بهینه سازی توأمان انرژی و تأخیر در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم

داود غرویان[1] امیر راهدار[2]

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
d_gharavian@sbu.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
a_rahdar@sbu.ac.ir

چکیده: **شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل ده‌ها یا صدها حسگر هستند که بر اساس کاربرد مورد نظر در محیط پخش می‌شوند و به جمع آوری اطلاعات می‌پردازند. در بسیاری از کاربردها، دریافت سریع اطلاعات دارای اهمیت بسیاری است . همچنین، ارسال اطلاعات بیشترین مقدار انرژی را مصرف می‌کند و با توجه به محدود بودن انرژی در نظر گرفته شده، کنترل مصرف انرژی، چالشی مهم محسوب می‌شود. میزان مصرف انرژی و ایجاد تأخیر در انتقال اطلاعات از مبدا به مقصد از مهم‌ترین مشکلات موجود در شبکه حسگر بی‌سیم است. در این تحقیق، مصرف انرژی و تأخیر به صورت دو پارامتر مستقل و همچنین توأمان با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در شبکه حسگر بی‌سیم بهینه شده است. نتایج نشان می‌دهد بهینه‌سازی توأمان دو پارامتر مصرف انرژی و تأخیر می‌تواند در شبکه‌های حسگری، موثر باشد و طول عمر شبکه و همچنین کارایی آن را افزایش دهد. برمبنای نتایج، با افزایش تکرار الگوریتم بهینه‌سازی، نتایج الگوریتم فراابتکاری پشنهادی، در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات، نزدیکتر به نتایج الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر است.**

واژه‌های کلیدی: **حسگر بی‌سیم، شبکه حسگر بی‌سیم، بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه یابی، مصرف انرژی شبکه، تأخیر شبکه**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۳/۴
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۷/۱
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر داود غرویان
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – بزرگراه شهید چمران - خیابان یمن - میدان شهید شهریاری - بلوار دانشجو – دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده‌ی مهندسی برق، گروه مخابرات

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت فنّاوری مخابرات و صنعت قطعات الکترونیکی خرد منجر به ساخت حسگرهای کوچک و ارزان قیمت شده است که از طریق شبکه بی‌سیم با هم در ارتباط هستند. گره‌های حسگر موجود در شبکه حسگر بی‌سیم با چالش‌های مختلفی از قبیل انرژی محدود، قدرت پردازش پایین و حافظه کم روبرو هستند و استفاده بهینه از تمامی عناصر این شبکه، خصوصاً منبع تغذیه حسگر موضوع مهمی است.

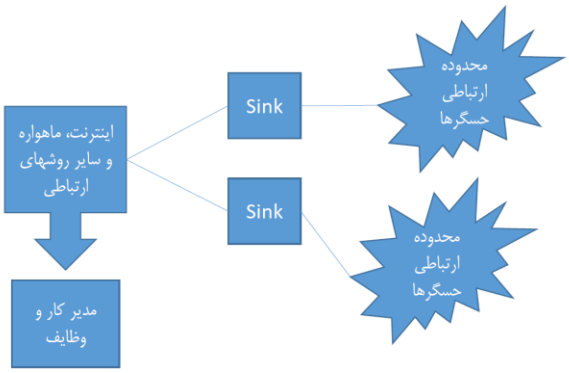
امروزه به طور گسترده، از اتصالات داخلی برای اندازه گیری متغیرهای مختلف محیط استفاده می‌شود. شبکه حسگر بی‌سیم نوعی از این اتصالات داخلی هست که روشی کلیدی برای بدست آوردن اطلاعات از مکان‌های کوچک و بزرگ ارائه می‌دهد. ادغام حسگری و ارتباط بی‌سیم منجر به ظهور شبکه‌های حسگر بی‌سیم شده است. بر این اساس انتظار می رود استفاده تجاری از شبکه های حسگر بی‌سیم به طور چشم‌گیری افزایش یابد.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، به طور عمومی یک حسگر از چهار زیرسیستم تشکیل شده است:

۱- زیرسیستم حس‌کننده به منظور جمع‌آوری اطلاعات محیطی
۲- زیرسیستم پردازش و ذخیره کننده اولیه بر روی حسگر
۳- زیرسیستم ارسال بی‌سیم به منظور انتقال اطلاعات
۴- منبع تغذیه محدود

در شبکه‌های حسگری بی‌سیم معمولا ایستگاه پایه، سینک[1] نامیده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم، عدم نیاز به زیرساخت است. از لحاظ تئوری امکان گسترش این شبکه‌ها در ابعاد وسیع وجود دارد، ولی در عمل با توجه به محدودیت تعداد گره‌های سینک و مصرف انرژی گره‌ها برای ارسال داده، این شبکه‌ها با چالش طول عمر مواجه هستند. در برخی از کاربردها، به خصوص در کاربردهایی که محدوده تحت نظر گره‌های حسگر، وسیع است و نیاز به دریافت سریع داده‌های حس‌شده وجود دارد، تأخیر در ارسال داده می‌تواند باعث مشکل شود. در برخی دیگر از کاربردهای شبکه حسگر بی‌سیم، کاربر نیاز به دریافت داده‌های بدون خطا و کامل دارد. با توجه به موارد ذکر شده انتخاب مسیریاب مناسب برای ارسال داده‌های حس‌شده، بر اساس کاربرد معنی پیدا می‌کند. لذا مسیریابی بهینه در شبکه حسگر بی‌سیم منوط به هدف در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): اجزای یک شبکه حسگری بی‌سیم

معمولاً بیشترین انرژی موجود در هر حسگر توسط زیر سیستم ارسال بی‌سیم مصرف می‌شود. عموماً مقدار انرژی حسگرها محدود بوده و در نتیجه میزان انرژی موجود در کل شبکه محدود است. همچنین نیاز به مسیریابی بهینه برای حفظ انرژی شبکه یکی از نکات مهم در شبکه حسگر بی‌سیم است. یکی از اهداف اصلی طراحان این شبکه‌ها کاهش توان مصرفی در شبکه های حسگر می باشد. همچنین پوشش شبکه، تأخیر و آرایش بین گره های حسگر برای داشتن کیفیت سرویس (QoS) مناسب از اهمیت بالایی برخوردار هستند [۱] [۲]. از جمله ویژگی‌هایی که در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم مورد توجه قرار می‌گیرد، آگاه بودن از انرژی، تحمل پذیر بودن در برابر خطا، تأخیر در ارسال داده و مقیاس پذیری است. آگاه بودن از انرژی به این معنی است که با اطلاع از مقدار انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر شبکه و انتخاب مسیرهای جایگزین از مرگ گره‌ها جلوگیری شده و در نتیجه طول عمر شبکه افزایش می‌یابد [۴].

همچنین در برخی از کاربردها نیاز به ارسال سریع و با تأخیر کم داده‌ها وجود دارد. در این حالت بهینه‌سازی تأخیر که وابسته به پیشنهاد مسیر در شبکه حسگر بی‌سیم است بسیار مهم خواهد بود. یکی از مهمترین عوامل تأخیر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تعداد پرش‌های لازم برای انتقال داده از گره مبدأ تا است). تعدد گره‌های مشارکت کننده در انتقال یک بستهٔ فرضی اطلاعات، سبب توزیع مناسب‌تر مصرف انرژی در گره‌های مختلف می‌شود، هر چند که می‌تواند این امر تأخیر در شبکه را افزایش دهد. معمولاً بهینه‌سازی یک پارامتر موجب افزایش هزینه نسبت به پارامتر دیگر می‌شود.

در این تحقیق از ایده‌ی بهینه‌سازی توامان استفاده شده است، به گونه‌ای که مقدار تابع هزینه نسبت به هر دو پارامتر انرژی و تاخیر به کمترین مقدار ممکن خود برسد. بدیهی است این بهینه‌سازی توأمان نسبت به بهینه‌سازی تک تک پارامترهای انرژی و تأخیر از بهینه‌گی کمتری برخوردار است. بنابراین می‌توان گفت در این تحقیق به جای بهینه‌سازی پارامترهای انرژی و تأخیر، به زیربهینه‌سازی[2] این پارامترها اقدام شده است و به پاسخی کمتر از ایده‌آل رضایت داده شده است. ابزار مورد استفاده برای زیربهینه‌سازی این پارامترها در این تحقیق، الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد. این الگوریتم‌ها یکی از انواع

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی بوده که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت استفاده در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند.

