

بهبود پوشش هدف در شبکه‌های حسگر بصری با تنظیم میدان دید دوربین‌ها و زمان‌بندی مجموعه‌های پوششی از طریق تبرید شبیه‌سازی شده

بهروز شاهرخزاده، مهدی دهقان و محمدرضا شاهرخزاده

وظایف محوله به حسگر تأمین می‌کند. این منبع توان معمولاً یک باتری کوچک با ذخیره انرژی محدود می‌باشد. در شبکه‌های WSN سنتی، حسگرها داده‌های عددی از قبیل رطوبت، دما، فشار هوا و یا ارتعاشات زلزله را جمع‌آوری می‌کنند ولی پس از تولید دوربین‌های CMOS ارزان قیمت، فرصتی برای ایجاد شبکه‌های حسگر مجهز به دوربین یا بصری^۲ (VSN) فراهم شد تا بدین وسیله بتوان داده‌های تصویری را از محیط اطراف دریافت، پردازش و مخابره کرد [۲]. شبکه‌های حسگر بصری تفاوت‌های عمده‌ای با شبکه‌های WSN متداول دارند. برای مثال میدان دید^۳ (FoV) گره‌های حسگر دوربینی محدودتر از حسگرها در شبکه‌های WSN سنتی است. در یک فضای دوبعدی، میدان دید حسگرهای WSN به صورت یک دیسک یا دایره است که همه رویدادهای پیرامون خود را به شرط آن که در دامنه حسگریش قرار داشته باشد، حس می‌کند اما در VSNها شکل میدان دید قطاعی^۴ از این دیسک با زاویه دید مشخص است و دوربین‌ها تصاویر رویداد مربوطه را از جهت خاصی می‌گیرند [۳].

یکی از مسایلی که در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهش‌ها در حوزه شبکه‌های VSN قرار داشته است، مسأله پوشش و ارائه راه‌حلی برای آن بوده است [۴] تا [۱۰]. پوشش عبارتست از این که یک ناحیه (یا نقاط) هدف با چه کیفیتی توسط دوربین‌ها نظارت می‌شود؟ بنابراین پوشش یک مسأله کیفیت سرویس^۵ (QoS) است. سه نوع پوشش در حوزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم تعریف شده است: پوشش ناحیه^۶ که به پوشش کل یا قسمتی از یک ناحیه می‌پردازد، پوشش حصار (مرزی)^۷ که به دنبال شناسایی نفوذ از یک سوی مرز به طرف دیگر است و پوشش هدف (نقاط گسسته)^۸ که منظور از آن، نظارت بر تعدادی شیء ثابت یا متحرک در طول زمان است [۱۱]. در این مقاله تمرکز ما روی پوشش هدف ثابت در محیطی با توزیع تصادفی حسگرهای دوربینی است. این مسأله کاربردهای زیادی در دنیای پیرامون ما دارد، از جمله مراقبت بصری در مناطق جنگی یا نظارت بر زیستگاه جانوران در حیات وحش و غیره. نقاط هدف، مناطقی خاص و استراتژیک از محیط تحت نظارت هستند که وقوع رویدادهای حساس از قبیل تحرکات دشمن یا تهدیدهای زیست‌محیطی در آن نقاط، پایش دایمی آنها را ضروری می‌سازد. برای

چکیده: در سال‌های اخیر، مسأله «پوشش هدف» در شبکه‌های حسگر بصری که در آن دوربین‌ها داده‌های ویدئویی را جمع‌آوری می‌کنند مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به محدودیت توان حسگرها، لازم است با استفاده بهینه از انرژی ذخیره‌شده، ضمن حفظ پوشش همه اهداف مستقر در محیط، طول عمر شبکه را نیز افزایش داد. در اینجا مسأله بهینه‌سازی طول عمر شبکه با زمان‌بندی پوشش (MLCS) تعریف می‌شود که با تقسیم حسگرها به مجموعه‌های پوششی و سپس نوبت‌بندی خواب و بیدار آنها، در عین حفظ پوشش، مدت زمان عملیاتی شبکه افزایش می‌یابد. از طرفی، انتخاب بهترین میدان دید ممکن برای هر دوربین با توجه به موقعیت اهداف پیرامونی و با استفاده از قابلیت چرخش دوربین‌ها، ضمن کاهش اندازه فضای جواب، تأثیر مهمی در نزدیکی پاسخ مسأله به جواب بهینه دارد. برای حل مسأله، یک الگوریتم جدید مبتنی بر تبرید شبیه‌سازی شده (SA) با هدف یافتن تعداد مجموعه‌های پوششی بیشتر از حسگرهای دارای ذخیره انرژی بالاتر، پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی با ارائه یک تابع انرژی و تولید همسایگی جدید، ضمن پرهیز از تله نقطه بهینه محلی، توزیع متوازن انرژی حسگرها در سراسر شبکه تأمین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کارایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش‌های حریصانه، بهتر است.

کلیدواژه: پوشش هدف، تبرید شبیه‌سازی شده، شبکه‌های حسگر بصری، طول عمر شبکه.

۱- مقدمه

یک شبکه حسگر بی‌سیم^۱ (WSN) از تعداد زیادی گره حسگر تشکیل شده است که به منظور مانیتورینگ پدیده‌های فیزیکی در یک ناحیه جغرافیایی مستقر شده‌اند [۱]. معمولاً هر گره حسگر از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: مؤلفه حسگری که وظیفه جمع‌آوری داده‌ها از محیط اطراف را بر عهده دارد، قسمت پردازشگر با هدف پردازش و ذخیره داده‌های محلی و بخش مخابرات بی‌سیم که برای انتقال داده‌ها به کار می‌رود. علاوه بر اینها یک منبع توان، انرژی مورد نیاز را برای انجام

این مقاله در تاریخ ۲۳ آذر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد. این تحقیق با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی به انجام رسیده است.

بهروز شاهرخزاده، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، (email: bshahrokhzadeh@qiau.ac.ir).

مهدی دهقان، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (email: dehghan@aut.ac.ir).

محمدرضا شاهرخزاده، دانشگاه جامع علمی- کاربردی قزوین، (email: m.shahrokhzadeh@uast.ac.ir).

1. Wireless Sensor Networks

2. Visual Sensor Networks

3. Field of View

4. Sector

5. Quality of Service

6. Area Coverage

7. Barrier Coverage

8. Target or Point Coverage

پیشنهادی از تکنیک فرااکتشافی^۷ تبرید شبیه‌سازی شده^۸ (SA) برای یافتن جواب بهینه مدد می‌گیریم. نکته کلیدی در الگوریتم پیشنهادی تلاش برای طولانی‌شدن عمر شبکه با تأکید بر توزیع متوازن انرژی مصرفی بین گره‌های شبکه است. لذا در تعریف تابع انرژی برای الگوریتم SA به توزیع یکنواخت انرژی مصرف‌شده بین حسگرها به عنوان یک پارامتر مهم توجه شده است.

خلاصه نوآوری‌های اصلی ما در این مقاله به شرح زیر است:

۱. مدل‌سازی و حل مسأله MLCS با استفاده از روش SA که نتایج شبیه‌سازی نشان از بهبود زمان عمر شبکه در عین پوشش کامل اهداف و توزیع متوازن انرژی مصرفی میان حسگرهای مستقر در محیط دارد.
 ۲. کاهش فضای جواب و پیچیدگی الگوریتم با بهره‌گیری از روش پیشنهادی در [۱۶] که FOVهای زیرمجموعه‌های حداکثری از اهداف را به عنوان ورودی به الگوریتم زمانبندی تحویل می‌دهد.
 ۳. تعریف توابع انرژی و تولید همسایگی جدید در روش SA که اولی علاوه بر افزایش تعداد مجموعه‌های پوششی، به توزیع متوازن و یکنواخت انرژی مصرفی بین حسگرها به عنوان یک پارامتر مؤثر در پتانسیل افزایش دوره حیات در آینده نیز توجه دارد و دومی به گونه‌ای مؤثر همسایه‌های مختلف را در فضای جواب مرور کرده تا از افتادن در تله نقطه بهینه محلی^۹ پرهیز نماید.
- ادامه گزارش بدین صورت تنظیم شده که در بخش ۲ برخی از کارهای انجام‌شده در این حوزه معرفی می‌شود. بخش ۳ مسأله پیشینه‌سازی طول عمر با زمانبندی پوشش را تعریف و فرموله می‌کند. در بخش ۴ ما الگوریتم پیشنهادی خود را برای حل مسأله MLCS تشریح می‌کنیم. در بخش ۵ کارامدی و موفقیت الگوریتم پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی و انجام آزمایش‌های مختلف نشان داده می‌شود و سرانجام نتیجه‌گیری و کارهای آتی در بخش ۶ آمده است.

۲- کارهای مرتبط

مسأله پوشش هدف ابتدا برای شبکه‌های حسگر همه‌سویه^{۱۰} یا دیسکی توسط Cardei و همکارانش در [۱۱] مطرح شد. مرجع [۱۱] مجموعه‌های حسگر غیر مجزا^{۱۱} را به صورت مجموعه‌های پوششی غیر مجزا مدل‌سازی کرد به گونه‌ای که هر مجموعه پوششی به طور کامل همه اهداف را پوشش دهد. آنها ثابت کردند که این مسأله تحت عنوان پوشش مجموعه‌ای حداکثر^{۱۲} NPC (MSC) است و دو الگوریتم اکتشافی^{۱۳} برای حل آن پیشنهاد دادند: الگوریتم برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم حریم‌بانه. نویسندگان با انجام شبیه‌سازی نشان دادند که پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم حریم‌بانه کمتر از برنامه‌ریزی خطی است و علاوه بر آن طول عمر شبکه در الگوریتم حریم‌بانه تا حدودی از روش برنامه‌ریزی خطی بیشتر می‌باشد. آنها پیشتر همین مسأله را با استفاده از مجموعه‌های حسگر مجزا^{۱۴} حل کرده بودند [۱۷] ولی در

تضمین پوشش همه اهداف لازم است تا چگالی حسگرها به حد کافی زیاد و افزونه باشد. قبلاً اشاره شد که حسگرها برای تأمین انرژی از یک باتری با ذخیره انرژی محدود استفاده می‌کنند و چون اغلب در محیط‌های غیر قابل دسترسی مستقر می‌شوند، بنابراین شارژ مجدد آنها تقریباً غیر ممکن است. از دیگر سو افزایش طول عمر شبکه به منظور تأمین نیازمندی‌های کاربرد مانند پوشش طولانی‌مدت اهداف ضرورت دارد. بنابراین ما در جستجوی راه حل برای مسأله‌ای با دو هدف ناسازگار هستیم، تأمین پوشش کامل همه نقاط هدف که مستلزم فعال‌شدن تعداد بیشتری از حسگرهای دوربینی است و صرفه‌جویی در مصرف انرژی حسگرها که نیازمند خاموش‌بودن آنها در مواقع غیر ضروری است.

همان طور که در [۴] و [۱۲] نیز اشاره شده است یکی از روش‌های متداول برای افزایش طول عمر شبکه تغییر وضعیت کاری حسگرها بین "خواب" و "بیدار" است. در این مقاله، ما به مسأله "حداکثرسازی طول عمر با زمان‌بندی پوشش" (MLCS) در شبکه‌های حسگر دوربینی می‌پردازیم. هدف، یافتن مجموعه‌های پوششی از حسگرها و تعیین زاویه دید مناسب برای دوربین‌هاست به طوری که همه اهداف مورد نظر را پوشش دهند و سپس زمان‌بندی مناسب برای بیدارشدن متوالی مجموعه‌ها و خوابیدن سایر حسگرها جهت صرفه‌جویی در انرژی، تا طول عمر شبکه به حداکثر برسد. طول عمر در اینجا به معنی دوره زمانی است که هر هدف حداقل توسط یک حسگر بیدار (فعال) دیده شود. این مسأله شباهت بسیاری به مسأله MCMS^{۱۵} در [۴] دارد که در آنجا اثبات شده مسأله اخیر اخیر جزء مسائلی NPC^{۱۶} است.

