سال چهاردهم، شماره‌های ۵۱ و ۵۲ ، بهار و تابستان ۱۴۰۱
صص: ۸۳_۹۶

دو فصلنامه علمی
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

# ارائه روش جدیدی به منظور بهینه‌سازی ردیابی اهداف متحرک در شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار

**شایسته طباطبائی* حسن نصرتی ناهوک****

*استادیار دانشکده فنی مهندسی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران

**مربی دانشکده فنی مهندسی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

نوع مقاله: پژوهشی

**چکیده**

شبکه حسگر بی سیم مجموعه‌ای از گره‌های حسگر بی سیم در اندازه کوچک است که محیط را حس می‌کنند و اطلاعات جمع آوری شده را به سمت گره چاهک ارسال می‌کنند. یکی از وظایف شبکه‌های حسگر بی‌سیم ردیابی هدف است. ردیابی هدف، فرآیند تخمین وضعیت هدف از طریق اندازه‌گیری‌های حاصل شده از هدف است. اکثر مدل‌ها و الگوریتم‌های ردیابی اهداف در شبکه‌های حسگر بی سیم مقدار قابل توجهی انرژی مصرف می‌کنند. بر این اساس این مقاله، ضمن افزایش کیفیت ردیابی هدف سعی در کاهش انرژی مصرفی حسگرها با یک الگوریتم محلی جدید بنام الگوریتم جستجوی شکار را دارد. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی به همراه پروتکل DCRRP[۱] و پروتکل NODIC[۲] در شبیه سازOPNET نسخه ۱۱,۵ شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر مصرف انرژی، نرخ تحویل سالم داده و نرخ گذردهی نسبت به دو پروتکل دیگر بهتر عمل می‌کند.

**واژگان کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، الگوریتم جستجوی شکار، خوشه‌بندی، ردیابی هدف متحرک، پروتکل**DCRRP**، پروتکل** NODIC.

## ۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در ارتباطات بی‌سیم، ابزارهای تعبیه شده و تکنولوژی‌های حسگر امکان استقرار و استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم را فراهم کرده است. WSN شامل تعدادی از گره‌های کوچک، کم هزینه و با توان مصرفی پایین است که محیط را سنجش می‌کنند و این اطلاعات را به یک مرکز جمع آوری داده‌ها ارسال می‌کنند. این شبکه‌ها دامنه گسترده‌ای از کاربردها نظیر نظارت بر فوران آتش فشان، نظارت بر عملیات نظامی، کنترل ساختمان‌ها، ردیابی و تفتیش وسائل نقلیه، انجام مشاهدات در مکان‌های غیرقابل دسترسی و حیات وحش، اکتشافات و ردیابی هسته‌ای، زیستی و شیمیائی، اتوماسیون منزل و کاربردهای پزشکی را شامل می‌شوند [۱]. WSN شبکه‌ای با انرژی محدود است که شامل گره‌های حسگر و یک ایستگاه پایه می‌باشد. انرژی حسگرها با استفاده از باتری‌های کوچک غیر قابل تعویض و یا غیر

نویسنده مسئول: شایسته طباطبائی و shtabatabaey@yahoo.com

[۱] Distributed Clustering Reliability, Routing Protocol

[۲] Novel Distributed Clustering

قابل شارژ مجدد تامین می‌شود [۲]. بنابراین، صرفه جویی در انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از روش‌های بهبود مصرف انرژی خوشه‌بندی گره‌های حسگر است که با انتخاب یک یا چند گره به عنوان واسطه (سر خوشه) کمک می‌کند تا مصرف انرژی کاهش یابد لذا در این شبکه‌ها خوشه‌بندی نقش کلیدی دارد [۳].

در خوشه‌بندی گره‌های حسگر در دسته‌هایی بنام خوشه دسته-بندی می‌شوند هر خوشه شامل یک گره سرخوشه است که داده ها را از گره‌های عضو خوشه خود دریافت و آن را به‌صورت چند گامه از طریق سرخوشه سایر خوشه‌ها یا تک گامه به سمت گره مرکزی یا چاهک ارسال می‌کند معمولاً ارتباطات چند گامه باعث کاهش مصرف انرژی می‌گردد.

خوشه‌بندی گره‌ها در WSNها دارای اهداف زیر هستند: (۱) ارتباطات درون خوشه‌ای را کاهش می‌دهد. (۲) با استفاده از خوشه‌ها، می‌توان تعادل بار را در سراسر شبکه حفظ کرد. (۳) بسیاری از این پیام‌ها از طریق ارتباطات درون خوشه کاهش می‌یابد. (۴) خوشه‌بندی موجب افزایش کارایی می‌شود[۴].

ردیابی هدف (پردازش اندازه گیری‌های به دست آمده از یک هدف برای برآورد مستمر وضعیت فعلی آن) در برنامه‌های کاربردی فرماندهی، کنترل، ارتباطات، کامپیوتر، هوش، نظارت و شناسایی (C۴ISR)[۳] از اهمیت زیادی برخوردار است [۵]. ردیابی هدف با WSNها شامل طراحی مدل‌های انرژی-کارآمدی است که می‌توانند با برقراری موازنه[۴] خوب بین صرفه جویی در مصرف انرژی و کیفیت ردیابی، کار کنند و مکان قرارگیری هدف را تخمین بزنند. در ردیابی هدف، به حداقل رساندن خطا بین موقعیت واقعی و برآورد شده هدف مدنظر قرار می‌گیرد.

اکثر روش‌های موجود در ردیابی هدف متحرک به‌صورت متمرکز عمل ردیابی را انجام می‌دهند و تمام داده‌های اندازه‌گیری شده را برای پردازش به یک گره مرکزی ارسال می-کند که این روش تأخیر ارسال داده و تأخیر همگام‌سازی را به همراه دارد همچنین انرژی و پهنای باند بالایی را مصرف می‌کند لذا برای حل این مشکلات در این مقاله یک چارچوب ردیابی هدف کاملاً توزیع‌شده که با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار و با توجه به اطلاعات محلی شبکه موقعیت قرارگیری هدف را برآورد می‌کند ارائه شده است.

الگوریتم جستجوی شکار جز الگوریتم‌های فراابتکاری است که مبتنی بر شیوه شکار گروهی است این الگوریتم از این استراتژی که شکارچیان به دور شکار خود حلقه می‌زنند و به مرور زمان حلقه را برای محاصره شکار تنگ‌تر می‌کنند و اینکه هر عضوی از گروه موقعیت خود را بر اساس موقعیت خودش و موقعیت سایر افراد گروه تصحیح می‌کند برای ردیابی شکار استفاده می-کند در روش پیشنهادی هدف متحرک به عنوان شکار در نظر گرفته می‌شود و گره‌های حسگر به عنوان شکارچی قصد ردیابی شکار را دارند.

## ۲. کارهای مرتبط

ردیابی هدف به فرآیند مکان‌یابی یک یا چند جسم ازطریق ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده آن اجسام و تاریخچه آنها اطلاق می‌گردد در واقع ردیابی هدف به مسئله ترکیب داده‌های حسگر و تاریخچه هدف برای ارائه دانش دقیق و به موقع در مورد مکان یک یا چند جسم متحرک می‌پردازد [۶]. ردیابی هدف درعین‌حال که تلاش می‌کند خطا را به حداقل برساند، با چالش‌های طراحی مانند مصرف انرژی، ارتباطات و پیچیدگی محاسباتی روبرو است. یک WSN به صورت ایده‌آل، باتوجه به پوشش فضایی و تنوع در جنبه حسگری، برای ردیابی اهداف متحرکی در نظر گرفته شده است که در یک منطقه بزرگ حرکت می‌کنند [۷]. در [۸]، یک سیستم ردیابی با چند حسگر متمرکز استفاده شده است. در شبکه‌های متمرکز، تمام داده‌های اندازه‌گیری شده برای پردازش به یک گره مرکزی ارسال می‌شوند. این معماری از لحاظ کاهش بار محاسباتی در شبکه، مطلوب است. با این حال، نقاط ضعف متعددی نظیر ارسال داده‌های سری زمانی از طریق شبکه، مشکلات مربوط به تأخیر و همگام‌سازی را به همراه دارد. همچنین انرژی و پهنای باند بالایی را مصرف می‌کند و زمانی که حسگرهای متعدد استفاده می‌شوند، اطلاعات کسب شده حسگرها با ردیابی‌ها از انفجار ترکیبی[۵] آسیب می‌بینند [۹].

در یک معماری ردیابی هدف توزیع‌شده، تمام گره‌های حسگر قادر به پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده درمورد اهداف هستند. بعد از اینکه گره‌های حسگر داده‌های خود را پردازش کردند، نتایج خود را به گره‌های دیگر ارسال می‌کنند. معماری توزیع‌شده ارتباطات را کاهش می‌دهد و مشکل قابلیت اطمینان را برطرف می‌کند اما بار محاسباتی فوق‌العاده‌ای را به گره‌های حسگر اضافه می‌کند. در ادامه این بخش به کارهای مرتبط در زمینه ردیابی و بهبود مصرف انرژی در WSNها می‌پردازیم.

در [۱۰]، یک رویکرد مبتنی بر خوشه‌بندی برای ردیابی تک هدفه، در شبکه‌های بی‌سیم متراکم را پیشنهاد کرد. الگوریتم مکانیابی هدف، مبتنی بر انرژی برای برآورد موقعیت هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. گره‌های حسگر که در تلفیق اطلاعات

[۳] Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance

[۴] Trade off

[۵] combinatorial explosion

هدف شرکت می‌کنند، بر اساس سطح سیگنال دریافتی، سطح انرژی، محدوده حساسیت و اطلاعات شناسایی شده در مورد هدف انتخاب می‌شوند.