عملکرد اساسی یک الگوریتم مسیریابی، انتخاب بهترین مسیر از مجموعه مسیرهای در دسترس است. این مسیر بر اساس معیارهایی که ادامه ذکر خواهد شد و بسته به کاربرد، کارآمد خواهد بود. یکی از این معیارها، افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. افزایش طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم این طور تحقق می‌یابد که مصرف انرژی گره‌های حسگر عادلانه می‌شود [۳].

در این تحقیق مقایسه‌ای بین عملکرد روش فراابتکاری گرگ‌های خاکستری با سایر روش‌ها نظیر الگوریتم ازدحام ذرات، مسیریابی بهترین مسیر و مسیریابی تصادفی صورت خواهد پذیرفت.

در ادامه، ابتدا به بررسی تحقیقات مرتبط پیشین و مفاهیم و روش‌های استفاده شده در آن‌ها پرداخته می‌شود. سپس روش‌های فرا ابتکاری که الگوریتم گرگ‌های خاکستری یکی از آن‌ها است، توضیح داده می‌شود. در پایان مصرف انرژی و تاخیر به دو شکل جداگانه و توامان در چند سناریو متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد الگوریتم گرگ‌های خاکستری نسبت به سایر روش‌های متداول مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- تحقیقات پیشین

یکی از چالش‌های مهم در شبکه حسگر بی سیم نحوه مسیریابی و انتقال اطلاعات جمع‌آوری شده است. به دلیل اینکه این نوع شبکه‌ها از نظر میزان انرژی در دسترس و منابع پردازشی محدودیت دارند، نمی‌توان از روش‌های مطرح‌شده برای سایر شبکه‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده کرد. شبکه‌های حسگر بی‌سیم توانایی نظارت و حس محیط پیرامون خود و ارسال داده‌های حس شده به یک ایستگاه اصلی را دارند. محدود بودن انرژی موجود در گره‌ها، بقای شبکه را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد، از این رو تاکنون روش‌های متنوعی به منظور کاهش مصرف انرژی گره‌های حسگر و در حالت کلی شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است.

بصورت کلی می‌توان پروتکل‌های مسیریابی مورد استفاده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به ۵ دسته زیر تقسیم کرد:

۱- مبتنی برچند مسیره[۳]
۲- مبتنی بر پرس و جو[۴]
۳- مبتنی بر کیفیت سرویس[۵]
۴- مبتنی بر مذاکره[۶]
۵- مبتنی بر انسجام[۷]

الگوریتم‌های مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم بر اساس معیارهای محدودیت مکانی، زمانی، پردازشی، هزینه‌ای و کاربردی طراحی می‌شوند.

در ادامه به چند روش پرکاربرد برای کاهش مصرف انرژی و تأخیر که در برخی از پروتکل‌های مسیریابی استفاده شده‌اند، اشاره می‌شود.

۲-۱- روش برنامه‌ریزی خواب[۸]

هدف اصلی از کنترل برنامه‌ریزی خواب، خاموش کردن موقت گره به منظور کاهش مصرف انرژی است. در نتیجه با گسترش زمان‌های بیکاری گره، بهره‌وری انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم افزایش می‌یابد.

در یکی از روش‌های پیشنهاد شده، گره‌های حاوی داده به طور منظم تعداد گره‌های فعال در شبکه را کنترل می‌کنند و زمانی که تعداد گره‌های فعال از حد آستانه بالاتر رفت، به حالت خواب می‌روند. با تنظیم زمان خواب گره و توجه به تعداد گره‌های فعال، تعداد پرش‌های لازم برای ارسال داده از گره حس‌کننده تا سینک کمتر می‌شود و در نتیجه تأخیر در ارسال داده کاهش می‌یابد [۱]. روش کنترل خواب گره‌ها بر اساس انرژی باقی مانده نیز روشی مناسب برای کاهش مصرف انرژی است. در این روش با کاهش انرژی برخی از گره‌ها از مقدار آستانه، این گره‌ها به حالت خواب می‌روند. در نتیجه سطح انرژی باقیمانده در گره‌های شبکه به هم نزدیک می‌شود و طول عمر شبکه افزایش پیدا می‌کند [۵]. Greunen و همکاران [۱] روش‌های کنترل خواب را برای به حداقل رساندن تأخیر صف در انتقال داده پیشنهاد داده‌اند. روش کار به این صورت است که با کنترل زمان خواب گره‌ها از هجوم داده‌های تکراری جلوگیری می‌شود و این داده‌ها برای ارسال به سینک در صف انتظار قرار نمی‌گیرند. علاوه بر این، در پروتکلی دیگر ساخت یک شبکه درختی بر اساس تعداد دفعات انتقال داده از محیط، پیشنهاد شده است. این روش باعث کاهش زمان تأخیر بین تشخیص رویداد و انتقال داده‌ها می‌شود [۶].

۲-۲- خوشه‌بندی گره‌ها

وظیفه اصلی گره‌های شبکه حسگر، جمع‌آوری اطلاعات از محیطی است که در آن قرار می‌گیرند. از آن جایی که یکی از مهم‌ترین دلایل مصرف انرژی گره‌ها، انتقال داده است و انرژی مصرفی ارسال اطلاعات به صورت بی‌سیم با توان دوم مسافت رابطه مستقیم دارد، ارسال مستقیم داده‌های هر گره به سینک، بهینه نیست. در نتیجه طرح‌هایی که فواصل ارتباطی گره‌ها را کوتاه‌تر می‌کنند، می‌توانند مصرف انرژی را در شبکه کاهش داده و باعث افزایش طول عمر شبکه شوند. حالت ایده‌آل در شبکه‌های حسگر به گونه‌ای است که انرژی همه گره‌ها با هم به پایان برسد، در نتیجه برای افزایش طول عمر شبکه، توزیع بار شبکه را یکنواخت می‌کنند تا فاصله زمانی بین مرگ اولین گره و مرگ آخرین گره حداقل گردد. جهت دستیابی به این هدف، تاکنون پروتکل‌های ارتباطی متعددی ارائه شده است که در این بین پروتکل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی به طور قابل توجهی انرژی مصرفی کل شبکه را پایین می‌آورند [۲]. گروه‌بندی گره‌ها در خوشه‌ها به طور وسیعی توسط جوامع تحقیقاتی پذیرفته شده است تا هدف‌های

مقیاس‌پذیری و به طور کلی دستیابی به کارایی انرژی بالاتر و طول عمر بیشتر در محیط شبکه‌های حسگر بی‌سیم تحقق یابند.