همان طور که از مرور ادبیات برمی‌آید، راه‌حل‌های بسیاری با رویکردهای مختلف از قبیل حریم‌بانه، ژنتیک، الگوریتم‌های تقریبی و نیز روش‌های برنامه‌ریزی خطی^{۱۷} (LP) برای حل مسأله پوشش هدف در شبکه‌های حسگر بصری یا جهت‌دار پیشنهاد شده است [۴]، [۵] و [۱۲] تا [۱۵]. با وجود آن که راه‌حل‌های مطرح‌شده به بهبودهای قابل ملاحظه‌ای در خصوص افزایش طول عمر شبکه دست یافته‌اند، ولی بیشتر آنها جهت‌های ممکن برای دوربین‌ها را ثابت، از پیش تعریف شده و بدون همپوشانی در نظر گرفته‌اند [۴] و [۱۲]. در بسیاری از موارد این محدودیت و عدم توجه به موقعیت استقرار اهداف در جهت‌گیری دوربین‌ها، موجب انتخاب نامناسب جهت دوربین و در نتیجه عدم پوشش حداکثری اهداف در دامنه دید حسگرها می‌شود. معدود کارهایی هم که همپوشانی در جهت‌گیری حسگرها را امکان‌پذیر دانسته‌اند، یا توجهی به مصرف انرژی نداشته‌اند [۱۵] و یا بدون در نظر گرفتن موقعیت اهداف، سعی در لحاظ کردن همه جهت‌های ممکن دوربین در محاسبات داشته‌اند که با افزایش ورودی‌های مسأله و تعداد متغیرها، زمان اجرا و پیچیدگی حل مسأله را افزایش می‌دهند [۱۴].

بنابراین در این مقاله، ما ابتدا با استفاده از روش پیشنهادی در [۱۶] جهت‌های پوشش‌دهنده زیرمجموعه‌های حداکثری اهداف را شناسایی می‌کنیم و سپس آنها را به عنوان ورودی برای الگوریتم زمانبندی پیشنهادی به منظور حل مسأله MLCS به خدمت می‌گیریم. در الگوریتم

7. Meta-Heuristic
8. Simulated Annealing
9. Local Optima
10. Omni-Directional
11. Non-Disjoint
12. Maximum Set Cover
13. Heuristic
14. Disjoint

1. Sleep
2. Wake
3. Maximum Lifetime Coverage Scheduling
4. Maximum Coverage with Minimum Sensors
5. NP-Complete
6. Linear Programming

مسئله پوشش هدف در شبکه‌های حسگر جهت‌دار (DSN)^۷ اولین بار توسط Ai و همکارانش در [۴] مطرح شد. نویسندگان مسئله را تحت عنوان حداکثر پوشش با حداقل حسگر^۸ (MCMS) فرموله کردند و اثبات اثبات کردند که NPC است، سپس چند روش اکتشافی برای حل آن پیشنهاد کردند که از اولین راه‌حل‌ها برای مشکل تضاد بین "پوشش حداکثری" و "طول عمر حداکثری" است. ایده اصلی [۴] انتخاب حسگر-قطعه‌هایی است که بیشترین تعداد اهداف را پوشش می‌دهند. این کار به صورت تکراری اجرا شده و حسگرهای منتخب به صورت متوالی روشن می‌شوند تا جایی که انرژی آنها تخلیه شده و با حسگرهای باقیمانده نتوان هدف پوشش داده نشده‌ای را حس کرد. الگوریتم فوق با سه روش حریصانه متمرکز، توزیع‌شده و توزیعی با اولویت به حسگرهای با انرژی باقیمانده بیشتر پیاده‌سازی شده است.

در [۲۰] Rossi و همکارانش سعی کردند با بهره‌گیری از روش‌های فرااکتشافی Column Generation و ترکیبی از ژنتیک الگوریتم^۹ و برنامه‌ریزی خطی مسئله را حل کنند. در مسئله، دو مدل برای جهت‌های حسگرها در نظر گرفته شده است: در مدل اول جهت‌های ثابت و از پیش تعیین شده و در مدل دوم جهت‌ها قابل تنظیم در نظر گرفته می‌شود که این تنظیمات در ابتدای استقرار شبکه و با توجه به موقعیت جغرافیایی اهداف انجام می‌شود. ولی جهت‌های حسگری در هر دو مدل یکنواخت و بدون همپوشانی فرض شده است که این فرض با واقعیت‌های شبکه‌های دوربینی چندان سازگار نبوده و کارایی الگوریتم را در رسیدن به جواب بهینه تحت تأثیر قرار می‌دهد.

GIL در [۱۲] دو الگوریتم برای حل مسئله MSCD پیشنهاد کرده است: الگوریتم اکتشافی حریصانه و الگوریتم فرااکتشافی ژنتیکی. الگوریتم‌های حریصانه معمولاً در یافتن جواب سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کنند ولی به خاطر ماهیت جستجوی محلی جواب ممکن است در نقطه بهینه محلی بيفتند، بنابراین مؤلفان مقاله از تکنیک جستجوی سراسری تکاملی (الگوریتم ژنتیک) برای یافتن پاسخ بهینه استفاده کرده‌اند. در الگوریتم ژنتیک از نمایش دوبعدی و ماتریسی مجموعه‌های پوششی در قالب کروموزوم‌ها استفاده شده است، سپس با دو عملیات لقاح^{۱۰} و جهش ژنتیکی^{۱۱} سعی در تنظیم جهت‌گیری حسگرها در نسل‌های بعدی دارد و در نهایت اعمال یک تابع برازندگی^{۱۲} منجر به یافتن حداکثر مجموعه‌های پوششی ممکن خواهد شد. این کار تا تخلیه کامل انرژی باقیمانده حسگرها یا تا جایی که با آنها نتوان همه اهداف را پوشش داد، ادامه می‌یابد. در این مقاله نیز همانند [۲۰] جهت‌های ممکن هر حسگر بدون همپوشانی با یکدیگر و با تعداد ثابت در نظر گرفته شده است که این پیش‌فرض رسیدن به جواب بهینه سراسری را با تردید مواجه می‌کند.

در کلیه روش‌هایی که تا کنون بدان‌ها اشاره شد، توپولوژی شبکه در طول زمان ثابت فرض شده است ولی Hosseini و همکاران در [۱۴] با فرض سیاربودن اهداف و با تقسیم دوره فعالیت شبکه به بازه‌های زمانی مساوی، دو رویکرد برای مسئله انتخاب بهینه حسگرها مطرح نمودند. اولین رویکرد به انتخاب بهینه حسگرها در هر بازه زمانی به طور مستقل

بهبود بعدی [۱۱] توانستند با مشارکت‌دادن حسگرها در بیش از یک مجموعه پوششی طول عمر شبکه را به مقدار قابل توجهی افزایش دهند. الگوریتم‌های مطرح‌شده در [۱۱] و [۱۷] به صورت متمرکز اجرا می‌شوند و فرض بر آن است که موقعیت اهداف و حسگرها معلوم است. اولین الگوریتم توزیعی با مرتبه زمان اجرای چندجمله‌ای برای مسئله حداکثرسازی طول عمر شبکه توسط Kasbekar و همکارانش در [۱۳] ارائه شد. در آنجا حسگرها به جای مختصات دقیق گره‌ها از فاصله نسبی میان گره‌ها اطلاع دارند، یعنی هر حسگر فاصله مخابراتی و حسگری خود تا همسایگانش را می‌داند. در [۱۳] زمان عملیاتی شبکه به چند بازه^۱ تقسیم می‌شود و در هر بازه زیرمجموعه‌ای از حسگرها که پوشش K تایی را تأمین می‌کنند و از انرژی باقیمانده بیشتری برخوردارند، فعال می‌شوند. نویسندگان مقاله ثابت کردند که طول عمر شبکه حداقل مضرب $O((\log n)(\log nB))$ از جواب بهینه است که n تعداد حسگرها و B مقدار انرژی اولیه هر حسگر است. بدین ترتیب با ارائه یک الگوریتم توزیعی-تقریبی^۲، تضمینی قابل اثبات روی دوره حیات شبکه فراهم کردند که نیازی به دانستن موقعیت دقیق حسگرها ندارد.

بعدها Ding و همکارانش [۱۸] الگوریتمی با تقریب مقدار ثابت $(\xi + 4)$ برای مسئله MLCP^۳ پیشنهاد کردند. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا گره‌ها به مجموعه‌های پوششی غیر مجزا تقسیم می‌شوند و سپس این مجموعه‌ها به صورت متوالی^۴ انتخاب و حسگرهای فعال می‌شوند تا زمانی که با حسگرهای باقیمانده دارای انرژی نتوان پوشش کامل اهداف را تأمین کرد. نوآوری اصلی [۱۸] در بهبود تقریب از $O(\log n \times \log nB)$ به یک نرخ ثابت $(\xi + 4)$ است زیرا در کار قبلی میزان کارایی الگوریتم بر حسب تعداد حسگرهای شبکه و انرژی اولیه آنها متغیر است، در حالی که در مقاله اخیر کارایی مستقل از ابعاد و سایر پارامترهای شبکه است.

در [۱۹] Li و همکاران مسئله پوشش ناحیه‌ای K تایی را مورد توجه قرار داده‌اند و برای حل آن دو الگوریتم PCL-GS^۵ و PCL-GSA^۶ را ارائه کردند. در GS، حسگرها دامنه حسگری ثابت دارند و به زیرمجموعه‌های مجزا که هر یک توانایی پوشش کامل K تایی ناحیه را دارند، تقسیم می‌شوند. سپس با زمان‌بندی متوالی خواب/بیدار این زیرمجموعه‌ها، طول عمر شبکه افزایش می‌یابد ولی در GSA اولاً حسگرها می‌توانند دامنه حسگری خود را تنظیم نمایند و در ثانی زیرمجموعه‌های کاری غیر مجزا هستند. معیار انتخاب حسگرها در GS و GSA، دادن اولویت بالاتر به حسگرهای مستقر در نواحی با کمترین تراکم حسگری است. بنابراین گزینه‌های بیشتری برای پیوستن به زیرمجموعه‌های بعدی باقی می‌ماند و نواحی پوششی همپوشانی شده در هر زیرمجموعه نیز به کمترین حد می‌رسد. نویسندگان مقاله با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که الگوریتم GS طول عمر شبکه را به ۹۰٪ طول عمر در حالت ایده‌آل می‌رساند و در حالات خاص که امکان تنظیم دامنه حسگری وجود دارد، الگوریتم GSA ۱۶/۶۳٪ بهبود کارایی نسبت به GS نشان می‌دهد.

7. Directional Sensor Networks

8. Maximum Coverage with Minimum Sensor

9. Genetic Algorithms

10. Crossover

11. Mutation

12. Fitness Function

1. Time Slot

2. Distributed-Approximation Algorithm

3. Maximum Lifetime Coverage Problem

4. Iterative

5. Perimeter Coverage Level-Greedy-Selection

6. Perimeter Coverage Level-Greedy-Selection-Adjustable

جدول ۱: لیست برخی کارهای تحقیقاتی مطرح برای حل مسأله بهینه‌سازی پوشش.

