

یک رهیافت فرااکتشافی چندهدفه برای بهبود پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

مصطفی بصیرنژاد، محبوبه هوشمند، سید عابد حسینی و مهرداد جلالی

به‌طور کامل پوشش منطقه سنجش را تضمین کند، به همین خاطر منجر به سوراخ‌های پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌شود [۲]. یکی از راه‌های افزایش کارایی و طول عمر شبکه حسگر نحوه چینش گره‌هاست، به‌گونه‌ای که تمام منطقه هدف را پوشش دهند. اما در برخی مناطق مانند محیط‌های کوهستانی، گره‌ها ممکن است به‌صورت تصادفی از طریق هواپیما پخش شوند در این شرایط پوشش منطقه به یک چالش تبدیل می‌شود. از این رو محققان معتقدند حل مسئله پوشش بسیار پیچیده است [۳].

با توجه به محدودیت‌های موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بهبود پوشش شبکه می‌تواند به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن زوایای مختلف و متغیرهای مختلف، تعریف شود. حجم مطالعات در مواجهه با چالش‌های شبکه حسگر بی‌سیم همچون پوشش‌دهی شبکه بسیار زیاد است. این امر نخست، ناشی از تنوع در انتخاب جزئیات مدل شبکه همچون همگن یا غیرهمگن بودن، متمرکز یا غیرمتمرکز بودن، متحرک یا ثابت بودن گره‌ها است [۴].

پوشش حداکثری به این خاطر است که بتوان به‌طور پیوسته یا متناوب اهداف موردنظر را در هر جای محیط نظارت کرد و داده‌های مربوط به رخدادهای در حداقل زمان به چاهک رساند. از این رو، برای حداکثر کردن طول عمر شبکه باید هر حسگر مصرف انرژی خود را به حداقل برساند [۵].

حسگرها ممکن است به مجموعه‌های پوششی تقسیم شوند تا پوشش هدف کافی را فراهم کنند. با این حال، نشان داده شده است که این مساله NP کامل است [۶]. در نتیجه محققان روش‌های فرااکتشافی الهام گرفته شده از طبیعت را برای حل مسئله بقای انرژی در شبکه‌های حسگر را برای دستیابی به پوشش پیشنهاد کرده‌اند. مجموعه‌های پوششی با این روش تولید می‌شوند که به نظارت بر همه اهداف کمک کنند [۷].

اولین مسئله‌ای که ضرورت انجام این تحقیق را فراهم می‌کند، مسئله پوشش حداکثری است؛ به دلیل NP کامل بودن مسئله، در اکثر تحقیقات از راه‌حل‌های اکتشافی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها که بر ویژگی‌های ساختار مسئله و ساختار جواب متمرکز می‌شوند، گاهی اوقات تا حد بهینگی می‌توانند خوب عمل کنند؛ اما امکان دارد در جواب‌های بی‌کیفیت گیر کنند. در واقع، یکی از مشکلات مهمی که این الگوریتم‌ها با آن روبرو می‌شوند، گیرافتادن در بهینه‌های محلی است، بدون اینکه هیچ شانس برای فرار از آن‌ها داشته باشند. اکثر راه‌حل‌های اکتشافی به فرم بهینه‌سازی تصادفی عمل می‌کنند و همیشه پیدا کردن جواب بهینه را ضمانت نمی‌کنند. اکتشافی‌ها برای بهینه‌سازی ترکیبی به کار می‌روند، هنگامی که جواب بهینه بر روی فضای جستجوی گسسته مورد جستجو قرار می‌گیرد [۸].

چکیده: مقاله حاضر به بررسی و ارائه یک الگوریتم بهینه‌ساز جدید تحت عنوان الگوریتم بهینه‌ساز یوزپلنگ چندهدفه (MOCO) می‌پردازد که باهدف افزایش پوشش و بهبود اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم توسعه یافته است. این الگوریتم با بهره‌گیری از مفاهیم بهینه‌سازی فرا اکتشافی، یک رویکرد نوین برای تعیین بهینه موقعیت گره‌های حسگر و مدیریت منابع ارائه می‌دهد. در این روش، با تعریف یک تابع هدف چندمعیاره شامل بیشینه‌سازی پوشش ناحیه، بهبود اتصال بین گره‌ها و کاهش مصرف انرژی، قادر است تعادل مناسبی میان این اهداف برقرار کند. الگوریتم پیشنهادی از قابلیت‌های جستجوی تصادفی و پرشتاب الگوریتم یوزپلنگ الهام گرفته و امکان جستجوی مؤثرتر در فضای پاسخ را فراهم می‌سازد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که MOCO در مقایسه با سه الگوریتم MOFAC-GA-PSO، CSSO و HHA توانسته نرخ پوشش محیط را به بیش از ۹۴/۵ درصد افزایش دهد، نرخ اتصال شبکه را به حدود ۹۷/۸ درصد برساند و در عین حال میانگین مصرف انرژی حسگرها را تا ۱۵ درصد نسبت به سایر الگوریتم‌ها کاهش دهد.

کلیدواژه: اتصال، الگوریتم‌های فرااکتشافی، پوشش، شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم در حوزه‌های مختلفی کاربرد دارند این شبکه‌ها شامل گره‌های کم‌وزن با قابلیت پردازش و انرژی محدود هستند. در اکثر کاربردها مشکل هزینه حسگر و تعویض باتری وجود دارد. این حسگرها محیط اطراف خود را نظارت کرده و رخدادهای را از نزدیک‌ترین مسیر به گره چاهک ارسال می‌کنند. در این شبکه‌ها، مسئله اتصال گره‌ها به یکدیگر و پوشش منطقه از مسائل مهم است، از این رو، استفاده کمینه تعداد حسگرها با رعایت پوشش کامل منطقه از چالش‌های این نوع شبکه‌هاست [۹].

در اکثر کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌ها به‌صورت تصادفی در محیط پخش می‌شوند. استقرار تصادفی گره‌های حسگر نمی‌تواند

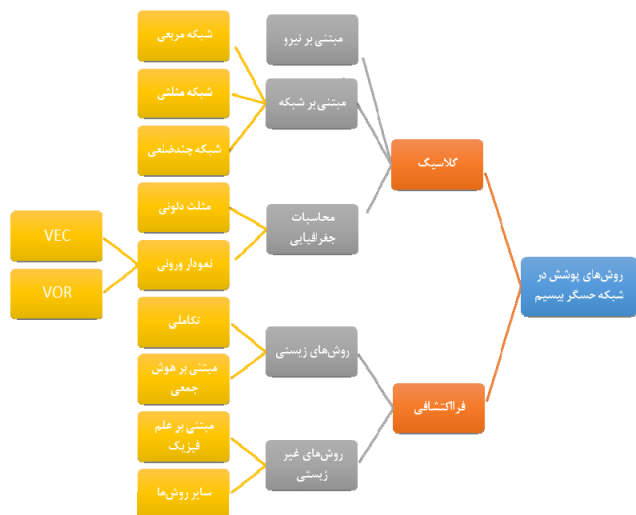
این مقاله در تاریخ ۲۰ آبان ماه ۱۴۰۴ دریافت و در تاریخ ۳ بهمن ماه ۱۴۰۴ بازنگری شد.

مصطفی بصیرنژاد، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، (email: mostafa.basimezhad@iaiu.ac.ir).

محبوبه هوشمند (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، (email: ma.houshmand@iaiu.ac.ir).

سید عابد حسینی، گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، (email: sa.hosseini@iaiu.ac.ir).