۲-۳- سایر تحقیقات

در [۷] نویسنده تعادل بین انرژی، تاخیر و تراکم را برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با طرح مدیریت انرژی و توپولوژی پیشنهاد داده است، که گره‌ها از حالت خواب با توان خیلی کم بیدار می‌شوند. این روش جدید که STEM[۹] نامیده شده است، گره را با موج رادیویی فوق کم توان[۱۰] بیدار می‌کند. در این تحقیق، تعادلی بین بازدهی انرژی برای گره‌های در حالت خواب و تاخیر در گره‌های بیدار ایجاد شده است. همچنین، نویسنده از الگوریتم صحت تطبیق جغرافیایی[۱۱] برای بهبود عملکرد شبکه استفاده کرده است. در [۸] و [۹]، Ammari یک پروتکل ارسال داده پیشنهاد داده است. هدف او دستیابی به بهترین مصالحه بین کمترین مصرف انرژی، بصورت تخلیه یکنواخت توان باتری گره‌ها، و کمترین تاخیر، بوده است. در واقع محدوده انتقال حسگرها را به نوارهای دایره‌ای هم محور تجزیه کرده که مبتنی بر کمترین فاصله بین هر جفت حسگرها است. در این تحقیق، پروتکلی به نام TED[۱۲] معرفی شده استکه به حل مسئله بهینه‌یابی چند وجهی[۱۳] می‌پردازد. هدف این مسئله بهینه‌یابی، پیدا کردن بهترین مصالحه بین کمترین مصرف انرژی، میزان تخلیه یکنواخت توان باتری گره‌ها و کمترین میزان تاخیر است. در ادامه، پروتکل معرفی شده، با فرض‌هایی به مسائل دنیای واقعی اعمال شده و نتایج استفاده عملیاتی و میدان آن مورد بررسی قرار گرفته است. شهرکی (Shahraki) در [۱۰] یک تابع هزینه جدید تعریف کرده است و یک طرح مسیریابی درون خوشه‌ای برای تعادل قابل حصول بین طول عمر شبکه در برابر تاخیر انتها به انتها بین اعضای خوشه و سرخوشه تهیه کرده است. نحوه کار به این صورت است که در هر خوشه دو نوع گره فرض کرده است. یکسری از گره‌ها اعضای خوشه هستند. هر خوشه نیز سر سرخوشه دارد که وظیفه جمع آوری اطلاعات از اعضای همان خوشه را دارد. سپس سرخوشه، اطلاعات را به گره سینک ارسال می‌کند. برای ارسال مستقیم اطلاعات درون هر خوشه از هر گره به سرخوشه نیز یک مقدار آستانه در نظر گرفته است. مقدار آستانه را بر اساس ویژگی‌های شبکه حسگر بی‌سیم و با استفاده از یک رابطه خطی بدست آورده است. از مقدار آستانه برای تعادل بین انرژی مصرفی و تاخیر انتها به انتها استفاده کرده است، به نحوی که برای گره‌هایی که فاصله‌شان تا سرخوشه کمتر از مقدار آستانه است، ارتباط مستقیم و در غیر اینصورت ارتباط غیر مستقیم در نظر گرفته است. اگر چه که ارتباط مستقیم انرژی بیشتری مصرف می‌کند، در عوض تأخیر کمتری دارد. در [۱۱]، Dong تعامل بین انرژی مصرفی و کمینه کردن تاخیر لایه انتقال با قابلیت اطمینان را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بررسی کرده است. در این تحقیق پروتکل جمع‌آوری اطلاعات جدیدی به نام BCMN/A[۱۴] معرفی شده است. این پروتکل به بازدهی مناسب در انرژی و تاخیر برای دو حالت درون خوشه‌ای و برون خوشه‌ای دست یافته است و نتایج آن در حالت شبیه‌سازی قابل قبول هستند.

در [۱۲] نویسنده یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر ساختار مش‌بندی مجازی را معرفی کرده است که گره سینک حرکت می‌کند. در این الگوریتم برخی از گره‌های انتخاب شده توسط ساختار مجازی، آخرین موقعیت سینک را نگهداری می‌کنند. با استفاده از این الگوریتم، انرژی مصرفی و تاخیر را بهبود داده‌اند. در سایر زمینه های تحقیقاتی که از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است، در [۱۳]، کوهستانی و همکاران از الگوریتم‌های فراابتکاری برای کدگذاری کانال در راستای مقاوم‌سازی آن با استفاده از بلاک‌های کدگذاری تمام مرتبه فضایی-زمانی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، مدل کدگذاری STBC[۱۵] معرفی شده است. سیستم معرفی شده به نرخ سیگنال به نویز بالاتری در حالات مختلف، نسبت به تحقیقات مشابه، دست یافته است. همچنین در [۱۴]، تقی پور و همکاران از الگوریتم‌های فراابتکاری برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های استخراج شده از موتور مانند مقدار مؤثر جریان استاتور و با استفاده از الگوریتم‌هایی فراابتکاری، مانند بهینه-سازی جمعیت ذرات، مدلی از موتور القایی قفسه سنجابی مورد مطالعه و تخمین قرار گرفته است. در [۱۵]، ولی و همکاران با استفاده از مسیریابی از مسیرهای چندگانه، بجای روش‌های سنتی برمبنای روش کوتاه‌ترین مسیر، به توزیع متعادل بار در شبکه و استفاده بهینه از پهنای باند آن اقدام کرده‌اند. در این تحقیق انواع پروتکل‌های مسیریابی چندگانه به همراه دسته‌بندی راه‌حل‌های توزیع بار مورد بررسی قرار گرفته است. از سایر تحقیقات بهینه‌یابی، عسگریان و همکاران در [۱۶]، از الگوریتم بهینه‌سازی ترتیبی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، تابع هدف توسعه، سود شرکت‌کنندگان بازار را بیشینه و هزینه توسعه و هزینه برقراری امنیت را کمینه می‌کند.

هدف این تحقیق، دستیابی به کمینه مصرف انرژی و تاخیر در شبکه حسگرها، با دو دیدگاه مستقل از هم و توامان با یکدیگر است. در این راستا، این موضوع به یک مسئله بهینه‌یابی تبدیل می‌شود و از الگوریتم گرگ‌های خاکستری که یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است، برای بهینه‌یابی استفاده می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌یابی در چند تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شده است و در این تحقیق هدف اصلی دست‌یابی به نتایجی برتر نسبت به تحقیقات قبلی، به شکل ویژه با استفاده از الگوریتم گرگ‌های خاکستری در شبکه حسگرهای بی‌سیم است.

۳- روش‌های فرا ابتکاری[۱۶]

روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در دو دهه اخیر بسیار محبوب شده‌اند. برخی از این روش‌ها مانند الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی مورچگان و بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۱۷] نه تنها برای محققان رشته

کامپیوتر، بلکه برای محققان سایر رشته‌ها نیز شناخته شده هستند. به طور کلی روش‌های فرا ابتکاری را می‌توان بـه دو گـروه اصـلی تقسـیم کرد: روش‌های بر پایه تک راه حلی[۱۸] و روش‌های بر پایه جمعیت[۱۹]. در روش تک راه حلی نظیر روش SA[۲۰]، فرآیند جسـتجو بـا یـک راه حـل انجام می‌گیرد. این تک راه حل در طی فرآیند تکرار، بهبـود مـی‌یابـد. روش‌های فـرا ابتکـاری بـر پایـه جمعیـت، بهینـه‌سـازی را بـر اسـاس مجموعه‌ای از راه حل‌ها انجام می‌دهند. در این روش، فرآیند جستجو با تعریف تصادفی جمعیت اولیه شروع می‌شـود و ایـن جمعیـت در طـی فرآیند تکرار بهبود می‌یابد. این روش، فوایدی در مقایسه با روش‌هـای تک راه حلی دارد که عبارت است از:

۱- راه حل‌هـایی بـا چنـد کاندیـدا، اطلاعـات در مـورد فضـای جستجو را به اشتراک می‌گذارند. این مسـئله باعـث مـی‌شـود جهـش ناگهانی به سمت بخش امیدوار کننده فضای جستجو پدیدار شود.

۲- راه حل‌هایی با چند کاندیـدا، بـه یکـدیگر بـرای اجتنـاب از گرفتار شدن در نقاط محلی کمک می‌کنند.

۳- روش‌های جمعیت محور عموماً اکتشاف بیشتری نسبت بـه الگوریتم‌های تک راه حلی دارند.

یکی از شاخه‌های الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر پایـه جمعیـت، ازدحـام هوش[۲۱] SI است. از جمله روش‌های محبوب در این زمینه، می‌توان بـه ACO[۲۲] (بهینه‌سازی مورچگان) و PSO[۲۳] (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) ذرات) اشاره کرد. برخی از فواید الگوریتم‌های SI عبارت‌اند از:

۱- الگوریتم SI اطلاعـات مربـوط بـه فضـای جسـتجو را طـی فرآیند تکرار حفظ می‌کند، در حالی که الگوریتم‌های تکاملی اطلاعـات مربوط به نسل‌های قبلی را دور می‌ریزند.

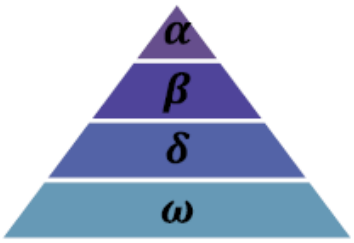
۲- الگـوریتم SI عملگرهـای کمتـری را بـه نسـبت روش‌هـای تکاملی به کار می‌برد.

۳- پیاده‌سازی الگوریتم SI آسان است.

در این تحقیق به بررسی عملکرد الگوریتم گـرگ‌هـای خاکسـتری کـه یکی از الگوریتم‌های خانواده روش‌های فرا ابتکاری است پرداخته مـی‌شود و عملکرد آن با چند الگوریتم متداول مورد مقایسه قرار می‌گیرد..