عنوان کار پژوهشی	سال ارائه	مدل حسگری	بهره‌وری انرژی	نوع الگوریتم	رویکرد
Cardei et al. [۱۱]	۲۰۰۵	همه‌سویه	بلی	متمرکز	حریصانه، برنامه‌ریزی خطی
Kasbekar et al. [۱۳]	۲۰۱۱	همه‌سویه	بلی	توزیعی	تقریبی
Ding et al. [۱۸]	۲۰۱۲	همه‌سویه	بلی	متمرکز	تقریبی
Li et al. [۱۹]	۲۰۰۸	همه‌سویه	بلی	متمرکز	حریصانه
Ai et al. [۴]	۲۰۰۶	جهت‌دار	بلی	متمرکز، توزیعی	حریصانه، برنامه‌ریزی خطی صحیح
Rossi et al. [۲۰]	۲۰۱۳	جهت‌دار	بلی	متمرکز	ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی
Gil et al. [۱۲]	۲۰۱۱	جهت‌دار	بلی	متمرکز	ژنتیک
Hosseini et al. [۱۴]	۲۰۱۳	جهت‌دار	بلی	توزیعی	حریصانه، برنامه‌ریزی خطی باینری
Wu et al. [۱۵]	۲۰۱۳	جهت‌دار	خیر	متمرکز	حریصانه
Xiau et al. [۹]	۲۰۱۶	جهت‌دار	خیر	متمرکز	تبرید شبیه‌سازی شده

می‌پردازد به طوری که مجموع انرژی مصرفی حسگرها به حداقل برسد ولی رویکرد دوم، علاوه بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در هر بازه زمانی یکنواختی^۱ در مصرف انرژی را برای بازه‌های زمانی بعدی نیز در نظر می‌گیرد. بدین منظور شبکه به ناحیه‌های مساوی تقسیم شده و به هر ناحیه عددی که مبین مجموع انرژی حسگرهایی است که به صورت بالقوه قابلیت پوشش اهداف آن ناحیه را دارند، نسبت داده می‌شود. سپس در هر بازه زمانی به حسگرهایی که قادر به پوشش نواحی با انرژی کمتر هستند شانس کمتری برای انتخاب داده می‌شود تا برای آینده رزرو شوند. نویسندگان مقاله با شبیه‌سازی نشان دادند که مصرف یکنواخت انرژی در سطح نواحی شبکه و در طول بازه‌های زمانی متوالی موجب بهبودی قابل ملاحظه‌ای در افزایش طول عمر شبکه خواهد شد.

۳- تعریف مسأله

قبل از آن که به تعریف مسأله MLCS بپردازیم لازم است ابتدا مدل جهت‌دار حسگرهای دوربینی استفاده‌شده در مسأله را تشریح کنیم. مدل به کار رفته در این مقاله مشابه با مدل معرفی‌شده در [۱۲] است با این تفاوت که اولاً دوربین‌ها قابلیت چرخش به سمت اهداف را داشته و ثانیاً امکان همپوشانی بین میدان‌های دید مجاور وجود دارد. شکل ۱ مدل مورد نظر از حسگر دوربینی قابل چرخش را به همراه دو هدف تصادفی که در میدان دید آن قرار گرفته‌اند نمایش می‌دهد.

در این شکل، S دوربین و (x, y) مختصات دکارتی آن می‌باشد. T_1 و T_2 اهداف مورد نظر هستند که (x_1, y_1) و (x_2, y_2) به ترتیب مختصات آنها در صفحه دویعدی می‌باشند. P زاویه جهت دوربین نسبت به محور افقی و θ زاویه دید دوربین^۵ (AoV) است و R نشان‌دهنده شعاع دید دوربین می‌باشد. V بردار واحد در جهت نیم‌ساز θ است که شاخص جهت دوربین است. زاویه دید و شعاع دید، میدان دید دوربین (FoV) را تعریف می‌کنند.

به منظور شناسایی FoVهایی که همه زیرمجموعه‌های حداکثری از اهداف را پوشش می‌دهند (MaxFoV) از روش پیشنهادشده در [۱۶] استفاده می‌کنیم. طبق نظر Munishwar در [۱۶]، FoVای که حداقل یک هدف روی لبه منتهی‌الیه (چپ یا راست) خود داشته باشد، شانس قرارگیری در مجموعه MaxFoV را دارد. به عنوان مثال و با توجه به شکل ۱ اگر T_1 هدف روی لبه منتهی‌الیه چپ و $\|a\|_p \leq R$ باشد، می‌توان زاویه P را طبق رابطه زیر تنظیم کرد

$$P = \alpha - \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

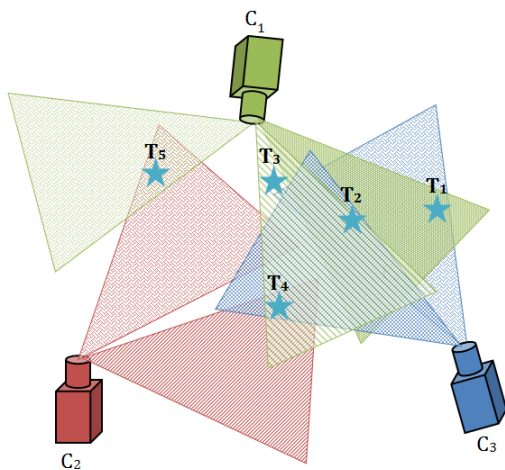
که در آن α زاویه قطبی نقطه هدف T_1 می‌باشد. اگر هدف دیگری (مثلاً T_2) در سه شرط زیر صدق کند، آن گاه آن هدف نیز در این FoV قرار گرفته است

$$\|b\|_p \leq R \quad (2)$$

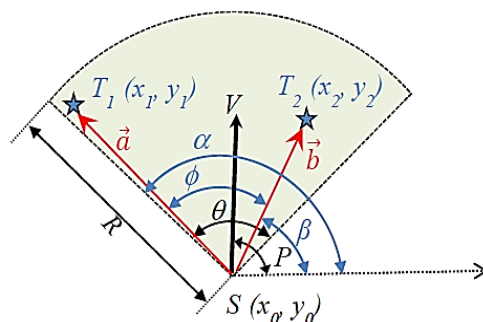
Xiau و همکارانش در [۹] به بررسی پوشش سه‌بعدی زمین‌های ناهموار در شبکه‌های حسگر جهت‌دار پرداخته‌اند و سپس با به کارگیری روش‌های تقسیمات توری^۲، SA و نقطه بهینه محلی^۳ الگوریتم‌هایی به منظور بهبود نرخ پوشش ناحیه‌ای ارائه نموده‌اند. ابتدا مدل سه‌بعدی حسگرهای جهت‌دار را ساده کرده و سپس با استفاده از جای‌جایی موقعیت استقرار حسگرها و نیز تغییر زاویه دید آنها (از بالا) نسبت به سطح ناهموار، الگوریتم‌هایی را برای بهینه‌سازی پوشش سطح مطرح کردند. این بهبود صرفاً با پوشش حفره‌های ناشی از بی‌نظمی سطوح طبیعی حاصل شده است و نویسندگان به پوشش ناحیه در زمان عملیات و افزایش طول عمر شبکه نپرداخته‌اند. ولی تا آنجا که می‌دانیم این کار از معدود پژوهش‌ها در حوزه پوشش شبکه‌های حسگر است که در سال‌های اخیر و با بهره‌گیری از روش تکاملی SA انجام شده است.

در بیشتر کارهایی که به بررسی پوشش هدف در شبکه‌های حسگر جهت‌دار قابل چرخش^۴ می‌پردازند، قطاع مناسب برای تأمین نرخ پوشش بیشینه از یک مجموعه ثابت و از پیش تعریف شده از قطاع‌های ممکن انتخاب می‌شود. به عنوان مثال اگر زاویه دید حسگر ۹۰ درجه باشد، ۴ قطاع در ربع اول تا چهارم قابل تعریف است. [۱۵] با حذف این محدودیت و تنظیم جهت حسگرها با توجه به موقعیت استقرار اهداف مورد نظر سعی در افزایش نرخ پوشش دارد. در اینجا هر حسگر با توجه به اهدافی که در شعاع حسگریش (R_p) قرار دارد، طوری می‌چرخد که بتواند با حداقل قطاع‌های ممکن همه اهداف پیرامونش را پوشش دهد. بنابراین هر حسگر

1. Uniformity
2. Grid Division
3. Local Optimum
4. Rotatable



شکل ۲: یک سناریو از نمایش MaxFoV.



شکل ۱: میدان دید دوربین S و دو هدف T1 و T2 در آن.

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\|} \leq \theta \tag{۳}$$

$$\beta \leq \alpha \tag{۴}$$

که در (۳)، $\vec{a} \cdot \vec{b} = (x_1 - x_s)(x_2 - x_s) + (y_1 - y_s)(y_2 - y_s)$ و $\|\vec{a}\| = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}$ و $\|\vec{b}\| = \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2}$ و در (۴) β زاویه قطبی نقطه هدف T_2 می‌باشد.

بدین ترتیب مجموعه اهداف پوشش داده شده توسط این FoV شناسایی می‌شود. حال اگر این مجموعه زیرمجموعه هیچ FoV دیگری نباشد به MaxFoV اضافه خواهد شد.

به منظور تشریح چگونگی عملکرد MaxFoV در شناسایی FoV‌های مفید با بیشترین تعداد اهداف پوششی ممکن به شکل ۲ توجه کنید. این شکل یک سناریو با ۳ دوربین و ۵ هدف را نشان می‌دهد. مجموعه‌های اهداف پوششی ممکن برای دوربین C_1 عبارتند از $\{T_1\}$ ، $\{T_1, T_2\}$ ، $\{T_1, T_3\}$ ، $\{T_1, T_4\}$ ، $\{T_1, T_5\}$ ، $\{T_2, T_3\}$ ، $\{T_2, T_4\}$ ، $\{T_2, T_5\}$ ، $\{T_3, T_4\}$ ، $\{T_3, T_5\}$ ، $\{T_4, T_5\}$ ، $\{T_1, T_2, T_3\}$ ، $\{T_1, T_2, T_4\}$ ، $\{T_1, T_2, T_5\}$ ، $\{T_1, T_3, T_4\}$ ، $\{T_1, T_3, T_5\}$ ، $\{T_1, T_4, T_5\}$ ، $\{T_2, T_3, T_4\}$ ، $\{T_2, T_3, T_5\}$ ، $\{T_2, T_4, T_5\}$ ، $\{T_3, T_4, T_5\}$ ، $\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ ، $\{T_1, T_2, T_3, T_5\}$ ، $\{T_1, T_2, T_4, T_5\}$ ، $\{T_1, T_3, T_4, T_5\}$ ، $\{T_2, T_3, T_4, T_5\}$ ، $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$ می‌شود. در نتیجه FoV‌های ورودی به مسأله محدود به همین ۷ میدان دید خواهند بود.

