نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال پنجم، شماره سوم، پاییز 1396

Vol.5, No.3, Autumn 2017

31-49

جانمایی حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از یک رهیافت تکاملی چندهدفه مقید بر مبنای تجزیه

مینا خالصیان[1]، محمود رضا دلاور[2*]

1- دکترای سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

2- استاد، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله 1395/09/28 تاریخ پذیرش مقاله: 1395/11/20

چکیده

جانمایی حسگرها یکی از بنیادی‌ترین مسائل در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم محسوب می‌گردد. یکی از چالش‌های اصلی در جانمایی حسگرها، یافتن موازنه‌ای بهینه بین اهداف متعارض شبکه (مانند پوشش و طول عمر شبکه) تحت قیود همبندی می‌باشد. از طرف دیگر، تجزیه، یک روش پایه در بهینه‌سازی چندهدفه محسوب می‌گردد که در سال‌های اخیر ایده استفاده از آن در بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه مطرح شده است. در این مقاله یک رهیافت "تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید بر پایه تجزیه" برای حل مسئله جانمایی بهینه حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم مطرح شده است. هدف این رهیافت آن است که با تجزیه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه جانمایی حسگرها به چندین زیرمسئله بهینه‌سازی اسکالر و بهینه نمودن همزمان آنها، به یافتن جانمایی‌های بهینه پَرِتویی بپردازد که در آنها پوشش و طول عمر شبکه حداکثر شده و همبندی کامل بین هر گره حسگر و گره ارتباطی با انرژی بالا نیز برقرار باشد. در این مقاله، مقایسه متریک‌های کارایی مطرح در این زمینه نشان می‌دهد که رهیافت پیشنهاد شده منجر به بهبودهایی مهم در کارایی کلی رهیافت "تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید" شده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی بر روی یک نمونه آزمایشی حاکی از برتری رهیافت "تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید بر پایه تجزیه" بر رهیافت "تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید" و تولید مجموعه‌ای متنوع از شبکه‌های طراحی شده با کیفیت بالا برای ارائه به تصمیم‌گیرندگان و تسهیل انتخاب شبکه مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه حسگر بی‌سیم، جانمایی حسگرهای بی‌سیم، رهیافت تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید بر پایه تجزیه، بهینه‌سازی.

* نویسنده مکاتبه کننده: : تهران، خیابان کارگر شمالی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.

تلفن: 88334430

Email: mdelavar@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

1- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم[1] (WSNs) متشکل از تعدادی حسگر بی‌سیم با قابلیت‌های انرژی، حافظه و قدرت انتقال محدود می‌باشند که در منطقه مورد مطالعه استقرار می‌یابند و به پایش منطقه مورد نظر می‌پردازند. هر حسگر بر اساس برد سنجشی خود اطلاعاتی را از محیط پیرامون مورد سنجش قرار داده، دارای قابلیت ارتباطی بی‌سیم بوده و سطحی از هوشمندی را برای پردازش اطلاعات و انتقال آنها در شبکه به نقطه جمع‌آوری مشترک[2] که معمولاً گیرنده مرکزی[3] نامیده می‌شود، دارا می‌باشد. شبکه‌های حسگر بی‌سیم در سال‌های اخیر در بسیاری از کاربردها همچون نظارت بر محیط زیست، کشف تغییرات، مدیریت بحران، ردیابی، حفاظت از سلامت و کاربردهای شهری و صنعتی به کار گرفته شده است [1، 2، 3 و 4].

طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم فعالیتی بسیار پیچیده با تأثیری قابل توجه بر کیفیت، هزینه و سودمندی کاربردهای حسگرها است. در اغلب کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مسئله جانمایی حسگرها[4] در یک شبکه حسگر بی‌سیم یکی از مراحل اصلی و بنیادی در طراحی شبکه‌های حسگر می‌باشد [1 و 5]. جانمایی حسگرها بر اساس قابلیت‌ها و ویژگی‌های خاص حسگرها و به‌منظور بهینه نمودن همزمان اهداف دلخواه مسئله انجام می‌پذیرد. در جانمایی حسگرها، ویژگی‌های خاصی از آنها همچون برد سنجشی حسگر، انرژی باتری، توانایی برقراری ارتباط با سایر گره‌ها، حافظه و قابلیت‌های محاسباتی-پردازشی و اهدافی از شبکه مانند حداکثر نمودن مساحت پوشش داده شده از منطقه مورد مطالعه[5] (ROI)، حداقل نمودن انرژی مصرفی حسگرها (یا به عبارتی مدیریت منابع انرژی و افزایش طول عمر شبکه) با قید همبندی[6] شبکه مدنظر قرار می‌گیرد.

هدف پوشش به‌عنوان یک هدف اصلی و معیاری از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم درنظر گرفته می‌شود که با طراحی مناسب شبکه برآورده می‌گردد. پوشش منطقه باید حداکثر باشد تا این اطمینان حاصل گردد که شئ یا رویداد مورد نظر در منطقه مورد پایش قابل کشف خواهد بود [2، 6، 7 و 8]. از طرف دیگر، حسگرهای بی‌سیم معمولاً دارای منبع انرژی و قابلیت‌های پردازشی و ارتباطی محدود می‌باشند [9، 10، 11 و 12]. دشواری و عدم امکان شارژ یا تعویض باتری حسگرها و گاه عدم امکان دسترسی به آنها، موجب می‌شوند که در طراحی شبکه برای هر گره، عمر محدودی در نظر گرفته شده و متعاقباً عمر شبکه نیز محدود گردد. بنابراین، یکی از اهداف مهم دیگر در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم این است که چگونه از منابع انرژی محدود در حسگرها به طرز بهینه استفاده شود تا طول عمر شبکه افزایش یابد [13، 14 و 15].

زمانی که حسگرها در منطقه مورد مطالعه مستقر می‌گردند، شبکه‌ای ارتباطی را جهت انتقال اطلاعات تشکیل می‌دهند. ارتباطات در شبکه حسگر می‌بایست به‌صورت یک قید ساختاردهی شود که براساس آن حداقل یک مسیر بین هر گره حسگر و گیرنده مرکزی، که همان گره ارتباطی با انرژی بالا[7] است، وجود داشته باشد.

با توجه به آنچه ذکر گردید، مسئله جانمایی حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم به صورت ذاتی یک مسئله

[1] Wireless sensor networks
[2] Common collection point
[3] Data sink
[4] Sensor deployment problem
[5] Region of interest
[6] Connectivity
[7] High energy communication node

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

چند هدفه مقید بوده و جانمایی گره‌های حسگر به‌نحوی که همه اهداف شبکه برآورده شوند، مسئله‌ای چالش برانگیز خواهد بود. در این راستا، مسئله جانمایی بهینه‌ی حسگرها به‌عنوان یک مسئله *NP-hard*[1] طبقه‌بندی شده است [*1*، *16*، *17*، *18* و *19*].

در چند سال اخیر، محققان در تلاش بوده‌اند که مسئله جانمایی حسگرها، به‌عنوان یک مسئله چند هدفه، را با استفاده از روش‌های محاسباتی تکاملی مورد بررسی قرار دهند و در این بین الگوریتم‌های ژنتیک[2] (*GAs*)، روش‌های تکاملی چند هدفه قدرتمندی می‌باشند که عموماً در مطالعات جانمایی حسگرها به کار گرفته شده‌اند [*20*، *21*، *22* و *23*]. در برخی از تحقیقات صورت گرفته این فرض مطرح شده است که همه حسگرها به صورت ذاتی می‌توانند با گیرنده مرکزی به صورت مستقیم و یا از طریق ارتباط چند پَرِشی[3] ارتباط برقرار نمایند. آن‌ها نشان داده‌اند که پوشش کامل شبکه درصورتی که برد ارتباطی حسگرها حداقل مساوی دو برابر برد سنجشی آن‌ها باشد، به معنی همبندی شبکه نیز می‌باشد [*20*، *21*، *24*، *25*، *26* و *27*]. با این وجود، بسته به نوع حسگر (به‌عنوان مثال لرزه‌ای، صوتی، شیمیایی و نوری) نسبت بین برد ارتباطی و برد سنجشی حسگرها متفاوت بوده و علاوه بر آن، بهینه‌سازی اهداف متعارضی مانند پوشش و طول عمر شبکه ممکن است به پوشش کامل منطقه نیانجامد. بنابراین، پوشش منطقه مورد مطالعه به وسیله حسگرها بدون در نظر گرفتن مسائل مرتبط با همبندی به شبکه‌ای ناهمبند می‌انجامد که استفاده از آن در کاربردهای دنیای واقعی را به شدت محدود می‌سازد. از طرف دیگر در برخی از تحقیقات، روش مدیریت قید[4] که در آن امکان‌پذیری جواب بر اهداف ارجحیت دارند در نظر گرفته شده است [*28* و *29*]. در این روش، میزان تخطی از قیود برای هر جواب محاسبه شده و هنگام تصمیم در مورد برازندگی یک جواب در برابر جواب دیگر، ابتدا امکان‌پذیری آن و سپس برتری از لحاظ اهداف در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، در این روش هنگامی که هر دو جواب ناممکن باشند، جوابی که درجه تخطی از قیود آن کمتر است در جمعیت جواب‌ها باقی می‌ماند. بدیهی است این روش برای حالاتی که تعداد جواب‌های تولید شده ناممکن در جمعیت زیاد است نمی‌تواند کارا باشد.