۳-۱- الگوریتم گرگ‌های خاکستری

گرگ خاکسـتری بـه عنـوان شـکارچی در رأس زنجیـره غـذایی قـرار می‌گیرد. این حیوانات دارای یک سیستم اجتماعی همانند آن چـه کـه در شکل (۲) نشان داده شده است هستند [۱۷]. رهبر گرگ‌ها می‌تواند نر یا ماده باشـد و گـرگ آلفـا نامیـده مـی‌شـود. آلفـا عمـدتاً مسـئول تصمیم‌گیری در زمینه شکار، مکان خواب، زمان بیـدار کـردن و غیـره است. در سطوح قدرت بعدی، به ترتیـب گـرگ‌هـای بتـا، دلتـا و گامـا تعریف هویت می‌شوند. در ادامه مدل ریاضی رفتار گرگ‌ها شبیه‌سـازی شده است.



شکل (۲): سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری

طبق مدل ریاضی سلسله مراتب اجتماعی برای گـرگ‌هـا، بهتـرین راه حل به عنوان آلفا در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، راه حل دوم و سوم به ترتیب بتا و دلتا نامیده می‌شود. بقیه کاندیداهای راه حل، امگا فرض شـده اسـت. در الگـوریتم بهینـه‌سـازی گـرگ خاکسـتری، شـکار (بهینه‌سازی) توسط آلفا، بتا و دلتا هدایت می‌شود. گرگ‌هـای امگـا از این سه گرگ تبعیـت مـی‌کننـد. عـلاوه بـر سلسـله مراتـب اجتمـاعی گرگ‌ها، شکار دسته جمعی یکی دیگر از رفتارهای جالب گرگ‌ها است. مراحل اصلی شکار به صورت زیر است [۱۸]:

۱- پیگیری، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه

۲- دنبال کردن، محاصـره و آزار و اذیـت طعمـه تـا توقف حرکت آن

۳- حمله به سمت طعمه

گرگ‌های خاکستری طعمه را در حین شکار محاصره می‌کنند. به منظور داشتن مدل ریاضی محاصره، معادله‌های زیر ارائه می‌شود:

$$\vec{D} = \left| \vec{C}.\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (۱)$$

$$\vec{X}(t+1) = \left| \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D} \right| \quad (۲)$$

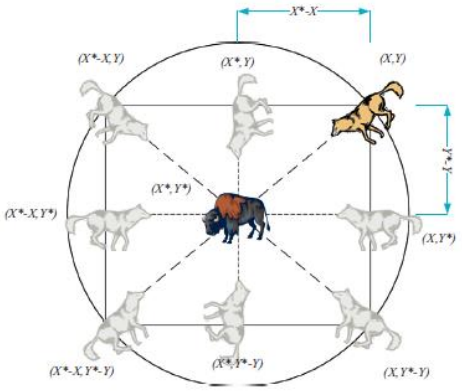
اندیس t تکرار عمل است، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ ضریب بردار هستند، بردار $\vec{X}_p$ موقعیت طعمه است و $\vec{X}$ نشان دهنده بردار موقعیت گرگ خاکستری است. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ طبق معادله‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۳)$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r}_2 \quad (۴)$$

مؤلفه $\vec{a}$ به صورت خطی از ۲ به صفر در طی تکرارها کاهش می‌یابـد. $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ بردارهای تصادفی هستند که در بازه [۰،۱] قرار دارند. بـرای نشان دادن تأثیر معادلات (۱) و (۲)، بردار دو بعدی موقعیت و برخی از همسایگان ممکن در شکل (۳) (الف) نشان داده شده است. همان‌طـور که در این شکل دیده مـی‌شـود، گـرگ در موقعیـت (x,y) مـی‌توانـد موقعیت خـود را بـه موقعیـت طعمـه (x^*,y^*) بـه روز رسـانی کنـد. موقعیت‌های مختلف در اطراف بهترین گزینه، می‌توانـد بـا اسـتفاده از توجه به موقعیت فعلی و تنظیم بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بدسـت آینـد. بـرای مثال، X^*-X, Y^* با انتخاب $\vec{A}=(1,0)$ و $\vec{C}=(1,1)$ بدست می‌آیـد.

اصلاح موقعیت گرگ خاکستری در فضای سه بعدی در شکل (۳) (ب) نشان داده شده است [۱۷]. توجه شود که $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ به گرگ‌ها اجازه می‌دهند که به هر موقعیتی بین نقاط نشان داده شده در شکل (۳) دسترسی داشته باشند.



شکل (۳) : بردار دو بعدی و سه بعدی موقعیت و احتمال‌های موجود برای مرحله بعدی

به منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض بر این است که آلفا (بهترین راه‌حل) و بتا و دلتا دانش بهتری را نسبت به موقعیت بالقوه طعمه دارند. بنابراین در ابتدا سه راه حل بهتر که تاکنون بدست آمده است و ملزم به جستجوی دیگر عوامل (ازجمله امگا) برای به‌روزرسانی موقعیت‌ها بر طبق موقعیت بهترین مورد است، نشان داده می‌شود. معادله‌های زیر، این مسئله را نشان می‌دهند.

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1 . \vec{X}_\alpha - \vec{X}\right| \quad (۵)$$

$$\vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2 . \vec{X}_\beta - \vec{X}\right| \quad (۶)$$

$$\vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3 . \vec{X}_\delta - \vec{X}\right| \quad (۷)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 . \left(\vec{D}_\alpha\right) \quad (۸)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 . \left(\vec{D}_\beta\right) \quad (۹)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 . \left(\vec{D}_\delta\right) \quad (۱۰)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۱۱)$$

به عبارت دیگر گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت طعمه را تخمین می‌زنند و دیگر گرگ‌ها موقعیت خودشان را به صورت تصادفی اطراف طعمه به روز می‌کنند.

در مدل ریاضی برای نشان دادن نزدیک شدن به طعمه مقدار بردار $\vec{A}$ کم می‌شود. زمانی که موقعیت تصادفی $\vec{A}$ در بازه [-۱،۱] باشد، موقعیت بعدی جستجو می‌تواند هر موقعیتی بین موقعیت کنونی و موقعیت طعمه باشد.

به‌طور خلاصه، فرآیند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری (که کاندید راه‌حل‌ها هستند) در الگوریتم گرگ خاکستری ایجاد می‌شود. در طی تکرارها، آلفا، بتا و دلتا موقعیت احتمالی طعمه را تخمین می‌زنند. هر کاندید فاصله خود را از طعمه به روز می‌کند. پارامتر a به منظور تأکید بر اکتشاف و بهره‌برداری به تدریج کاهش می‌یابد. راه حل‌های کاندید، زمانی که $norm(\vec{A}) > 1$ است تمایل به دور شدن از طعمه را دارند و در غیر این صورت تمایل به همگرایی به سمت طعمه را دارند. در نهایت زمانی الگوریتم گرگ خاکستری به انتها می‌رسد که شرایط خاتمه برآورده شده باشد.

مهم‌ترین موضوع در استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، شناساندن و تطبیق پارامترهای کاندید زیربهینه‌سازی با الگوریتم بهینه‌ساز است. برای رسیدن به این هدف نیاز به تعریف تابع هزینه متناسب با مسئله است. در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا، ۳ عملگر برای تخمین مکان طعمه (سینک) هستند و این مسئله یکی از مزیت‌های این الگوریتم برای رسیدن سریع‌تر به طعمه است.

۴- تحلیل و شبیه‌سازی

در این قسمت به بررسی مفاهیم مصرف انرژی و تأخیر در شبکه حسگر بی‌سیم، پرداخته می‌شود. در ادامه میانگین مصرف انرژی گره‌ها و تأخیر در ارسال داده، در مسیریابی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم گرگ‌های خاکستری و مسیریابی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات، با مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر مقایسه می‌شوند. برای سادگی بیشتر مسئله، شرایط کانال ایده‌آل در نظرگرفته شده است و اتلاف اطلاعات بین پیغام ارسال شده و دریافت شده وجود ندارد. همچنین توجه شود که با افزایش تعداد حسگرها، الگوریتم بهینه‌سازی نیاز به بررسی ترکیبات بیشتری برای یافتن راه حل زیربهینه دارد و این احتمال نیز تا حدی وجود دارد که سربار شبکه از کنترل خارج شود. در این تحقیق شرایط به گونه‌ای تعریف شده‌اند که از رخداد این مسئله جلوگیری شود.

مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر، همان الگوریتم OSPF[۲۴] است که در مسیریابی، مسیریاب‌های شبکه‌های کامپیوتری از آن استفاده می‌شود. استفاده از این الگوریتم به دلیل کاهش شدید طول عمر شبکه، مقرون به صرفه نیست. معمولاً این الگوریتم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تعداد گره‌های کم به کار گرفته می‌شود. روش کار این الگوریتم به این صورت است که از گره مبدأ تا گره مقصد بررسی می شود و الگوریتم از بین آن‌ها، کوتاه‌ترین مسیر را پیشنهاد می‌دهد. با تشکیل گرافی وزن‌دار، شامل تمامی مسیرهای ممکن، کوتاه‌ترین مسیر را محاسبه می‌کند. وزن خطوط اتصالی نقاط گراف، همان انرژی مصرفی در یک لینک ارتباطی بین دو گره شبکه است.

در پایان، مسیرهای پیشنهادی خروجی با بهترین میانگین تأخیر انتقال و مسیرهای خروجی با بهترین میانگین مصرف انرژی

زیربهینه‌سازی شده با تابع هزینه جدید، به عنوان ورودی جدید دوباره به الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات داده می‌شود. در نتیجه، مسیر زیربهینه توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر انتقال از گره مبدا تا سینک بدست می‌آید. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته چند مسیر تصادفی به عنوان ورودی به الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات داده می‌شود، سپس الگوریتم‌های بهینه‌سازی با توجه به تابع هزینه و جابه‌جایی مسیر اقدام به پیدا کردن بهترین مسیر می‌کنند.

محیط انجام شبیه‌سازی، نرم‌افزار MATLAB است. ابتدا ۳۰۰ گره شبکه به صورت تصادفی در یک محیط ۳۰۰ m × ۳۰۰ m تولید و پراکنده می‌شوند. سپس با توجه به محدودیت شعاع رادیویی ۱۱۰ متری، ارتباطات بین گره‌های شبکه برقرار می‌شوند. هدف، ارسال داده به گره سینک است. بیست مسیر تصادفی برای هر گره به عنوان مسیر اولیه به الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری داده می‌شود. لازم به ذکر است، هیچ‌کدام از این بیست مسیر تصادفی اولیه از لحاظ مصرف انرژی و تاخیر بهینه نیستند و کاملا تصادفی انتخاب می‌شوند. تمامی این تصمیم‌ها با توجه به جدول همسایگی هر گره شبکه، توسط سینک انجام می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری با توجه به تابع هزینه تعریف شده برای مسئله، مسیر مناسب را با تکرارهای مختلف برای هر گره تولید می‌کند. روش کار به این صورت است که طعمه در گرگ‌های خاکستری، همان حداقل کردن تابع هزینه در مسیریابی گره حس‌کننده تا سینک است. گرگ‌ها همان گره‌های شبکه حسگر هستند که باید به صورت زیربهینه برای ارسال داده‌ها انتخاب شوند.

بررسی عملکرد شبکه به اینصورت خواهد بود که ابتدا هر گره شبکه با توجه به محدودیت شعاع ارتباطی، پیام سلام[۲۵] را به تمام گره‌های همسایه خود ارسال می‌کند. گره گیرنده با توجه به توان دریافتی، فاصله خود تا گره فرستنده را بدست می‌آورد. گره گیرنده شماره و فاصله خود تا گره فرستنده را به گره فرستنده ارسال می‌کند. با این روش جدول اول هر گره شبکه تشکیل می‌شود. پس از آن، تمام گره‌های شبکه، جدول همسایه‌های خود را به گره‌های همسایه خود ارسال می‌کنند. این عمل آن قدر ادامه پیدا می‌کند که تمام جدول‌های همسایه، به گره سینک می‌رسد. گره سینک با توجه به جدول همسایه‌ها و الگوریتم مسیریابی در نظر گرفته شده، جدول مسیریابی هر گره تا سینک را تشکیل می‌دهد و به گره‌های شبکه ارسال می‌کند. در این سامانه روش‌هایی برای بررسی امکان رویداد خطا در ارسال و دریافت درنظر گرفته شده است.

فرض‌های انجام شده شامل موارد زیر هستند:

۱. گره‌های حسگر همگی یکسان بوده و در تمام شبکه و در یک ناحیه مربع شکل به طور یکنواخت توزیع شده‌اند.
۲. انتخاب موقعیت ایستگاه پایه بستگی به نوع کاربرد دارد.
۳. گره‌های شبکه قادرند توان ارسال خود را با توجه به فاصله خود تا گیرنده مورد نظر، تنظیم کنند.
۴. گره‌ها همگی دارای انرژی و توانایی یکسانی هستند.

۴-۱- مدل ریاضی انرژی مصرفی بین دو گره

در یک لینک ارتباطی بین دو گره شبکه حسگر بی‌سیم، هر گره یک بار در زمان ارسال داده و بار دیگر در زمان دریافت داده، انرژی مصرف می‌کند. انرژی مصرفی هر گره شبکه در زمان ارسال داده از رابطه (۱۱) بدست می‌آید. [۱۸-۲۲]

$$E_{Tx} = \begin{cases} lE_{elect} + l\varepsilon_{fs} d^2 & d \le d_{co} \\ lE_{elect} + l\varepsilon_{mp} d^4 & d \ge d_{co} \end{cases} \quad (۱۱)$$

در این معادله، انرژی مصرفی هر گره برای ارسال یک بسته با طول l بیت و مسافت d نشان داده شده است. بر اساس نتایج تئوری و نتایج تجربی اندازه‌گیری شده، d_{oc} حدود ۸۷ متر است. یعنی انرژی مصرفی هر گره برای ارسال داده در مسافت‌های کمتر از ۸۷ متر با توان دوم فاصله و در مسافت‌های بیشتر از ۸۷ متر با توان چهارم فاصله ارتباط مستقیم دارد. ε_{fs} و ε_{mp} به ترتیب انرژی فعال‌سازی تقویت کننده توان حسگر برای دو وضعیت انتشار فضای باز و چند مسیره است. انرژی مصرفی هر گره هنگام رسیدن داده به گره، از معادله (۱۲) تبعیت می‌کند [۲۳]. در این رابطه، E_{elect} مقدار انرژی مصرفی مدارهای الکتریکی حسگر برای دریافت یک بیت داده است. بر اساس نوع حس‌گر استفاده شده در شبکه حسگر بی‌سیم، E_{elect} مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهد.

$$E_{Rx} = lE_{elect} \quad (۱۲)$$

مقادیر در نظر گرفته شده برای معادله‌های انرژی مصرفی در این شبیه‌سازی به شرح جدول (۱) است. خلاصه‌ای از فرآیند شبیه‌سازی مصرف انرژی در شکل (۴) تصویر شده است.

جدول (۱): مقادیر در نظر گرفته شده برای معادله‌های انرژی مصرفی [17-20]

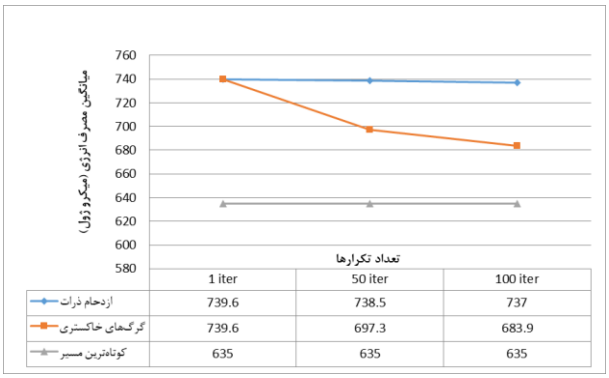
متغیر	مقدار (برحسب واحد)
l	**2000 *bit***
E_{elect}	**50 *nj/bit***
ε_{fs}	**10 *pj/bit/m²***
ε_{mp}	**0.001 *pj/bit/m⁴***
d_{co}	**100 m**