۳-۱- تعریف مسأله MLCS

یک شبکه VSN را با N حسگر دوربینی که در یک فضای دوبعدی به صورت کاملاً تصادفی پراکنده شده‌اند در نظر می‌گیریم و می‌خواهیم با این حسگرها M هدف را پوشش دهیم. مجموعه $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ به عنوان مجموعه N حسگر و مجموعه $T = \{t_1, t_2, \dots, t_M\}$ به عنوان مجموعه‌ای از M هدف، توصیف می‌شود. دوربین‌های مورد استفاده در شبکه از نوع PTZ^۲ بوده و لذا قابلیت چرخش افقی (Pan)، چرخش عمودی (Tilt) و بزرگ‌نمایی (Zoom) را دارند. چون فضای مسأله ما دوبعدی است منحصراً قابلیت چرخش افقی دوربین‌ها مد نظر است که می‌تواند ۳۶۰ درجه حول محور خود دوران افقی داشته باشند. هدف مسأله MLCS به حداکثر رسانیدن طول عمر^۳ یک شبکه VSN با استفاده از زمان‌بندی مناسب خواب/بیدار حسگرها است در عین حالی

که تمام اهداف مورد نظر را پوشش دهد. فرضیات ما در این مسأله به شرح زیر است:

- شبکه VSN همگن^۴ است یعنی همه حسگرها انرژی اولیه، شعاع دید، زاویه دید و مصرف انرژی برابر دارند.
- موقعیت جغرافیایی حسگرها و اهداف ثابت و معلوم است و در هر نقطه فقط یک حسگر (یا هدف) متمایز و بدون روی هم افتادگی وجود دارد.
- با فرض این که شعاع انتقال داده دوربین‌ها به حد کافی بزرگ است، همبندی یا اتصال شبکه تضمین می‌شود.
- هر حسگر در هنگام فعالیت‌های مربوط به حسگری مقدار ثابت و یکنواختی انرژی مصرف می‌کند. هزینه انرژی مصرفی برای انتقال داده، تغییر حالت از روشن به خاموش و بالعکس، چرخش دوربین‌ها به جهات مناسب و سایر فعالیت‌ها ناچیز فرض شده است.
- مدل پوشش اهداف: نقطه‌ای، Coverage-۱ و بولین^۵ است.
- به ازای هر هدف حداقل یک دوربین وجود دارد که پتانسیل پوشش آن را دارد.
- اهداف ضریب اهمیت (وزن) برابر دارند.
- سایر علامات استفاده شده در این مقاله به شرح زیر است:
- P_i : مجموعه پوششی حداکثر از قطعات حسگر i ام که با توجه به اهداف قابل پوشش آن حسگر مشخص می‌شود (مسأله MaxFoV [۱۶]).

- $F_{i,p}$: امین قطعه از حسگر i ام $(p: 1 \dots |P_i|, i: 1 \dots N)$.
- F : مجموعه $F_{i,p}$ ‌های حسگرهای مستقر در محیط.
- $C(F_{i,p})$: مجموعه اهداف پوشش داده شده توسط $F_{i,p}$.
- $F(t_j)$: مجموعه حسگر-قطعات‌هایی که پتانسیل پوشش هدف t_j را دارند $(j: 1 \dots M)$.
- $CS_k (\subseteq F)$: k امین مجموعه پوششی^۶ از حسگر-قطعات‌هایی که همه اهداف (T) را پوشش می‌دهند، تحت شرایط زیر:
 ۱. هر هدف حداقل توسط یک حسگر-قطعه پوشانده شود.
 ۲. به ازای هر حسگر، حداکثر یک حسگر-قطعه در CS_k وجود داشته باشد.
 ۳. مجموع انرژی مصرفی هر حسگر از انرژی اولیه آن تجاوز نکند.

4. Homogeneous
5. Boolean
6. Cover Set

1. Maximal Coverage Set
2. Pan-Tilt-Zoom
3. Maximizing Lifetime

$$\sum_{k=1}^L \sum_{p=1}^{|P_i|} a_k \text{cost}.M_{i,p}^k \leq E_i, \forall S_i \in S \quad (9)$$

where $M_{i,p}^k \in \{0, 1\}$

رابطه (۷) تضمین می‌کند که هر هدف حداقل توسط یک حسگر-قطاع پوشش داده می‌شود، (۸) می‌گوید هر حسگر در هر مجموعه پوششی فقط یک جهت فعال می‌تواند داشته باشد و (۹) بیان می‌کند مجموع انرژی مصرفی هر حسگر در CS هایی که فعال بوده است نباید از انرژی اولیه آن بیشتر شود.

این مسأله به عنوان یک مسأله NPC شناخته شده [۴] و بنابراین ما در این مقاله سعی داریم الگوریتم‌هایی مکاشفه‌ای برای حل آن ارائه دهیم.

۴- الگوریتم پیشنهادی برای مسأله MLCS

در اینجا به شرح جزئیات الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مسأله MLCS می‌پردازیم. ابتدا الگوریتمی حریصانه ارائه خواهد شد که به منظور مبنای مقایسه با روش مبتنی بر SA مطرح شده است. الگوریتم دوم مبتنی بر روش فرااكتشافی SA می‌باشد که در این مقاله برای اولین بار به منظور حل مسایل پوشش هدف در شبکه‌های حسگر بصری ارائه می‌شود.

۴-۱ الگوریتم حریصانه

در اینجا به شرح جزئیات الگوریتم حریصانه برای حل مسأله تعریف شده در قسمت پیشین می‌پردازیم که با توجه به مفروضات مسأله یعنی همگن بودن شبکه و مصرف مساوی انرژی در همه مجموعه‌های پوششی ارائه شده است. این الگوریتم مشابه با کاری است که بیشتر برای حل همین مسأله ارائه شده بود [۱۲] اما بهبودهایی در نحوه کار و به منظور گسترش‌پذیری آن اعمال شده است. اولاً در الگوریتم پیشنهادی بر خلاف [۱۲] جهت‌های حسگرها ثابت و از پیش تعریف شده نیست و امکان همپوشانی میان جهت‌های (میادین دید) مجاور وجود دارد. در ثانی به خاطر تعداد فوق‌العاده زیاد FoV های ممکن برای حسگرها، الگوریتم MaxFoV [۱۶] به خدمت گرفته شده است.

پارامترهای ورودی الگوریتم عبارتند از S (مجموعه حسگرهای دوربینی)، T (مجموعه اهداف)، r (درصد انرژی مصرفی در هر مجموعه پوششی نسبت به انرژی اولیه)، E (انرژی اولیه حسگرها)، $Cost$ (هزینه انرژی مصرفی) عملیات حسگری در واحد زمان) و گام‌های الگوریتم به شرح زیر است:

- کام اول (Initialize) یا مقداردهی اولیه به متغیرهای برنامه: مجموعه حسگرها (Sensors=S)، مجموعه اهداف (Targets=T)، انرژی اولیه حسگرها $(RE_i = E, i: 1 \dots N)$ و شماره مجموعه پوششی $(k=0)$.
- کام دوم (MaxFoV): بر مبنای موقعیت جغرافیایی حسگرها و اهداف، برای هر حسگر، قطاع‌هایی که بیشترین اهداف ممکن را پوشش می‌دهند شناسایی می‌شوند (F و P_i).
- کام سوم (Coverage): به ازای هر حسگر-قطاع $(F_{i,p}, i: 1 \dots N, p: 1 \dots |P_i|)$ از F ، مجموعه اهداف قابل پوشش توسط آن شناسایی می‌شود: $\{C(F_{i,p}), \forall i, p | F_{i,p} \in F\}$.
- همچنین برای هر هدف $(t_j, j: 1 \dots M)$ ، مجموعه حسگر-قطاع‌هایی که قابلیت پوشش آن را دارند به دست می‌آید: $\{F(t_j), \forall j | t_j \in Targets\}$

- CS : مجموعه CS_k های حاصل در هر زمان بندی.
- E_i : انرژی اولیه حسگر i ($i: 1 \dots N$). با فرض همگن بودن VS_N ، انرژی اولیه همه حسگرها برابر است با: $(E_i = E, \forall S_i \in S)$.
- r_k : درصد انرژی مصرفی نسبت به انرژی اولیه در k امین مجموعه پوششی $(0 \leq r_k \leq 1)$.
- $Cost$: انرژی مصرفی ناشی از فعالیت حسگری در واحد زمان (با واحد Joule/s).
- CE_k : انرژی مصرف شده حسگرهای فعال در k امین مجموعه پوششی: $CE_k = \min\{r_k \times E, \min_{F_{i,p} \in CS_k} (RE_i)\}$.
- RE_i : انرژی باقیمانده حسگر i ام که مقدار اولیه آن برابر با E_i است $(RE_i = E_i = E, \forall S_i \in S)$.
- a_k : زمان فعالیت مجموعه پوششی k ام $(a_k = CE_k / Cost)$.

همان طور که پیشتر اشاره شد، هدف ما حداکترسازی طول عمر شبکه است. طول عمر شبکه در اینجا به مفهوم فاصله زمانی آغاز به کار شبکه تا هنگامی است که نتوان با مجموعه حسگرهای دارای انرژی هیچ "مجموعه پوششی" روی اهداف تشکیل داد. هر مجموعه پوششی شامل قطاع‌هایی از حسگرهاست که بتوانند همه اهداف را پوشش دهند. با اجرای یک الگوریتم زمان بندی، این مجموعه‌های پوششی به ترتیب فعال شده و حسگرهای مربوطه بخش مشخصی از انرژی خود را برای انجام فعالیت‌های حسگری مصرف می‌کنند. مسلم است هرچه مجموعه‌های پوششی بیشتری پیدا کنیم، طول عمر شبکه بیشتر خواهد شد. ما حسگر-قطاع‌های F را در k مجموعه پوششی تقسیم می‌کنیم. هر حسگر-قطاع می‌تواند به چند مجموعه پوششی متعلق باشد به شرط آن که انرژی باقیمانده‌اش تمام نشده باشد (مجموعه پوششی غیر مجزا). هدف ما یافتن بزرگ‌ترین مقدار k ممکن با رعایت شرایط سه‌گانه مورد اشاره است. همان طور که در [۱۱] تشریح شده است حد بالای k که آن را با L نمایش می‌دهیم برابر با d/r می‌باشد که d تعداد حسگر-قطاع‌هایی است که در زمان استقرار اولیه شبکه یک هدف بحرانی^۲ را پوشش می‌دهند (هدف بحرانی، هدفی است که تعداد حسگر-قطاع‌هایی که بالقوه قابلیت پوشش آن را دارند مینیمم باشد) و r مقدار نسبی انرژی مصرفی حسگرها در هر مجموعه پوششی است (r_k) .

به منظور تعریف دقیق مسأله متغیری با نام $M_{i,p}^k$ معرفی می‌شود

$$M_{i,p}^k = \begin{cases} 1, & \text{if } F_{i,p} \in CS_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

با تعریف متغیر فوق مسأله MLCS به صورت زیر تعریف خواهد شد

$$\max \sum_{k=1}^L a_k \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \sum_{F_{i,p} \in F(t_j)} M_{i,p}^k \geq 1, \forall t_j \in T, k = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^{|P_i|} M_{i,p}^k \leq 1, \forall S_i \in S, k = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

1. Sensor-Sector
2. Critical Target

در ابتدا یک پیکربندی اولیه دلخواه (حالت اولیه s : از فضای جواب انتخاب می‌گردد. سپس یک دمای اولیه (τ) برای سیستم در نظر گرفته می‌شود (انتخاب مقدار دمای اولیه دلخواه است اما می‌توان بسته به این که تابع در نقطه شروع چه رفتاری دارد آن را انتخاب کرد. مثلاً اگر تابع دارای تغییرات کم است دمای کمتر نسبت می‌دهیم تا قابلیت تحرک کمتر باشد و اگر تابع دارای تغییرات زیاد است دمای بیشتری نسبت می‌دهیم تا امکان حرکت و خارج شدن از مینیمم‌های محلی بیشتر شود).