مطالعات فوق برای جانمایی حسگرها، دانش خاص مسئله را در الگوریتم‌های پیشنهادی خود دخیل نکرده‌اند. اگرچه طراحی عملگرهای خاص مسئله برای یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه دشوار است اما استفاده از این عملگرها منجر به هدایت جستجو به سمت مناطق امید بخشی از فضای جستجو شده و کارایی کلی فرآیند را بهبود می‌بخشد. تجزیه[5] یک روش پایه در بهینه‌سازی چندهدفه است که [*30*] این ایده را در بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه به‌کار گرفته است و یک الگوریتم تکاملی چندهدفه بر مبنای تجزیه[6] (*MOEA/D*) مطرح نموده است. *MOEA/D* با تجزیه یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به چندین زیرمسئله اسکالر که به‌صورت موازی و با استفاده از اطلاعات زیرمسئله‌های همسایه بهینه می‌شوند، دشواری طراحی عملگرهای خاص مسئله برای مسائل بهینه‌سازی چند هدفه را کاهش می‌دهد. دشواری اضافه نمودن دانش خاص مسئله در این است که زیرمسئله‌ها، ترجیحات هدفی متفاوت داشته و نیاز به رفتاری متفاوت در طول تکامل دارند در حالی که باید به صورت همزمان و در یک مرحله حل شوند. در سال‌های اخیر، ایده *MOEA/D* برای

[1] *Non-deterministic polynomial-time hard*
[2] *Genetic algorithms*
[3] *Multi-hop communication*
[4] *Constraint handling technique*
[5] *Decomposition*
[6] *Multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

حل مسئله جانمایی حسگرها در شبکه حسگر بی‌سیم نیز در تحقیقاتی به کار گرفته شده است [18، 19، 28 و 29]؛ کنستانتینیدیس و همکاران [19] یک الگوریتم تکاملی چند هدفه بر مبنای تجزیه برای حل مسئله چند هدفه تخصیص انرژی و جانمایی مطرح کردند. در تحقیق فوق، دو هدف حداکثر کردن پوشش و طول عمر با استفاده از تخصیص سطح قدرت انتقال آگاه از انرژی در نظر گرفته شدند. در این تحقیق از روش مدیریت قید برای مدیریت جواب‌های ناممکن استفاده شده است. کنستانتینیدیس و یانگ [18] همین مسئله را تحت قیود k-همبندی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه یک روش اکتشافی برای تخصیص انرژی و جانمایی جهت تبدیل جواب‌های ناممکن به جواب‌های ممکن مورد استفاده قرار گرفته است. سنگوپتا و همکاران [29] از *MOEA/D* در یک طرح کنترل تراکم حسگرها برای برنامه‌ریزی زمان فعالیت حسگرها استفاده نمودند تا پوشش و طول عمر شبکه را حداکثر نمایند. در تحقیق دیگری نیز سنگوپتا و همکاران [28] به‌حل مسئله مقید چندهدفه جانمایی حسگرها با استفاده از *MOEA/D* پرداختند که هدف آن حداکثر نمودن پوشش و طول عمر شبکه و حداقل نمودن تعداد حسگرهای به‌کار گرفته شده بود. با این وجود، در هیچ یک از این مطالعات، همبندی به‌صورت قیدی که در تمامی مراحل تکامل برآورده شود، در نظر گرفته نشده است. در راستای در نظر گرفتن قید همبندی در جانمایی حسگرها، تحقیق [31] یک رهیافت تکاملی چند هدفه مقید بر مبنای پَرِتو[1] (*CPMEA*) پیشنهاد داده است. *CPMEA* جانمایی‌های بهینه پرتویی تولید می‌نماید که در آنها پوشش شبکه حداکثر و انرژی مصرفی حسگرها حداقل بوده و همبندی کامل بین هر گره حسگر و گیرنده مرکزی نیز در طول تکامل برقرار باشد. در مقاله حاضر، یک رهیافت تکاملی چندهدفه پَرِتو مبنای مقید بر پایه تجزیه[2] (*CPMEA/D*) برای حل مسئله جانمایی بهینه حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم مطرح شده است. هدف این رهیافت آن است که با تجزیه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه جانمایی حسگرها، به یافتن جانمایی‌های بهینه پرتویی بپردازد که در آنها پوشش شبکه حداکثر و انرژی مصرفی حسگرها برای رسیدن به‌طول عمر بیشتر شبکه، حداقل بوده و همبندی کامل بین هر گره حسگر و گره ارتباطی با انرژی بالا (گیرنده مرکزی) نیز برقرار باشد.

ساختار این مقاله از 6 بخش تشکیل شده است. بخش 2 مسئله جانمایی حسگرها، بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه پَرِتو، تقریب جبهه پَرِتو با تجزیه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و اهداف در نظر گرفته شده را معرفی نموده و شرح می‌دهد. در بخش 3 روش پیشنهادی که یک رهیافت تکاملی چندهدفه پرتو مبنای مقید بر پایه تجزیه است مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. متریک‌های کارایی در بخش 4 مطرح می‌گردند و بخش 5 به ارائه نتایج عددی به‌دست آمده و تحلیل‌های صورت گرفته بر آنها می‌پردازد. در پایان، بخش 6 نتیجه‌گیری انجام شده از تحقیق را ارائه می‌دهد.

2- مسئله جانمایی حسگرها

یک محدوده مسطح مانند $\mathrm{ROI} \subset \mathbb{R}^2$ را به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر بگیرید که هدف، جانمایی k حسگر با انرژی اولیه $E \in \mathbb{R}^+$ در آن می‌باشد. همچنین فرض کنید که گیرنده مرکزی H با انرژی نامحدود، بدون از دست رفتن کلیت مسئله، در مرکز محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. گره‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند هر آنچه درون برد سنجشی R_s آنها قرار دارد

[1] *Constrained Pareto-based multi-objective evolutionary approach*

[2] *Constrained Pareto-based multi-objective evolutionary approach based on decomposition*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

را مورد سنجش قرار داده و با تمامی حسگرهایی که درون برد ارتباطی R_c آنها قرار دارند ارتباط برقرار کنند. R_s و R_c برای همه حسگرها یکسان در نظر گرفته می‌شوند. حسگرها مسئول نظارت بر منطقه مورد مطالعه می‌باشند و اطلاعات جمع‌آوری شده را به گیرنده مرکزی گزارش می‌دهند. بنابراین، هر گره حسگر باید قادر به انتقال اطلاعات خود به گیرنده مرکزی به صورت مستقیم و یا از طریق ارتباط چند پرشی باشد. موقعیت حسگرها (x_i, y_i) در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری طراحی شبکه حسگر بی‌سیم در نظر گرفته می‌شوند که قرار است بهینه شوند.

مسئله جانمایی حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم به‌دلیل وجود چندین هدف ناسازگار و متعارض (مانند پوشش و طول عمر شبکه) که بیشینه نمودن یکی می‌تواند منجر به کمینه شدن دیگری شود، یک مسئله چندهدفه است که حل آن بر مبنای استفاده از روش‌هایی است که با برقراری موازنه‌ای بین اهداف منجر به تولید مجموعه‌ای از شبکه‌های بهینه می‌گردند.

1-2- بهینه‌سازی چندهدفه و بهینه پرتو

یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه[1] (*MOP*) می‌تواند به‌صورت حداکثر نمودن یک تابع هدف برداری مانند $F: Q \rightarrow R^M$ به‌صورت رابطه (*1*) بیان شود.

رابطه (*1*)

$$\begin{aligned} &Maximize\ \ F(\mathbf{x}) = \left[(f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \ldots, f_M(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}} \\ &\quad subject\ to\ \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned}$$

درحالی‌که $M \in \square$، برابر با تعداد هدف‌ها و $\Omega \subset R^n$، فضای تصمیم‌گیری (مجموعه جواب‌های ممکن[2]) بوده و هدف بهینه‌سازی فوق نیز یافتن مقدار بهینه‌ی متغیر $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ \ldots\ , x_n) \in \Omega$ می‌باشد.

در برخی مسائل، بهینه‌سازی چند هدفه دارای قیود مختلف به‌صورت معادلات یا نامساوی‌هایی به صورت زیر است که فضای جستجو را محدود می‌کنند. در این حالت جواب‌هایی که همه قیود (چه به‌صورت مساوی و چه به صورت نامساوی) را برآورده می‌نمایند، جواب‌های ممکن مسئله نامیده می‌شوند. (رابطه (*2*))

$$\begin{aligned} &\mathbf{g}(\mathbf{x}) \le 0 \\ &\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \end{aligned}$$

رابطه (*2*)

که در رابطه فوق $\mathbf{h}(x) = \left[h_1 \quad h_2 \quad \ldots \quad h_q\right]$ و $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \left[g_1 \quad g_2 \quad \ldots \quad g_p\right]$ به ترتیب معادلات برداری منسوب به قیود نامساوی و مساوی محسوب می‌گردند و لذا p و q نیز به ترتیب تعداد معادلات قیود نامساوی و تعداد معادلات قیود مساوی مسئله می‌باشند.

از آنجا که اهداف در رابطه (*1*) اغلب در تضاد با یکدیگر می‌باشند، هیچ جوابی در Ω همه اهداف را به صورت همزمان حداکثر نمی‌نماید. بنابراین باید تعادل و توازنی بین برآورده شدن اهداف ایجاد نمود. بهترین توازن در میان اهداف در قالب بهینگی پرتو[3] می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود.