در [۱۱]، یک روش پیش‌بینی هدف مبتنی بر خوشه‌بندی را پیشنهاد کردند. در این رویکرد، تمام گره‌های حسگر فعال اطلاعات خود را به سرخوشه ارسال می‌کنند. اطلاعات دریافت شده توسط سرخوشه با استفاده از الگوریتم مکانیابی مرکز ثقل[۶] ترکیب می‌شوند. سپس از یک الگوریتم پیش‌بینی، که حداقل مربعات بازگشتی (RLS) نامیده می‌شود، برای انتخاب سرخوشه جدید و گره‌های فعال استفاده می‌شود.

در [۱۲]، یک الگوریتم ردیابی هدف مبتنی بر همکاری انرژی آگاه را پیشنهاد کردند، که ترکیبی از فیلتر کالمن و الگوریتم مشارکتی مبتنی بر انرژی است. فیلتر توزیع شده کالمن فقط در گره‌های سرخوشه اجرا می‌شود. تمام گره‌های حسگر فعال در صورت تشخیص هدف، مشاهدات خود را به اشتراک می‌گذارند. انرژی مصرف شده توسط یک گره با ترکیبی از انرژی حسگری (که بستگی به فاصله بین هدف و گره حسگر دارد) و انرژی ارتباطی (که بستگی به فاصله بین گره حسگر و گره جمع آوری داده و قدرت ارسال دارد) محاسبه می‌شود.

در [۱۳]، یک الگوریتم ردیابی هدف انرژی کارآمد مبتنی بر سلول را پیشنهاد کردند. در این روش منطقه حسگری به مکان‌های جغرافیایی، به نام سلول‌ها تقسیم و حرکت هدف از یک سلول به دیگر پیش‌بینی می‌شود همچنین از یک رویه مبتنی بر انرژی برای برآورد مکان هدف با استفاده از اندازه گیری‌های انرژی در یک لحظه خاص استفاده می‌کند.

در [۱۴]، یک الگوریتم ردیابی سازگار با تحرک مبتنی بر پیش‌بینی توزیع‌شده (P-MAT)[۷] را پیشنهاد کردند، که دقت بسیار زیادی را در ردیابی ارائه می‌کند و درعین‌حال مقدار انرژی مورد استفاده را کمینه می‌سازد. P-MAT از یک فیلتر کالمن تطبیقی برای پیش‌بینی وضعیت آینده (موقعیت و سرعت) هدف استفاده می‌کند. همچنین بر اساس پیش‌بینی مکان، منطقه ردیابی فعال تعیین می‌شود.

در [۱۵]، مساله ردیابی هدف در حسگرهای مجاورتی را مورد بررسی قرار دادند که از فیلتر کالمن به منظور بهبود اندازه‌گیری موقعیت هدف برای به دست آوردن برآوردهای بهتر از موقعیت هدف استفاده نمودند. این روش قادر است راندمان توان مصرفی شبکه را افزایش دهد.

در [۱۶]، یک الگوریتم TwCA [۸] را برای ردیابی اهداف چندگانه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم منفعل (PWSN) را پیشنهاد کردند. برنامه‌های PWSN به سنسورهایی که محاسبات کمتری دارند نیاز دارند. آنها PWSN را برای تشخیص هدف در هر گره سنسور اجرا کردند. الگوریتم TWSA مشکل اتصال را با عملیات بسیار ساده با استفاده از خوشه‌هایی متشکل از سنسورهای تشخیص که در اطراف اهداف جمع شده است حل می‌کند. TWCA می‌تواند تعداد نامحدودی از اهداف را در یک طیف گسترده‌ای از مانورهای غیرخطی با بار محاسباتی کم و دقت بالا که توسط شبیه ساز ی نشان داده شده است ردیابی کند.

در [۱۷]، یک پروتکل مسیریابی فازی (به نام SIF[۹])، که انرژی باقی‌مانده، فاصله تا چاهک، و فاصله از مرکز خوشه را برای انتخاب سرخوشه‌ها در نظر می‌گیرد و از منطق فازی برای غلبه بر عدم اطمینان در محیط WSN استفاده می‌کند را پیشنهاد کردند. سیستم استنتاج فازی می‌تواند برای به دست آوردن ترکیبی بهتر از پارامترهای ورودی قابل اجرا جهت حصول خروجی مطلوب، که در این تحقیق روش انتخاب سرخوشه است، استفاده شود. SIF از الگوریتم خوشه‌بندی مرکز میانگین فازی برای تشکیل خوشه‌ها استفاده می‌کند و سپس سرخوشه‌ها مناسب را از طریق سیستم استنتاج فازی ممدانی انتخاب می‌کند. در این روش همچنین از یک الگوریتم هوشمند ترکیبی مبتنی بر الگوریتم کرم شب تاب برای بهینه سازی جدول پایه قانون فازی SIF استفاده شده است تا طول عمر شبکه را بر اساس مشخصات برنامه افزایش دهد.

در [۱۸]، یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم را پیشنهاد کردند که به صورت غیر متمرکز عمل می‌کند و سعی می‌کند مصرف انرژی را کاهش دهد. پروتکل پیشنهادی شامل یک الگوریتم خوشه‌بندی چند معیاره و یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی است که به صورت همزمان اجرا می‌شوند. در بخش الگوریتم خوشه‌بندی چندمعیاره تلاش می‌کنند تعداد سرخوشه برای تجمیع داده و انتقال در بازه‌های تعیین شده مشخص را نمایند. از الگوریتم مسیریابی مبتنی بر خوشه‌بندی برای کاهش هزینه انتقال پیغام‌ها به وسیله ایجاد درخت پوشای کمینه استفاده می‌کند.

در [۱۹]، یک پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ماهی‌ها بنام AFSRP در شبکه‌های WSN را پیشنهاد کردند که میزان انرژی مصرفی را بهبود می‌بخشد. پروتکل پیشنهادی با پروتکل ERA در شبیه‌ساز OPNET۱۱,۵ شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی حاکی از

---

[۶] Centroid

[۷] Prediction-based Mobility Adaptive Tracking

[۸] Two Way Cluster Association

[۹] Swarm Intelligence based Fuzzy

عملکرد بهتری پروتکل پیشنهادی نسبت به پروتکلERA[۱۰] از نظر مصرف انرژی، تأخیر انتها به انتها، تأخیر دسترسی به رسانه، نرخ گذردهی، احتمال موفقیت ارسال به چاهک و نسبت سیگنال به نویز می‌باشد.

در [۲۰]، برای حداکثر رساندن طول عمر شبکه و مقیاس-پذیری از الگوریتم قورباغه جهنده برای ارائه یک پروتکل خوشه-بندی چند گامه فازی استفاده نمودند. از روش پیشنهادی برای پیکربندی خودکار و بهینه سازی جدول قواعد پایه در یک سیستم استنتاج فازی و پنج پارامتر قابل تنظیم که شامل انرژی، فاصله از ایستگاه پایه، تعداد گره‌های همجوار، میانگین بار مسیر، تأخیر می‌باشد در دو مرحله، یعنی انتخاب سرخوشه و انتخاب والدین، بر اساس ویژگی‌های برنامه کاربردی استفاده می‌شود. روش پیشنهادی قادر است انرژی مصرفی حسگرها را بهبود بخشد.

در [۲۱]، یک روش مسیریابی مبتنی بر انرژی برای انتقال داده در محیط حسگر ناهمگن را پیشنهاد کردند. در روش پیشنهادی، یک فضای جستجوی محدود و یک الگوریتم برای انتخاب مسیر بین منبع و چاهک ایجاد شده است که با تحویل سریع داده‌ها از طریق یک گام کارآمدی مصرف انرژی را فراهم می‌کند. روش پیشنهادی همچنین با استفاده از جمع آوری داده‌ها و با فراهم کردن توازن بار مناسب در شبکه، درصد موفقیت بسته‌های داده دریافت شده در چاهک، در شبکه بزرگ متراکم را بهبود می‌بخشد.

در [۲۲]، برای خوشه‌بندی حسگرها از الگوریتم لیگ فوتبال استفاده نمودند. روش پیشنهادی با پروتکلIEEE۸۰۲,۱۵,۴ و پروتکل NODIC با شبیه ساز OPNET شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی نظیر انرژی مصرفی، تأخیر انتها به انتها، نرخ سیگنال به نویز، احتمال موفقیت ارسال داده به چاهک و نرخ گذردهی استخراج شده که نتایج شبیه‌سازی حاکی از عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به پروتکل IEEE۸۰۲,۱۵,۴ و پروتکل NODIC است

در [۲۳]، یک نرم افزار مسیریابی سلسله مراتبی بر اساس الگوریتم بهینه سازی گله شیرها در شبکه WSN را پیشنهاد کردند که به منظور کنترل پیچیدگی شبکه با جدا کردن سطح کنترل از سطح داده عمل می‌کند. هدف اصلی این روش، مصرف مناسب انرژی و در نتیجه افزایش طول عمر و کیفیت خدمات (QoS) شبکه است. روش پیشنهادی شامل فاز تشکیل خوشه، فاز ایجاد مسیر و فاز انتقال داده است که فاز خوشه‌بندی گره-های حسگر توسط الگوریتم گله شیرها انجام می‌شود.

در [۲۴]، الگوریتم خوشه‌بندی جدیدی بنام NODIC برای شبکه‌های WSN به منظور افزایش طول عمر شبکه را پیشنهاد کردند که در فرآیند انتخاب سرخوشه یک مقدار آستانه در نظر می‌گیرد اگر مقدار احتمال انتخاب گره به عنوان سرخوشه کمتر از آستانه در نظر گرفته شده در هر دور بود گره حسگر به عنوان سرخوشه موقت انتخاب می‌شود. نتایج شبیه سازی نشان داد که روش پیشنهادی مصرف انرژی را بهبود می‌بخشد و طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد.