مهرداد جلالی، گروه علم داده کاربردی و هوش مصنوعی، دانشگاه SRH هایدلبرگ، هایدلبرگ، آلمان، (email: mehrdad.jalali@srh.de).



شکل ۱: طبقه‌بندی روش‌های مختلف پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

نیرو^۳ [۱۷] تا [۲۳]، طبقه‌بندی می‌شوند. شکل ۱ یک طبقه‌بندی اساسی از روش‌های مختلف برای پوشش و استقرار گره در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را نشان می‌دهد.

آثار مرور شده در این بخش در قالب دو دسته مقالات روش‌های کلاسیک و روش‌های فراکتشافی ارائه می‌شوند. روش‌های کلاسیک بیشتر بر پایه محاسبات ریاضی هستند و روش‌های فراکتشافی، روش‌های بهینه‌سازی ریاضی سطح بالاتری هستند که برای یافتن یا تولید پاسخ بهینه به یک مسئله با داده‌های جزئی و با قابلیت محاسبات کمتر طراحی شده‌اند. الگوریتم‌های فراکتشافی بسیار مفیدند و می‌توانند برای مشکل پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده شوند. در جدول ۱ تعدادی از روش‌های کلاسیک [۲۴] تا [۳۲] و در جدول ۲ تعدادی از روش‌های فراکتشافی بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۴ که برای بهینه‌سازی پوشش و اتصال در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده شده‌اند، باهم مقایسه شده‌اند [۳۳] تا [۵۹].

یکی از دلایل برتری الگوریتم‌های فراکتشافی نسبت به روش‌های کلاسیک، در این است که آن‌ها معمولاً به‌صورت هم‌زمان بسیاری از فضای جستجو را اکتشاف می‌کنند و این خاصیت باعث شده است که در بسیاری از مسائل، به بهینه‌سازی بهتری برسند.

قابلیت پوشش و قابلیت انتفاع، دو نوع از مهم‌ترین قابلیت‌ها در الگوریتم‌های فراکتشافی به‌شمار می‌روند. قابلیت پوشش، به توانایی الگوریتم فراکتشافی در جستجوی آزادانه و بدون هرگونه توجه به دستاوردهای آن در طول فرآیند جستجو و قابلیت انتفاع به میزان توجه الگوریتم به دستاوردهایش در طول فرآیند جستجو اطلاق می‌گردد. بدیهی است که به هر میزان که قابلیت پوشش در یک الگوریتم جستجو بیشتر باشد، این الگوریتم رفتاری تصادفی‌تر و غیرقابل پیش‌بینی‌تر خواهد داشت. در نقطه مقابل، تقویت قابلیت انتفاع در یک الگوریتم سبب می‌شود که این الگوریتم رفتاری حساب‌شده‌تر و محتاطانه‌تر داشته باشد. از آنجا که تقریباً اکثر روش‌های جستجو فراکتشافی دارای پارامترهای قابل تنظیمی هستند، می‌توانیم میزان قابلیت‌های پوشش و انتفاع را در آنها کنترل نماییم.

دومین مسئله‌ای که الهام‌بخش ما برای انجام این تحقیق بوده، اتصال گره‌ها با کمترین تعداد گره حسگر است؛ که در اکثر سناریوهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم احساس می‌شود. و از آنجایی که امروزه فناوری شبکه‌های حسگر بی‌سیم با کاربردهای حیاتی مانند پزشکی، کشاورزی و نظامی گره خورده است، مسلماً اولین پیش‌نیاز ما برای تحقق این هدف، دستیابی به کاهش مصرف انرژی گره‌ها و افزایش طول عمر شبکه است.

ما در این تحقیق قصد داریم برای حل و فصل چالش‌های فوق یک الگوریتم فراکتشافی در جهت حل مسئله پوشش و اتصال در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده کنیم. بر این اساس فرضیه‌های زیر مدنظر است:

فرضیه اول: رهیافت فراکتشافی پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های فراکتشافی موجود، پوشش شبکه را به طور معناداری بهبود می‌بخشد. فرضیه دوم: الگوریتم پیشنهادی منجر به افزایش نرخ اتصال گره‌های شبکه در مقایسه با روش‌های پایه می‌شود.

فرضیه سوم: الگوریتم پیشنهادی قادر است توازن مناسبی بین اهداف متضاد «پوشش» و «اتصال» ایجاد کرده و عملکرد کلی شبکه را بهینه کند.

فرضیه چهارم: الگوریتم پیشنهادی مصرف انرژی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم کاهش می‌دهد.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: بخش ۲ کارهای انجام‌شده در زمینه مسئله پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه می‌کند. بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی، از جمله مدل ریاضی و فرآیند محاسباتی آن را توضیح می‌دهد. بخش ۴ تجزیه و تحلیلی از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در مقایسه با سایر روش‌ها در حل مشکل پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارزیابی می‌کند. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- پیشینه پژوهش

مسئله پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در طول سال‌های گذشته مورد تحقیقات وسیعی قرار گرفته است [۱]. این مسئله شامل تعدادی زیر مجموعه از قبیل پوشش سطح [۹]، پوشش هدف [۶] و پوشش کتایی [۱۰] است که هر کدام نیازمند راهبردی متفاوت برای حل مسئله هستند. با این حال، در اکثر کاربردهای شبکه حسگر، هدف حداکثر کردن پوشش با حداقل تعداد گره حسگر است. پوشش و اتصال بهتر با نصب تعداد بیشتری از گره‌های حسگر به دست می‌آید، اما رقابت اصلی در این است که با استقرار کمترین مجموع گره‌ها و همچنین حفظ مصرف انرژی در حداقل سطح، درجه اتصال و پوشش مطلوب را داشته باشیم.

انواع مختلف مسائل پوشش و اتصال در استقرار تصادفی گره در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را با پارامترهای مختلفی مانند تحرک گره‌ها از نظر ثابت یا متحرک بودن، نوع گره از نظر همگن یا ناهمگن بودن و رویکردهای راه‌حل اتخاذشده براساس متمرکز یا توزیع‌شده مشخص می‌کنند. روش‌های پوشش در شبکه حسگر بی‌سیم به‌طور کلی به دودسته روش‌های کلاسیک و روش‌های مبتنی بر فراکتشافی تقسیم می‌شوند. روش‌های کلاسیک خود به سه دسته روش‌های مبتنی بر شبکه^۱ [۱۱] و [۱۲]، روش‌های محاسبات جغرافیایی^۲ [۱۳] تا [۱۶] و روش‌های مبتنی بر

1. Grid-Based Techniques
2. Computational Geometry

جدول ۱: روش‌های کلاسیک در زمینه پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