تعریف *1* در یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه که در آن اهداف حداکثر می‌شوند، جواب $\mathbf{x}^*$ بر جواب $\mathbf{x}'$ غلبه می‌کند[4] اگر و تنها اگر برای همه $i \in \{1, 2, .. M\}$ $f_i(\mathbf{x}^*) \ge f_i(\mathbf{x}')$ باشد و حداقل برای یک $j \in \{1, 2, .. M\}$ ، $f_j(\mathbf{x}^*) > f_j(\mathbf{x}')$ باشد. این موضوع با نماد $F(\mathbf{x}^*) \succ F(\mathbf{x}')$ نمایش داده می‌شود.

تعریف فوق نشان می‌دهد که جواب $\mathbf{x}^*$ بر جواب $\mathbf{x}'$ غلبه می‌کند اگر در همه اهداف به خوبی جواب $\mathbf{x}'$ و حداقل در یک هدف از $\mathbf{x}'$ بهتر باشد. جواب‌هایی که توسط هیچ جواب دیگری مغلوب نمی‌شوند به‌عنوان جواب‌های غیرمغلوب یا بهینه پَرِتو[5] برای بهینه‌سازی

[1] *Multi-objective optimization problem*
[2] *Feasible solutions*
[3] *Pareto optimality*
[4] *Dominate*
[5] *Pareto optimal solutions*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

شرح داده شده در رابطه (1) شناخته می‌شوند. مجموعه همه جواب‌های غیرمغلوب یا بهینه پرتو در فضای جستجو، مجموعه پرتو[1] (PS) نامیده شده که در فضای هدف بر جبهه پرتو[2] (PF) نگاشته می‌شود.

2-2- تقریب جبهه پَرِتو با تجزیه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه

در بسیاری از کاربردهای بهینه‌سازی چندهدفه، تقریبی از PF برای تصمیم‌گیرنده مورد نیاز است تا جواب نهایی مورد نظر خود را انتخاب کند. اغلب مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، بردارهای بهینه پرتوی زیاد یا حتی بی‌نهایت دارند. به‌دست آوردن PF کامل، حتی اگر غیرممکن نباشد، بسیار زمان‌بر است. از طرف دیگر، تصمیم‌گیرنده ممکن است علاقه‌مند به مواجهه با تعداد زیادی بردارهای بهینه پرتوی اضافی (به‌علت سرریز اطلاعات[3]) هم نباشد. بنابراین، بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه به پیداکردن تعداد قابل مدیریتی از بردارهای بهینه پرتو که به‌صورت یکنواخت در طول PF پراکنده شده باشند یا به عبارتی نمایندگان خوبی از کل PF باشند، می‌پردازند [30، 32 و 33].

جواب بهینه پرتوی یک مسئله چندهدفه در شرایط مناسب می‌تواند جواب بهینه یک مسئله بهینه‌سازی اسکالر باشد که در آن هدف تجمیعی از همه f_i ها است. بنابراین، تقریب PF می‌تواند به تعدادی زیرمسئله بهینه‌سازی هدف اسکالر تجزیه شود. این موضوع، ایده پایه بسیاری از روش‌های برنامه‌نویسی ریاضی برای تقریب PF است. در تحقیقات انجام شده، روش‌های بسیاری را برای ساخت توابع تجمیع می‌توان یافت (به‌عنوان مثال رجوع شود به [33]). معمول‌ترین این روش‌ها، رهیافت مجموع وزندار می‌باشد که در مطالعات عددی این مقاله نیز به کار گرفته شده است.

[1] Pareto set
[2] Pareto front
[3] Overflow of information

3-2- اهداف مسئله جانمایی حسگرهای بی‌سیم

همانگونه که پیشتر ذکر گردید، در این مقاله، دو هدف متعارض حداکثر کردن پوشش کلی شبکه حسگر بی‌سیم (f_1) و طول عمر شبکه حسگر بی‌سیم (f_2) با یکدیگر در حال رقابت می‌باشند. هدف پوشش، سعی در پراکنده نمودن گره‌های حسگر و کاهش همپوشانی برد سنجشی آنها درون منطقه مورد مطالعه می‌نماید که منجر به پوشش بیشتر منطقه شده در حالی که مصرف انرژی بیشتر و طول عمر شبکه کمتر می‌گردد. هدف طول عمر نیز سعی در فراهم نمودن جانمایی‌های متراکم‌تری از شبکه با استقرار گره‌های حسگر به‌صورت نزدیک به گیرنده مرکزی می‌نماید که منجر به مصرف انرژی کمتر و طول عمر بیشتر شبکه و در عین حال همپوشانی‌های بیشتر برد سنجشی حسگرها و به‌عبارت دیگر پوشش ضعیف‌تر می‌گردد.

1-3-2- پوشش

در یک WSN، هر گره حسگر مانند s_j ($j=1,2,...,k$) بخشی از منطقه مورد مطالعه را بر اساس برد سنجشی خود مورد سنجش قرار می‌دهد که به آن بخش اصطلاحاً پوشش حسگر گفته می‌شود. معمولاً پوشش هر نقطه p توسط هر گره حسگر s_j را با استفاده از یک مدل سنجشی باینری به صورت رابطه (3) تعریف می‌نمایند.

$$Cover_{\substack{s_j \\ j=1,2,...,k}}(p)=\begin{cases}1 & d(s_j,p)\le R_s \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}$$ رابطه(3)

که در آن p یک نقطه متعلق به ROI است.

بر اساس این مدل، پوشش منطقه مورد مطالعه (ROI) به‌صورت مساحت اجتماع محدوده‌های سنجش‌شده توسط حسگرها به مساحت کل منطقه مورد مطالعه تعریف می‌شود (رابطه (4)):

$$f_1=Cover(\boldsymbol{x})=\frac{Area\left(\bigcup_{j=1}^{k}A_j\right)}{A}$$ رابطه (4)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

که در رابطه (4) k تعداد گره‌های حسگر A، مساحت منطقه مورد مطالعه و A_j منطقه پوشش داده شده توسط گره حسگر s_j می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (رابطه (5)):

$$A_j = \left\{ p \in \mathrm{ROI} \mid Cover_{s_j}(p) = 1 \right\}$$ رابطه (5)

2-3-2- طول عمر

طول عمر شبکه در واقع برابر با مدت زمانی است که انرژی اولین گره حسگر به پایان می‌رسد یا به عبارت دیگر مدت زمانی که اولین گره حسگر دچار نقص شده و از سنجش اطلاعات باز می‌ماند. عموماً این مدت زمان را با تقسیم بر حداکثر مقدار آن نرمال می‌نمایند تا مقداری در بازه $[0,1]$ داشته باشد. از این رو طول عمر شبکه با استفاده از رابطه (6) تعریف می‌گردد:

رابطه (6)

$$f_2 = Life(x) = \frac{Min\left\{T_{failure,i}\right\}_{i=1,\dots,k}}{T_{\max}}$$

که در رابطه فوق، k تعداد گره‌های حسگر، $Min\left\{T_{failure,i}\right\}_{i=1,\dots,k}$ تعداد دوره‌های سنجشی[1] قبل از به پایان رسیدن انرژی یک گره حسگر و $T_{\max}$ حداکثر تعداد ممکن برای دوره‌های سنجشی است.

در هر دوره سنجشی، همه حسگرها باید اطلاعات سنجش شده خود را به‌صورت مستقیم و یا از طریق ارتباط چند پرشی به گیرنده مرکزی انتقال دهند. به بیان دیگر، گره‌های حسگر باید اطلاعات خود و احتمالاً برخی از گره‌های حسگر دیگر را به گیرنده مرکزی منتقل نمایند. این اطلاعات باید از مسیرهایی به گیرنده مرکزی فرستاده شوند که انرژی باقیمانده هر گره حسگر حداکثر شود. بنابراین برای یافتن این مسیرها، یال‌های ورودی هر گره حسگر با مقدار معکوس انرژی باقیمانده آن گره وزن داده می‌شود و سپس یک الگوریتم کوتاهترین مسیر دلخواه (مانند الگوریتم دیکسترا [34]) برای یافتن بهترین مسیر ممکن با حداقل وزن به‌کار گرفته می‌شود. $Min\left\{T_{failure,i}\right\}_{i=1,\dots,k}$ می‌تواند با تکرار این محاسبات به‌دست آید. همچنین $T_{\max}$ نیز با در نظر گرفتن نسبت کل انرژی یک گره حسگر و انرژی مصرفی برای یک بار انتقال داده محاسبه می‌شود. در واقع $T_{\max}$ مرتبط با حالتی می‌باشد که در آن همه گره‌های حسگر به‌صورت مستقیم به گیرنده مرکزی متصل می‌باشند.

بر اساس مدل ارتباطی اتلاف در مسیر[2] [35]، انرژی انتقالی که باید به حسگر i تخصیص داده شود تا بتواند به حسگر j دسترسی پیدا کند به‌صورت رابطه (7) می‌باشد:

$$P_{ij} = \beta d_{ij}^{\alpha}$$ رابطه (7)

که در آن α توان اتلاف در مسیر[3] نامیده شده و مقداری در بازه‌ی $[2,6]$ دارد. همچنین پارامتر β نیز پارامتر کیفیت انتقال[4] اطلاعات خوانده شده و عموماً برابر با 1 در نظر گرفته می‌شود. d_{ij} نیز فاصله اقلیدسی بین حسگرهای i و j است که باید کمتر از برد ارتباطی حسگر i باشد یا به عبارت دیگر $d_{ij} \le R_c$.