در [۲۵]، یک پروتکل مسیریابی بنامDCRRP را پیشنهاد کردند، که با استفاده از چاهک سیار و خوشه‌بندی طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد. در این روش سرخوشه‌ها با انتخاب بهترین گره جایگزین از بین اعضای گره خوشه‌ای که سرخوشه آن دچار خطا شده قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهند و با حرکت چاهک به سمت گره‌های سرخوشه‌ایی که انرژی‌شان در حال کم شدن است و دریافت داده آنها قبل از خاموش شدن-شان تأخیر انتقال داده را کاهش می‌دهد.

در [۲۶]، از الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری همراه با تبرید شبیه سازی شده برای حل مشکل بهینه سازی پوشش شبکه WSN استفاده نمودند. روش پیشنهادی به منظور کاهش افزونگی توزیع گره‌های حسگر، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه مورد استفاده قرار گرفته است که در مرحله اول، مدل ریاضی بهینه سازی پوشش WSN را ایجاد می‌کند. سپس، برای افزایش میزان همگرایی الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری، الگوریتم تبرید شبیه سازی شده پس از خاتمه رفتار محاصره در الگوریتم گرگ خاکستری تعبیه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری بهمراه تبرید شبیه سازی شده نسبت به الگوریتم‌های ازدحام ذرات و الگوریتم استاندارد گرگ خاکستری از لحاظ سرعت بهینه‌سازی، پوشش شبکه، مصرف انرژی گره‌ها و طول عمر شبکه است.

در [۲۷]، یک رویکرد بهینه سازی ترکیبی الهام گرفته از طبیعت به نام بهینه‌سازی ترکیبی ازدحام ذرات و گرگ خاکستری برای بهبود مصرف انرژی و ارسال امن داده‌ها را پیشنهاد کردند که برای یادگیری پویایی محیط از یک آتاماتای یادگیر استفاده می‌کند که اتاماتای یادگیری برای ارائه رشته آموخته شده و پذیرفته شده به الگوریتم بهینه سازی ترکیبی ازدحام ذرات و گرگ خاکستری استفاده می‌شود تا مسیرها بهینه شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که رویکرد پیشنهادی طول عمر شبکه و مصرف انرژی را بهبود می‌بخشد.

[۱۰] Energy-aware Routing Algorithm

در [۲۸]، برای بهبود عملکرد WSN ابتدا روش‌های بهینه-سازی را شناسایی که برای حل مسائل WSN مدل‌سازی شده را شناسایی نمودند سپس الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف برای بهینه سازی نتیجه در فضای جستجوی محلی برای بقای سراسری پیشنهاد دادند. علاوه بر این که این مطالعه به شناسایی ایرادات، دامنه و محدودیت‌های روش‌های موجود کمک می‌کند.

در [۲۹]، یک روش جدید مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری است برای حل مساله جایگذاری گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم گرید سه بعدی را پیشنهاد کردند. الگوریتم پیشنهادی هر دو شرط پوشش و اتصال را برآورده می‌کند و برای افزایش تنوع و جلوگیری از همگرا شدن به بهینه‌های محلی، از ایده مهاجرت استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی زمان اجرای کمتری دارد و همچنین از تعداد گره‌های انتخاب شده کمتری برای برآورده کردن پوشش و اتصال کمتری استفاده می‌کند.

در [۳۰]، یک روش جدید برای قرارگیری بهره‌ور گره‌های رله اطراف گره‌های بحرانی شبکه با هدف جلوگیری از حذف آنها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم زیر آب را پیشنهاد کردند. الگوریتم پیشنهادی موقعیت بهینه گره‌های رله را با فرموله بندی کردن مکان هر گره رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب و با استفاده از یک تبدیل جدید مسئله غیرمحدب به معادل محدب بدست می‌آورد. نتایج شبیه سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی مشکل حفره انرژی را حل می‌کند و همچنین طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد.

## ۳. روش پیشنهادی

یک WSN شامل تعداد زیادی گره حسگر با منابع محدود ظرفیت باتری،قدرت محاسبات، حافظه و محدوده رادیویی است. اگر چه WSNها اساساً با هدف برنامه‌های نظامی مانند نظارت بر میدان جنگ ساخته شده اند، اما در بسیاری از مناطق صنعتی و غیر نظامی، از جمله نظارت بر فرآیند، نظارت بر سلامت دستگاه، نظارت بر محیط زیست و محل سکونت، برنامه‌های مراقبت بهداشتی، اتوماسیون خانگی، رباتیک و کنترل ترافیک استفاده می‌شوند. هدف اصلی WSNها حس کردن دوره‌ای رویدادها از یک منطقه مورد توجه و هدایت آنها به عنوان داده‌های دیجیتال به ایستگاه پایه به نام چاهک می-باشد. چالش‌های بسیاری قبل از ارسال اطلاعات به چاهک نظیر جمع آوری اطلاعات، تجمیع، رمزگذاری و مسیریابی ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، WSNها باید با محدودیت این منابع مقابله کنند. یکی از روشهای بهبود مصرف انرژی خوشه‌بندی گره‌های حسگر است که با دسته‌بندی گره‌ها و انتخاب سرخوشه کمک می‌کند تا مصرف انرژی را کاهش دهد. در روش‌های مبتنی بر خوشه‌بندی، گره‌های حسگر در بخش‌هایی به نام خوشه دسته‌بندی می‌شود و هر خوشه دارای یک گره مسئول ارتباطات به نام سرخوشه است که می‌تواند بعنوان گره واسط برای انتقال داده به چاهک مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی روش‌های نامناسب خوشه‌بندی ممکن است منجر به مصرف زیاد انرژی و توزیع بار نامتعادل شود و همچنین گره‌های سرخوشه نزدیک به چاهک بدلیل استفاده بیش از حد برای ارسال داده‌ها به سمت سینک انرژی خود را زیاد مصرف کنند و خاموش شوند که خاموش شدن گره‌ها موجب تغییر توپولوژی و ایجاد مشکل نقطه داغ می‌شود. یکی از کاربردهای WSNها ردیابی اهداف متحرک است که حسگرها منابع انرژی زیادی را برای انجام این وظیفه مصرف می‌کنند برای افزایش طول عمر شبکه و بهبود مصرف انرژی در حسگرها می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم جستجوی شکار[۱۱] (HuS) استفاده نمود. الگوریتم جستجوی شکار از رفتار گروهی حیواناتی نظیر شیرها، گرگها، دلفین‌ها در شکار الهام گرفته شده است. که توسط افتاده[۱۲] و همکارانش در سال ۲۰۱۰ ارائه شده است [۳۱]. اگر چه شکارچیان استراتژیهای گوناگونی در شکار دارند، اما وجه اشتراک آنها شکار گروهی می‌باشد. شکارچیان به دور شکار خود حلقه می‌زنند و به مرور زمان حلقه را تنگ‌تر می‌کنند. بعلاوه هر عضوی از گروه موقعیت خود را بر اساس موقعیت خودش و موقعیت سایر افراد گروه تصحیح می‌کند. در صورتی که شکار از حلقه شکارچیان بگریزد، آنها دوباره خود را سازماندهی می‌کنند تا شکار را محاصره کنند. حیوانات می‌توانند با انجام جستجوی گروهی شکارهای بزرگتر و سریع‌تر از خود را شکار کنند. آنها یک شکار را انتخاب می‌کنند و گروه شکارچیان به مرور به آن نزدیک می‌شود. تا اینکه بتواند آن را شکار کند. شکارچیان در مسیر باد قرار نمی‌گیرند تا مانع انتقال بوی خود به شکار و متعاقب آن فرار شکار شوند. در الگوریتم جستجوی شکار هر شکارچی نمایانگر یک راه حل برای مساله‌ای خاص می‌باشد. همانند حیوانات واقعی که گروهی شکار می‌کنند حیوانات مصنوعی نیز با یکدیگر در گرفتن شکار همکاری می‌کنند. منظور از شکار در اینجا همان نقطه بهینه است. موقعیت هر شکارچی در مقایسه

[۱۱] Hunting Search (HuS)

[۱۲] Oftadeh

با شکار، میزان شانس آن را در گرفتن شکار تعیین می‌کند. مقدار تابع هدف با توجه به مجموعه‌ای از مقادیر اختصاص داده شده به هر متغیر تصمیم مشخص می‌شود. در شکار گروهی (شکار حیواناتی چون شیر و گرگ)، شکارچیان می‌توانند شکار را ببینند یا حداقل بوی آن را استشمام کنند و موقعیت آن را تشخیص دهند. برای شبیه‌سازی فرایند شکار پویا در الگوریتم جستجوی شکار، شکارچیان مصنوعی به سمت رهبر دسته حرکت می‌کنند، رهبر شکارچیای است که دارای بهترین موقعیت در شرایط کنونی است. در واقع فرض می‌شود که رهبر نقطه بهینه را یافته و سایر اعضاء به سمت آن حرکت می‌کنند. در صورتی که یکی از آنها نقطه‌ای بهتر از رهبر کنونی را

بیابد، در مرحله بعد خود رهبر خواهد شد. حیوانات واقعی نه تنها به مرور زمان به سمت شکار حرکت می‌کنند بلکه موقعیت خود را نیز تصحیح می‌کنند. بنابراین در این الگوریتم، بعد از حرکت به سمنت رهبر، شکارچی موقعیت خود را بر اساس موقعیتن سایر اعضاء در گروه اصلاح می‌کند. بعلاوه در شکار گروهی حیوانات، اگر شکار از حلقه ایجاد شده خارج شود، شکارچیان با سازماندهی مجدد خود دوباره به دور آن حلقه می‌زنند. در الگوریتم جستجوی شکار این توانایی به شکارچیان داده شده است تا بتوانند خارج از حلقه را نیز جستجو کنند. در الگوریتم، در صورتی که موقعیت شکارچی و شکار خیلی به هم نزدیک باشد، گره متوجه خواهد شد که در تلاش‌های بعدی به نقطه بهینه خواهد رسید [۳۱].