روش [مرجع]	سال	اتصال	پوشش	قابلیت اعتماد	مقیاس پذیری	مصرف انرژی	پیچیدگی محاسبات	نوع گره حسگر	تحرک گره حسگر	شبیه‌ساز
VFA [۲۴]	۲۰۰۴	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	بالا	همگن	متحرک	متلب
VFPSO [۲۱]	۲۰۰۷	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	متوسط	همگن	ثابت-متحرک	متلب
DVFA [۲۵]	۲۰۱۲	دارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	متوسط	همگن	متحرک	NS2
VanDerWaals [۲۶]	۲۰۱۳	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	بالا	همگن	متحرک	متلب
VFBBO [۲۷]	۲۰۱۳	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	متوسط	همگن	ثابت	-
HLVFA [۲۲]	۲۰۱۳	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	متوسط	همگن	ثابت	-
MVFA [۱۸]	۲۰۱۵	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	متوسط	همگن	متحرک	متلب
VFASF-OPT [۱۷]	۲۰۱۹	ندارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	بالا	همگن	ثابت	Microsoft Visual C++
IVFAI [۲۸]	۲۰۱۹	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	متوسط	همگن	ثابت	متلب
VFLGWO [۲۰]	۲۰۱۹	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	بالا	همگن	ثابت	متلب
VMFA [۱۹]	۲۰۲۰	ندارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	بالا	همگن	متحرک	متلب
VFIALO [۲۳]	۲۰۲۱	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	بالا	همگن	ثابت	متلب
RPSODV [۲۹]	۲۰۲۲	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	بالا	همگن	ثابت	متلب
VBIVFA [۳۰]	۲۰۲۲	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	بالا	همگن	ثابت	متلب
BVFPFO [۳۱]	۲۰۲۳	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد	متوسط	همگن	متحرک	متلب
VBACC [۳۲]	۲۰۲۴	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	بالا	همگن	متحرک	-

چنین شرایطی، الگوریتم‌های فرااکتشافی چندهدفه با الهام از پدیده‌های طبیعی می‌توانند تعادلی میان این اهداف برقرار کرده و مجموعه‌ای از پاسخ‌های پارتو^۳ را به دست آورند.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های مختلفی برای حل این نوع مسائل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده شده‌اند. با وجود این، بسیاری از این روش‌ها در همگرایی زودهنگام، پراکندگی پایین در جبهه‌ی پارتو و وابستگی زیاد به تنظیم پارامترها دچار ضعف هستند.

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، در این پژوهش یک الگوریتم فرااکتشافی چندهدفه جدید بر پایه‌ی رفتار شکار یوزپلنگ ارائه می‌شود. این الگوریتم با الهام از مراحل مشاهده، تعقیب و حمله‌ی یوزپلنگ، سه فاز اصلی شامل بررسی ناحیه‌ی جستجو، تمرکز بر شکار و به‌روزرسانی تطبیقی موقعیت‌ها را در فرآیند بهینه‌سازی پیاده‌سازی می‌کند.

روش پیشنهادی از ترکیب سه تابع هدف زیر بهره می‌گیرد:

- بیشینه‌سازی پوشش شبکه به‌منظور اطمینان از تحت نظارت بودن بیشترین بخش از منطقه.
- بیشینه‌سازی اتصال گره‌ها جهت حفظ پایداری ارتباطی شبکه و تضمین ارسال داده‌ها به ایستگاه پایه.
- کمینه‌سازی انرژی مصرفی کل شبکه برای افزایش طول عمر گره‌ها و به تبع آن افزایش عمر کل شبکه.

در الگوریتم MOCO، هر راه‌حل ممکن، معرف آرایش مکانی گره‌های حسگر است و عملکرد آن با سه تابع هدف یادشده ارزیابی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در جبهه‌ی پارتو به تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد تا با توجه به اولویت‌های سیستم، ترکیب بهینه‌ای از پوشش، اتصال و انرژی را انتخاب کند. در ادامه، مدل ریاضی توابع هدف، قیود بهینه‌سازی و ساختار گام‌به‌گام الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود.

یکی از روش‌های فرااکتشافی که اخیراً توسط میرجلیلی و همکاران ارائه شده بهینه‌ساز یوزپلنگ^۱ است [۶۰]. روش CO به تعداد کمی معادله و محاسبات نیاز دارد و استراتژی‌های شکار سعی می‌کنند روند شکار را مدل کنند. این استراتژی‌ها یک موازنه مناسب بین جستجوهای اکتشافی و بهره‌برداری ایجاد می‌کنند و از همگرایی زودرس در مسائل مختلف بهینه‌سازی جلوگیری می‌کنند. بنابراین، این روش می‌تواند در مسائل با مقیاس بزرگ به‌طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق سعی داریم از روش فرااکتشافی CO رویکردی جدید برای بهینه‌سازی پوشش و اتصال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه نماییم.

۳- روش پیشنهادی

۳-۱ کلیات

شبکه‌های حسگر بی‌سیم به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در اینترنت اشیاء، پایش هوشمند محیطی و سیستم‌های صنعتی خودکار شناخته می‌شوند. کارایی یک شبکه‌ی حسگر تا حد زیادی به پوشش ناحیه‌ی مورد نظر، اتصال میان گره‌ها و مدیریت بهینه‌ی انرژی بستگی دارد. با این حال، میان این سه عامل یک رابطه‌ی تضادآمیز^۲ وجود دارد؛ به گونه‌ای که افزایش چگالی پوشش معمولاً موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود و در مقابل، کاهش مصرف انرژی ممکن است به افت اتصال یا کاهش پوشش منجر شود.

در طراحی بهینه‌ی شبکه‌های حسگر، هدف آن است که آرایش مکانی گره‌ها و سیاست‌های ارتباطی به گونه‌ای انتخاب شوند که پوشش منطقه حداکثر، اتصال شبکه پایدار، و مصرف انرژی کل حداقل شود. با توجه به این که این سه هدف به صورت ذاتی متضاد هستند، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی تک‌هدفه نمی‌تواند راه‌حل‌های مناسبی ارائه دهد. در

1. Cheetah Optimizer (CO)

2. Trade-Off

جدول ۲: روش‌های فرا اکتشافی در زمینه پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

روش (مقاله)	سال	اتصال	پوشش	قابلیت اعتماد	مقیاس پذیری	مصرف انرژی	پیچیدگی محاسبات	نوع گره حسگر	تحرك گره حسگر	شبیه‌ساز
ACO [۳۳]	۲۰۱۱	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	بالا	بالا	همگن	ثابت	-
ABC [۳۴]	۲۰۱۲	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	بالا	بالا	همگن	متحرك	-
BBO [۳۵]	۲۰۱۲	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	بالا	بالا	همگن	ثابت-متحرك	متلب
MOEA/D [۳۶]	۲۰۱۳	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	پایین	همگن-ناهمگن	ثابت	-
CM-IA [۳۷]	۲۰۱۴	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	متوسط	همگن	متحرك	متلب
EENPA [۳۸]	۲۰۱۴	ندارد	دارد	ندارد	دارد	پایین	متوسط	همگن	ثابت	QualNet
GA [۳۹]	۲۰۱۶	دارد	دارد	ندارد	ندارد	بالا	بالا	همگن	ثابت	متلب
MGA-RNP [۴۰]	۲۰۱۶	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	متوسط	بالا	همگن	ثابت	پایتون
SA [۴۱]	۲۰۱۷	دارد	دارد	ندارد	ندارد	متوسط	بالا	همگن-ناهمگن	ثابت	متلب
HS [۴۲]	۲۰۱۷	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	متوسط	همگن	ثابت	متلب
MADA-WOA [۴۳]	۲۰۱۷	ندارد	دارد	ندارد	دارد	بالا	بالا	همگن	متحرك	متلب
Firefly [۴۴]	۲۰۱۷	ندارد	دارد	ندارد	دارد	پایین	بالا	همگن	ثابت	متلب
PSO [۴۵]	۲۰۱۸	ندارد	دارد	دارد	دارد	بالا	بالا	ناهمگن	ثابت	متلب
MIGA [۴۷]	۲۰۱۹	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	بالا	ناهمگن	ثابت	-
IABC [۴۷]	۲۰۱۹	دارد	دارد	ندارد	ندارد	پایین	بالا	همگن	ثابت	متلب
GA-PSO [۷]	۲۰۲۰	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	متوسط	بالا	همگن	ثابت	متلب
Bat Algorithm (BA) [۴۸]	۲۰۲۱	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	متوسط	همگن	ثابت	متلب
Cuckoo search [۴۹]	۲۰۲۱	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	متوسط	متوسط	ناهمگن	ثابت	متلب
CSSO [۵۰]	۲۰۲۱	دارد	دارد	دارد	ندارد	بالا	بالا	همگن	ثابت	متلب
EOBBMA [۵۱]	۲۰۲۲	ندارد	دارد	ندارد	دارد	پایین	بالا	همگن	ثابت	متلب
SSMA [۵۲]	۲۰۲۲	ندارد	دارد	دارد	دارد	متوسط	متوسط	ناهمگن	ثابت	-
HHH [۵۳]	۲۰۲۳	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	متوسط	متوسط	همگن	ثابت	متلب
IM-DTSSA [۵۴]	۲۰۲۳	ندارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	متوسط	همگن	ثابت-متحرك	متلب
IHBA [۵۵]	۲۰۲۳	ندارد	دارد	ندارد	دارد	پایین	متوسط	همگن	ثابت	متلب
CMOMPA [۵۶]	۲۰۲۳	دارد	دارد	دارد	دارد	بالا	متوسط	ناهمگن	ثابت	متلب
MOFAC-GA-PSO [۵۷]	۲۰۲۳	ندارد	دارد	ندارد	ندارد	پایین	متوسط	همگن	متحرك	پایتون
Improved Grey Wolf Optimizer [۵۸]	۲۰۲۴	دارد	دارد	ندارد	دارد	متوسط	بالا	همگن	ثابت	متلب
GA with RWOA [۵۹]	۲۰۲۴	دارد	دارد	دارد	دارد	متوسط	بالا	همگن	ثابت	متلب