انرژی باقیمانده حسگر i در دوره سنجشی t از رابطه (8) محاسبه می‌شود [35]:

$$E_i(t) = E_i(t-1) - r_{ij}(t) P_{ij}(t)\, amp$$ رابطه (8)

در رابطه‌ی فوق، $r_{ij}(t)$ کل بار ترافیکی است که حسگر i به حسگر j بر اساس مسیرهای به‌دست آمده با استفاده از محاسبات کوتاهترین مسیر انتقال می‌دهد؛ $P_{ij}(t)$ نیز انرژی انتقالی است که باید به حسگر i تخصیص داده شود تا بتواند به حسگر j دسترسی پیدا کند و amp انرژی مصرف شده برای تقویت قدرت[5] است.

[1] Sensing cycle

[2] Path loss communication model
[3] Path loss exponent
[4] Transmission quality parameter
[5] Power amplifier's energy consumption

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

3- روش پیشنهادی: رهیافت تکاملی چندهدفه پرتو مبنای مقید بر پایه تجزیه

در این بخش رهیافت تکاملی چندهدفه پرتو مبنای مقید بر پایه تجزیه[1] (CPMEA/D) طراحی شده برای جانمایی حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم و عملگرهای خاص مسئله طراحی شده برای CPMEA شرح داده می‌شوند.

3-1- تجزیه بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم MOEA/D یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را به چندین زیرمسئله بهینه‌سازی اسکالر تجزیه کرده و آن‌ها را به صورت همزمان بهینه می‌نماید. هر زیرمسئله تنها با استفاده از اطلاعات چند زیرمسئله همسایه خود بهینه می‌شود که این موضوع باعث می‌گردد که MOEA/D نسبت به الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه دیگر مانند الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب-2 (NSGA-II)[2]، پیچیدگی محاسباتی کمتری در هر نسل داشته باشد. رهیافت‌های تجزیه متعددی برای تبدیل یک مسئله تقریب PF به یک سری مسائل بهینه‌سازی اسکالر وجود دارند. در ادامه، رهیافت مجموع وزندار که در مطالعات عددی این مقاله به‌کار گرفته شده است، معرفی می‌گردد.

3-1-1- رهیافت مجموع وزندار

رهیافت مجموع وزندار [33]، یک ترکیب محدب از اهداف مختلف را در نظر می‌گیرد. اگر $\lambda=(\lambda_1,...,\lambda_M)^T$ بردار وزنی در نظر گرفته شود که به ازای همه مقادیر $i=1,...,M$، $\lambda_i \geq 0$ و $\sum_{i=1}^{M}\lambda_i=1$ باشد، آنگاه جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی اسکالر زیر یک نقطه بهینه پرتو برای مسئله بهینه‌سازی در رابطه (1) خواهد بود [33] (رابطه (9)).

رابطه (9)

$$Maximize\ \ g^{ws}(\mathbf{x}\,|\,\lambda)=\sum_{i=1}^{M}\lambda_i f_i(\mathbf{x})$$
$$subject\ to\ \mathbf{x}\in\Omega$$

که در $g^{ws}(\mathbf{x}|\lambda)$، λ بردار ضریب در تابع هدف است در حالی که $\mathbf{x}$ متغیرهایی می‌باشند که قرار است بهینه شوند. برای تولید یک مجموعه از بردارهای بهینه پرتوی متفاوت، می‌توان از بردارهای وزنی متفاوت λ در مسئله بهینه‌سازی اسکالر فوق استفاده کرد. در این مقاله، مسئله جانمایی حسگرها با در نظر گرفتن دو هدف پوشش و طول عمر به N زیرمسئله بهینه‌سازی تجزیه می‌شود. رهیافت مجموع وزندار برای این منظور به‌صورت رابطه (10) به کار گرفته می‌شود که نشان‌دهنده jاُمین زیرمسئله بهینه‌سازی اسکالر می‌باشد.

رابطه (10)

$$Maximize\ \ g^{ws_j}(\mathbf{x}\,|\,\lambda^j)=\lambda^j\,Life(\mathbf{x})+(1-\lambda^j)\,Cover(\mathbf{x})$$

در این مقاله، توزیع یکنواختی برای وزن‌های λ^j در نظر گرفته می‌شود که برای هر $j=1,...,N$ در تمام تکامل ثابت می‌ماند و به‌صورت $\lambda^j=1-(\frac{j-1}{N})$ تعیین می‌شود. یک معنی خاص مسئله نیز برای این پارامتر وجود دارد. با در نظر گرفتن λ^j به‌عنوان ضریب وزن زیرمسئله j، می‌توان ترجیحات هدفی یک طراحی خاص را پیش‌بینی کرده و بنابراین موقعیت آن در فضای هدف را معلوم کرد.

3-2- چارچوب کلی CPMEA/D

هر الگوریتم تکاملی چند هدفه بر مبنای تجزیه، مستلزم تجزیه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مورد نظر به چندین زیرمسئله بهینه‌سازی اسکالر می‌باشد. هر زیرمسئله تنها با استفاده از اطلاعات چند زیرمسئله همسایه خود بهینه می‌شود. برای تعیین زیرمسئله‌های همسایه نیز در ابتدا یک همسایگی از بردار وزن به‌صورت مجموعه‌ای از چند بردار وزن نزدیک به آن در $\{\lambda^1,...,\lambda^N\}$ تعریف می‌شود. همسایگی j اُمین

[1] Constrained Pareto-based multi-objective evolutionary approach based on decomposition
[2] Non-dominated sorting genetic algorithm

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

زیرمسئله شامل همه زیرمسئله‌های با بردارهای وزن از همسایگی λ^j می‌باشد. سپس جمعیت از بهترین جواب‌های پیدا شده برای هر زیرمسئله تشکیل می‌شود و تنها جواب‌های فعلی زیرمسئله‌های همسایه برای بهینه‌سازی زیرمسئله مفروض مورد بررسی و به‌کار گرفته می‌شوند.

پیاده‌سازی *CPMEA/D* به صورتی که در الگوریتم *1* آمده است، صورت می‌گیرد.

3-2-1- تنظیمات اولیه

در تنظیمات اولیه، $B(i)$ در حالت کلی شامل شمارنده‌های T بردار وزن نزدیک به بردار وزن λ^i می‌باشد. از آنجا که از فاصله اقلیدسی برای اندازه‌گیری نزدیکی بین هر دو بردار وزن استفاده شده است، بنابراین نزدیک‌ترین بردار به بردار وزن λ^i خودش است و $i \in B(i)$ است. اگر $j \in B(i)$ باشد، j اُمین زیرمسئله می‌تواند به‌عنوان یک همسایه i اُمین زیرمسئله در نظر گرفته شود.

در *CPMEA* به جای تولید مجموعه‌ای از جانمایی‌های اتفاقی، جمعیت اولیه در دو بعد هندسی و توپولوژی تولید شده است. در بعد هندسی، m گراف همبند با $k-1$ یال تولید شدند. k تعداد گره‌های حسگر و m اندازه جمعیت یا به عبارت دیگر تعداد شبکه‌های حسگر در هر نسل است. برای هر گراف، یک ساختار درختی t با گیرنده مرکزی به‌عنوان ریشه تولید می‌شود. سایر گره‌ها در اطراف ریشه به نحوی قرار می‌گیرند که هر گره در عمق $d-1$ در صورتی والد یک گره در عمق d است که به آن متصل باشد. یک ماتریس همسایگی G معادل با t برای هر گراف می‌تواند تولید شود. این ماتریس یک ماتریس باینری متقارن $G=[g_{ij}]$ است که به‌صورت رابطه (*11*) تعریف می‌شود:

$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & if\ v_i v_j \in Lnk \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

رابطه (*11*)

که $\{v_i = (x_i, y_i)\},\ i = 1, 2, \ldots, k$ مجموعه رئوس یا گره‌های گراف و Lnk مجموعه ارتباط‌ها یا یال‌های گراف و k تعداد گره‌های حسگر یا به عبارتی تعداد رئوس گراف می‌باشد. یک یال $(v_i, v_j) \in Lnk$ می‌تواند بین دو گره حسگر v_i و v_j وجود داشته باشد اگر فاصله بین آنها کمتر از برد ارتباطی R_c باشد.

در بعد هندسی، موقعیت گره‌های حسگر در منطقه مورد مطالعه بر اساس موقعیت گیرنده مرکزی و ساختار درختی به‌دست آمده محاسبه می‌شود. قیود مرتبط با همبندی گره‌های حسگر و مرزهای منطقه مورد مطالعه بر گراف‌های ایجاد شده در بعد توپولوژی اعمال شده و موقعیت گره‌های حسگر با استفاده از یک روش سرشکنی مانند حداقل مربعات مقید[1] در منطقه ممکن فضای جستجو تعیین می‌شوند. برای توضیحات بیشتر به [*31*] مراجعه شود.

3-2-2- عملگرهای ژنتیک

در i اُمین تکرار حلقه در مرحله *2*، T زیرمسئله همسایه منتسب به i اُمین زیر مسئله برای انتخاب والدین و تولید مثل در نظر گرفته می‌شود. عملگر انتخاب مسئول انتخاب جواب‌های امیدوارکننده از بین جمعیت حاضر به‌عنوان والدین است تا در تولید نسل بعدی مورد استفاده قرار گیرند. در مرحله *2.1*، از آنجا که $\mathbf{x}^k$ و $\mathbf{x}^l$ بهترین جواب‌های فعلی همسایه‌های i اُمین زیرمسئله می‌باشند، این امیدواری وجود دارد که فرزند نیز یک جواب خوب برای زیرمسئله i اُم باشد.