سپس یک نقطه از فضای اطراف s به عنوان گزینه برای قدم بعدی انتخاب می‌شود (همسایگان هر حالت از تغییر در مقادیر حالت فعلی به دست می‌آیند که بستگی به تعریف مسأله دارد، هدف یافتن بهترین حالت‌های همسایه است تا جایی که جواب بهتری پیدا نشود). برای تصمیم در مورد حرکت به سمت نقطه جدید این طور عمل می‌کنیم: اگر جواب بهتر شد حرکت کن و اگر نه با احتمال P به سمت نقطه جدید برو. فلسفه احتمال پذیرش P پرهیز از افتادن در نقطه بهینه محلی است. اگر هیچ یک از حالت‌های همسایه جواب بهتری از حالت کنونی ندهد، ممکن است گمان کنیم نقطه فعلی بهترین جواب است (در صورتی که نیست) که این نقطه بهینه را جواب بهینه محلی می‌نامند. برای فرار از این تله، الگوریتم علی‌رغم این که ترجیح می‌دهد جواب‌های بهتر را بپذیرد ولی برخی همسایه‌های بدتر را نیز با یک احتمال خاص (P) قبول می‌کند. یکی از متداول‌ترین تابع‌های مورد استفاده برای تصمیم‌گیری در مورد حرکت به سمت نقطه جدید به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$P(e, e', \tau) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta e}{B\tau}\right), & \Delta e > 0 \\ 1, & \Delta e \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن e انرژی حالت کنونی، e' انرژی حالت جدید، $\Delta e = e' - e$ ، τ دمای سیستم و B ثابت Boltzmann [۲۴] است. تابع به گونه‌ای تعریف شده که هرچه دما زیادتر باشد احتمال یا توانایی حرکت در جهت افزایش انرژی (بدتر شدن جواب) نیز بیشتر باشد و برعکس. پارامتر دیگری که در تعیین احتمال P نقش ایفا کرده، میزان تغییر تابع (Δe) در مسیر حرکت است. هرچه شیب تابع (اختلاف بین انرژی حالت جدید و کنونی) بیشتر باشد احتمال P کمتر است و برعکس. زمانی که دما بالاست فضای جواب با هدف یافتن محدوده پاسخ بهینه سراسری جستجو می‌شود و وقتی دما پایین می‌آید، هدف افزایش دقت پاسخ نهایی و نزدیکی هرچه بیشتر آن به جواب بهینه سراسری است. بنابراین کاهش ملایم دما به جهت این که فرصت کافی را برای جستجوی وسیع‌تر فضای جواب فراهم نماید اهمیت بسیاری دارد. در ادبیات دو روش معمول برای کاهش دما مطرح شده است: نمایی^۵ و خطی^۶. در روش نمایی هنگامی که دما بالاست، زمان کمتری برای جستجوی فضای جواب صرف می‌شود ولی وقتی دما کاهش می‌یابد، زمان بیشتری صرف افزایش دقت می‌شود. در کاهش دمای خطی، دما به طور یکنواخت کاهش یافته و در نتیجه زمان جستجو به طور مساوی در فضای جواب توزیع می‌شود.

در طراحی یک الگوریتم SA کارآمد، سه گام از مراحل فوق اهمیتی

- گام چهارم (Select): اهداف $(t_j, j: 1 \dots M)$ بر اساس $|F(t_j)|$ به صورت صعودی مرتب شده و حسگر-قطاعی $(F_{i,p})$ که پوشاننده هدف با کمترین $|F(t_j)|$ هست و اولاً بیشترین انرژی باقیمانده (RE_i) و ثانیاً بیشترین $|C(F_{i,p})|$ را دارد انتخاب می‌شود.

- گام پنجم (Update): حسگر-قطاع انتخابی به مجموعه پوششی k اضافه شده و همه قطاع‌های حسگر انتخاب شده و نیز اهداف قابل پوشش قطاع مربوطه حذف شده و مجموعه‌های $Targets$ و F به روز رسانی می‌شوند.

- گام ششم (Cover Set): گام‌های سوم، چهارم و پنجم تا وقتی مجموعه $Targets$ تهی شود (همه اهداف حذف شوند) تکرار می‌شوند. در اینجا k امین مجموعه پوششی یافت می‌شود.

- گام هفتم (Consume): انرژی لازم برای عملیات حسگری توسط حسگرهای مجموعه پوششی k ام (CE_k) مصرف شده و مقدار انرژی باقیمانده آنها محاسبه می‌شود.

- گام هشتم (Repeat): حسگرهای باقیمانده $(RE_i = 0)$ و قطاع‌های آنها (F) را مشخص کرده و به زمان پوشش کل به اندازه $CE_k / cost$ اضافه می‌کنیم. سپس به k یکی اضافه کرده و همه اهداف را برمی‌گردانیم $(T = Targets)$ و از گام سوم تا وقتی که امکان پوشش هدفی با حسگرهای باقیمانده وجود ندارد، تکرار می‌کنیم.

در الگوریتم فوق، گام چهارم (Select) اهمیت بسیار زیادی در حصول پاسخ بهینه دارد. از نگاه ما هدفی که توسط کمترین تعداد دوربین‌ها قابل مشاهده و پوشش است (هدف بحرانی) بیشترین تأثیر را بر میزان طول عمر شبکه دارد. زیرا با تخلیه انرژی حسگرهای پوشاننده آن، شبکه قادر به ادامه کار خود-پوشش پیوسته کلیه اهداف-نیست. حال اگر چند هدف در یک زمان واجد این شرایط باشند یا چند حسگر-قطاع با شرایط یکسان (تعداد اهداف پوشش داده شده و انرژی باقیمانده برابر)، گزینه قابل انتخاب برای پوشش اهداف باشند، چگونگی انتخاب از میان این گزینه‌ها رسیدن به جواب بهینه سراسری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر ممکن است به سبب انتخاب‌هایی که در فرایند حریصانه داریم، نهایتاً به جواب بهینه محلی (و نه سراسری) برسیم. بنابراین روشی دیگر برای کشف جواب بهینه سراسری مبتنی بر SA ارائه می‌کنیم.

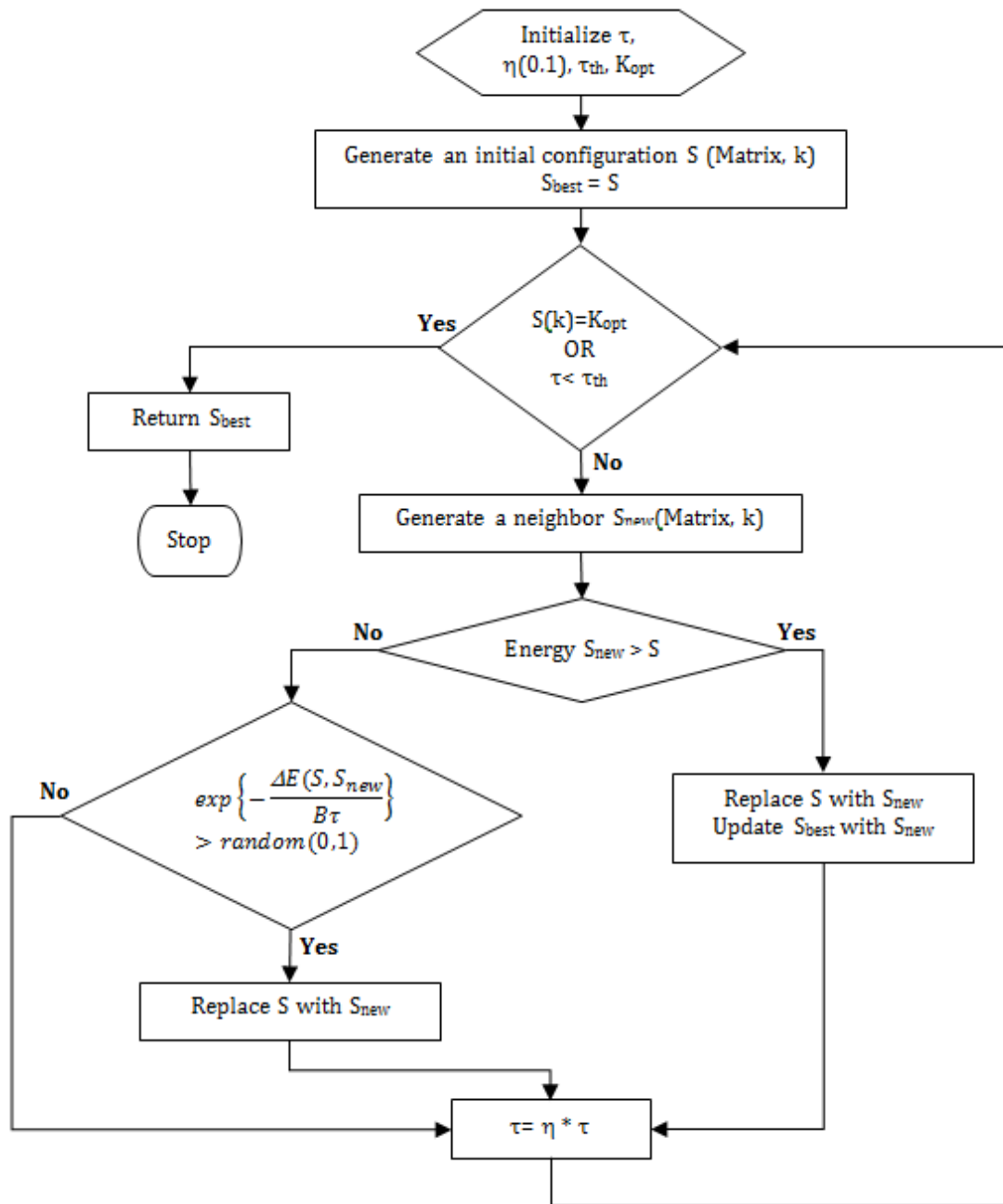
۴-۲ الگوریتم مبتنی بر Simulated Annealing

الگوریتم Simulated Annealing و یا به اختصار SA، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرااکتشافی ساده و اثربخش در حل مسایل بهینه‌سازی است. منشأ الگوریتم SA، کارهای کریک پاتریک و کرنی و همکارانشان در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است [۲۱] و [۲۲]. الگوریتم SA با استخراج شباهت‌های تیرید^۱ مواد و مسئله جستجوی جواب بهینه در فضای راه حل‌ها توسعه یافته است. این الگوریتم تعمیم‌یافته روش مونت کارلو [۲۳] است. روش SA از متغیرهای تصادفی در فضای راه حل آغاز کرده و آنها را به سمت جواب نسبتاً بهینه و قابل قبول هدایت می‌نماید البته تضمینی برای به دست آوردن بهترین جواب ارائه نمی‌کند. به دست آوردن یک تخمین خوب برای مسایل بهینه‌سازی نسبت مستقیمی با کشف دمای تعادل سیستم دارد.

شکل ۳ روندنمای کلی الگوریتم SA را برای حل مسأله نشان می‌دهد.

2. Initial State
3. Neighbor
4. Acceptance Probability
5. Exponential
6. Linear

1. Annealing



شکل ۳: روندنمای گام‌های اصلی الگوریتم SA.

که در آن $SensorID$ شناسه حسگر پوشاننده هدف i ام با $Direction$ تنظیم شده بر حسب زاویه از افق در مجموعه پوششی k ام است. هر ستون از ماتریس یک مجموعه پوششی خواهد ساخت به شرط آن که معیارهای زیر در آن صدق کند:

۱. هیچ حسگری با جهت‌های متضاد در یک ستون نباشد.
۲. به ازای هر هدف (هر سطر) حداقل یک حسگر با جهت مشخص وجود داشته باشد.
۳. مجموعه پوششی هیچ حسگر - قطعی زیرمجموعه پوششی حسگر - قطاع دیگری در هر ستون نباشد.