۲-۳ مدل‌سازی مسئله

فرض کنید شبکه‌ای با n گره حسگر در ناحیه‌ای مستطیلی با ابعاد $M \times N$ توزیع شده است. هر حسگر i دارای موقعیت (x_i, y_i) و شعاع حسگری r_s و شعاع ارتباطی r_c است. مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه به صورت (۱) تعریف می‌شود.

$$\text{Max } \{F(x)\} = [f_1(x), f_2(x), -f_3(x)] \quad (1)$$

که در آن $f_1(x)$ تابع هدف پوشش، $f_2(x)$ تابع هدف اتصال و $f_3(x)$ تابع هدف انرژی می‌باشند.

۳-۳ تابع هدف اول: پوشش شبکه

پوشش بیانگر درصد نقاط تحت نظارت شبکه نسبت به کل ناحیه‌ی حسگر است. برای هر نقطه k_j در شبکه، احتمال تحت پوشش بودن به صورت (۲) تعریف می‌شود.

$$P_{\text{cov}}(l_i, k_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } r_s \leq d(l_i, k_j) \\ 1 & \text{if } r_s > d(l_i, k_j) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن فاصله‌ی بین حسگر و نقطه‌ی هدف از (۳) به دست می‌آید.

$$d(l_i, k_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

در نتیجه، تابع هدف پوشش به صورت (۵) بیان می‌شود.

$$P(L, k_j) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{cov}}(l_i, k_j)) \quad (4)$$

در نتیجه، تابع هدف پوشش به صورت (۵) بیان می‌شود.

$$P(L, k_j) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{cov}}(l_i, k_j)) \quad (5)$$

که $f_1 \in [0, 1]$ است و هدف، بیشینه‌سازی f_1 می‌باشد.

۳-۴ تابع هدف دوم: اتصال شبکه

اتصال نشان‌دهنده‌ی قابلیت برقراری مسیر ارتباطی بین تمام گره‌های شبکه و ایستگاه پایه (Sink) است. دو گره i و j در صورتی به هم متصلند که فاصله‌ی بین آن‌ها از شعاع ارتباطی کمتر باشد در (۶) اتصال دو گره را نشان می‌دهد.

$$C_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_c \leq d(l_i, l_j) \\ 1 & \text{if } r_c > d(l_i, l_j) \end{cases} \quad (6)$$

یک ماتریس مجاورت $A = [C_{ij}]_{N_s \times N_s}$ تشکیل می‌شود، اتصال کلی شبکه به صورت نسبت تعداد گره‌های درون مولفه‌ی متصل به گره‌ی پایه مطابق (۷) تعریف می‌گردد.

$$f_2 = \frac{N_{conn}}{N_s} \quad (7)$$

که در آن N_{conn} تعداد گره‌هایی است که از طریق یک یا چند پرش به ایستگاه پایه متصل‌اند. هدف، بیشینه‌سازی f_2 است تا از قطع ارتباط در شبکه جلوگیری شود.

۳-۵ تابع هدف سوم: انرژی مصرفی

انرژی مصرفی هر گره ترکیبی از انرژی انتقال، دریافت و حرکت است. در این مدل، با فرض انتقال داده از گره i و j در (۸) تعریف می‌شود.

$$E_{tx}(i, j) = E_{elec} \times l + \varepsilon_{amp} \times l \times d^\alpha(l_i, l_j) \quad (8)$$

که در آن E_{elec} انرژی الکترونیکی، ε_{amp} انرژی تقویت‌کننده و l طول بسته داده است. میانگین کل انرژی مصرفی شبکه به صورت (۹) بیان می‌شود.

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{E_i}{N_s} \quad (9)$$

که هدف، کمینه‌سازی f_3 است.

۳-۶ مدل نهایی بهینه‌سازی چندهدفه

با در نظر گرفتن سه تابع هدف فوق، مدل کلی به صورت (۱۰) نوشته می‌شود.

$$\text{Max} \{F(x)\} = [f_1(x), f_2(x), -f_3(x)] \quad (10)$$

$$x_i \in [0, M], y_i \in [0, N], i = 1, \dots, N_s$$

۳-۷ الگوریتم فرااکتشافی چندهدفه یوزپلنگ

الگوریتم فرااکتشافی چندهدفه یوزپلنگ یا MOCO (شکل ۲) با الهام از رفتار شکار یوزپلنگ طراحی شده و برای بهینه‌سازی هم‌زمان سه هدف پوشش، اتصال و انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به کار می‌رود. در این روش، هر پاسخ نشان‌دهنده‌ی آرایش مکانی گره‌های حسگر است و با سه تابع هدف ارزیابی می‌شود. الگوریتم شامل دو فاز اصلی است، مشاهده برای جست‌وجوی نواحی امیدبخش و تعقیب برای تمرکز بر نواحی بهینه. موقعیت جدید هر یوزپلنگ بر اساس بهترین پاسخ‌های فعلی و مؤلفه‌های تصادفی نرمال به‌روزرسانی می‌شود تا از بهینه‌های محلی عبور کند. پس از هر تکرار، پاسخ‌های غیرغالب بر اساس غالب‌بودن پارتو انتخاب و تنوع آن‌ها با معیار فاصله‌ی جمعیتی حفظ می‌شود. در نهایت، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو ارائه می‌شود که تعادل مؤثری میان پوشش بالا، اتصال پایدار و مصرف انرژی پایین برقرار می‌کند.

Algorithm 1: Multi-Objective Cheetah Optimizer (MOCO)

Start
 Initialize population of solutions
 Evaluate objectives (Coverage f_1 , Connectivity f_2 , Energy f_3)
 Store best solutions (Pareto front)
 While (stopping criteria not met)
 Observation: identify promising areas in search space
 Sprint: generate new solutions using adaptive coefficients
 (α, β, H)
 Evaluate f_1, f_2, f_3 for new solutions
 Update Pareto front
 End While
 Output final non-dominated (Pareto optimal) solutions
 End

شکل ۲: الگوریتم فرااکتشافی چندهدفه یوزپلنگ.