در این مقاله، عملگر انتخاب مسابقه‌ای دوتایی[2] به‌عنوان یک روش متداول انتخاب و کارآمد برای *CPMEA* مورد استفاده قرار گرفته است [*31*]. برای انتخاب والدین، با توجه به مقدار اهداف در زیرمسئله‌های همسایه، دو جواب بهتر از نظر تابع برازندگی تعریف شده انتخاب می‌گردند.

[1] *Constrained least squares*
[2] *Pairwise tournament selection*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

Input: *WSN parameters (number of sensor nodes (k), communication range (R_c), sensing range (R_s), corners of the ROI area (x_A, x_B), initial energy of sensor nodes (E)), a uniform spread of N weight vectors ($\lambda^1,...,\lambda^N$), neighbourhood size (T), population size and number of subproblems (N), stopping criterion (the maximum number of generations N_{gen}) ;*
Output: *Pareto set (PS);*

Step 1: *Initialization:*
Step 1.1: *Set $PS = \varnothing$;*
Step 1.2: *Compute the Euclidean distances between each two weight vectors and then find the T closest weight vectors to each weight vector (in this condition, for each weight vector λ^i, vectors $\{\lambda^{i_1}, \lambda^{i_2},...,\lambda^{i_T}\}$ with indexes $B(i) = \{i_1,...,i_T\}$ are considered As the T closest weight vectors to λ^i);*
Step 1.3: *Generate an initial population including N wireless sensor networks, $\mathbf{x}^1,...,\mathbf{x}^N$, according to the WSN parameters;*
Step 1.4: *Compute the fitness values of generated WSNs (i.e., $g^{ws_j}(\mathbf{x}\,|\,\lambda^j)$ in Eq. (10)) and Set $FV^i = g^{ws_i}(\mathbf{x}\,|\,\lambda^i)$;*
Step 1.5: *Find the initial non-dominated set of solutions based on the computed fitness values (i.e., the initial PS);*
Step 2: *Reproduction and Updating:*
for $i = 1$ to N
Step 2.1: *Reproduction:*
Randomly select two indexes k and l from $B(i) = \{i_1,...,i_T\}$ and then generate a new WSN $\mathbf{y}$ from two WSNs $\mathbf{x}^k$ and $\mathbf{x}^l$ using the proposed CPMEA problem specific operators;
Step 2.2: *Updating the subproblem solution:*
for subproblem i, if $g^{ws}(\mathbf{x}^i\,|\,\lambda^i) \le g^{ws}(\mathbf{y}\,|\,\lambda^i)$ then set $\mathbf{x}^i = \mathbf{y}$ and $FV^i = g^{ws_i}(\mathbf{y}\,|\,\lambda^i)$;
Step 2.3: *Updating PS :*
Remove all the vectors dominated by $F(\mathbf{y})$ from PS ;
Add $F(\mathbf{y})$ to PS if there is no vector in PS that dominates $F(\mathbf{y})$;
Step 3: *Stopping criterion:*
*Stop and output PS, if the number of generations reaches its maximum degree (i.e., N_{gen}); otherwise, go to **Step 2**;*

الگوریتم *1*: رهیافت تکاملی چندهدفه پرتو مبنای مقید بر پایه تجزیه (*CPMEA/D*) طراحی شده برای جانمایی حسگرهای بی‌سیم

با استفاده از عملگر الحاق[1] دو جواب انتخاب شده که والدین نامیده می‌شوند، اطلاعات خود را با احتمال مشخصی (موسوم به نرخ الحاق) با یکدیگر مبادله کرده و یک یا چند جواب جدید به نام فرزندان[2] می‌سازند.

[1] *Crossover operator*

[2] *Offspring*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

در این مقاله، p_1 و p_2 را به‌عنوان شبکه‌هایی که قرار است با یکدیگر الحاق شوند (یا به‌عبارت دیگر والدین) و ch_1 و ch_2 را به‌عنوان فرزندان تولید شده در نظر بگیرید. در عملگر الحاق پیشنهاد شده در *CPMEA*، ابتدا گراف‌های متناظر والدین به‌صورت جبری به هم اضافه شده و یک گراف $2k-2$ یاله و $2k$ گرهی همبند ساخته می‌شود. گراف تولید شده باید برای تولید دو فرزند $k-1$ یاله همبند مورد استفاده گیرد. در این راستا، برخی یال‌های گراف به‌صورت اتفاقی و یکی یکی حذف شده و همبندی گراف باقیمانده بررسی می‌گردد. در هر مرحله اگر حذف یال منجر به ناهمبندی گراف شود، این یال به گراف برگردانده شده و این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که یک گراف همبند با $k-1$ یال و k گره ایجاد شود. برای تولید فرزند دوم، فرآیند ذکر شده فوق دوباره از یال‌هایی که تا به حال انتخاب نشده‌اند شروع شده و فرآیند تا زمانی که گراف همبند دیگری با $k-1$ یال و k گره باقی بماند، ادامه می‌یابد. همچنین در *CPMEA*، یک عملگر جهش اتفاقی نیز به‌کار گرفته شده است. با این عملگر، موقعیت هر گره مستعد از جواب با احتمالی مشخص (نرخ جهش[1]) تصحیح می‌شود تا تنوع جمعیت را حفظ نماید؛ برای توضیحات بیشتر به [*31*] مراجعه شود.

3-2-3- به روز رسانی

مرحله *2.2* زیرمسئله i اُم را در نظر گرفته و اگر جواب تولید شده $\mathbf{y}$ بهتر از جواب $\mathbf{x}^i$ باشد آن را با $\mathbf{y}$ جایگزین می‌نماید. مجموعه پرتوی PS که در مرحله *1.5* مقدار اولیه می‌گیرد، در مرحله *2.3* به‌وسیله جواب تولید شده جدید $\mathbf{y}$ به‌روز رسانی می‌شود. در انتهای هر نسل، معیار توقف که حداکثر تعداد نسل‌ها می‌باشد (N_{gen}) بررسی می‌گردد تا مشخص شود که جستجو ادامه یافته یا متوقف شود. پس از اینکه الگوریتم به حداکثر تعداد نسل‌ها رسید، مجموعه پرتوی نهایی به‌عنوان جواب‌های بهینه نهایی کشف شده در فضای جستجو برگشت داده می‌شوند.

4- متریک‌های کارایی

در رهیافت‌های بهینه‌سازی چند هدفه، کیفیت برآورد مجموعه پَرِتوی تولید شده دارای اهمیت می‌باشد. متریک‌های کارایی[2] مختلفی برای تعیین و مقایسه کیفیت برآورد در این مبحث معرفی شده‌اند. از آنجا که یک متریک به تنهایی نمی‌تواند نتایج کافی برای بررسی قدرت و کیفیت رهیافت پیشنهادی ارائه دهد، بدین منظور در این مقاله متریک‌های متنوعی در نظر گرفته شده است که در ادامه شرح داده می‌شوند.

4-1- تعداد جواب‌های غیرمغلوب

تعداد جواب‌های غیرمغلوب[3] (NDS) به‌دست‌آمده توسط یک رهیافت و یا به عبارتی اندازه مجموعه پرتویی که تمامی جواب‌های غیرمغلوب تولید شده توسط رهیافت موردنظر را در خود دارد (P_S)، یکی از متریک‌های متداولی است که در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته می‌شود (رابطه (*12*)):

$$NDS = |P_S| \qquad \text{رابطه } (12)$$

هرچه مقدار این متریک بزرگتر باشد، به این معنی است که گزینه‌های بیشتری برای انتخاب وجود دارند. با این وجود، متریک NDS باید در ترکیب با متریک‌های دیگری که کیفیت و پراکندگی جواب‌های غیرمغلوب را ارزیابی می‌کنند در نظر گرفته شود.

4-2- متریک پوشش مجموعه

فرض کنید P_{s1} و P_{s2} دو مجموعه بهینه پرتو باشند.

[1] *Mutation rate*

[2] *Performance metric*

[3] *The number of non-dominated solutions*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

متریک پوشش مجموعه[1] (متریک C)، یک متریک مقایسه بین دو مجموعه از جواب‌های بهینه پرتو است که نسبت تعداد جواب‌هایی از P_{s2} که توسط جواب‌های P_{s1} مغلوب شده‌اند تقسیم بر تعداد کل جواب‌های P_{s2} را محاسبه می‌کند. این متریک کیفیت به‌صورت رابطه (13) ارزیابی می‌شود [36]:

$$C\left(P_{s1},P_{s2}\right)=\frac{\left|\left\{\mathbf{y}\in P_{s2}\,|\,\exists\mathbf{x}\in P_{s1}:\mathbf{x}\succ\mathbf{y}\right\}\right|}{\left|P_{s2}\right|}$$ رابطه (13)

$C\left(P_{s1},P_{s2}\right)=1$ بدان معنا است که همه جواب‌های P_{s2} توسط جواب‌های P_{s1} مغلوب شده‌اند و $C\left(P_{s1},P_{s2}\right)=0$ به این معنی است که هیچ جوابی از P_{s2} توسط هیچ جوابی از P_{s1} مغلوب نشده است. به بیان دیگر، اگر $C\left(P_{s1},P_{s2}\right)<C\left(P_{s2},P_{s1}\right)$ باشد، P_{s2} جواب‌های بهتری نسبت به P_{s1} دارد. توجه داشته باشید که $C\left(P_{s1},P_{s2}\right)$ لزوماً برابر با $1-C\left(P_{s2},P_{s1}\right)$ نیست.