شکل (۴): فرآیند شبیه‌سازی مصرف انرژی

در این تحقیق، تابع هزینه، انرژی لازم برای پرش گام به گام از گره مبدا تا گره مقصد است. نتایج شبیه‌سازی میانگین مصرف انرژی برای ارسال یک بسته از گره مبدا تا سینک در سه حالت با تکرارهای یک، پنجاه و صد با هم مقایسه شده‌اند. در مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر کمترین میزان مصرف انرژی در شبکه رخ می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تکرارها میانگین مصرف انرژی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش تکرارها الگوریتم‌های بهینه‌سازی، فضای بیشتری از راه‌حل‌ها را جستجو می‌کنند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات داشته و فضای ورودی را بهتر جستجو می‌کند. با رجوع به نحوه جستجوی فضای راه‌حل‌ها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری و ازدحام ذرات، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به رابطه‌های موجود در هر تکرار، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری با ۳ عملگر، یعنی گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا فضای راه‌حل‌ها را جستجو می‌کند، ولی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ۲ عملگر این کار را انجام می‌دهد، به این دلیل الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری، عملکرد سریع‌تری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای زیربهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه حسگر بی‌سیم در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل، الگوریتم‌های ازدحام ذرات، کوتاهترین مسیر و گرگ‌های خاکستری، برای سه تعداد تکرار متفاوت، در متلب، پیاده‌سازی و تکرار شده است و میانگین مصرف انرژی برای هر نه حالت، در نرم‌افزار اکسل، در قالب جدول و نمودار بیان شده است. دلیل این نحوه‌ی نمایش، ماهیت عددی، و نه نموداری خروجی الگوریتم‌ها در نرم‌افزار متلب است. این رویکرد نمایش اطلاعات تا پایان نوشتار حفظ شده است.

۴-۲- تأخیر در شبکه حسگر بی‌سیم

تأخیر انتها به انتها، میزان زمان لازم برای رسیدن داده مورد نظر از گره حس‌کننده تا مقصد سینک تعریف می‌شود. این زمان شامل پردازش‌های داخلی در هر گره، زمان مدولاسیون و دمدولاسیون در هر گره و همچنین زمان انتقال اطلاعات ارسالی از فرستنده به گیرنده است. با توجه به فواصل کوتاه بین فرستنده و گیرنده، می‌توان گفت بخش عمده ای از این زمان مربوط به دو عامل اول مذکور می‌باشد که تابعی از تعداد گره‌های بین فرستنده و گیرنده هستند. لذا در زیربهینه‌سازی تأخیر، صرفا متغیر تعداد پرش (N) از گره مبدأ تا مقصد زیربهینه‌سازی شده است.



	1 iter	50 iter	100 iter
ازدحام ذرات	739.6	738.5	737
گرگ‌های خاکستری	739.6	697.3	683.9
کوتاه‌ترین مسیر	635	635	635

شکل (۵): میانگین مصرف انرژی برای ارسال یک بسته در زیربهینه‌سازی مصرف انرژی

تابع هزینه تأخیر همانند تابع هزینه مصرف انرژی در دو مرحله تشکیل می‌شود. ابتدا ماتریسی از تمامی ارتباطات موجود با یک پرش بین گره‌های شبکه ساخته می‌شود. در این ماتریس عدد یک برای اتصال موجود بین دو گره و عدد بی‌نهایت برای عدم اتصال در نظر گرفته می‌شود. تعداد پرش‌ها برای یک گره از مبدأ تا سینک طبق رابطه (۱۳) بدست می‌آید. در این رابطه n تعداد پرش‌ها و hop عدد یک و یا بی‌نهایت است.

$$S_{node} = \sum_{i=1}^{n}(hop_i) \quad (۱۳)$$

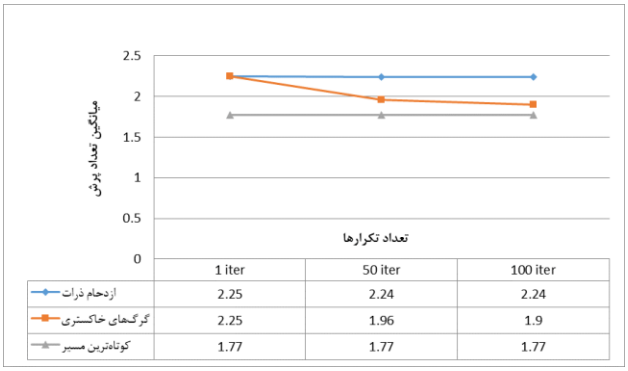
پس از محاسبه تعداد پرش‌ها از هر گره شبکه تا سینک، میانگین تعداد پرش‌ها برای هر گره شبکه از رابطه (۱۴) بدست می‌آید. $noofnode$ نشان دهنده تعداد گره‌های شبکه و S_{node} میانگین تعداد پرش از هر گره شبکه تا سینک است.

$$S_{average} = \frac{\sum_{node=1}^{noofnode} S_{node}}{noofnode} \quad (۱۴)$$

خلاصه‌ای از فرآیند شبیه‌سازی میزان تاخیر در شکل (۶) نمایش داده شده است.

شکل (۶): فرآیند شبیه‌سازی میزان تاخیر

در شبیه‌سازی‌ها سه روش پیشنهادی برای مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم با تکرارهای یک، پنجاه و صد با هم مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تکرارها میانگین تعداد پرش‌ها، برای انتقال داده‌های شبکه از گره حس‌کننده تا سینک کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش تکرارها الگوریتم‌های بهینه‌سازی، فضای بیشتری از راه‌حل‌ها را جستجو می‌کنند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری در زیربهینه‌سازی تأخیر همچون زیربهینه‌سازی مصرف انرژی، بنا به دلایل ذکر شده در قسمت قبل عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دارد. نتایج مقایسه میانگین تعداد پرش در مسیریابی‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است.



	1 iter	50 iter	100 iter
ازدحام ذرات	2.25	2.24	2.24
گرگ‌های خاکستری	2.25	1.96	1.9
کوتاه‌ترین مسیر	1.77	1.77	1.77

شکل(۷): میانگین تعداد پرش یک بسته در زیربهینه‌سازی تاخیر

۴-۳- مسیریابی توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر

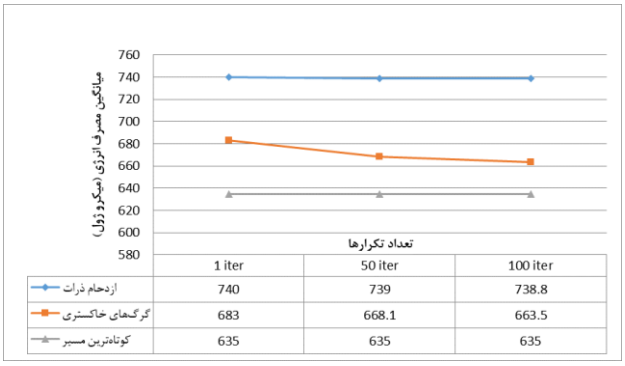
پس از زیربهینه‌سازی مصرف انرژی و تأخیر، هر کدام از حالت‌های زیربهینه شده، برای هر گره یک مسیر از گره مبدأ تا سینک پیشنهاد می‌دهند. این دو مسیر به عنوان ورودی برای به دست آوردن مسیر زیربهینه، توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با تابع هزینه جدید برای زیربهینه‌سازی توأمان مصرف انرژی و تأخیر در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم استفاده شده است. هدف، بدست آوردن مسیرهایی متوازن از لحاظ مصرف انرژی و تاخیر است. ورودی‌های الگوریتم بهینه‌ساز، خروجی‌های قسمت قبل برای زیربهینه‌سازی مصرف انرژی و تأخیر هستند.

پس از بدست آوردن مسیر زیربهینه توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر، بر اساس ماتریس نشان دهنده مصرف انرژی بین دو گره شبکه و ماتریس نشان دهنده پرش بین دو گره شبکه، مصرف انرژی و تأخیر برای ارسال یک بسته محاسبه می‌شود. با این فرآیند میانگین مصرف انرژی و میانگین تعداد پرش برای ارسال یک بسته در یک دوره از گره حس‌کننده تا سینک در مسیریابی زیربهینه توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر بدست می‌آید. ماتریس زیربهینه‌سازی توأمان از جمع دو ماتریس مربوط به زیربهینه‌سازی مصرف انرژی و زیربهینه‌سازی تأخیر تشکیل شده است. در واقع در هر درایه این ماتریس، در لینک‌هایی که بین دو گره شبکه برقرار است، عدد یک با انرژی مصرفی لینک جمع شده است. با استفاده از این ماتریس تابع هزینه زیربهینه‌یابی می‌شود، به این مفهوم که الگوریتم‌های بهینه‌سازی با این تابع هزینه سعی می‌کنند، بین مسیرهایی با تاخیر کمتر، آن مسیری که انرژی کمتری مصرف می‌کند را انتخاب کنند. خلاصه‌ای از فرآیند شبیه‌سازی توامان از لحاظ مصرف انرژی و تاخیر در شکل (۸) تصویر شده است.