در الگوریتم MOCO ضرایب تطبیقی (α, β, H) ، برای ایجاد تعادل هوشمند بین اکتشاف و بهره‌برداری، به صورت غیرخطی و وابسته به نسبت تکرار جاری به بیشترین تکرار به‌روزرسانی می‌شوند. پارامتر α ضریب انرژی است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد. این پارامتر تعیین‌کننده احتمال انتخاب بین فاز «مشاهده/جستجو» و فاز «تعقیب/حمله» است. پارامتر β ضریب جهت‌گیری است، این ضریب برای همگرایی به سمت بهترین راه‌حل‌های جاری استفاده می‌شود. این ضریب در مراحل اولیه مقادیر بالایی دارد تا اکتشاف تقویت شود و به تدریج کاهش می‌یابد تا بهره‌برداری دقیق‌تر صورت گیرد. پارامتر H برای مدل‌سازی پرش‌های تصادفی در فاز اکتشاف به کار می‌رود و از توزیع لوی^۱ برای شبیه‌سازی حرکت‌های ناگهانی یوزپلنگ استفاده می‌کند.

مکانیزم تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم بر اساس α به صورت زیر است:

اگر $\alpha < rand$ باشد الگوریتم وارد فاز اکتشاف می‌شود. در این حالت یوزپلنگ‌ها محیط را برای شناسایی مناطق امیدوارکننده جستجو می‌کنند در غیر این صورت الگوریتم وارد فاز بهره‌برداری می‌شود. در این حالت یوزپلنگ روی شکار (راه‌حل بهینه) تمرکز می‌کند.

سازوکار انتخاب و به‌روزرسانی جبهه پارتو پس از تولید جمعیت جدید و ارزیابی توابع هدف، راه‌حل‌های جدید و قدیمی با هم ترکیب می‌شوند. سپس عملیات غالب‌سازی انجام می‌شود هر راه‌حل که هیچ راه‌حل دیگری بر آن غالب نباشد، در جبهه پارتو ذخیره می‌شود در صورت پر شدن ظرفیت آرشیو، از معیارهایی مانند فاصله اقلیدسی برای حذف راه‌حل‌های شلوغ و حفظ توزیع یکنواخت استفاده می‌شود.

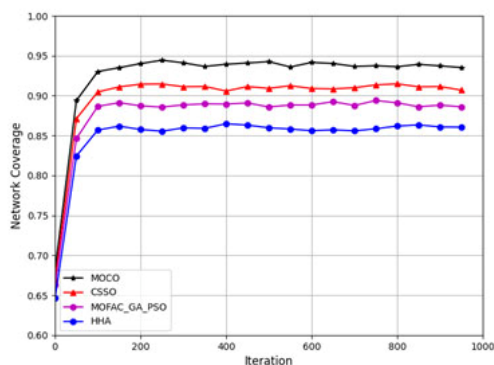
۴- ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس سه شاخص کلیدی شامل نرخ پوشش شبکه، نرخ اتصال گره‌ها و انرژی باقیمانده حسگرها مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل تطبیقی، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی با سه روش معتبر شامل MOFAC-GA-PSO [۵۷] و HHA [۵۳] و CSSO [۵۰] مقایسه شده

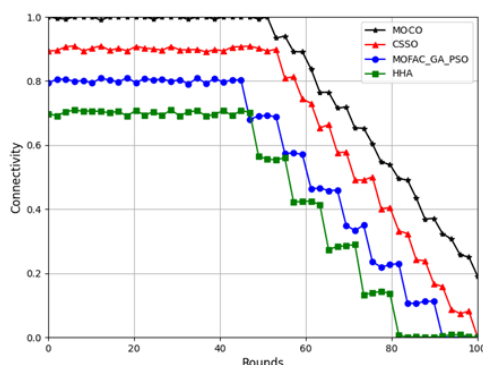
1. Levy Distribution

جدول ۳: مقادیر و داده‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر	ناحیه تحت پوشش
۵ متر	شعاع حسگری
۱۰ متر	شعاع ارتباطی
۱۰۰	تعداد گره حسگر
۱۰۰۰ بار	تعداد تکرار
۱ ژول	انرژی اولیه هر حسگر
۵۱۲ بایت	اندازه بسته‌ها



شکل ۳: مقایسه نرخ پوشش.



شکل ۴: مقایسه نرخ اتصال.

MOFAC-GA-PSO و HHA به ترتیب برابر با ۹۲/۳ درصد، ۸۹/۵ درصد و ۸۶/۲ درصد بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از سازوکارهای جست‌وجوی گسترده و به‌روزرسانی تطبیقی، توانایی بالایی در یافتن چیدمان بهینه‌ی حسگرها دارد. استفاده از اطلاعات احتمالاتی و ترکیب پویا در فرآیند جست‌وجو موجب شده است تا MOCO بتواند تنوع بیشتری از موقعیت‌های ممکن را بررسی کرده و در نتیجه، پوشش یکنواخت‌تر و کامل‌تری از ناحیه‌ی هدف ارائه دهد. علاوه بر این، مقایسه‌ی کمی نشان می‌دهد که الگوریتم MOCO نسبت به MOFAC-GA-PSO، که یکی از روش‌های چندهدفه‌ی قدرتمند در این حوزه است، حدود ۴/۵ درصد بهبود در نرخ پوشش ایجاد کرده است. این میزان افزایش در کارایی، به‌ویژه در کاربردهایی که به پایش دقیق و کامل محیط‌های حساس مانند سامانه‌های نظامی، پزشکی یا زیست‌محیطی نیاز دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۴-۲ مقایسه نرخ اتصال

علاوه بر نرخ پوشش، نرخ اتصال^۱ نیز یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی کارایی شبکه‌های حسگر بی‌سیم محسوب می‌شود. حفظ اتصال مناسب میان گره‌های حسگر تضمین می‌کند که داده‌های جمع‌آوری شده بدون وقفه، تأخیر یا از دست رفتن بسته‌ها به ایستگاه پایه منتقل شوند. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مطابق با شکل ۴، الگوریتم پیشنهادی MOCO توانسته است بالاترین میزان اتصال را با مقدار ۹۸/۸ درصد به دست آورد، در حالی که مقادیر نرخ اتصال برای سایر الگوریتم‌ها شامل

است. تمامی الگوریتم‌ها در یک محیط شبیه‌سازی مشترک و با شرایط اولیه یکسان پیاده‌سازی شده‌اند تا مقایسه‌ای منصفانه حاصل شود. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام گرفته و پارامترهای اصلی سیستم مطابق با مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ تنظیم شده‌اند. نتایج به‌صورت نمودارهای مقایسه‌ای و جداول تحلیلی ارائه می‌شوند که نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی CO در تمامی شاخص‌ها، به‌ویژه در افزایش نرخ پوشش و حفظ انرژی باقیمانده گره‌ها، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مرجع دارد.

در بررسی و شبیه‌سازی، مفروضات زیر را در نظر گرفته شده است:

فرض ۱: حسگرها به اندازه کافی متراکم و تصادفی در یک شبکه‌های حسگر بی‌سیم دوطرفه مستقر شده‌اند تا یک شبکه متصل را تشکیل دهند و به‌طور کامل میدان سنجش را پوشش دهند.

فرض ۲: همه حسگرها از نظر محدوده حسی، محدوده ارتباطی و مصرف انرژی همگن هستند.