## ۴. شبیه سازی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل دو فاز خوشه‌بندی و ردیابی است که در فاز ردیابی با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار به ردیابی اهداف متحرک می‌پردازد.

### ۱,۴ فاز خوشه‌بندی

در مرحله خوشه‌بندی گرههای حسگر درون خوشه‌هایی مجزا دسته-بندی می‌شوند. هر گره قبل از شروع رقابت برای سرخوشه شدن، به‌صورت مستقل زمان‌بند خود را طبق رابطه ۱ تنظیم می‌کند.

$$t(i) = \frac{E_m(i) - E_r(i)}{E_m(i)} \times T_{CH} \qquad (۱)$$

که $t(i)$ زمان‌بند گره حسگر iام، $T_{CH}$ حداکثر زمان اختصاص داده شده برای انتخاب سرخوشه می‌باشد. $E_m(i)$ و $E_r(i)$ به ترتیب حداکثر انرژی اولیه و انرژی باقی‌مانده گره iام هستند که منظور از انرژی باقیمانده، تفاضل انرژی اولیه گره از انرژی صرف شده برای دریافت یا ارسال داده می‌باشد. $E_r(i)$ مطابق رابطه ۲ محاسبه می-شود.

$$E_r(i) = E_m(i) - ((T_{start} * E_{start}) + \left(\frac{n}{RR_{code}}\right) * \left(E_{txElec} + E_{amp}\right)) \qquad (۲)$$

که $T_{start}$ زمان شروع ارسال داده، $E_{start}$ میزان انرژی لازم برای شروع ارسال داده، $\frac{n}{RR_{code}}$ زمان لازم برای انتقال n بیت داده، $E_{txElec}$ انرژی مورد استفاده در مدل الکترونیکی فرستنده برای دریافت یا ارسال یک بیت از بسته داده و $E_{amp}$ انرژی مصرفی تقویت کننده رادیویی است.

طبق رابطه ۱ گره با انرژی باقی‌مانده بیشتر شانس بیشتری برای سرخوشه شدن دارد چرا که زمان‌بندش عدد کوچکتری را نشان می-دهد، زمانی که زمان‌بند به پایان رسید، گره i خود را به عنوان سرخوشه معرفی می‌کند و یک پیغام آگهی را در محدوده انتقال خود همه پخشی می‌کند. پیغام H'id شامل شناسه گره (ID)، انرژی باقی‌مانده $E_r(i)$ و موقعیت مکانی $P(i)$ می‌باشد. اگر گره j این پیغام را دریافت کرد، از کاندید شدن برای سرخوشه خارج شده و زمان‌بند خود را لغو می‌کند و تا دور بعدی یک گره عادی خواهد بود. گره j لیست گرههایی که پیغام آگهی را از آنها دریافت کرده است را درون یک لیست با عنوان مجموعه سرخوشه‌های همسایه ذخیره می‌کند. گره j بایستی به عنوان عضو خوشه به یکی از سرخوشه‌های موجود در لیست بپیوندد لذا از بین مجموعه سرخوشه‌های همسایه خود، سرخوشه‌ای که انرژی بالایی بین تمام سرخوشه‌های موجود در لیست دارد و گرهj فاصله کمتری با او دارد وصل شده و یک پیغام اتصال را که حاوی شناسه (ID)، و موقعیت مکانی $P(i)$ خودش است را به سمت سرخوشه انتخابی می‌فرستد. بدین ترتیب خوشه‌ها شکل می‌گیرند.

### ۲,۴ فاز ردیابی

در فاز ردیابی با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار شش مرحله دارد که شامل:

**مرحله ۱- مقداردهی اولیه مساله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم:** پارامترهای الگوریتم جستجوی شکار در این مرحله تعیین می‌گردند که عبارتند از : اندازه گروه شکارچیان (تعداد گرههای حسگر در شکار گروهی HGS)، بیشترین تعداد حرکت به سمت رهبر (MML) و نرخ توجه به گروه شکار (HGCR) که بین مقادیر ۰ و ۱ تغییر می‌کند. پارامترهای HGCR و MML پارامترهایی هستند که برای بهبود موقعیت شکارچی (موقعیت قرارگیری گره) مورد استفاده قرار می‌گیرند. متغیر MML در شبیه سازی ۰,۰۵ در نظر گرفته شده است.

مرحله ۲- مقداردهی اولیه گروه شکارچیان (HG): بر اساس تعداد شکارچیان (HGS) ماتریس شکار گروهی با شناسه گرههای حسگر که به صورت تصادفی در محیط پخش شده‌اند پر می‌شود. مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و رهبر بر اساس مقدار تابع هدف شکارچیان

تعیین می‌گردد. تابع هدف، نزدیکترین فاصله به هدف در نظر گرفته شده است بدین ترتیب که موقعیت قرارگیری هدف از طریق GPS تعیین شده و همچنین هر گره موقعیت خود را از طریق GPS بدست می‌آورند و فاصله خود تا هدف را طبق رابطه ۳ محاسبه می-کنند گرهی که کمترین فاصله با هدف را داشته باشد به عنوان گره رهبر انتخاب می‌شود.

$$\mathbf{D_i} = \sqrt{(\mathbf{xt} - \mathbf{xi})^2 + (\mathbf{yt} - \mathbf{yi})^2 + (\mathbf{zt} - \mathbf{zi})^2} \quad (۳)$$

بطوریکه Di فاصله تا هدف، (xt, yt, zt) موقعیت هدف و (xi,yi,zi) موقعیت فیزیکی حسگر iام است. در این مرحله برای انتخاب گره با کمترین فاصله، بین گره‌ها بسته‌هایی برای اخذ موقعیت هدف ردو بدل می‌شود که انرژی مصرفی لازم برای تبادل این بسته‌ها طبق رابطه ۴ محاسبه خواهد شد.

$$E_t(i) = ((T_{start} * E_{start}) + \left(\left(\frac{n}{RR_{code}}\right) * \mathrm{E}_{rxElec}\right) + (n * E_{decBit})) + ((T_{start} * E_{start}) + \left(\frac{n}{RR_{code}}\right) * \left(\mathrm{E}_{txElec} + \mathrm{E}_{amp}\right)) \quad (۴)$$

**که** $E_t(i)$ انرژی لازم برای تبادل بسته‌های داده، $T_{start}$ زمان شروع ارسال داده، $E_{start}$ میزان انرژی لازم برای شروع ارسال داده، $\frac{n}{RR_{code}}$ زمان لازم برای انتقال n بیت داده، $\mathrm{E}_{rxElec}$ انرژی مورد استفاده در مدل الکترونیکی گیرنده برای دریافت یا ارسال یک بیت از بسته داده، $E_{decBit}$ انرژی لازم برای رمزگشایی بسته داده، $\mathrm{E}_{txElec}$ انرژی مورد استفاده در مدل الکترونیکی فرستنده برای دریافت یا ارسال یک بیت از بسته داده و $\mathrm{E}_{amp}$ انرژی مصرفی تقویت کننده رادیویی **است.**

**مرحله ۳- حرکت به سمت رهبر:** موقعیت جدید شکارچیان (بردار راه حل جدید) $\mathrm{x}' = \mathrm{x}'_1, \mathrm{x}'_2, \ldots . \mathrm{x}'_N$ با حرکت به سمت رهبر به صورت رابطه (۵) تولید می‌گردد در این مرحله هر گره موقعیتی که بایستی با تبعیت از رهبر شکار به آن برسد را تعیین می‌کند از آنجا که گرههای حسگر متحرک نیست به صورت فیزیکی نمی‌تواند در ان موقعیت جدید قرار بگیرد ولی برای انجام ردیابی بعد از تعیین موقعیت قرارگیری جدید، حسگر شعاع حسی خود را تا موقعیت جدید خود افزایش می‌دهد تا بتواند هدف را ردیابی کند.

$$(\mathrm{x}'_i, \mathrm{y}'_i, \mathrm{z}'_i) = (\mathrm{x_i}, \mathrm{y_i}, \mathrm{z_i}) + \mathrm{rand} \times \mathrm{M}ML \times ((x_i^l - x_i), (y_i^l - y_i), (z_i^l - z_i)) \quad (۵)$$

MML بیشترین تعداد حرکت به سمت رهبر می‌باشد. rand عدد تصادفی یکنواختی است که بین ۰،۱ تغییر می‌کند و $(\mathrm{x}'_i, \mathrm{y}'_i, \mathrm{z}'_i)$ مقدار موقعیت رهبر برای i امین گره حسگر می‌باشد (توجه شود که در الگوریتم زیر برای سادگی فرض شده است که تنها یک رهبر برای همه شکارچیان وجود دارد)

برای هر شکارچی، اگر حرکت به سمت رهبر موفقیت آمیز باشد، شکارچی در موقعیت جدید قرار می‌گیرد (گره حسگر شعاع خود را تا موقعیت جدید قرارگیری خود افزایش می‌دهد) در هر حال، در صورتی که حرکت ناموفق باشد (موقعیت قبلی بهتر از موقعیت فعلی باشد) به موقعیت قبلی باز خواهد گشت (حسگر شعاع حسی خود را تغییر نمی‌دهد). به این ترتیب ما به برخی مزایا دست خواهیم یافت. اول اینکه، شکارچی را با بدترین شکارچی در گروه مقایسه نخواهیم کرد. بنابراین ما به ضعیف‌ترین شکارچی اجازه جستجوی راه‌حل‌های دیگر را داده‌ایم. تا اینکه شاید بتوانند راه حل خود را بهبود ببخشند. دوما، برای جلوگیری از همگرایی زودرس، گروه شکارچی موقعیت کنونی خود را با موقعیت قبلی خود مقایسه می‌کند. بنابراین موقعیتهای خوب حذف نخواهند شد. مقدار MML برای مسائل مختلف متفاوت می‌باشد، که بستگی به تعداد تکرارها در هر دوره اجرای الگوریتم دارد که در مرحله ۵ تعریف می‌شود. MML برای تنظیم قابلیت انتفاع الگوریتم کاربرد دارد (هرچقدر مقدار آن بیشتر باشد الگوریتم سریعتر همگرا می‌شود). این پارامتر معمولا با توجه به بازه [۰،۰،۰۵] مقدار دهی می‌شود. برای روش پیشنهادی این مقدار برابر ۰،۰۵ در نظر گرفته شده است.