4-3- متریک فراحجم

متریک فراحجم[2] (متریک HV) که تحت عنوان متریک S نیز شناخته می‌شود، برای فراهم کردن اطلاعاتی ترکیبی از پراکندگی و نزدیکی مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده (P_S) به‌کار گرفته می‌شود. این متریک به نوعی حجم پوشانده شده با جواب‌ها را در فضای هدف محاسبه می‌کند. در این راستا، یک نقطه بدترین حالت ممکن[3] W (مخالف بهینه[4]) به‌عنوان نقطه مرجع به‌کار گرفته می‌شود. این نقطه به‌صورت برداری از بدترین مقادیر توابع هدف تعریف می‌شود [37]. برای هر جواب از مجموعه جواب‌های غیرمغلوب ($\mathbf{x}\in P_s$)، یک فرامکعب[5] $HyperCube(\mathbf{x})$ با در نظر گرفتن نقطه مرجع W و جواب $\mathbf{x}$ به‌عنوان نقاط قطری فرامکعب در فضای هدف ساخته می‌شود. متریک HV به‌صورت حجم اجتماع فرامکعب‌ها به‌صورت رابطه (14) محاسبه می‌شود [37]:

$$HV=volume\left(\bigcup_{x\in P_s}HyperCube(\mathbf{x})\right)$$ رابطه (14)

در محاسبه این متریک، مقادیر توابع هدف برای رهایی از اثرات ناخواسته مقیاسی[6] اهداف باید نرمال شوند. در عمل هر چه مقدار این متریک بزرگتر باشد، مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده مطلوب‌تر خواهد بود.

4-4- متریک فاصله نسلی

متریک فاصله نسلی[7] (متریک GD)، میزان دوری مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده (P_S) از PF حقیقی[8] (P_T) را اندازه‌گیری می‌نماید. این متریک به وسیله رابطه (15) محاسبه می‌گردد [38]:

$$GD(P_s,P_T)=\frac{\left(\sum_{i=1}^{|P_s|}d_i^2\right)^{1/2}}{|P_s|}$$ رابطه (15)

که در آن $|P_s|$ تعداد جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده و d_i فاصله اقلیدسی میان جواب $\mathbf{x}_i\in P_s$ و نزدیکترین جواب P_T در فضای هدف می‌باشد. در تحقیقاتی که PF حقیقی نامعلوم و ناشناخته است، می‌توان بهترین مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده از چندین روش را به جای PF حقیقی مورد نیاز در متریک GD به کار برد. همچنین برای رهایی از اثرات ناخواسته مقیاسی اهداف، مقادیر توابع هدف مرتبط با جواب‌های P_s و P_T می‌باید نرمال گردند. بدیهی است که با نزدیک شدن جواب‌های P_s به جواب‌های P_T، مقدار متریک GD نیز به‌سمت صفر میل می‌نماید. بنابراین، در عمل هر چه مقدار این متریک کوچکتر باشد، مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده مطلوب‌تر خواهد بود.

---

[1] *Set coverage metric*
[2] *Hypervolume metric*
[3] *Worst possible point*
[4] *Anti-optimal*
[5] *Hypercube*
[6] *Arbitrary scaling*
[7] *Generational distance metric*
[8] *True Pareto front*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

5- نتایج عددی و بحث و بررسی

این بخش، نتایج محاسباتی رهیافت *CPMEA/D* مطرح شده برای حل مسئله جانمایی بهینه حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم را گزارش داده و این نتایج را با نتایج به‌دست آمده از رهیافت *CPMEA* مقایسه می‌نماید. برای ارزیابی کارایی رهیافت پیشنهادی *CPMEA/D*، آزمایش‌های انجام شده تحت تنظیمات پارامتری مختلف در نظر گرفته شده و نتایج توسط متریک‌های کارایی معرفی شده در بخش *4* با نتایج متناظر به‌دست آمده برای *CPMEA* مقایسه شده‌اند. توانمندی *CPMEA/D* و *CPMEA* در یک نمونه آزمایشی شبکه حسگر بی‌سیم که شرایط دنیای واقعی را مدل می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفته است.

نمونه آزمایشی شبکه حسگر بی‌سیم در نظر گرفته شده در این مقاله متشکل از *20* حسگر در منطقه $1Km \times 1Km$ می‌باشد. در این راستا، پارامترهای شبکه حسگر بی‌سیم شامل "برد سنجشی حسگرها (R_s)"، "برد ارتباطی حسگرها(R_C)"، "انرژی اولیه هر حسگر (E)"، "توان اتلاف در مسیر (α)" و "انرژی مصرف شده برای تقویت قدرت (amp)" به‌صورت $R_s = 300m$، $R_C = 200m$، $E = 5J$، $\alpha = 2$ و $amp = 100pJ/bit/m^2$ در نظر گرفته شده است.

این پارامترها عموماً در نمونه‌های مطالعاتی مختلفی به کار گرفته شده‌اند که به‌عنوان مثال می‌توان به [*19*، *31* و *39*] مراجعه کرد و در این مقاله نیز جهت امکان مقایسه نتایج *CPMEA/D* با *CPMEA* از این مقادیر استفاده شده است.

در ابتدا برای اطمینان از اینکه رهیافت *CPMEA* و *CPMEA/D* در کارایی مناسبی برای مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرند، پارامترهای آنها شامل: *1*) تعداد نسل‌ها، *2*) اندازه جمعیت، *3*) نرخ الحاق و *4*) نرخ جهش، باید تنظیم گردند. ترکیبات مختلفی از تنظیمات این پارامترها وجود دارند که باید مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در این مقاله، طراحی بخشی از فاکتوریل دو سطحی[1] (مانند آنچه که در [*19*] نیز مطرح شده است) به‌کار گرفته شده است تا تمامی ترکیبات سطوح کم و زیاد[2] (مقادیر حداقل و حداکثر) عوامل تأثیرگذار بر آزمایش‌ها بررسی شده باشد. طراحی بخشی از فاکتوریل دوسطحی در شرایطی به‌جای طراحی فاکتوریلی[3] به کار می‌رود که تعامل بین عوامل قابل چشم‌پوشی باشد و به‌عنوان نتیجه، اطلاعات را بتوان تنها با در نظر گرفتن بخشی از آزمایش‌های فاکتوریلی نیز به‌دست آورد.

بنابراین، در این بخش، برای ارزیابی و مقایسه کارایی رهیافت *CPMEA/D* و *CPMEA* در مبحث جانمایی بهینه حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم بر مبنای مطالب فوق، آزمایش‌های انجام شده تحت تنظیمات پارامتری مختلف در نظر گرفته شده است و نتایج به‌دست آمده از آنها توسط متریک‌های کارایی معرفی شده در بخش *4* با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقادیر حداقل و حداکثر در نظر گرفته شده برای عوامل تأثیرگذار بر آزمایش‌ها در جدول (*1*) نشان داده شده است.

برای مقایسه رهیافت پیشنهادی *CPMEA/D* با رهیافت *CPMEA*، پارامترهای پایه تعداد نسل‌ها، اندازه جمعیت، نرخ الحاق و نرخ جهش به‌صورت نشان داده شده در جدول (*2*) مورد استفاده قرار گرفته و اندازه همسایگی نیز با توجه به بررسی‌های اولیه صورت گرفته برابر با *10* تنظیم شده است.

مطالعات آزمایشی صورت گرفته در این مقاله در محیط نرم‌افزار محاسباتی متلب (*MATLAB*) و بر روی یک رایانه با سیستم عامل ویندوز *7* (*64*-بیتی)، *8* گیگابایت حافظه (*RAM*) و پردازنده *2.93-GHz-Core™ i7* انجام گرفته است.

---
[1] *Two-level fractional factorial design*
[2] *High and low levels*
[3] *Factorial design*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

جدول 1: پارامترهای CPMEA

پارامترها	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
تعداد نسل‌ها	100	250
اندازه جمعیت	120	200
نرخ الحاق	0/1	1
نرخ جهش	0/1	0/5

تنظیمات پارامتری مختلف در نظر گرفته شده در جدول (2) لحاظ شده است.

جدول 2: تنظیمات پارامتری

شماره تنظیمات پارامتری	تعداد نسل‌ها	اندازه جمعیت	نرخ الحاق	نرخ جهش
Ps1	100	120	0/1	0/5
Ps2	100	120	1	0/1
Ps3	250	120	0/1	0/1
Ps4	250	120	1	0/5
Ps5	100	200	0/1	0/5
Ps6	100	200	1	0/1
Ps7	250	200	0/1	0/1
Ps8	250	200	1	0/5

در ادامه، نتایج متریک‌های کارایی محاسبه شده برای رهیافت پیشنهادی CPMEA/D در جدول (3) و نتایج متناظر برای رهیافت CPMEA در جدول (4) نشان داده شده است.

نتایج ارائه شده در جداول (3 و 4) نشان می‌دهند که رهیافت CPMEA/D توانسته است در بیشتر تنظیمات پارامتری (همه تنظیمات به غیر از Ps5 و Ps7) تعداد جواب‌های غیرمغلوب مشابه یا بیشتری را به نسبت CPMEA به‌دست آورد. مقایسه مقادیر متریک فراحجم (HV) نشان می‌دهد که در تمامی تنظیمات پارامتری به غیر از Ps7 مقدار این متریک برای رهیافت CPMEA/D بزرگتر از مقادیر متناظر رهیافت CPMEA بوده و بنابراین مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده نیز مطلوب‌تر است.

