‌مراتبی مبتنی بر خوشه‌بندی چاهک متحرک در ارسال داده‌های حس‌شده توسط حسگرها به ایستگاه پایه پیشنهاد گردیده است. این راهکار متشکل از دو قدم انتخاب سرخوشه و تخصیص نزدیک به بهینه تعداد محدود چاهک به شمار بالای مناطق بحرانی در شبکه است. هر راه حل پیشنهادی برای محقق‌سازی قدم‌های ذکرشده می‌بایست دارای دو ویژگی روبه‌رو باشد: الف) موازنه‌ای مناسب میان افزایش دقت و کاهش بار محاسباتی برقرار کند و ب) قابل پیاده‌سازی در شبکه‌های واقعی (با رویکرد محدودیت‌های سخت‌افزاری حسگرها مانند باتری و توان محاسباتی) باشد.

لذا در روش پیشنهادی با محلی‌سازی محاسبات سبک‌وزن و اجرای آنها بر روی حسگرها و نیز محول‌کردن محاسبات سنگین‌وزن به ایستگاه پایه، بدون نیاز به افزایش تعداد و طول پیام‌های مبادله‌شده بین حسگرها و ایستگاه پایه، امکان اجرایی‌شدن روش در شبکه‌های واقعی را فراهم کرده‌ایم. از این گذشته، از آنجایی که افزایش دقت در دو مرحله تشکیل خوشه و نیز تخصیص چاهک مورد نظر است، اقدامات زیر را پیشنهاد دادیم:

- انتخاب سرخوشه بر اساس پارامترهای تأثیرگذار محیطی و نیز تعریف تابع هزینه عضویت حسگر در خوشه بر اساس فاکتورهای فاصله و نیز میزان شایستگی سرخوشه با هدف تشکیل خوشه‌هایی با سایزهای نابرابر
- مدل‌سازی ریاضی شانس یک ناحیه برای دریافت چاهک متحرک بر اساس پارامترهای ناپایداری خوشه‌های ناحیه و میانگین انرژی باقیمانده ناحیه.
- تطبیق الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن تخصیص‌های نزدیک به بهینه از چاهک‌های متحرک به مناطق بحرانی.
- طراحی یک تابع برازش برای ارزیابی شایستگی هر تخصیص از چاهک‌های متحرک به مناطق بحرانی بر اساس پارامترهای شانس یک ناحیه برای دریافت چاهک متحرک و فاصله ناحیه تا ایستگاه پایه.

نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های EECDRA [۱۵] و LEACH-SF [۱۶] از نظر معیارهای ۱) زمان مرگ اولین حسگر، ۲) زمان رسیدن به نیمه عمر شبکه، ۳) متوسط انرژی باقیمانده در حسگرها، ۴) متوسط انرژی مصرفی توسط حسگرها و ۵) تأخیر شبکه است.

در جهت بهبود روش پیشنهادی در نظر داریم که بر روی ۱) تعیین اتوماتیک حداقل چاهک‌های مورد نیاز برای کمک به مناطق بحرانی با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کارایی، ۲) زمان‌بندی توقف چاهک‌ها در محیط و ۳) بازطراحی تابع برازش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با توجه به پارامترهای زمان دسترس‌پذیری و الگوی حرکتی چاهک متحرک متمرکز شویم.

## مراجع


[1] P. Chauhan and P. Ahlawat, "Target tracking in wireless sensor network," *International J. of Information & Computation Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 643-648, Apr. 2014.

[2] F. Fanian and M. Kuchaki Rafsanjani, "A new fuzzy multi-hop clustering protocol with automatic rule tuning for wireless sensor networks," *Applied Soft Computing J.*, vol. 89, pp. 106-115, Apr. 2020.

[3] P. Singh Mehra, M. Najmud Doja, and B. Alam, "Fuzzy-based enhanced cluster head selection (FBECS) for WSN," *J. of King Saud University-Science*, vol. 32, no. 1, pp. 390-401, Jan. 2020.

[4] S. Adabi, M. Abdolkarimi, and A. Sharifi, "A new multi-objective distributed fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks with mobile gateways," *AEU-International J. of Electronics and Communications*, vol. 89, pp. 92-104, May 2018.

[5] N. Ghosh, I. Baberjee, and R. Simon Sherratt, "On-demand fuzzy clustering and ant-colony optimization based mobile data collection in wireless sensor network," *Wireless Networks*, vol. 25, no. 4, pp. 1829-1845, May 2019.

[6] A. Ghosal, S. Halder, and S. K. Das, "Distributed on-demand clustering algorithm for lifetime optimization in wireless sensor networks," *J. of Parallel and Distributed Computing*, vol. 141, pp. 129-142, Jul. 2020.

[7] T. Stephan, F. Al-Turjman, K. Suresh Joseph, B. Balusamy, and S. Srivastava, "Artificial intelligence inspired energy and spectrum aware cluster based routing protocol for cognitive radio sensor networks," *J. of Parallel and Distributed Computing*, vol. 142, pp. 90-105, Aug. 2020.

[8] P. Parvin Renold and A. Balaji Ganesh, "Energy efficient secure data collection with path-constrained mobile sink in duty-cycled unattended wireless sensor network," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 55, pp. 1-12, Apr. 2019.

[9] N. Gharaei, K. Abu bakar, S. Zaiton Mohd Hashim, and A. Hosseingholi Pourasl, "Inter-and intra-cluster movement of mobile sink algorithms for cluster-based networks to enhance the network lifetime," *Ad Hoc Networks*, vol. 85, pp. 60-70, Mar. 2019.

[10] J. Wang, Y. Yin, J. Zhang, S. Lee, and R. S. Sherratt, "Mobility based energy efficient and multi-sink algorithms for consumer home networks," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 77-84, Feb. 2013.

[11] S. Gao, H. Zhang, and S. K. Das, "Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 10, no. 4, pp. 592-608, Apr. 2011.

[12] M. H. Khodashahi, F. Tashtarian, M. H. Yaghmaee Moghaddam, and M. Tolou Honary, "Optimal location for mobile sink in wireless sensor networks," in *Proc IEEE Wireless Communications and Networking Conf.,* 6 pp., Sydney, Australia, 18-20 Apr. 2010.

[13] M. Marta and M. Cardei, "Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, pp. 542-555, 2009.

[14] M. Elshrkawey, S. M. Elsherif, and M. Elsayed Wahed, "An enhancement approach for reducing the energy consumption in wireless sensor networks," *J. of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 2, pp. 259-267, Apr. 2018.

[15] J. Wang, J. Cao, S. Ji, *et al.*, "Energy-efficient cluster-based dynamic routes adjustment approach for wireless sensor networks with mobile sinks," *J. of Supercomputing*, vol. 73, no. 7, pp. 3277-3290, Jul. 2017.

[16] M. Shokouhifar and A. Jalali, "Optimized sugeno fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 60, pp. 16-25, Apr. 2017.

**فاطمه صادقی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ در دانشگاه شیراز و دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های حسگر و اینترنت اشیا.

**سپیده آدابی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی کامپیوتر به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ در دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رسانده است و هم اکنون استادیار گروه مهندسی کامپیوتر دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های کامپیوتری، اینترنت اشیا، محاسبات مه، محاسبات ابر و اقتصاد ابر و مه.

**سحر آدابی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی کامپیوتر به‌ترتیب درسال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶، ۱۳۹۲ در دانشگاه آزا داسلامی به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی کامپیوتر دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: معماری نرم‌افزار، سیستم‌های توزیع شده، درستی آزمایی صوری.