**مرحله ۴- اصلاح موقعیت- همکاری میان اعضاء:** در این مرحله همکاری میان اعضاء به منظور هدایت هرچه بهتر شکار انجام می‌پذیرد. بعد از حرکت به سمت رهبر، شکارچی (بر اساس موقعیت سایر شکارچیان (سایر گرههای حسگر) ) موقعیت دیگری را انتخاب می‌کند تا راه حل بهتری را بیابد. شکارچیان برای تصحیح موقعیت خود به این صورت عمل می‌کنند که موقعیت جدید شکارچی یا گره حسگر، $(\mathrm{x}', \mathrm{y}', \mathrm{z}') = \left(\mathrm{x}'_1, \mathrm{y}'_1, \mathrm{z}'_1\right), (\mathrm{x}'_2, \mathrm{y}'_2, \mathrm{z}'_2), \ldots . (\mathrm{x}'_N, \mathrm{y}'_N, \mathrm{z}'_N)$ از HG بر اساس توجه به شکار گروهی یا تصحیح موقعیت تولید می‌شود. برای مثال اولین تخصیص مقدار متغیر برای J امین شکارچی $(X_i^j, y_i^j, z_i^j)$ برای بردار جدید (موقعیت جدید شکارچی) می‌تواند از هر مقدار (یعنی اعداد حقیقی) که در HG (گروه شکارچیان) مشخص شده $((X_i^1, y_i^1, z_i^1), (X_i^2, y_i^2, z_i^2), \ldots \ldots (X_i^{HGS}, y_i^{HGS}, z_i^{HGS}))$ انتخاب شود یا با استفاده از پارامترهای HGCR (بین ۰،۱ انتخاب

می‌شود) تصحیح شود. بنابراین به هنگام سازی متغیرها به صورت رابطه ۶ انجام می‌پذیرد:

$$(x_i^{j'}, y_i^{j'}, y_i^{j'}) \leftarrow \begin{cases} (x_i^{j'}, y_i^{j'}, z_i^{j'}) \in \{(x_i^1, y_i^1, z_i^1), (x_i^2, y_i^2, z_i^2), \dots (x_i^{HGS}, y_i^{HGS}, z_i^{HGS})\} & HGCR \\ (x_i^{j'}, y_i^{j'}, z_i^{j'}) = (x_i^j, y_i^j, z_i^j) \pm rand * R_a & (1 - HGCR) \end{cases}$$

(۶)

i=۱,……N, j= ۱,…… HGS

پارامتر HGCR احتمال انتخاب مقداری از گروه شکارچی ذخیره شده در HG و (۱-HGCR) احتمال انجام تصحیح موقعیت است. برای مثال اگر HGCR=۰,۳ باشد یعنی الگوریتم جستجوی شکار با احتمال ۳۰٪ از جمعیت شکارچیان یا همان گرههای حسگر را در HG تخصیص می‌دهد و با احتمال ۷۰٪ موقعیت گرههای حسگر تصحیح می‌شود. در رابطه (۶) $R_a$ شعاع فاصله مجازی حسگر و rand مقدار یکنواخت بین ۰ و ۱ است. $R_a$ می‌تواند تصحیح شود یا در طی فرآیند بهینه سازی کاهش یابد برای محاسبه $R_a$ از رابطه ۷ استفاده می‌شود.

$$R_a(it) = R_{a_{min}}(\max(x_i, x_i, z_i) - \min(x_i, x_i, z_i))\exp(\frac{(R_{a_{min}}/R_{a_{max}})*it}{itm}) \quad (۷)$$

که it برابر تعداد تکرارها، $\max(x_i, x_i, z_i)$ بیشترین مقدار ممکن متغیر $(x_i, x_i, z_i)$ و $\min(x_i, x_i, z_i)$ کمترین مقدار ممکن متغیر $(x_i, x_i, z_i)$ و $R_{a_{min}}$ کمترین مقدار شعاع که برابر صفر و $R_{a_{max}}$ بیشترین مقدار شعاع که برابر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است و itm نیز بیشترین تعداد تکرار در فرآیند بهینه سازی است.

**مرحله ۵- سازماندهی مجدد گروه شکارچیان:** همچنان که فرآیند جستجو ادامه می‌یابد این امکان نیز وجود دارد که شکارچیان در بهینه محلی به دام بیافتند. در این صورت، شکارچیان باید سازماندهی مجدد یابند تا فرصت جدیدی برای یافتن نقطه بهینه بیابند. الگوریتم این کار را در دو شرایط مستقل انجام می‌دهد. در صورتی که اختلاف بین مقدار تابع هدف برای رهبر و بدترین شکارچی در گروه از مقدار از قبل تعیین شده‌ای ($\in_1$) کوچکتر باشد ( که در شبیه سازی $\in_1$ برابر ۰,۹در نظر گرفته شده است) و معیارهای خاتمه الگوریتم نیز ارضاء نشده باشند،( که شرط خاتمه نیز تعداد دویست بار اجرا در نظر گرفته شد) الگوریتم گروه شکارچیان را برای هر شکارچی سازماندهی مجدد می‌کند. عملیات سازماندهی مجدد گروه به این صورت انجام می‌شود که رهبر موقعیت خود را حفظ می‌کند و سایر اعضاء موقعیت خود را به صورت تصادفی توسط رابطه ۸ انتخاب می‌کنند.

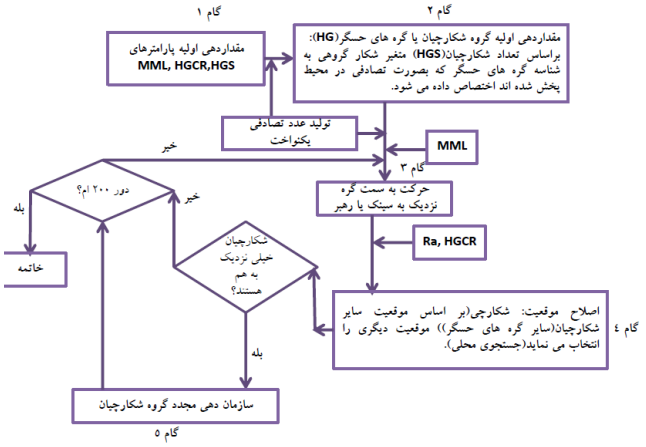
$$(x_i', y_i', z_i') = (x_i^l, y_i^l, z_i^l) \pm \text{rand} \times (\max(x_i, x_i, z_i) - \min(x_i, x_i, z_i)) \times a\exp(-\beta \times EN) \quad (۸)$$

که $(x_i^l, y_i^l, z_i^l)$ مقدار موقعیت رهبر برای i امین متغیر، rand عدد تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱، $\max(x_i, x_i, z_i)$ , $\min(x_i, x_i, z_i)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ممکن برای $(x_i, x_i, z_i)$می‌باشد.

EN تعداد دفعاتی که گروه به دام افتاده است را شمارش می‌کند. منظور از به دام افتادن گروه یعنی شرایطی پیش آمده که حسگرها قادر به ردیابی هدف نبودند یا اینکه هدف را گم کرده‌اند. همچنان که الگوریتم ادامه می‌یابد، راه حلها به سمت بهینه سراسری متمرکز می‌شوند. پارامترهای $\beta, \alpha$ مقادیر حقیقی مثبت می‌باشند که در روش پیشنهادی برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است که این پارامترها نرخ همگرایی سراسری الگوریتم را تعیین می‌کنند. به این ترتیب شکارچیان از چهار طریق سود می‌برند اول، به آنها فرصت دوباره‌ای برای جستجوی فضا داده می‌شود. دوم به علت اینکه از موقعیت قبلی هر شکارچی استفاده می‌شود، شکارچیان برازنده موقعیت خود را تصحیح می‌کنند و لازم نیست که همه فضای جستجو را کورکورانه جستجو نمایند. سوم به علت حفظ موقعیت رهبر بعد از هر دوره اجرای الگوریتم شکارچیان موقعیت بهترین راه حل را که تاکنون یافته‌اند گم نمی‌کنند. چهارم که مهمترین آن می‌باشد، هنگامی است که EN افزایش می‌یابد و شکارچیان فضای جستجو را به صورت محلی‌تری جستجو می‌کنند تا بتوانند نقطه بهینه را بدست آورند.

**مرحله ۶- کنترل تعداد تکرارهای الگوریتم:** زمانی که الگوریتم به معیار توقف یعنی دویست دور اجرای می‌رسد محاسبات تمام می‌شود در غیر اینصورت مراحل ۳ تا ۵ تکرار می‌شوند. در تکرار دویستم نزدیکترین موقعیت به هدف بدست می‌آید و گرههای حسگر داخل خوشه به ردیابی هدف می‌پردازند.