اگر فرض کنیم شبکه همگن باشد و نسبت انرژی مصرفی (r) در همه مجموعه‌های پوششی با هم برابر و نیز دارای ضربی صحیح از ۱ باشد (مثلاً $r = 0.1$ یا $r = 0.25$)، طول عمر شبکه از رابطه زیر به دست می‌آید

$$Network\ Lifetime = |CS| \times \left(r \times \frac{E}{cost} \right) \quad (11)$$

مضاعف دارند. اولین گام، اتخاذ مکانیزم تولید حالات همسایگی از حالت فعلی است که تأثیر زیادی در همگرایی الگوریتم به جواب بهینه سراسری دارد. دومین قدم، تعریف تابع احتمال پذیرش (P) نسبت به دماست که باید خطر افتادن در نقاط مینیمم محلی را از بین ببرد. سومین گام، انتخاب مقادیر مناسب برای دمای اولیه و نهایی و نیز روش کاهش دمای سیستم است که مستقیماً روی زمان مورد نیاز برای جستجوی جواب نهایی تأثیر می‌گذارد.

۴-۲-۱ راه حل مسأله MLCS با استفاده از SA

هر State نشان‌دهنده یک راه حل کاندید برای مسأله است و به صورت یک ماتریس دوبعدی با M سطر (تعداد اهداف) و L ستون (حد بالای مجموعه‌های پوششی) نمایش داده می‌شود (شکل ۴). در شکل هر مؤلفه $A_{i,k}$ از ماتریس که i امین سطر و k امین ستون آن را نشان می‌دهد ($i = 1, 2, \dots, M$ و $k = 1, 2, \dots, L$) دارای مقدار زیر است $A_{i,k} = (SensorID, Direction)$

حد آستانه دما (τ_{th}) و نیز ضریب سردکردن فرایند تبرید (η) تعیین می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، چون تابع انرژی دچار تغییرات دفعی شدید می‌شود، لذا انتخاب مقادیر بالاتر τ ، مانع از افتادن در تله ماکسیمم‌های محلی خواهد شد. حد آستانه دما ۱٪ مقدار اولیه تنظیم می‌شود $(\tau_{th} = 0.01 \times \tau)$ تا اولاً فرصت کافی برای جستجوی گسترده در فضای جواب فراهم شود و در ثانی با کاهش بسیار زیاد دمای نهایی، احتمال پذیرش جواب‌های بدتر به حداقل برسد.

گام دوم: تولید ماتریس جواب $(S(A, k))$ - به ازای هر هدف مستقر در محیط (متناظر با هر سطر ماتریس)، از مجموعه حسگر-قطاع‌های بالقوه پوشاننده آن هدف (حاصل از الگوریتم MaxFoV [۱۶]) یکی به تصادف انتخاب می‌شود به شرط آن که هر ستون یک مجموعه پوششی با رعایت ضوابط سه‌گانه فوق تشکیل دهد. تکمیل ستون‌های بعدی ماتریس تا جایی ادامه می‌یابد که نتوان با مجموعه حسگر-قطاع‌های باقیمانده، مجموعه پوششی جدیدی ایجاد کرد. k تعداد ستون‌های (Cover Set) به دست آمده است. حسگرهای ستون اول به طور همزمان روشن (بیدار) می‌شوند و جهت دوربین خود را متناسب با Direction مشخص شده تنظیم می‌کنند. پس از زمان a_k ، فعالیت حسگرهای آن مجموعه خاتمه یافته و از انرژی آنها به اندازه CE_k کاسته شده (رابطه (۱۳)) و سپس به خواب می‌روند. به همین ترتیب حسگرهای ستون بعدی فعالیت خود را آغاز می‌کنند و الی آخر.

گام سوم: تولید ماتریس جواب همسایگی - با به هم ریختن مؤلفه‌های ماتریس در S یک ماتریس جدید S_{new} حاصل می‌شود. انتخاب مؤلفه کاندید برای جایگزینی و نیز معیار انتخاب جانشین آن بر طبق قواعد مندرج در جدول ۲ انجام خواهد شد. در هر ردیف جدول یک گزینه انتخاب با قواعد ممکن برای آن درج شده است. احتمال انتخاب همه قواعد با هم برابر است (چون سه قاعده داریم، احتمال انتخاب هر یک ۰/۳۳ است). به ازای هر ردیف یک عدد تصادفی $u \in [0, 1]$ انتخاب می‌شود، اگر $0.33 \leq u \leq 0.66$ باشد قاعده اول، اگر $0.33 < u \leq 0.66$ باشد قاعده دوم و اگر $0.66 < u \leq 1$ باشد قاعده سوم به عنوان گزینه منتخب مربوط به آن ردیف اعمال می‌شود. این روال به ترتیب زیر اجرا می‌گردد:

۱. انتخاب مجموعه پوششی (ستون) کاندید برای تعویض مؤلفه در S مطابق قواعد ردیف اول جدول انجام می‌شود. مجموعه پوششی کاندید یا به تصادف، یا اولین ستون و یا آخرین ستون می‌تواند باشد.
۲. از ستون انتخابی در مرحله قبل یک حسگر-قطاع (سطر) می‌بایست نامزد جابه‌جایی با گزینه‌های جدید شود که به صورت تصادفی و یا حسگر-قطاعی که به کمترین تعداد ستون (مجموعه پوششی) و یا بیشترین تعداد ستون منتهی خواهد شد، کاندید تعویض می‌شود.
۳. اکنون نوبت به انتخاب جانشین می‌رسد و طی آن حسگر-قطاعی که باید جایگزین مؤلفه انتخاب‌شده در مراحل قبلی شود، مشخص می‌گردد. این جایگذاری می‌تواند به صورت تصادفی یا انتخاب بر اساس کمترین همپوشانی با سایرین و یا بیشترین انرژی باقیمانده در میان حسگرهای شایسته برای جانشینی باشد.
۴. در نهایت نوبت تنظیم CS ‌های (ستون‌ها) بعدی است که گزینه‌های تصادفی با کمترین همپوشانی و با بیشترین انرژی باقیمانده حسگرها در اختیار است.

نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره کرد، وجود قاعده انتخاب تصادفی در کلیه ردیف‌های جدول است. در واقع این قاعده جهت پرهیز از افتادن در تله جواب محلی ضروریست و اجازه می‌دهد تا جهش‌های دور و کشف پاسخ‌های جدید در فضای جواب میسر شود.

	CS1	CS2	...	CS _k	...	CS _L
T ₁	8,25	4,55		5,170		14,28
T ₂	2,110	21,30		12,22		-
T ₃	15,10	4,55		3,193		8,196
...						
T _M	2,110	2,320		3,193		-

شکل ۴: نمونه‌ای از نمایش حالت (State) در SA پیشنهادی.

که $|CS|$ تعداد مجموعه‌های پوششی (تعداد ستون‌هایی که شرایط بالا در آنها صادق است)، E انرژی اولیه حسگرها و $cost$ نرخ انرژی مصرفی در واحد زمان است.

به منظور ارزیابی حالت‌های ماتریسی در شکل ۴ از یک تابع انرژی استفاده می‌شود. تابع انرژی باید طوری تعریف شود که اولاً با افزایش تعداد مجموعه‌های پوششی مقدار آن زیاد شود و ثانیاً توزیع متوازن انرژی بین حسگرهای شبکه در آن لحاظ شود. بالابودن تعداد حسگرهای باقیمانده و نیز انرژی موجود در آنها هم تأثیر مثبتی روی تابع خواهد داشت زیرا در صورت پیکربندی جدید در شبکه (مثلاً اضافه‌شدن یک یا چند حسگر) احتمال یافتن مجموعه‌های پوششی جدید را افزایش خواهد داد.

با مقدمه فوق تابع انرژی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$E_s = \alpha \left\{ \frac{|CS|}{d} \right\} + (1 - \alpha) \cdot \left\{ \text{avg} \left[\frac{Q}{N}, \frac{\sum_{i=1}^N RE_i}{N \times E}, \frac{\cos^{-1} \frac{\sigma}{E}}{\frac{\pi}{2}} \right] \right\} \quad (12)$$

در این رابطه، $|CS|$ تعداد مجموعه‌های پوششی حاصله، d/r حد بالای مجموعه‌های پوششی ممکن، N تعداد حسگرهای مفید (حسگری که حداقل یک هدف در محدوده شعاع دید خود داشته باشد) و Q تعداد حسگرهای دارای انرژی در پایان کار (حسگرهای باقیمانده) است. E انرژی اولیه حسگرها و $\sum_{i=1}^N RE_i$ مجموع انرژی باقیمانده در حسگرها می‌باشد. از σ برای نمایش انحراف معیار انرژی باقیمانده در حسگرهای شبکه استفاده می‌کنیم که توزیع مصرف انرژی را نشان می‌دهد. هرچه مقدار انحراف معیار کمتر باشد، مبین توزیع متوازن‌تر انرژی بین حسگرهای عملیاتی در شبکه است. بنابراین تابع انرژی با σ نسبت عکس دارد و لذا از تابع نزولی $\cos^{-1}(\sigma/E)$ استفاده شده است. در ضمن تمامی پارامترهای تابع فوق بین صفر و یک نرمال شده‌اند، فلذا $\cos^{-1}(\sigma/E)$ بر $\pi/2$ تقسیم شده و سپس همراه با Q/N و $(\sum_{i=1}^N RE_i) / (N \times E)$ از آنها میانگین‌گیری شده است تا رنج آن نیز محدود به ۰-۱ شود. α ضریب اهمیت در بازه صفر تا یک است، مثلاً $\alpha = 0.8$ بیانگر تأثیر ۸۰ درصدی طول عمر شبکه در تابع انرژی و ۲۰ درصد تأثیر سایر پارامترها (توزیع متوازن انرژی، تعداد و مجموع انرژی حسگرهای باقیمانده) روی این تابع است. برای کاهش انرژی حسگرها در مجموعه‌های پوششی متوالی از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$E_i = E_i - CE_k, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (13)$$

که در آن E_i انرژی اولیه حسگر i ام و CE_k مقدار انرژی مصرفی هر حسگر در k امین مجموعه پوششی است. در ادامه به شرح گام به گام الگوریتم SA پیشنهادی می‌پردازیم. **گام اول:** مقداردهی اولیه - در این مرحله مقادیر اولیه برای دما (τ) و

جدول ۲: قواعد انتخاب حسگر- قطاع جهت جایگزینی و جانشینی توسط تابع تولید ماتریس همسایگی.

گزینه‌های انتخاب	قاعده ۱	قاعده ۲	قاعده ۳
انتخاب مجموعه پوششی (ستون)	تصادفی	اولین ستون	آخرین ستون
انتخاب حسگر- قطاع (سطر)	تصادفی	منتهی به کمترین CS	منتهی به بیشترین CS
حسگر- قطاع جدید	تصادفی	کمترین همپوشانی	بیشترین انرژی باقیمانده
تنظیم ستون‌های بعدی	تصادفی	کمترین همپوشانی	بیشترین انرژی باقیمانده

جدول ۳: پارامترهای شبیه‌سازی و مقادیر انتسابی به آنها.