فرض ۳: محدوده سنجش حسگرها توسط دیسکی با شعاع ۲ مدل‌سازی می‌شود.

فرض ۴: مدل ارتباطی حسگرها توسط دیسکی مدل‌سازی می‌شود که اندازه آن دو برابر محدوده سنجش است.

فرض ۵: میدان حسی بدون مانع است.

به‌منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده و مقایسه آن با روش‌های CSSO [۵۰]، HHA [۵۳] و MOFAC-GA-PSO [۵۷] در چند آزمایش شبیه‌سازی نرخ پوشش، نرخ اتصال و مصرف انرژی را به دست می‌آوریم و باهم مقایسه می‌کنیم. مشکل مصرف انرژی شبکه همیشه موضوع و دغدغه تحقیقاتی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بوده است و همچنین پیشرفت تحقیقات پوشش شبکه را محدود می‌کند. با استقرار منطقی گره‌ها در شبکه، با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان نرخ استفاده از انرژی شبکه را به حداکثر رساند و تحقق تعادل انرژی می‌تواند به دستیابی به عملکرد پوشش بهینه شبکه کمک کند.

۴-۱ مقایسه نرخ پوشش

یکی از مهم‌ترین معیارها در بهینه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نرخ پوشش ناحیه‌ی هدف توسط حسگرهاست، زیرا افزایش این نرخ نشان‌دهنده‌ی بهبود قابلیت نظارت شبکه و دقت داده‌های گردآوری شده است. در این بخش، عملکرد الگوریتم MOCO از نظر نرخ پوشش با سه الگوریتم CSSO، MOFAC-GA-PSO و HHA مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده و مطابق با شکل ۳، الگوریتم MOCO توانسته است بیشترین میزان پوشش، برابر با ۹۴ درصد را حاصل کند، در حالی که نرخ پوشش برای الگوریتم‌های CSSO،

جدول ۴: نتایج آزمون ویلکاکسون برای مقایسه الگوریتم MOCO با سایر روش‌ها.

الگوریتم‌های مورد مقایسه	میانگین نتایج (پوشش)	p-value	نتیجه با سطح معناداری ($\alpha = 0.05$)
MOCO vs CSSO	۰٫۹۲ در برابر ۰٫۸۵	۰٫۰۰۷	رد فرضیه ۰ (اختلاف معنادار است)
MOCO vs MOFAC-GA-PSO	۰٫۹۲ در برابر ۰٫۸۷	۰٫۰۱۱	رد فرضیه ۰ (اختلاف معنادار است)
MOCO vs HHA	۰٫۹۲ در برابر ۰٫۸۳	۰٫۰۰۲	رد فرضیه ۰ (اختلاف معنادار است)

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، الگوریتم MOCO در تمامی مقایسه‌ها به طور معناداری عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است. این نتایج نشان می‌دهند که بهبود عملکرد MOCO نه تنها از نظر عددی بلکه از نظر آماری نیز قابل توجه است.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق الگوریتم بهینه‌ساز یوزپلنگ چندهدفه را به عنوان ابزاری برای استقرار گره در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای افزایش نرخ پوشش و اتصال شبکه‌های حسگر بی‌سیم در مناطق نظارت و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد می‌کند. نتایج شبیه‌سازی به وضوح نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌ساز یوزپلنگ چندهدفه (MOCO) توانسته است نرخ پوشش محیط را به بیش از ۹۴٫۵ درصد افزایش دهد، نرخ اتصال شبکه را به حدود ۹۷٫۸ درصد برساند و در عین حال میانگین مصرف انرژی حسگرها را تا ۱۵ درصد نسبت به سایر الگوریتم‌ها کاهش دهد. همچنین، زمان همگرایی این الگوریتم نسبت به رقبا کمتر بوده که نشان‌دهنده سرعت بالای آن در رسیدن به راه‌حل‌های بهینه است.

تحقیقات آینده می‌تواند بر روی اهداف دیگری علاوه بر مسئله بهینه‌سازی پوشش و اتصال، مانند پیش‌بینی مصرف انرژی و تنظیم اندازه شعاع‌های ادراکی گره حسگر برای افزایش چرخه عمر شبکه با کاهش افزونگی حسگر تمرکز خواهد کرد.

مراجع

- [1] J. Amutha, S. Sharma, and J. Nagar, "WSN Strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues," *Wireless Personal Communications*, vol. 111, no. 2, pp. 1089-1115, Oct. 2020.
- [2] C. So-In, T. G. Nguyen, and N.G. Nguyen, "An efficient coverage hole-healing algorithm for area-coverage improvements in mobile sensor networks," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 541-552, Aug. 2019.
- [3] S. Abdollahzadeh, and N. J. Navimipour, "Deployment strategies in the wireless sensor network: A comprehensive review," *Computer Communications*, vol. 91-92, pp. 1-16, Oct. 2016.
- [4] V. Chowdary and T. Bera, "Types of coverage in wireless sensor network: A survey," vol. 8, no. 4, pp. 463-467, Feb. 2022.
- [5] N. Saadi, et al., "Maximum lifetime target coverage in wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 111, no. 3, pp. 1525-1543, Jul. 2020.
- [6] A. Katti, "Target coverage in random wireless sensor networks using cover sets," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 3, pp. 734-746, Mar. 2022.
- [7] H.T.T. Binh, et al., "Metaheuristics for maximization of obstacles constrained area coverage in heterogeneous wireless sensor networks," *Applied Soft Computing*, vol. 86, Article ID: 105939, Nov. 2020.
- [8] R. Priyadarshi, B. Gupta, and A. Anurag, "Wireless sensor networks deployment: A result oriented analysis," *Wireless Personal Communications*, vol. 113, no. 2, pp. 843-866, 2020.

CSSO، MOFAC-GA-PSO و HHA به ترتیب ۹۲٫۵ درصد، ۸۱٫۲ درصد و ۷۲٫۱ درصد گزارش شده‌اند. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از ساختار بهینه‌سازی چندهدفه، توانسته است همبندی شبکه را به شکل قابل‌توجهی بهبود بخشد، به گونه‌ای که تقریباً تمامی گره‌های حسگر در یک ساختار ارتباطی پایدار و متصل قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، افزایش بیش از ۶٫۳ درصد نسبت به الگوریتم CSSO نشان‌دهنده توانایی بالای MOCO در حفظ ساختار گراف شبکه و جلوگیری از شکل‌گیری گره‌های منزوی^۱ است. در نتیجه، شبکه‌ی حاصل از اجرای این الگوریتم از قابلیت اطمینان و پایداری ارتباطی بالاتری برخوردار است که این ویژگی در کاربردهایی مانند مدیریت بحران، سامانه‌های امنیتی و پایش صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

۴-۳ مقایسه مصرف انرژی

در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مصرف انرژی یکی از عوامل حیاتی به‌شمار می‌رود، زیرا گره‌های حسگر معمولاً از منابع انرژی محدود (باتری) تغذیه می‌کنند و امکان شارژ یا جایگزینی آن‌ها در بسیاری از کاربردها وجود ندارد. بنابراین، کاهش مصرف انرژی مستقیماً موجب افزایش طول عمر شبکه و پایداری عملکرد آن می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی MOCO در مقایسه با سایر روش‌های مرجع، کمترین میزان مصرف انرژی را ثبت کرده است. میانگین مقادیر مصرف انرژی به ترتیب برای الگوریتم‌های HHA، CSSO، MOFAC-GA-PSO و MOCO برابر با ۰٫۷۲ ژول، ۰٫۶۸ ژول، ۰٫۷۰ ژول و ۰٫۶۱ ژول گزارش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم MOCO توانسته است به‌طور میانگین حدود ۱۱ درصد کاهش مصرف انرژی نسبت به CSSO، حدود ۱۵ درصد نسبت به HHA و نزدیک به ۱۴ درصد نسبت به MOFAC-GA-PSO را به‌دست آورد. این کاهش چشمگیر عمدتاً ناشی از انتخاب بهینه موقعیت حسگرها، کاهش هم‌پوشانی غیرضروری در پوشش ناحیه و مدیریت متوازن بار ارتباطی بین گره‌ها است. در نتیجه، شبکه‌ی حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی قادر است برای دوره‌های زمانی طولانی‌تر با کارایی بالا و اتلاف انرژی کمتر به فعالیت خود ادامه دهد که این موضوع در کاربردهای بلندمدت نظیر پایش زیست‌محیطی، سامانه‌های صنعتی و امنیتی اهمیت ویژه‌ای دارد.