**مرحله ۷**- بعد از تعیین موقعیت هدف، اطلاعات مربوط به ردیابی از طریق گرههای حسگر سرخوشه که در رنج هدف هستند جمع آوری شده و به چاهک منتقل می‌کنند سپس گرههایی که از رنج هدف دور هستند به حالت خواب می‌روند تا در انرژی مصرفی صرفه جویی شود. چاهک با توجه به مسیر حرکت هدف و اطلاعات ارسال شده توسط گره‌ها به نزدیکترین گره سرخوشه که احتمال روئیت هدفش بالاست پیغام بیداری را می‌فرستد تا این گره سرخوشه، گرههای رنج خود را بیدار کند و اطلاعات مربوط به ردیابی را از دست ندهند. فلوچارت جستجوی شکار در شکل ۱ ارائه شده است.




**شکل ۱. فلوچارت جستجوی شکار**

## ۵. شبیه سازی روش پیشنهادی

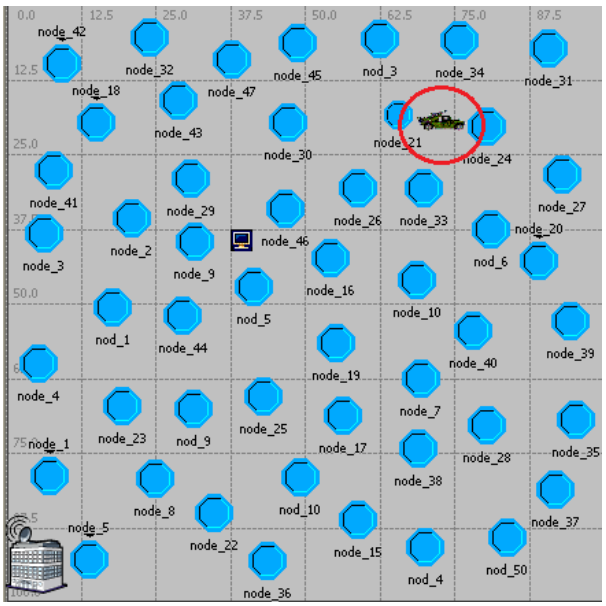
### ۱,۵ محیط شبیه سازی

در این مقاله برای شبیه سازی روش پیشنهادی و مقایسه آن با پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC از نرم افزار شبیه ساز ۱۳ OPNET نسخه ۱۱,۵ استفاده شده است پارامترهای شبیه سازی در جدول (۱) نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۲ در روش پیشنهادی ما همبندی شبکه را ۵۰ گره در نظر گرفته‌ایم که سه سناریو، که سناریو اول گره‌های حسگر به صورت تصادفی بر اساس پروتکل DCRRP با یک بعد و با محدوده ۳۶۰ درجه که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در محیط پراکنده شده‌اند و در سناریو دوم گره‌ها بر اساس پروتکل NODIC با یک بعد و با محدوده ۳۶۰ درجه که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در محیط پراکنده شده‌اند و در سناریو سوم گرهها به صورت تصادفی در محیط پخش شده‌اند که بعد از خوشه‌بندی با الگوریتم جستجوی شکار هدف را ردیابی می‌کنند پروتکل پیشنهادی را با نام HSA۱۴ نامگذاری نمودیم.

**جدول ۱. پارامترهای شبیه سازی**

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| روش پخش گرهها در محیط | تصادفی |
| اندازه محیط شبیه سازی | ۱۰۰۰m × ۱۰۰۰m× ۱۰۰۰m |
| نوع ارسال | CBR |
| اندازه بسته | ۱۰۲۴byte |
| مدل باتری | پیوسته |
| زمان شبیه سازی | ۲۰۰ ثانیه |
| پروتکل لایه mac | IEEE۸۰۲,۱۵,۴ |
| مقدار اولیه انرژی | ۴۰۰ ژول |
| تعداد چاهک | ۱ |
| تعداد گره‌ها | ۵۰ |
| برد انتقال رادیویی | ۱۰۰ متر |
| زمان ورود بسته( packet inter arrival time) | Constant |
| $\epsilon_1$ | ۰,۹ |
| پارامترهای $\beta, \alpha$ | ۱۰ |
| MML | ۰,۰۵ |
| $R_{a_{min}}$ کمترین مقدار شعاع | ۰ متر |
| $R_{a_{max}}$ بیشترین مقدار شعاع | ۱۰۰ متر |
| حداکثر تکرار | ۲۰۰ دور |
| تعداد هدف متحرک | ۱ |




**شکل۲. نمایی از توپولوژی شبکه مدل شبیه سازی شده**

[۱۳] Optimized Network Engineering Tool

[۱۴] Hunting Search Algorithm

## ۲,۵ معیارهای کارایی در روش پیشنهادی

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی از معیارهای زیر استفاده می‌شود.

**انرژی مصرفی:** انرژی مصرفی برابر است با مجموع انرژی استفاده شده توسط گرههای درون شبکه که انرژی استفاده شده برای یک گره معادل مجموع انرژی استفاده شده برای ارتباطات، شامل انتقال و انتقال و انتظار می‌باشد.

**تأخیر انتها به انتها:** عبارت است از زمانی که طول می‌کشد تا یک بسته داده از فرستنده به گیرنده انتقال داده شود. برای محاسبه میانگین تأخیر انتها به انتها، تأخیر انتها به انتهای تمام بسته‌ها که توسط گیرندگان دریافت می‌شود محاسبه می‌شود و میانگین آنها محاسبه می‌شود.

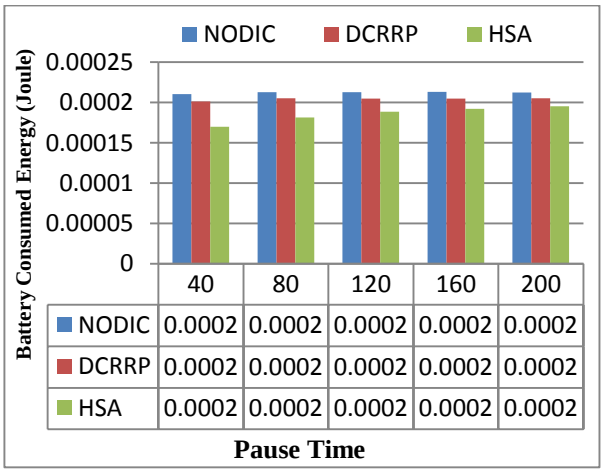
**تأخیر دسترسی به رسانه:** برابرمدت زمان بین دریافت بسته توسط لایه MAC تا زمانی که بطور کامل بر روی رسانه بی‌سیم قرار داده شود. دلیل بررسی تأخیر دسترسی به رسانه این است که بسیاری از کاربردهای چند رسانه‌ای دارای محدودیت تأخیر هستند و بعد از این زمان داده مورد نظر کاربری ندارد.

گذردهی: به عنوان کل بسته‌های دریافت شده توسط گیرنده‌ها تقسیم بر زمان بین دریافت اولین بسته و آخرین بسته تعریف می‌شود. در واقع برابر با تقسیم اندازه فایل در آن زمان، در واحد مگابیت بر ثانیه، می‌باشد.

**نرخ تحویل با موفقیت بسته داده:** تعداد بسته‌های داده که بدون خطا دست چاهک رسیده را نشان می‌دهد.

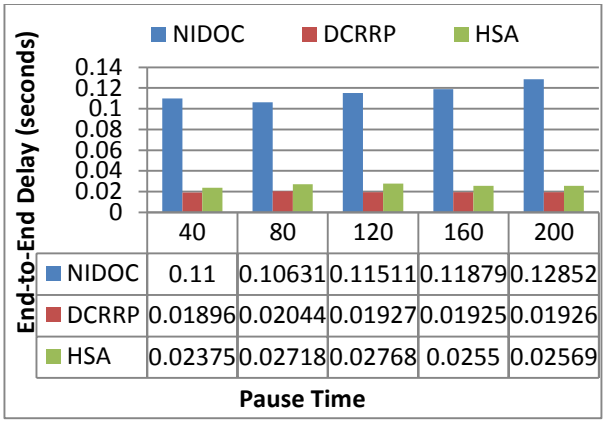
## ۳,۵ نتایج شبیه سازی

نتایج مقایسه میانگین انرژی مصرفی باتری گره‌های شبکه برای سناریو الگوریتم پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شکل ۳ نمایش داده شده است. محور عمودی انرژی مصرفی و محور افقی زمان شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. انرژی مصرفی برابر است با مجموع انرژی استفاده شده توسط گره‌های حسگر برای ارتباطات می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود NODIC دارای مصرف انرژی بیشتری می‌باشد. در پروتکل NODIC در شرایطی که شبکه به سمت انتخاب سرخوشه بر اساس جایگاه گره سوئیچ کرده، گره‌ای که فاصله کمتر تا چاهک دارد و انرژی باقیمانده‌اش کمتر از حد آستانه نباشد سرخوشه می‌شود، در غیر این‌صورت اگر گره‌ای با این ویژگی موجود نبود، این الگوریتم، خوشه‌بندی مجدد را انجام نمی‌دهد لذا ممکن است سرخوشه‌های انتخابی در دورهای بعدی انرژی کمتر داشته باشد لذا آنها را سرخوشه انتخاب کند و بدلیل مصرف انرژی بالا در سرخوشه‌ها این گره‌ها انرژی خود را سریع از دست بدهند و توپولوژی شبکه بهم بریزد همچنین در این پروتکل گره‌های سرخوشه اطلاعات داده جمع آوری شده را مستقیماً به گره سینک ارسال می‌کنند و گره‌هایی که فاصله زیاد با چاهک دارند در صورت داشتن داده زیاد به چاهک اطلاع می‌دهند تا به سمت ناحیه پرتراکم حرکت کند. در پروتکل DCRRP با استفاده از خوشه‌بندی و ردیابی چاهک گرهی به‌عنوان سرخوشه برای ارسال و انتقال داده استفاده می‌شود که انرژی بیشتر و فاصله تا چاهک کمتری را داشته باشند. از طرفی با توجه به اینکه گره‌های عضو نیز با توجه به فاصله‌شان به گره سرخوشه می‌پیوندند لذا برای ارسال داده از گره عضو به سرخوشه نیز نیازی نیست انرژی مصرفی زیادی صرف شود. در روش HSA با استفاده از دوره خواب و بیداری گرههای حسگر نزدیک هدف در انرژی مصرفی صرفه جویی می‌شود.