شکل (۸): فرآیند شبیه‌سازی توامان از لحاظ مصرف انرژی و تاخیر

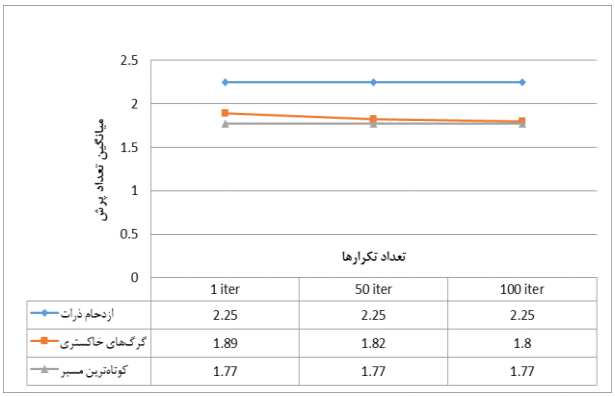
در شبیه‌سازی‌ها سه روش پیشنهادی برای مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم با تکرارهای یک، پنجاه و صد با هم مقایسه شده‌اند. میانگین مصرف انرژی در مسیریابی زیربهینه توأمان در تکرارهای مختلف از این مقدار بیشتر است و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بنا به دلایل ذکر شده در قسمت‌های قبل عملکرد بهتری دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میانگین مصرف انرژی در مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر ۶۳۵ میکرو

ژول است. در شکل (۹) میانگین مصرف انرژی، در مسیریابی زیربهینه‌سازی شده توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر در حالت‌های مختلف مقایسه شده است.



شکل (۹): میانگین مصرف انرژی برای ارسال یک بسته در زیربهینه‌سازی توأمان

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که میانگین تعداد پرش برای ارسال یک بسته در حالت مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر ۱,۷۷ پرش است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تکرارها در الگوریتم ازدحام ذرات، میانگین تعداد پرش‌ها ثابت می‌ماند ولی در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری میانگین تعداد پرش‌ها کاهش می‌یابد. بررسی توأمان شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ثابت ماندن تعداد پرش‌ها، میانگین انرژی مصرفی گره‌های شبکه کاهش می‌یابد. لذا الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با افزایش تکرارها به سمت مسیرهای متوازن‌تر توأمان از لحاظ مصرف انرژی و تأخیر رفته است. در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری با افزایش تکرارها، تعداد پرش‌ها و میانگین مصرف انرژی کاهش می‌یابند. این موضوع یعنی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری به سمت مسیرهای متوازن‌تر رفته‌است و در مجموع، الگوریتم گرگ‌های خاکستری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات مسیرهای متوازن‌تری را تولید می‌کند.



شکل (۱۰): میانگین تعداد پرش برای ارسال یک بسته در زیربهینه‌سازی توأمان

با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها، الگوریتم‌های بهینه‌سازی با افزایش تعداد تکرارها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند و در این بین، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری در تمامی موارد زیربهینه‌سازی شده در شبیه‌سازی‌ها نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دلیل استفاده از ۳ عملگر برای جستجوی فضای راه‌حل‌ها عملکرد بهتری دارد.

جدول (۲): مقایسه مصرف انرژی در مسیریابی زیربهینه‌سازی مصرف انرژی در صد تکرار [۱۹-۲۰]

میانگین مصرف انرژی	الگوریتم بهینه‌سازی
۱۲۰۰	بیشترین انرژی باقی‌مانده [19]
۹۰۰	حریصانه [19]
۸۰۰	آگاه از انرژی و فاصله [19]
۷۳۷	ازدحام ذرات [20]
۶۸۳,۹	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)
۶۳۵	کوتاه‌ترین مسیر [20]

۵- نتیجه‌گیری

یک پروتکل مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم از لحاظ پارامترهای مختلفی نظیر مصرف انرژی، تأخیر، طول عمر شبکه و میزان نفوذپذیری بررسی می‌شود.

در این تحقیق مصرف انرژی و تأخیر در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری گرگ‌های خاکستری به صورت مستقل و توأمان زیربهینه‌سازی شده است.

میانگین مصرف انرژی و تأخیر هر گره شبکه حسگر بی‌سیم برای ارسال یک بسته در یک دوره از گره حس‌کننده تا سینک، مبنای مقایسه است. تعداد تکرارها یک، پنجاه و صد در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، با زیاد شدن تکرارها، میانگین مصرف انرژی و تأخیر در مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم کاهش می‌یابد. دلیل محاسبه میانگین مصرف انرژی و میانگین تأخیر با یک بار تکرار در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نشان دادن این موضوع است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتدا چندین ورودی اخذ می‌کنند و سپس با تغییر ورودی‌ها بر اساس تکرارهای مختلف فضای ورودی را جستجو می‌کنند. نکته مهم اینجاست که با زیاد شدن تکرارها، مسیرها تغییر می‌کنند و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی معلوم می‌شود.

به منظور اطمینان بیشتر از عملکرد موثر الگوریتم گرگ‌های خاکستری، در جدول (۲) مسیریابی زیربهینه‌سازی شده از لحاظ مصرف انرژی توسط این الگوریتم در یک شبکه با ۳۰۰ گره و با انجام ۱۰۰ تکرار با مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر، مسیریابی آگاه از انرژی و مسافت، مسیریابی الگوریتم حریصانه، مسیریابی بیشترین انرژی باقی‌مانده[۲۶] و مسیریابی زیربهینه‌سازی شده از لحاظ مصرف انرژی توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ، مقایسه شده است.بهترین عملکرد برای مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر است. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات،

صرفه‌جویی بیشتری در مصرف انرژی دارد و این مسئله به دلیل تعداد عملگرهای بیشتر در الگوریتم گرگ‌های خاکستری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات، برای جستجوی فضای ورودی است.

برای رسیدن داده‌های شبکه از گره حس‌کننده تا سینک، با توجه به محدودیت شعاع ارتباطی هر گره، انتقال داده‌ها به سینک در چند پرش انجام می‌شود. هر مقدار که تعداد پرش‌ها کمتر باشد، تأخیر در شبکه حسگر بی‌سیم کاهش می‌یابد. اعداد بدست آمده در جدول (۳) میانگین تعداد پرش‌های یک بسته در یک دوره ارسال داده در شبکه را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول (۳)، با استفاده از مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر، برای انتقال یک بسته در هر دوره، به طور میانگین ۱,۷۷ پرش لازم است. در مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر، وزن کلیه خصوط اتصالی نقاط گراف، ۱ در نظر گرفته شده است و جمع این یک‌ها تعداد پرش‌ها از گره مبدا تا سینک را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که الگوریتم آگاه از انرژی و مسافت، تعداد پرش‌های زیربهینه از گره مبدأ تا سینک برای مصرف انرژی زیربهینه را می‌داند و برای زیربهینه‌سازی تأخیر طراحی نشده است و به این دلیل عملکرد بدتری نسبت به مسیریابی کوتاه‌ترین مسیر دارد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری همانند قسمت قبل عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات دارد و در تکرارهای مختلف درصد بیشتری از پرش‌ها تا سینک را کاهش می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه تعداد پرش در مسیریابی‌های زیربهینه‌سازی تاخیر در صد تکرار [20-19]

میانگین تعداد پرش	الگوریتم بهینه‌سازی	الگوریتم بهینه‌سازی
۳,۶	بیشترین انرژی باقی‌مانده [19]	بیشترین انرژی باقی‌مانده
۲,۲۵	حریصانه [19]	حریصانه
۲,۲	آگاه از انرژی و فاصله [19]	آگاه از انرژی و فاصله
۱,۹	ازدحام ذرات [20]	ازدحام ذرات
۱,۹	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)
۱,۷۷	کوتاه‌ترین مسیر [20]	کوتاه‌ترین مسیر