پارامترها	مقادیر
تعداد حسگرهای دوربینی (N)	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰
تعداد اهداف (M)	۲۰ و ۴۰
شعاع دید یا حسگری (R)	۵۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ متر
زاویه دید (AOV)	۴۵°، ۶۰° و ۹۰°
انرژی اولیه حسگرها (E)	۱۰۰۰ ژول
انرژی مصرفی در زمان ($Cost$)	۲۰ J/s
دمای اولیه (τ)	۲۰۰
ضریب تبرید (η) در (۱۵)	۰٫۹
α در (۱۲)	۰٫۹

بعدی تنظیم شده و فرایند تبرید از ابتدا تجدید می‌شود. انتظار می‌رود پس از چند دوره تکرار به مرور بهترین جواب به دست آمده در هر تکرار به جواب بهینه سراسری نزدیک شود. تعداد دفعات تکرار در اینجا ثابت فرض می‌شود ($i = 1, 2, 3, \dots$) ولی در اجراهای گوناگون می‌تواند متنوع باشد. پارامترهایی چون عبور از حد آستانه اختلاف بهترین جواب‌های حاصله در دو تکرار متوالی یا محدودیت زمان اجرا و یا اندازه سربار محاسباتی تحمیل شده، به عنوان ضوابط تعیین تعداد تکرار مناسب مطرح هستند. در بخش ارزیابی تأثیر تعداد دفعات تکرار در نتایج حاصله سنجیده خواهد شد. **بهبود سوم:** اگر تعداد تکرار فرایند SA را بیش از یک بار در نظر بگیریم (بهبود دوم)، می‌توان با تغییراتی در آخرین تکرار الگوریتم انرژی سیستم را بیشتر به جواب بهینه سراسری نزدیک نمود. همان طور که پیش از این نیز اشاره شد به منظور جلوگیری از تله جواب بهینه محلی با یک احتمال مشخص برخی انرژی‌های بالاتر (جواب‌های بدتر) هم پذیرفته می‌شود. حال اگر فرایند SA به اندازه کافی تکرار شده باشد، احتمال نزدیک شدن به جواب بهینه سراسری بسیار بیشتر شده است لذا در آخرین تکرار با تغییر در الگوریتم SA و انتخاب فقط پاسخ‌های بهتر (مستقل از دمای سیستم)، تقریب دقیق‌تری از جواب بهینه سراسری به دست خواهد آمد.

۵- ارزیابی کارایی

در این بخش کارایی روش SA پیشنهادی را با شبیه‌سازی و در مقایسه با چهار روش متداول در ادبیات می‌سنجیم.

۵-۱ محیط شبیه‌سازی

محیط شبیه‌سازی با استفاده از زبان ++C پیاده‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی یک ناحیه $500 \times 500 \text{ m}^2$ را در نظر می‌گیریم که در آن N (از ۵۰ تا ۱۵۰) حسگر دوربینی با M شیء هدف (۲۰ و ۴۰) به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت^۱ مستقر شده‌اند. شعاع دید حسگرها از ۵۰ تا ۱۲۰ متر و زاویه دید آنها از ۴۵°، ۶۰° و ۹۰° درجه متغیر است. انرژی اولیه همه حسگرها به صورت همگن ۱۰۰۰ ژول و نرخ مصرف انرژی برای فعالیت حسگری ۲۰ ژول بر ثانیه تنظیم شده است. مقادیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است.

در شکل ۵- الف یک نمونه از چگونگی استقرار اولیه حسگرها و اهداف مورد نظر در محیط شبیه‌سازی به تصویر کشیده شده است. در این شکل تعداد حسگرها ۲۰ (نقاط زردرنگ)، تعداد اهداف ۱۰ (نقاط قرمز رنگ)، دامنه دید (حسگری) ۱۵۰ m و زاویه دید ۹۰° در نظر گرفته شده است. تمام قطاع‌های حداکثری ممکن برای هر دوربین با توجه به موقعیت استقرار اهداف پیرامونیشان که با کمک الگوریتم MaxFoV [۱۶] شناسایی شده‌اند نمایش داده شده و بدیهی است در هر مجموعه پوششی فعال حداکثر یکی از این قطاع‌ها انتخاب خواهد شد (شکل ۵- ب).

گام چهارم: مقایسه انرژی S_{new} با S - در این مرحله انرژی ماتریس جواب جدید (S_{new}) و قدیم (S) با استفاده از (۱۲) محاسبه شده و مقادیر آنها با هم مقایسه می‌شود. اگر نتیجه S_{new} از S بهتر باشد جواب جدید جایگزین پاسخ قبل شده و در S_{best} نیز ثبت می‌گردد و به گام ششم می‌رویم و در غیر این صورت به گام پنجم می‌رویم.

گام پنجم: محاسبه احتمال پذیرش - یک ماتریس جواب بدتر با احتمال پذیرش P که در ادامه تعریف خواهد شد پذیرفته می‌شود

$$P = e^{-\frac{\Delta E(S, S_{new})}{B\tau}} \quad (14)$$

که در آن B ثابت Boltzmann و τ دمای سیستم است. سپس یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود که اگر از P کوچک‌تر باشد جواب جدید (هرچند ضعیف‌تر از قبلی باشد) پذیرفته می‌شود.

گام ششم: سرد کردن یا کاهش دما - فرایند سرد کردن روشی به منظور کاهش دما در هر تکرار تبرید است. در SA پیشنهادی از تابع سردسازی خطی به صورت زیر استفاده می‌کنیم

$$\tau_{i+1} = \eta \times \tau_i \quad (15)$$

که η ضریب تبرید و عددی بین ۰ و ۱ بوده و τ_i و τ_{i+1} به ترتیب دمای فعلی و جدید هستند.

۴-۲-۲ بهبود روش SA

در اینجا به بیان تغییرات اعمال شده در روند اجرایی الگوریتم SA که موجب بهبود کارایی آن خواهد شد می‌پردازیم.

بهبود اول: اولین اصلاح در مرحله تولید ماتریس جواب اولیه است. اگر ماتریس اولیه با توجه به بهترین جواب به دست آمده از الگوریتم‌های حریصانه انتخاب شود، سیر تولید جواب‌های همسایگی هدفمندتر خواهد بود. حداقل در این شرایط می‌توان تضمین نمود که جواب نهایی SA هیچ‌گاه از جواب روش‌های حریصانه بدتر نخواهد شد.

بهبود دوم: گاهی اوقات بازگشت به عقب و آغاز مجدد فرایند تبرید از یک نقطه جدید بهتر از ادامه مسیر کنونی است. این فرایند شروع دوباره SA نامیده می‌شود. در این فرایند، پس از افت کافی دما به نقطه کمینه، مقدار انرژی S_{best} حاصله در هر تکرار به عنوان مقدار انرژی اولیه تکرار

۱. الگوریتم حریصانه برای یافتن مجموعه‌های پوششی مجزا (DCS): در این الگوریتم هر مجموعه پوششی تا هنگامی که همه انرژی حسگرهای آن کاملاً تخلیه شوند، کار می‌کند. بنابراین با تخلیه کامل انرژی حسگرهای مجموعه فعلی، امکان شرکت آنها در مجموعه‌های پوششی بعدی وجود ندارد. معیار انتخاب حسگرها برای اضافه‌شدن به مجموعه پوششی، گزینش بر اساس بیشترین تعداد اهداف پوشش داده شده توسط حسگر-قطاع مربوطه و در صورت وجود بیش از یک گزینه، کمترین همپوشانی ممکن با قطاع‌های همسایه خواهد بود [۴].

۲. الگوریتم‌هایی با مجموعه‌های پوششی غیر مجزا: هر مجموعه پوششی به اندازه یک دوره زمانی ثابت فعالیت کرده و بخشی از انرژی اولیه خود را (با نسبت r) مصرف می‌کند، بنابراین هر حسگر در صورتی که انرژی باقیمانده‌اش صفر نشده باشد، می‌تواند در مجموعه‌های پوششی بعدی نیز مشارکت داشته باشد. حسگرها پس از مصرف سهم تعیین‌شده انرژی برای هر سیکل عملیاتی به خواب می‌روند و مجموعه پوششی بعدی فعال می‌شود تا وظیفه پوشش شبکه را ادامه دهد. بر این اساس سه معیار انتخاب ممکن برای حسگر-قطاع‌ها وجود دارد:

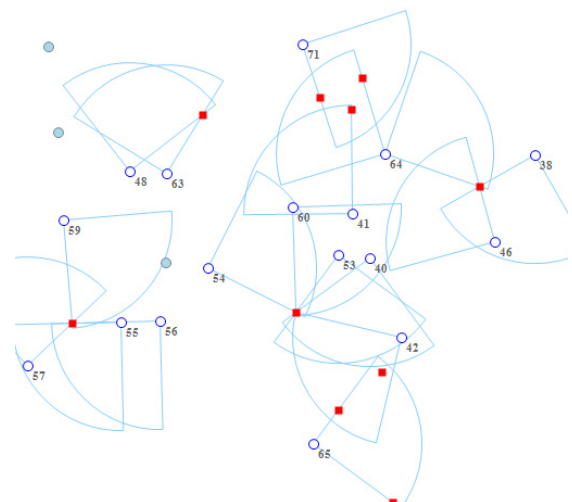
۱-۲ انتخاب حریصانه مبتنی بر حداکثر پوشش (MCF): حسگر-قطاع‌هایی که بیشترین اهداف را پوشش می‌دهند با اولویت بالا به مجموعه پوششی اضافه می‌شوند [۴].

۲-۲ انتخاب حریصانه مبتنی بر بیشترین انرژی باقیمانده (MREF): حسگرهایی با بیشترین انرژی باقیمانده با اولویت بالاتر به مجموعه‌های پوششی اضافه می‌شوند [۱۲].

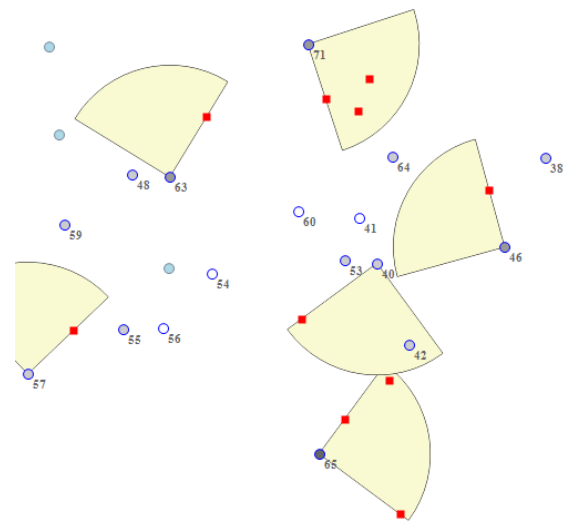
۳-۲ انتخاب حریصانه مبتنی بر کمترین همپوشانی (MCSF): حسگر-قطاع‌هایی که کمترین همپوشانی پوششی روی اهداف را با دیگران دارند یعنی $\text{avg min}_i \{ \sum_j O_i(j) \}$ که

$$O_i(j) = \begin{cases} 0, & C(F_i) \cap C(F_j) = \emptyset \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

اولویت بالاتری برای شرکت در مجموعه‌های پوششی دارند [۱۹]. در الگوریتم‌های اخیر (مجموعه‌های پوششی غیر مجزا) اثر مقدار r روی طول عمر شبکه معلوم نیست لذا آزمایش‌هایی با سهم r متفاوت (۱۰٪-۵۰٪) روی تمام الگوریتم‌ها (غیر از DCS) اجرا شده تا رابطه بین طول عمر شبکه و اندازه زمان عملیاتی مجموعه‌های پوششی بررسی شود. نتایج این آزمایش‌ها روی ۲۰۰ حسگر و ۴۰ نقطه هدف با حداکثر شعاع و زاویه دید $(R=120, \alpha=90^\circ)$ در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶-الف مقدار تابع انرژی را به ازای مقادیر r مختلف نشان می‌دهد و در شکل ۶-ب طول عمر شبکه در هر مورد مشخص شده است. هرچند طبق شکل ۶-الف در $r=50\%$ اندکی کاهش در میزان تابع انرژی مشاهده می‌شود ولی بر اساس شکل ۶-ب هیچ شواهدی مبنی بر ارتباط بین طول عمر شبکه و زمان عملیاتی مجموعه‌های پوششی وجود ندارد و بنابراین در کلیه آزمایش‌ها سهم انرژی ثابت (مثلاً ۲۰٪) فرض می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵: یک سناریوی نمونه از استقرار دوربین‌ها و اهداف، (الف) قطاع‌های حداکثری بر اساس موقعیت اهداف و (ب) فعال‌شدن حسگرها در قطاع با بیشترین هدف تحت پوشش.