**شکل ۳. میانگین انرژی مصرفی شبکه**

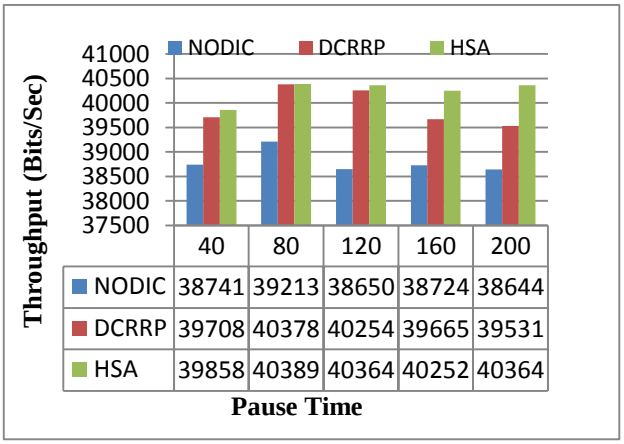
تأخیر انتها به انتها برای سناریوهای پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شکل ۴ مقایسه شده است. محور عمودی تأخیر انتها به انتها و محور افقی زمان شبیه سازی است. چنانکه مشاهده می‌شود در NODIC در همان دورهای ابتدایی ممکن است انرژی گره‌های سرخوشه کاهش یابد و نتواند اطلاعات حس شده را قبل از رسیدن چاهک به سمت این سرخوشه انتقال دهد، لذا تأخیر زیاد می‌شود. اما در پروتکل DCRRP چون در خوشه‌بندی سرخوشه‌ها از بین گره‌ها با انرژی بیشتر و فاصله کمتر به چاهک متحرک انتخاب می‌شوند و اعضاء خوشه نیز بر حسب فاصله به سرخوشه می‌پیوندند و بدلیل تحرک چاهک، لذا تأخیر انتها به انتها کاهش یافته است. در روش پیشنهادی HSA نیز بدلیل اینکه معیار انرژی گره‌ها را لحاظ کرده لذا در طول فرآیند انتقال داده به چاهک گره‌ها خاموش نمی‌شوند و تاخیر نسبت به NODIC کاهش می‌یابد ولی نسبت به DCRRP تاخیر بیشتری برای ارسال داده دارد چون چاهک در روش پیشنهادی متحرک نیست.




| | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| NIDOC | 0.11 | 0.10631 | 0.11511 | 0.11879 | 0.12852 |
| DCRRP | 0.01896 | 0.02044 | 0.01927 | 0.01925 | 0.01926 |
| HSA | 0.02375 | 0.02718 | 0.02768 | 0.0255 | 0.02569 |

**شکل۴. تأخیر انتها به انتها**

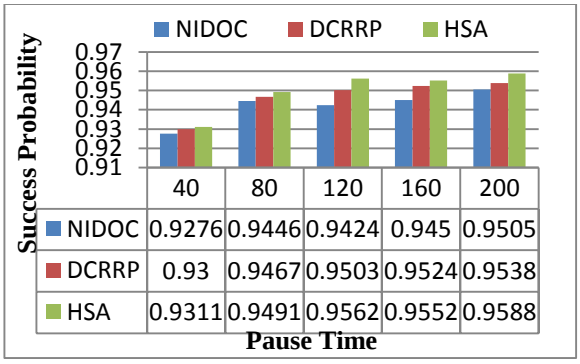
نتایج مقایسه نرخ گذردهی برای سناریوهای پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شکل ۵ نمایش داده شده است. محور افقی زمان شبیه‌سازی و محور عمودی تعداد بیت های داده تحویل داده شده در زمان یا نرخ گذردهی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ پروتکلNODIC نسبت به روش پیشنهادی HSA تعداد بسته‌هایی که با موفقیت سینک تحویل داده شده نسبت به کل بسته‌های انتقال داده شده توسط گره‌های حسگر بدلیل ایجاد ازدحام و خاموش شدن احتمالی گره کم است. در صورتی‌که در روش DCRRP بدلیل استفاده از چاهک متحرک و ارسال داده از طریق سرخوشه‌ها با فاصله کمتر به چاهک نرخ گذردهی نسبت به NODIC افزایش می‌یابد. در روش پیشنهادی بدلیل استفاده از دوره خواب و بیداری گره‌های حسگر و استفاده ار الگوریتم جستجوی شکار مسیر پیدا شده به چاهک تا انتهای فاز انتقال داده تغییر نمی-کند. بنابراین تعداد بسته تحویل داده شده به گره سینک در روش پیشنهادی بیشتر خواهد بود.




| | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| NODIC | 38741 | 39213 | 38650 | 38724 | 38644 |
| DCRRP | 39708 | 40378 | 40254 | 39665 | 39531 |
| HSA | 39858 | 40389 | 40364 | 40252 | 40364 |

**شکل۵. نرخ گذردهی**

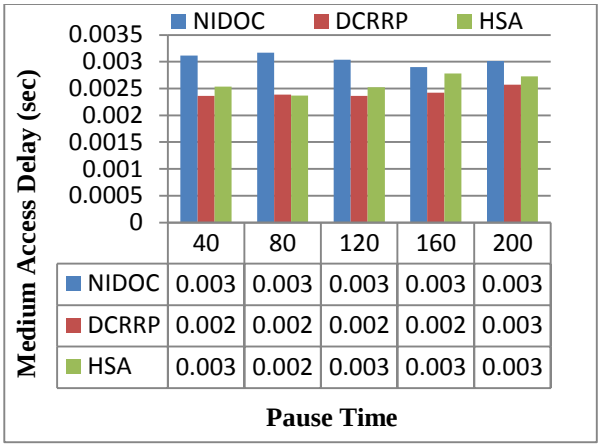
نسبت تحویل با موفقیت داده برای سناریوهای پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شکل ۶ مقایسه شده است. محور افقی زمان شبیه‌سازی و محور عمودی نسبت تحویل با موفقیت داده را نشان می‌دهد. نسبت با توجه به شکل ۶ پروتکلNODIC نسبت به روش پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP نسبت تحویل با موفقیت داده کمتری دارد زیرا ممکن است پروتکلNODIC موقع ارسال تعداد بیت‌هایی که دچار خطا شده‌اند زیاد شده و نسبت سیگنال به نویز کاهش یابد. همچنین ممکن است سیگنال اطلاعات ارسال شده توسط پروتکلNODIC در اثر ازدحام و ایجاد اغتشاش از بین برود و احتمال نویز بالا برود، لذا کیفیت داده‌های ارسالی کاهش یابد. در روش پیشنهادی HSA داده از طریق الگوریتم جستجوی شکار و تعیین خواب و بیداری گره‌ها تنها داده مربوط به گره‌های در محدوده هدف ارسال می‌شود لذا احتمال وقوع اغتشاش کاهش می‌یابد و نسبت تحویل با موفقیت داده افزایش می‌یابد.




| | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| NIDOC | 0.9276 | 0.9446 | 0.9424 | 0.945 | 0.9505 |
| DCRRP | 0.93 | 0.9467 | 0.9503 | 0.9524 | 0.9538 |
| HSA | 0.9311 | 0.9491 | 0.9562 | 0.9552 | 0.9588 |

**شکل ۶. نسبت تحویل با موفقیت داده**

نتایج مقایسه تأخیر دسترسی به رسانه برای برای سناریوهای پیشنهادی HSA و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۷ چنانکه مشاهده می‌شود در پروتکل NODIC تأخیر دسترسی به رسانه بدلیل اغتشاش و از دست رفتن داده افزایش می‌یابد چرا که برخی از گرههای شبکه ممکن است در اثر رخ دادن خطای سخت افزاری یا اتمام باتری خاموش شود و عمل انتقال اطلاعات به گره چاهک تکمیل نگردد و مجدد بخواهد از طریق رسانه داده را ارسال کند لذا تاخیر دسترسی به رسانه افزایش می‌یابد. ولی در روش پیشنهادی DCRRP بدلیل انتخاب مسیر با پایداری بالا که حاوی گرههایی با انرژی بالا هست و از طرفی بدلیل تحرک چاهک دسترسی به رسانه سریعتر انجام شده و تاخیر دسترسی کاهش می‌یابد. در روش پیشنهادی نیز بدلیل اینکه تنها داده مربوط به گرههای نزدیک هدف نیاز به دسترسی به رسانه دارد لذا تاخیر دسترسی روش پیشنهادی نسبت به NODIC کمتر خواهد بود.




| | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| NIDOC | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| DCRRP | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| HSA | 0.003 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |

**شکل۷. تاخیر دسترسی به رسانه**

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم جدیدی پیشنهاد شده است که به ردیابی اهداف متحرک در شبکه های حسگر بی سیم با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار می‌پردازد تا بتواند مشکل مصرف انرژی را بهبود بخشد. برای کاهش مصرف انرژی و بیشینه کردن زمان عمر شبکه‌های حسگر در کاربردهای رد یابی یکی از روش های مناسب کاهش تعداد گره های مشارکت کننده در ردیابی و در نتیجه تنظیم زمان خواب گره هاست که برای این منظور از راهکار تخمین موقعیت قرارگیری هدف استفاده شد و با استفاده از الگوریتم جستجوی شکار دقت تخمین موقعیت قرارگیری هدف افزایش یافت. در روش پیشنهادی با استفاده از دوره خواب و بیداری گره‌هایی که در فاصله دورتری از هدف قرار دادن را به حالت خواب می‌برد به این ترتیب انرژی مصرفی شبکه را به حداقل می‌رساند همچنین برای بهبود بهتر مصرف انرژی گرههای حسگر جهت دار استفاده شد که قادر به تنظیم شعاع حسی خود هستند بطوریکه با دور شدن هدف شعاع را افزایش می‌دهند تا مسیر حرکت هدف را از دست ندهند و با نزدیک شدن هدف شعاع حسی خود را برای کاهش مصرف انرژی کم می‌کنند. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC در شبیه ساز OPNET شبیه سازی شدند نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای ویژگی های شبکه مانند بهبود مصرف انرژی، نرخ گذردهی، نسبت تحویل با موفقیت داده نسبت به پروتکل DCRRP و پروتکل NODIC بهتر عمل می‌کند.