جدول (۴): مقایسه مصرف انرژی در مسیریابی زیربهینه شده ترکیبی در صد تکرار [20-19]

میانگین مصرف انرژی	الگوریتم بهینه‌سازی	الگوریتم بهینه‌سازی
۱۲۰۰	بیشترین انرژی باقی‌مانده [19]	بیشترین انرژی باقی‌مانده
۹۰۰	حریصانه [19]	حریصانه
۸۰۰	آگاه از انرژی و فاصله [19]	آگاه از انرژی و فاصله
۷۳۷,۸	ازدحام ذرات [20]	ازدحام ذرات
۶۶۳	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)
۶۳۵	کوتاه‌ترین مسیر [20]	کوتاه‌ترین مسیر

جدول (۵): مقایسه تعداد پرش‌ها در مسیریابی زیربهینه شده ترکیبی در صد تکرار [۱۹-۲۰]

میانگین تعداد پرش	الگوریتم بهینه‌سازی	الگوریتم بهینه‌سازی
۳,۶	بیشترین انرژی باقی‌مانده [19]	بیشترین انرژی باقی‌مانده
۲,۲۵	حریصانه [19]	حریصانه
۲,۲	آگاه از انرژی و فاصله [19]	آگاه از انرژی و فاصله
۱,۹	ازدحام ذرات [20]	ازدحام ذرات
۱,۸	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)	گرگ‌های خاکستری (این تحقیق)
۱,۷۷	کوتاه‌ترین مسیر [20]	کوتاه‌ترین مسیر

در پایان، مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم توأمان از لحاظ میانگین مصرف انرژی و تأخیر زیربهینه‌سازی شده است(جدول (۴) و جدول (۵)). مسیریابی زیربهینه‌سازی شده توسط الگوریتم گرگ‌های خاکستری هم از لحاظ مصرف انرژی و هم از لحاظ تعداد پرش نزدیکترین نتیجه را به الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر دارا است.

با مقایسه جدول‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت که در زیربهینه‌سازی توامان توسط الگوریتم گرگ‌های خاکستری، مصرف انرژی و تاخیر نسبت به مصرف انرژی و تاخیر در زیربهینه‌سازی مستقل کمتر است و زیربهینه‌سازی توامان هم از لحاظ مصرف انرژی و هم از لحاظ تعداد پرش عملکرد بهتری نسبت به زیربهینه‌سازی مستقل دارد.

مراجع

[1] J. van Greunen, D. Petrovic, A. Bonivento, J. Rabaey, K. Ramchandran, and A. S. Vincentelli, "Adaptive sleep discipline for energy conservation and robustness in dense sensor networks," in 2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577), 2004, vol. 6, pp. 3657-3662 Vol.6.

[2] N. K. Kapoor, S. Majumdar, and B. Nandy, "Techniques for allocation of sensors in shared wireless sensor networks," Journal of Networks, 01-Jan-2015. [Online]. Available: http://link.galegroup.com/apps/doc/A406900793/AONE?sid=googlescholar. [Accessed: 17-Jan-2019].

[3] H. F. Chan and H. Rudolph, "New energy efficient routing algorithm for Wireless Sensor Network," in TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, 2015, pp. 1–5.

[4] B. Barekatain, S. Dehghani, and M. Pourzaferani, "An Energy-Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on New Combination of Genetic Algorithm & k-means," Procedia Computer Science, vol. 72, pp. 552–560, Jan. 2015.

[5] P. C. Vinh, N. H. H. Cuong, and E. Vassev, Eds., Context-Aware Systems and Applications, and Nature of Computation and Communication: 6th International Conference, ICCASA 2017, and 3rd International Conference, ICTCC 2017, Tam Ky, Vietnam, November 23-24, 2017, Proceedings. Springer International Publishing, 2018.

simple rules in computational simulations," Behavioural Processes, vol. 88, no. 3, pp. 192–197, Nov. 2011.

[19] J. Wang, J.-U. Kim, L. Shu, Y. Niu, and S. Lee, "A Distance-based Energy Aware Routing algorithm for wireless sensor networks," Sensors (Basel), vol. 10, no. 10, pp. 9493–9511, 2010.

[20] J. Wang, T. Ma, J. Cho, and S. Lee, "An Energy Efficient and Load Balancing Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks," Computer Science and Information Systems, no. 20, pp. 991–1007, 2011.

[21] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, Oct. 2002.

[22] J. P. Pandey and D. A. Deshmukh, "Detection of Malicious Node in Wireless Sensor Network under Byzantine Attack," IJIRCCE, vol 4, no. 7, 2016.

[23] W. Heinzelman, "Application-specific protocol architectures for wireless networks," Ph.D. dissertstion, Mass. Inst. Technol., Cambridge, 2000. [Online]. Available: https://www.sigmobile.org/phd/2000/theses/heinzelman.pdf. [Accessed: 13-Dec-2018].

[6] G. Kavitha and R. S. D. Wahidabanu, "Improved Cluster Head Selection for Efficient Data Aggregation in Sensor Networks," Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014.

[7] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 99, no. 1, pp. 70–80, Jan. 2002.

[8] H. M. Ammari, "Trade-Off between Energy and Delay in Geographic Forwarding on Always-On Sensors," in Challenges and Opportunities of Connected k-Covered Wireless Sensor Networks: From Sensor Deployment to Data Gathering, H. M. Ammari, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 201–240.

[9] H. M. Ammari, "On the energy-delay trade-off in geographic forwarding in always-on wireless sensor networks: A multi-objective optimization problem," Computer Networks, vol. 57, no. 9, pp. 1913–1935, Jun. 2013.

[10] A. Shahraki, M. K. Rafsanjani, and A. B. Saeid, "A new approach for energy and delay trade-off intra-clustering routing in WSNs," Computers & Mathematics with Applications, vol. 62, no. 4, pp. 1670–1676, Aug. 2011.

[11] M. Dong, K. Ota, A. Liu, and M. Guo, "Joint Optimization of Lifetime and Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 27, no. 1, pp. 225–236, Jan. 2016.

[12] R. Yarinezhad and A. Sarabi, "Reducing delay and energy consumption in wireless sensor networks by making virtual grid infrastructure and using mobile sink," AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 84, pp. 144–152, Feb. 2018.

[13] A. Kuhestani, H. Pilaram, and A. Mohammadi, "Simply decoded efficient full-rate space-time block codes over correlated Rician fading channels," IET Communications, vol. 8, no. 10, pp. 1684–1695, Jul. 2014.

[14] M. Taghipour, M. Farshad, and S. m. Razavi, "Performance Assessment of Meta-Heuristic Optimization Algorithms in Estimation of Structural Parameters of Squirrel Cage Induction Motor," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 14, no. 1, pp. 93–101, Jun. 2017.

[15] Z. Vali, M. R. Hashemi, and N. Moghim, "Load Balancing Methods in Traffic Engineering," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 12, no. 2, pp. 105–118, Oct. 2015.

[16] H. Askarian Abyane, H. Shariati Dehaghan, M. H. Javidi, and F. Razavi, "Transmission Expansion Planning Considering Security Cost under Market Environment," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 6, no. 2, pp. 57–69, Oct. 2009.

[17] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014.

[18] C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, and R. P. Coppinger, "Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from

[1] Sink
[2] Sub Optimization
[3] Multipath-based
[4] Query-based
[5] QoS-based
[6] Negotiation-based
[7] Coherent-based
[8] Sleep Scheduling
[9] Sparse Topology and Energy Management
[10] Ultra Low-Power Radio
[11] Geographical adaptive fidelity
[12] Trade-off Energy with Delay
[13] Multi-objective Optimization Problem
[14] Broadcasting Combined with Multi-NACK/ACK
[15] Space-Time Block Code
[16] Metaheuristic Algorithms
[17] Particle Swarm Optimization (PSO)
[18] Single-solution Searches
[19] Single-solution Searches
[20] Simulated Annealing
[21] Swarm Intelligence (SI)
[22] Ant Colony Optimization
[23] Particle Swarm Optimization
[24] Open Shortest Path First
[25] Hello
[26] Maximal Residual Energy