۴-۴ تحلیل آماری

برای ارزیابی معناداری آماری بهبود عملکرد الگوریتم MOCO نسبت به روش‌های CSSO، MOFAC-GA-PSO و HHA، از آزمون ویلکاکسون به عنوان یک آزمون غیرپارامتری مناسب برای مقایسه دو به دو الگوریتم‌ها استفاده شده است. این آزمون فرضیه‌های زیر را بررسی می‌کند:

فرضیه ۰: تفاوت معناداری بین دو الگوریتم وجود ندارد.

فرضیه ۱: تفاوت معناداری بین دو الگوریتم وجود دارد.

سطح معناداری در این آزمون ۰٫۰۵ در نظر گرفته شده است. داده‌ها شامل ۳۰ اجرا برای هر الگوریتم در هر مسئله می‌باشد. اگر مقدار p-value از سطح معناداری کمتر باشد فرضیه ۰ را رد می‌کنیم. نتایج این آزمون در جدول ۴ گزارش شده است.

- [31] V. Kiani and M. Imanparast, "A bi-objective virtual-force local search PSO algorithm for improving sensing deployment in wireless sensor networks," *Journal of AI and Data Mining*, vol. 11, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2023.
- [32] W. A. Farias, et al., "Voronoi-based approach to increase connectivity and coverage in randomly deployed wireless sensor networks," in *Proc. 8th Int. Symp. on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers*, 6 pp., Joao Pesoa, Brazil, 2-6 Sept. 2024.
- [33] W. -H., Liao, Y. Kao, and R. -T. Wu, "Ant colony optimization-based sensor deployment protocol for wireless sensor networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 6, p. 6599-6605, Jun. 2011.
- [34] C. Öztürk, D. Karaboğa, and B. Gorkemli, "Artificial bee colony algorithm for dynamic deployment of wireless sensor networks," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 255-262, Mar. 2012.
- [35] G. Wang, et al., "Dynamic deployment of wireless sensor networks by biogeography based optimization algorithm," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 86-96, Apr. 2012.
- [36] S. Özdemir, B. A. Attea, and Ö. A. Khalil, "Multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy efficient coverage in wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 71, no. 1, pp. 195-215, Mar. 2013.
- [37] M. Abo-Zahhad, et al., "Coverage maximization in mobile wireless sensor networks utilizing immune node deployment algorithm," in *Proc. IEEE 27th Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, 6 pp., Toronto, Canada, 4-7 May 2014.
- [38] K. Y. Bendigeri, and J. D. Mallapur, Energy Aware Node Placement Algorithm for Wireless Sensor Network, 2014.
- [39] S. Gupta, P. Kuila, and P. Jana, "Genetic algorithm for k-connected relay node placement in wireless sensor networks," in *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Computer and Communication Technologies*, vol. 1, pp. 721-729, Hyderabad, India, 24-26 Jul. 2016.
- [40] J. George and R. M. Sharma, "Relay node placement in wireless sensor networks using modified genetic algorithm," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology*, pp. 551-556, Bengaluru, India, 21-23 Jul. 2016.
- [41] Y. El Khamlihi, et al., "A hybrid algorithm for optimal wireless sensor network deployment with the minimum number of sensor nodes," *Algorithms*, vol. 10, no. 3, pp. 80-88, Sept. 2017.
- [42] O. M. Alia and A. Al-Ajouri, "Maximizing wireless sensor network coverage with minimum cost using harmony search algorithm," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 3, p. 882-896, Jun. 2017.
- [43] R. Ozdag and M. Canayaz, "A new dynamic deployment approach based on whale optimization algorithm in the optimization of coverage rates of wireless sensor networks," *European Journal of Technic*, vol. 7, no. 1, pp. 119-130, Feb. 2017.
- [44] E. Tuba, M. Tuba, and M. Beko, "Mobile wireless sensor networks coverage maximization by firefly algorithm," in *Proc. 27th Int. Conf. Radioelektronika*, 5 pp., Brno, Czech Republic, 19-20 Apr. 2017.
- [45] B. Cao, et al., "Deployment optimization for 3D industrial wireless sensor networks based on particle swarm optimizers with distributed parallelism," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 103, pp. 225-238, Feb. 2018.
- [46] N. T. Hanh, et al., "An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks," *Information Sciences*, vol. 488, pp. 58-75, Jul. 2019.
- [47] Y. Yue, L. Cao, and Z. Luo, "Hybrid artificial bee colony algorithm for improving the coverage and connectivity of wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 3, pp. 1719-1732, May 2019.
- [48] S. S. Mohar, S. Goyal, and R. Kaur, "Optimized sensor nodes deployment in wireless sensor network using bat algorithm," *Wireless Personal Communications*, vol. 116, no. 4, pp. 2835-2853, Aug. 2021.
- [49] D. Arivudainambi, R. Pavithra, and P. Kalyani, "Cuckoo search algorithm for target coverage and sensor scheduling with adjustable sensing range in wireless sensor network," *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, vol. 24, no. 4, pp. 975-996, Jul. 2021.
- [50] L. Cao, et al., "A novel coverage optimization strategy for heterogeneous wireless sensor networks Based on connectivity and reliability," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18424-18442, 2021.
- [51] G. Zhou, T. Zhang, and Y. Zhou, "Elite opposition-based bare bones Mayfly algorithm for wireless sensor networks coverage optimization," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 50, pp. 719-739, 2025.
- [52] Y. Wei, et al., "SSMA: simplified slime mould algorithm for optimization wireless sensor network coverage problem," *Systems*
- [9] L. Kong, et al., "Surface coverage in sensor networks," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 234-243, Jan. 2014.
- [10] H. M. Ammari, "Connected k-coverage in two-dimensional wireless sensor networks using hexagonal slicing and area stretching," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 153, no. 2, pp. 89-109, Jul. 2021.
- [11] Al-Turjman, F.M., H.S. Hassanein, and M. Ibnkahla, "Quantifying connectivity in wireless sensor networks with grid-based deployments," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 368-377, Jan. 2013.
- [12] Liu, Y., et al., "A virtual square grid-based coverage algorithm of redundant node for wireless sensor network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 811-817, Mar. 2013.
- [13] F. Abbasi, A. Mesbahi, and J.M. Velni, "A new voronoi-based blanket coverage control method for moving sensor networks," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 409-417, Mar. 2019.
- [14] A. Boukerche and X. Fei, "A voronoi approach for coverage protocols in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf.*, vol. 5, pp. 5190-5194, Washington, DC, USA, 26-30 Nov. 2007.
- [15] S. Fortune, "Voronoi diagrams and DELAUNAY triangulations," in *Computing in Euclidean Geometry*, pp. 225-265, World Scientific Publishing, 1995.
- [16] J. Jiang, Z. Song, H. Zhang, and W. Dou, "Voronoi-based improved algorithm for connected coverage problem in wireless sensor networks," in *Proc. of the 2005 Int. Conf. on Embedded and Ubiquitous Computing*, pp. 224-233, Nagasaki, Japan, 6-9 Dec. 2005.
- [17] X. Deng, et al., "An optimized node deployment solution based on a virtual spring force algorithm for wireless sensor network applications," *Sensors*, vol. 19, no. 8, Article ID: 1817, Sept. 2019.
- [18] Y. Li, B. Zhang, and S. Chai, "An energy balanced-virtual force algorithm for mobile-WSNs," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Mechatronics & Automation*, Beijing, China, pp. 1779-1784, 2-5 Aug. 2015.
- [19] Liu, S., R. Zhang, and Y. Shi, "Design of coverage algorithm for mobile sensor networks based on virtual molecular force," *Computer Communications*, vol. 150, pp. 269-277, Jan. 2020.
- [20] S. Wang, et al., "A virtual force algorithm-Lévy-embedded grey wolf optimization algorithm for wireless sensor network coverage optimization," *Sensors*, vol. 19, no. 12, Article ID: 2735, Sept. 2019.
- [21] X. Wang, S. Wang, and D. Bi, "Virtual force-directed particle swarm optimization for dynamic deployment in wireless sensor networks," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Computing*, pp. 292-303, Qingdao, China, 21-24 Aug. 2007.
- [22] C. C. Yang and J. H. Wen, "A hybrid local virtual force algorithm for sensing deployment in wireless sensor network," in *Proc. 7th Int. Conf. on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, pp. 617-621, Taichung, Taiwan, 3-5 Jul. 2013.
- [23] Y. Yao, et al., "Coverage enhancement strategy for WSNs based on virtual force-directed ant lion optimization algorithm," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 17, pp. 19611-19622, Oct. 2021.
- [24] Zou, Y. and K. Chakrabarty, "Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks," *ACM Trans. Embedded Computer Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 61-91, Feb. 2004.
- [25] K. Mougou, et al., "Redeployment of randomly deployed wireless mobile sensor nodes," in *Proc. IEEE 76th Vehicular Technology Conf. VTC Fall*, 5 pp., Québec, Canada, 3-6 Sept. 2012.
- [26] X. Yu, et al., "A node deployment algorithm based on Van Der Waals force in wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9, no. 10, Article ID: 505710, 2013.
- [27] M. Song, L. Yong, W. Li, and T. A. Gulliver, "Improving wireless sensor network coverage using the VF-BBO algorithm," in *Proc. IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers and Signal Processing*, pp. 318-321, Victoria, Canada, 27-29 Aug. 2013.
- [28] J. Xie, et al., "A sensor deployment approach using improved Virtual force algorithm based on area intensity for multisensor networks," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID: 8015309, Mar. 2019.
- [29] X. Qi, et al., "A wireless sensor node deployment scheme based on embedded virtual force resampling particle swarm optimization algorithm," *Applied Intelligence*, vol. 52, no. 7, pp. 7420-7441, Sept. 2022.
- [30] Q. Wen, et al., "Coverage enhancement algorithm for WSNs based on vampire bat and improved virtual force," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 8245-8256, Sept. 2022.