## مراجع


[۱] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (۲۰۰۲). Wireless sensor networks: a survey. Computer networks,۳۸(٤), ۳۹۳-٤۲۲.

[۲] Khelladi, L., Djenouri, D., Rossi, M., & Badache, N. (۲۰۱۷). Efficient on-demand multi-node charging techniques for wireless sensor networks. Computer Communications, ۱۰۱, ٤٤-٥٦.

[۳] Moon, S. H., Park, S., & Han, S. J. (۲۰۱۷). Energy efficient data collection in sink-centric wireless sensor networks: A cluster-ring approach. Computer Communications, ۱۰۱, ۱۲-۲٥.

[٤] Zhao, L., Chen, Z., & Sun, G. (۲۰۱٤). Dynamic Cluster-based Routing for Wireless Sensor Networks. JNW, ۹(۱۱), ۲۹٥۱-۲۹٥٦.

[٥] Onel, T., Ersoy, C., & Deliç, H. (۲۰۰٦, September). Information content-based sensor selection for collaborative target tracking. In Signal Processing Conference, ۲۰۰٦ ۱٤th European (pp. ۱-٥). IEEE.

[٦] Liu, J., Chu, M., & Reich, J. E. (۲۰۰۷). Multitarget tracking in distributed sensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, ۲٤(۳), ۳٦-٤٦.

[۷] Zhao, F., Shin, J., & Reich, J. (۲۰۰۲). Information-driven dynamic sensor collaboration. IEEE Signal processing magazine, ۱۹(۲), ٦۱-۷۲.

[۸] Scheunert, U., Cramer, H., Fardi, B., & Wanielik, G. (۲۰۰٤, June). Multi sensor based tracking of pedestrians: a survey of suitable movement models. In Intelligent Vehicles Symposium, ۲۰۰٤ IEEE (pp. ۷۷٤-۷۷۸). IEEE.

[۹] Brooks, R. R., Ramanathan, P., & Sayeed, A. M. (۲۰۰۳). Distributed target classification and tracking in sensor networks. Proceedings of the IEEE, ۹۱(۸), ۱۱٦۳-۱۱۷۱.

[۱۰] Suganya, S. (۲۰۰۸, July). A cluster-based approach for collaborative target tracking in wireless sensor networks. In Emerging Trends in Engineering and Technology, ۲۰۰۸. ICETET'۰۸. First International Conference on (pp. ۲۷٦-۲۸۱). IEEE.

[۱۱] Wang, Z., Li, H., Shen, X., Sun, X., & Wang, Z. (۲۰۰۸, April). Tracking and predicting moving targets in hierarchical sensor networks. In Networking, Sensing and Control, ۲۰۰۸. ICNSC ۲۰۰۸. IEEE International Conference on (pp. ۱۱٦۹-۱۱۷۳). IEEE.

[۱۲] Balasubramanian, S., Jayaweera, S. K., & Namuduri, K. (۲۰۰٥). Energy-aware, collaborative tracking with ad hoc wireless sensor networks.

[۱۳] Li, D., Wong, K. D., Hu, Y. H., & Sayeed, A. M. (۲۰۰۲). Detection, classification, and tracking of targets. IEEE signal processing magazine, ۱۹(۲), ۱۷-۲۹.

[۱٤] Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (۲۰۰٥, October). Analysis of a prediction-based mobility adaptive tracking algorithm. In Broadband Networks, ۲۰۰٥. BroadNets ۲۰۰٥. ۲nd International Conference on (pp. ۷٥۳-۷٦۰). IEEE.

[۱٥] Kam, C., & Hodgkiss, W. S. (۲۰۰٦, October). Distributed target tracking in a wireless sensor network. In Signals, Systems and Computers, ۲۰۰٦. ACSSC'۰٦. Fortieth Asilomar Conference on (pp. ۱۹۹۹-۲۰۰۳). IEEE.

[۱۶] An, C., An, Y. K., Yoo, S. M., & Wells, B. E. (۲۰۱۸). Efficient data association to targets for tracking in passive wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, ۷۵, ۱۹-۳۲.

[۱۷] Zahedi, Z. M., Akbari, R., Shokouhifar, M., Safaei, F., & Jalali, A. (۲۰۱۶). Swarm intelligence based fuzzy routing protocol for clustered wireless sensor networks. Expert Systems with Applications, ۵۵, ۳۱۳-۳۲۸.

[۱۸] Sabet, M., & Naji, H. R. (۲۰۱۵). A decentralized energy efficient hierarchical cluster-based routing algorithm for wireless sensor networks. AEU-International Journal of Electronics and Communications, ۶۹(۵), ۷۹۰-۷۹۹.

[۱۹] Gorgich, S., & Tabatabaei, S. (۲۰۲۱). Proposing an Energy-Aware Routing Protocol by Using Fish Swarm Optimization Algorithm in WSN (Wireless Sensor Networks). Wireless Personal Communications, ۱-۲۱.

[۲۰] Fanian, F., & Rafsanjani, M. K. (۲۰۲۰). A new fuzzy multi-hop clustering protocol with automatic rule tuning for wireless sensor networks. Applied Soft Computing, ۸۹, ۱۰۶۱۱۵.

[۲۱] Maurya, S., Jain, V. K., & Chowdhury, D. R. (۲۰۱۹). Delay aware energy efficient reliable routing for data transmission in heterogeneous mobile sink wireless sensor network. Journal of Network and Computer Applications, ۱۴۴, ۱۱۸-۱۳۷.

[۲۲] Ebrahimi, S., & Tabatabaei, S. (۲۰۲۰). Using Clustering via Soccer League Competition Algorithm for Optimizing Power Consumption in WSNs (Wireless Sensor Networks). Wireless Personal Communications, ۱۱۳(۴), ۲۳۸۷-۲۴۰۲.

[۲۳] Ragavan, P. S., & Ramasamy, K. (۲۰۲۰). Software defined networking approach based efficient routing in multihop and relay surveillance using Lion Optimization algorithm. Computer Communications, ۱۵۰, ۷۶۴-۷۷۰.

[۲۴] Abasıkeleş-Turgut, İ., & Hafif, O. G. (۲۰۱۶). NODIC: a novel distributed clustering routing protocol in WSNs by using a time-HSAring approach for CH election. Wireless Networks, ۲۲(۳), ۱۰۲۳-۱۰۳۴.

[۲۵] Tabatabaei, S., & Rigi, A. M. (۲۰۱۹). Reliable routing algorithm based on clustering and mobile sink in wireless sensor networks. Wireless Personal Communications, ۱۰۸(۴), ۲۵۴۱-۲۵۵۸.

[۲۶] Zhang, Y., Cao, L., Yue, Y., Cai, Y., & Hang, B. (۲۰۲۱). A Novel Coverage Optimization Strategy Based on Grey Wolf Algorithm Optimized by Simulated Annealing for Wireless Sensor Networks. Computational Intelligence and Neuroscience, ۲۰۲۱.

[۲۷] Prithi, S., & Sumathi, S. (۲۰۲۱). Automata Based Hybrid PSO–GWO Algorithm for Secured Energy Efficient Optimal Routing in Wireless Sensor Network. Wireless Personal Communications, ۱۱۷(۲), ۵۴۵-۵۵۹.

[۲۸] Gupta, S., Rana, A., & Kansal, V. (۲۰۲۰). Optimization in wireless sensor network using soft computing. In Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence and Informatics (pp. ۸۰۱-۸۱۰). Springer, Singapore.

[۳۱] Oftadeh, R., Mahjoob, M. J., & HSAriatpanahi, M. (۲۰۱۰). A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: hunting search. Computers & Mathematics with Applications, ۶۰(۷), ۲۰۸۷-۲۰۹۸.

[۲۹] بارخدا، سیدوفا، شیخی، همت، و محمدی، سودابه (۱۳۹۹). بهبود الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسئله جایگذاری نودها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم گرید سه‌بعدی. دوفصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، ۴۵(۱۲)، ۲۱۲-۲۰۱.

[۳۰] محمدی، زهرا، سلیمان پور مقدم، محدثه، عباسی مقدم، داریوش، و طالبی، سیامک (۱۳۹۹). بیشینه‌سازی طول عمر شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی با جایگذاری بهینه گره‌های رله. دوفصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، ۴۵(۱۲)، ۱۳۰-۱۱۵.

.