جدول 3: مقادیر متریک‌های کارایی برای رهیافت CPMEA/D

شماره تنظیمات پارامتری	متریک NDS	متریک HV	متریک GD
Ps1	13	0/7644	0/0141
Ps2	22	0/8898	0/0051
Ps3	14	0/7360	0/0100
Ps4	21	0/8455	0/0034
Ps5	11	0/7065	0/0170
Ps6	27	0/8909	0/0056
Ps7	14	0/7470	0/0115
Ps8	21	0/8693	0/0024

نتایج ارائه شده برای متریک فاصله نسلی (GD) نیز نشان می‌دهد که در همه تنظیمات به غیر از Ps5 و Ps7 مجموعه جواب غیرمغلوب به‌دست آمده برای رهیافت پیشنهادی به PF حقیقی در نظر گرفته شده نزدیک‌تر بوده و بنابراین مجموعه جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده مربوط به آن نیز مطلوب‌تر خواهد بود.

جدول 4: مقادیر متریک‌های کارایی برای رهیافت CPMEA

شماره تنظیمات پارامتری	متریک NDS	متریک HV	متریک GD
Ps1	13	0/6411	0/0152
Ps2	19	0/8638	0/0096
Ps3	11	0/7190	0/0108
Ps4	18	0/7991	0/0087
Ps5	12	0/6437	0/0154
Ps6	15	0/8532	0/0077
Ps7	18	0/8655	0/0077
Ps8	15	0/7713	0/0115

میانگین مقادیر متریک‌های کارایی برای تنظیمات پارامتری مختلف نشان داده شده در جداول (3و 4) و همچنین مقادیر متریک‌های کارایی مرتبط با پَرِتوی نهایی دو رهیافت CPMEA/D و CPMEA که از

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

نتایج تمامی تنظیمات پارامتری به‌دست آمده است، در جدول (5) نشان داده شده است. همانطور که در جدول (5) مشاهده می‌شود، رهیافت *CPMEA/D* توانسته است هم به طور میانگین و هم در پرتوی نهایی، تعداد جواب‌های غیرمغلوب بیشتری را در مقایسه با *CPMEA* به‌دست آورد. جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده از رهیافت پیشنهادی با توجه به مقادیر میانگین متریک‌های کارایی *HV* و *GD* و نیز مقادیر مربوط به متریک‌های کارایی *HV* و *GD* پرتوی نهایی، جواب‌های مطلوب‌تری به نسبت جواب‌های غیرمغلوب به‌دست آمده از رهیافت *CPMEA* می‌باشند.

جدول 5: میانگین مقادیر متریک‌های کارایی برای رهیافت *CPMEA* و *CPMEA/D* و مقادیر مرتبط با پرتوی نهایی

	رهیافت	متریک *NDS*	متریک *HV*	متریک *GD*
میانگین	*CPMEA/D*	*17/8750*	*0/8062*	*0/0086*
	CPMEA	*15/125*	*0/7696*	*0/0108*
پرتوی نهایی	*CPMEA/D*	*20*	*0/8962*	*0/0009*
	CPMEA	*17*	*0/8801*	*0/0056*

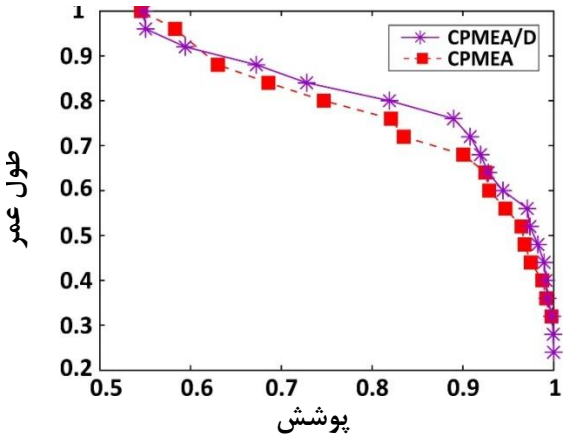
نتایج متریک کارایی پوشش مجموعه نیز در جدول (6) ارائه شده است. از نتایج نشان داده شده در جدول (6) می‌توان نتیجه گرفت که رهیافت *CPMEA/D* به طور میانگین و در پرتوی نهایی جواب‌های بهتری نسبت به رهیافت *CPMEA* تولید کرده است ($C(P_{CPMEA}, P_{CPMEA/D}) < C(P_{CPMEA/D}, P_{CPMEA})$).

جدول 6: مقادیر متریک کارایی پوشش مجموعه (متریک *C*) برای رهیافت *CPMEA* و *CPMEA/D*

تنظیمات پارامتری	$C(P_{CPMEA}, P_{CPMEA/D})$	$C(P_{CPMEA/D}, P_{CPMEA})$
Ps1	*0/6250*	*0/4118*
Ps2	*0*	*1*
Ps3	*0/6875*	*0/1111*
Ps4	*0/0714*	*0/9444*
Ps5	*0/4375*	*0/5714*
Ps6	*0/1176*	*0/8000*
Ps7	*0/8750*	*0/1481*
Ps8	*0/0645*	*0/8667*
میانگین	***0/3598***	***0/6067***
پَرِتوی نهایی	***0/0294***	***0/9524***

علاوه بر نتایج ذکر شده فوق، برتری رهیافت *CPMEA/D* در برابر رهیافت *CPMEA* برای تنظیمات پارامتری مختلف در شکل (1) نشان داده شده است.

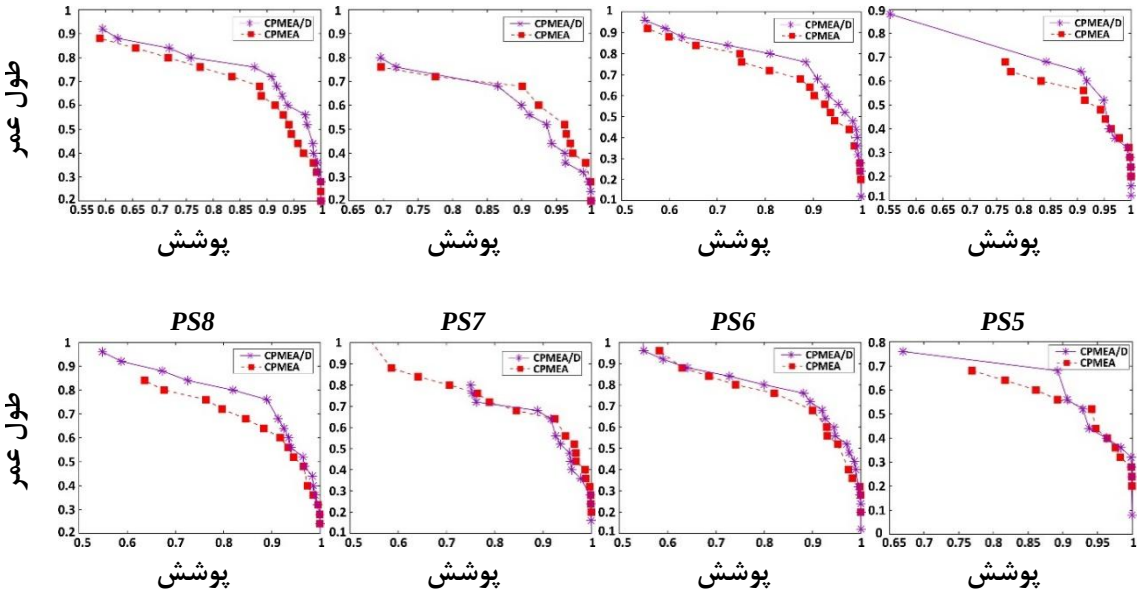
در پایان، شکل (2)، برتری پرتوی نهایی به‌دست آمده از رهیافت *CPMEA/D* را در برابر پرتوی نهایی به‌دست آمده از رهیافت *CPMEA* نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، برای اکثر جواب‌ها، نمودار پَرِتوی رهیافت *CPMEA/D* در بالای نمودار پَرِتوی رهیافت *CPMEA* قرار گرفته است که این امر نشان از غلبه اکثر جواب‌های رهیافت پیشنهادی به جواب‌های رهیافت *CPMEA* دارد.



شکل 2: پرتوی نهایی رهیافت *CPMEA/D* در برابر رهیافت *CPMEA*

PS4 ***PS3*** ***PS2*** ***PS1***

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]



شکل 1: رهیافت *CPMEA/D* در برابر رهیافت *CPMEA* برای تنظیمات پارامتری مختلف

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله جانمایی بهینه حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه مقید مطرح و به مجموعه‌ای از زیرمسئله‌های اسکالر تجزیه گردید. زیرمسئله‌ها براساس ترجیحات هدفی خود با استفاده از دانش خاص مسئله با به کارگیری رهیافت تکاملی چندهدفه پرتو مبنای مقید بر پایه تجزیه (*CPMEA/D*) به‌طور همزمان حل شده و به تولید جانمایی‌های بهینه پرتویی پرداختند که در آنها پوشش شبکه حداکثر و انرژی مصرفی حسگرها برای رسیدن به طول عمر بیشتر شبکه حداقل بوده و همبندی کامل بین هر گره حسگر و گیرنده مرکزی نیز برقرار باشد. برای بررسی کارایی رهیافت پیشنهادی، آزمایش‌هایی بر روی نمونه شبکه حسگر بی‌سیم تعریف شده صورت پذیرفت و برای تنظیمات پارامتری مختلف *CPMEA/D* و مجموعه پرتوی نهایی، برخی متریک‌های کارایی مطرح در این زمینه محاسبه گردیدند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با نتایج به‌دست آمده از رهیافت *CPMEA* نشان می‌دهد که رهیافت پیشنهادی *CPMEA/D* توانسته است تعداد جواب‌های غیرمغلوب بیشتری را تولید نماید. همچنین با مقایسه نتایج متریک‌های پوشش، فاصله نسلی و فراحجم و مقایسه مجموعه‌های پرتو به‌دست آمده نیز مشخص گردید که رهیافت پیشنهادی جواب‌های بهتری را نسبت به رهیافت *CPMEA* تولید نموده است. همانگونه که در نتایج عددی این تحقیق مشاهده گردید، مقادیر متریک کارایی پوشش مجموعه نشان از آن دارد که جواب‌های پَرِتوی رهیافت *CPMEA/D* توانسته است به‌طور متوسط به بیش از *95*٪ جواب‌های پَرِتوی رهیافت *CPMEA* غلبه نماید که این نتیجه عددی دستاوردی قابل توجه برای رهیافت *CPMEA/D* محسوب می‌گردد.