محبوبه هوشمند مدارک کارشناسی و کارشناسی‌ارشد خود را در رشته مهندسی کامپیوتر، گرایش نرم‌افزار، به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۹ از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت کرد و مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی کامپیوتر، گرایش معماری کامپیوتر، در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. ایشان از اواخر تابستان ۲۰۱۵ تا اواخر تابستان ۲۰۱۶، به‌عنوان پژوهشگر پسادکتر در زمینه رمزنگاری کوانتومی به‌طور مشترک در دانشگاه ملی سنکاپور و دانشگاه فناوری و طراحی سنکاپور مشغول به کار بود. نام‌برده در حال حاضر دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد است. علایق پژوهشی ایشان شامل نظریه اطلاعات کوانتومی و محاسبات کوانتومی، رمزنگاری، سیستم‌های چندعامله و داده‌کاوی است.

سید عابد حسینی دکترای خود را در رشته مهندسی برق، گرایش کنترل در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت کرده است. ایشان هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد است. نام‌برده تا کنون بیش از ۱۵۰ مقاله‌ی انتشاریافته و فصل‌کتاب منتشر کرده است. حوزه‌های پژوهشی ایشان شامل علوم شناختی، پردازش سیگنال‌های حیاتی، پردازش تصویر، یادگیری عمیق، مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی و سیستم‌های کنترل است.

مهرداد جلالی دارای دکترای مهندسی کامپیوتر از دانشگاه پوترای مالزی است. ایشان از سال ۲۰۲۴ پژوهشگر و عضو هیأت‌علمی در گروه علم داده کاربردی و هوش مصنوعی دانشگاه SRH هایدلبرگ در آلمان است. زمینه تخصصی نام‌برده شامل یادگیری ماشین، تحلیل داده‌های پیچیده، و توسعه سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است. ایشان همچنین دارای سال‌ها تجربه تدریس و راهنمایی دانشجویان در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد است.

Science & Control Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 662-685, Feb. 2022.

- [53] H. A. Wasay and P. K. Priya, "Effective coverage optimization techniques in WSN using the Harris hawk algorithm," in *Proc. Int. Conf. on Recent Trends in Microelectronics, Automation, Computing and Communications Systems*, pp. 281-286, Heydarabad, India, 28-30 Dec. 2023.
- [54] H. Chen, *et al.*, "A multi-strategy improved sparrow search algorithm for coverage optimization in a WSN," *Sensors*, vol. 23, no. 8, Article ID: 4124, Apr.-2 2023.
- [55] T. -K. Dao, T. -D. Nguyen, and V. -T. Nguyen, "An improved honey badger algorithm for coverage optimization in wireless sensor network," *Journal of Internet Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 363-377, Mar. 2023.
- [56] L. Chen, *et al.*, "Balancing the trade-off between cost and reliability for wireless sensor networks: a multi-objective optimized deployment method," *Applied Intelligence*, vol. 53, no. 8, pp. 9148-9173, Jun. 2023.
- [57] S. K., De, *et al.*, "Coverage area maximization using MOFAC-GA-PSO hybrid algorithm in energy efficient WSN design," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 99901-99917, 2023.
- [58] Y. Ou, *et al.*, "An improved grey wolf optimizer with multi-strategies coverage in wireless sensor networks," *Symmetry*, vol. 16, no. 3, pp. 19-26, Apr. 2024.
- [59] S. Sun, Y. Chen, and L. Dong, "An optimization method for wireless sensor networks coverage based on genetic algorithm and reinforced whale algorithm," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 2787-2812, 2024.
- [60] M. A. Akbari, *et al.*, "The cheetah optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems," *Scientific Reports*, vol. 12, Article ID: 10953, Jun. 2022.

مصطفی بصیرنژاد تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی‌ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش نرم‌افزار به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۹۰ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد به پایان رساند و از سال ۱۳۹۹ به دوره دکتری تخصصی مهندسی کامپیوتر گرایش نرم‌افزار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد وارد شد. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی شامل موضوعاتی مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم، الگوریتم‌های فراابتکاری و یادگیری ماشین است.