مراجع

[1] M. Younis and K. Akkaya, "Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey," Ad Hoc Networks, vol. 6, pp. 621-655, 2008.

[2] Zhu, C. Zheng, L. Shu, and G. Han, "A

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks," Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, pp. 619-632, 2012.

[3] J. P. Juul, O. Green, and R. H. Jacobsen, "Deployment of Wireless Sensor Networks in Crop Storages," Wireless Personal Communications, vol. 81, pp. 1437-1454, 2015.

[4] S. Nittel, "A survey of geosensor networks: Advances in dynamic environmental monitoring," Sensors, vol. 9, pp. 5664-5678, 2009.

[5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," Computer Networks, vol. 38, pp. 393-422, 2002.

[6] A. Ghosh and S. K. Das, "Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey," Pervasive and Mobile Computing, vol. 4, pp. 303-334, 2008.

[7] A. Ghosh and S. K. Das, "Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks," in Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions, ed: John Wiley & Sons, 2006, pp. 221-256.

[8] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. B. Srivastava, "Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks," in Proceedings - IEEE INFOCOM, 2001, pp. 1380-1387.

[9] S. Park, A. Savvides, and M. B. Srivastava, "Simulating networks of wireless sensors," in Proceedings of the 33nd conference on Winter simulation, 2001, pp. 1330-1338.

[10] F. V. Martins, E. G. Carrano, E. F. Wanner, R. H. Takahashi, and G. R. Mateus, "A hybrid multiobjective evolutionary approach for improving the performance of wireless sensor networks," Sensors Journal, IEEE, vol. 11, pp. 545-554, 2011.

[11] S. Jin, M. Zhou, and A. S. Wu, "Sensor network optimization using a genetic algorithm," Proceedings of the 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, pp. 109-116, 2003.

[12] H. Z. Abidin, N. M. Din, and Y. E. Jalil, "Multi-objective Optimization (MOO) approach for sensor node placement in WSN," in 2013, 7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), ed, 2013.

[13] R. G. Vieira, A. M. da Cunha, and A. P. de Camargo, "An energy management method of sensor nodes for environmental monitoring in Amazonian Basin," Wireless Networks, vol. 21, pp. 793-807, 2015.

[14] W.-H. Liao, S.-C. Kuai, and M.-S. Lin, "An Energy-Efficient Sensor Deployment Scheme for Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization Algorithm," Wireless Personal Communications, pp. 1-19, 2015.

[15] H. Mostafaei and M. R. Meybodi, "Maximizing lifetime of target coverage in wireless sensor networks using learning automata," Wireless Personal Communications, vol. 71, pp. 1461-1477, 2013.

[16] Q. Wu, N. S. V. Rao, X. Du, S. S. Iyengar, and V. K. Vaishnavi, "On efficient deployment of sensors on planar grid," Computer Communications, vol. 30, pp. 2721-2734, 2007.

[17] S. B. Chaudhry, V. C. Hung, R. K. Guha, and K. O. Stanley, "Pareto-based evolutionary computational approach for wireless sensor placement," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 24, pp. 409-425, 2011.

[18] A. Konstantinidis and K. Yang, "Multi-objective K-connected Deployment and Power Assignment in WSNs using a

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

problem-specific constrained evolutionary algorithm based on decomposition," Computer Communications, vol. 34, pp. 83-98, 2011.

[19]A. Konstantinidis, K. Yang, Q. Zhang, and D. Zeinalipour-Yazti, "A multi-objective evolutionary algorithm for the deployment and power assignment problem in wireless sensor networks," Computer Networks, vol. 54, pp. 960-976, 2010.

[20]J. Jia, J. Chen, G. Chang, and Z. Tan, "Energy efficient coverage control in wireless sensor networks based on multi-objective genetic algorithm," Computers and Mathematics with Applications, vol. 57, pp. 1756-1766, 2009.

[21]J. Jia, J. Chen, G. Chang, Y. Wen, and J. Song, "Multi-objective optimization for coverage control in wireless sensor network with adjustable sensing radius," Computers and Mathematics with Applications, vol. 57, pp. 1767-1775, 2009.

[22]S. C. Oh, C. H. Tan, F. W. Kong, Y. S. Tan, K. H. Ng, G. W. Ng, et al., "Multiobjective optimization of sensor network deployment by a genetic algorithm," in 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007, 2007, pp. 3917-3921.

[23]G. Molina, E. Alba, and E. G. Talbi, "Optimal sensor network layout using multi-objective metaheuristics," Journal of Universal Computer Science, vol. 14, pp. 2549-2565, 2008.

[24]Y. Qu and S. V. Georgakopoulos, "Relocation of wireless sensor network nodes using a genetic algorithm," in 2011 IEEE 12th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON 2011, Florida, 2011.

[25]M. Marks, "A survey of multi-objective deployment in wireless sensor networks," Journal of Telecommunications and Information Technology, pp. 36-41, 2010.

[26]H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks," Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, vol. 1, pp. 89-124, 2005.

[27]J. Jia, J. Chen, G. Chang, J. Li, and Y. Jia, "Coverage optimization based on improved NSGA-II in wireless sensor network," in IEEE ICIT 2007 - 2007 IEEE International Conference on Integration Technology, 2007, pp. 614-618.

[28]S. Sengupta, S. Das, M. Nasir, and B. K. Panigrahi, "Multi-objective node deployment in WSNs: In search of an optimal trade-off among coverage, lifetime, energy consumption, and connectivity," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 26, pp. 405-416, 2013.

[29]S. Sengupta, S. Das, M. Nasir, A. V. Vasilakos, and W. Pedrycz, "An evolutionary multiobjective sleep-scheduling scheme for differentiated coverage in wireless sensor networks," Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 1093-1102, 2012.

[30]Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 11, pp. 712-731, 2007.

[31]M. Khalesian and M. R. Delavar, "Wireless sensors deployment optimization using a constrained Pareto-based multi-objective evolutionary approach," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 53, pp. 126-139, 2016.

[32]K. Deb, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms vol. 2012: John Wiley & Sons Chichester, 2001.

[33]K. Miettinen, Nonlinear multiobjective optimization vol. 12: Springer Science & Business Media, 2012.

[34]T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

and C. Stein, Introduction to algorithms vol. 2: MIT press Cambridge, 2001.

[35]X. Liu and P. Mohapatra, "On the deployment of wireless data back-haul networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 1426-1435, 2007.

[36]E. Zitzler, Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications vol. 63: Shaker Ithaca, 1999.

[37]E. Zitzler and L. Thiele, "Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 3, pp. 257-271, 1999.

[38]D. A. Van Veldhuizen and G. B. Lamont, "Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis," Air Force Inst., Dept. Elec. Comput. Eng., Graduate School of Eng.1998.

[39]S. M. Jameii, K. Faez, and M. Dehghan, "Multiobjective optimization for topology and coverage control in wireless sensor networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2015, 2015.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.3, Autumn 2017

Wireless Sensor Networks Deployment Using a Constrained Multi-objective Evolutionary Approach Based on Decomposition

Mina Khalesian [1], Mahmood Reza Delavar *[2]

1- Ph.D graduate in geospatial information system from School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Professor in Center of Excellence in Geomatics Engineering in Disaster Management, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

Wireless sensors deployment is considered as one of the major and fundamental steps of wireless sensor networks (WSNs) design. One of the main challenges of sensors deployment is to find a trade-off between conflicting and competing objectives of the WSN including network coverage and lifetime under connectivity constraints. Besides, decomposition is a basic method in traditional multi-objective optimization and in recent decades, it has also been used for optimizing multi-objective evolutionary problems. In this paper, a constrained Pareto-based multi-objective evolutionary approach based on decomposition (CPMEA/D) is proposed for solving the sensors optimal deployment problem in a WSN. The aim of this approach is to decompose the multi-objective optimization problem into a number of scalar optimization subproblems and then to optimize them simultaneously for finding the Pareto optimal layouts in which the network coverage is maximized and the sensors energy consumption is minimized while the connectivity between each sensor node and the high energy communication node (i.e. sink) is maintained. In this paper, the comparison of the common performance metrics indicates that the proposed approach has made significant improvements on the overall performance of the CPMEA. Moreover, the simulation results on a WSN test instance have shown the superiority of the proposed approach (i.e. CPMEA/D) over the CPMEA and a diverse set of high quality designed networks has been provided to facilitate decision maker's choices.

Key words: *Wireless Sensor Network, Deployment, Constrained Pareto-based Multi-objective Evolutionary Approach, Optimization.*

Correspondence Address *GIS Department, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel : *+98 21 88334430*
Email*: mdelavar@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.31]