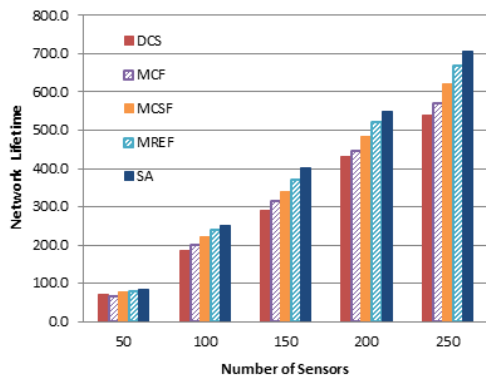
همه الگوریتم‌های شبیه‌سازی شده متمرکز بوده و فرض بر این است که در ایستگاه پایه که محدودیت انرژی ندارد یک بار اجرا شوند. سپس زمان‌بندی به دست آمده به حسگرهای مستقر در شبکه اعلام خواهد شد. هر آزمایش ۱۰ بار تکرار شده و نتایج گزارش، میانگین خروجی این ۱۰ اجرا می‌باشد. در مجموع به ازای مقادیر مختلف پارامترهای شبیه‌سازی، ۶۰۰ اجرا انجام شده است.

معیار اصلی برای سنجش کارایی روش‌ها طول عمر شبکه می‌باشد. طول عمر شبکه عبارتست از طول زمان آغاز به کار شبکه تا اولین زمانی که با حسگرهای باقیمانده نتوان همه اهداف مستقر در محیط را پوشش داد. در این لحظه با توجه به تعداد مجموعه‌های پوششی حاصله نسبت مورد نظر (k/L) و نیز بر اساس تعداد حسگرهای باقیمانده و انرژی ذخیره‌شده در آنها و واریانس انرژی مصرفی میان حسگرها، تابع انرژی (E) محاسبه خواهد شد.

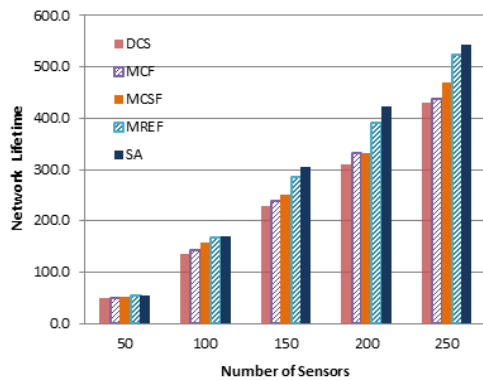
۲-۵ مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم‌های حریصانه

روش SA پیشنهادی با چهار الگوریتم اکتشافی حریصانه که بیش از سایرین در ادبیات به آنها اشاره شده مقایسه گردیده است. الگوریتم‌های حریصانه به دو دسته تقسیم شده‌اند:

1. Disjoint Cover Set
2. Maximal Coverage First
3. Maximum Residual Energy First
4. Most Critical Sensor First



(الف)



(ب)

شکل ۷: مقایسه الگوریتم‌ها با توجه به تعداد حسگرهای دوربینی، (الف) تعداد اهداف ۲۰ ($M = 20$) و (ب) تعداد اهداف ۴۰ ($M = 40$).

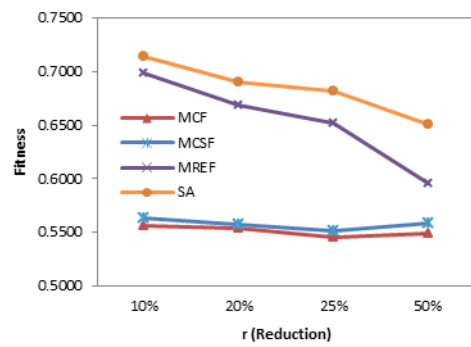
روش‌ها بیشتر است و این نشان‌دهنده بهبودی قابل ملاحظه الگوریتم پیشنهادی برای تعداد اهداف مختلف است. با مقایسه نتایج در شکل ۷-الف با شکل ۷-ب مشاهده می‌شود طول عمر شبکه برای پوشش ۲۰ هدف طولانی‌تر از ۴۰ هدف است و این برای کلیه روش‌های مورد بررسی صادق است. علت این است که برای پوشش اهداف کمتر، به تعداد حسگر-قطاع‌های کمتری در مجموعه‌های پوششی نیاز است و بنابراین انرژی کمتری از حسگرها نیز برای پوشش کامل شبکه مصرف می‌گردد.

۲-۲-۵ تأثیر دامنه (شعاع) دید دوربین‌ها

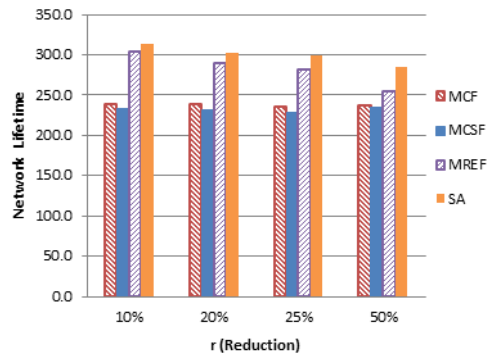
به منظور بررسی تأثیر دامنه دید حسگرهای دوربینی روی کارایی روش‌های پیشنهادی و به خصوص طول عمر شبکه آزمایش‌هایی انجام گرفت. تعداد حسگرها ۱۵۰ و تعداد اهداف ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. دامنه دید دوربین‌ها را از ۳۰ m تا ۱۲۰ m افزایش می‌دهیم تا تأثیر آن بر معیارهای کارایی به ویژه طول عمر شبکه مشخص شود. زاویه دید دوربین‌ها در همه این آزمایش‌ها 60° تنظیم می‌شود.

شکل ۸ اثر مقدار دامنه دید حسگرها را بر روی طول عمر شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طول عمر شبکه در دامنه‌های دید بالا زیاد و برعکس در دامنه‌های دید پایین، کمتر می‌باشد زیرا با افت دامنه دید دوربین‌ها به حسگر-قطاع‌های بیشتری برای پوشش یک تعداد هدف مشخص (در آزمایش‌های ما $M = 20$) نیاز داریم، فلذا مجموعه‌های پوششی با مشارکت حسگرهای بیشتری تشکیل می‌شوند که بالطبع مصرف انرژی نیز در کل شبکه بیشتر و موجب تخلیه سریع‌تر باتری حسگرهای قابل استفاده در شبکه خواهد شد و در نتیجه طول عمر شبکه افت می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود طول عمر شبکه برای R های کمتر از ۵۰ m در روش‌های مختلف تفاوت چندانی ندارند ولی با

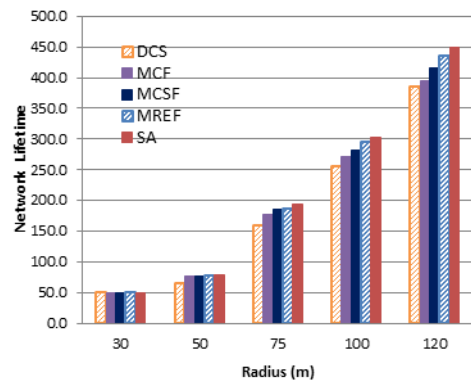


(الف)



(ب)

شکل ۶: اثر زمان عملیاتی مجموعه‌های پوششی روی تابع انرژی و طول عمر شبکه، (الف) مقدار تابع انرژی و (ب) طول عمر شبکه.



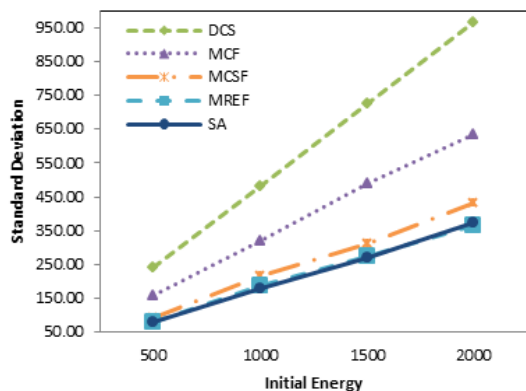
شکل ۸: تغییرات طول عمر شبکه بر حسب شعاع دید حسگرها.

۲-۲-۵ اثر تعداد حسگرهای دوربینی

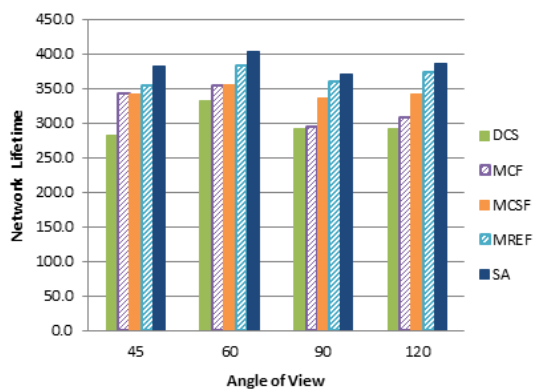
به منظور بررسی تأثیر تعداد حسگرها، دامنه و زاویه دید آنها به ترتیب 100 m و 90° تنظیم می‌شود. تعداد حسگرها از ۵۰ تا ۲۵۰ و برای پوشش ۲۰ و ۴۰ هدف استفاده می‌شوند و کارایی الگوریتم‌ها در هر دو مورد به طور جداگانه مقایسه می‌گردد.

شکل ۷-الف مقدار تابع انرژی را برای پوشش ۲۰ هدف و به ازای تعداد حسگرهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد حسگرها، طول عمر شبکه افزایش خواهد یافت زیرا با در اختیار داشتن حسگرهای دوربینی بیشتر برای تعداد ثابتی از اهداف، می‌توان مجموعه‌های پوششی بیشتری به دست آورد و بنابراین مدت زمان عملیاتی شبکه نیز بیشتر خواهد شد.

در شکل ۷-ب همین مقایسه برای تعداد اهداف ۴۰ تا $M = 40$ انجام شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، علاوه بر افزایش طول عمر شبکه به ازای تعداد حسگرهای بیشتر، دوره حیات شبکه در روش SA پیشنهادی مستقل از تعداد حسگرهای مستقر در محیط از سایر



شکل ۱۱: انحراف معیار انرژی باقیمانده حسگرها در پایان کار.



شکل ۹: اثر مقدار زاویه دید دوربین‌ها بر طول عمر شبکه.

برای تحلیل این پدیده به نمودار شکل ۱۰ توجه کنید. در این شکل نسبت تعداد واقعی مجموعه‌های پوششی به حد بالای ممکن این مجموعه‌ها (k/L) در الگوریتم‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. این نسبت با افزایش AoV مقداری زیاد شده (به غیر از ۱۲۰ که کمی افت نشان می‌دهد) و به ایده‌آل (۱۰۰٪) نزدیک می‌شود ولی طول عمر شبکه نه به نسبت k/L ، بلکه به مقدار مطلق k به ازای زوایای دید مختلف بستگی دارد، در حالی که تعداد مجموعه‌های پوششی (k) با افزایش زاویه دید بیشتر نشده است.

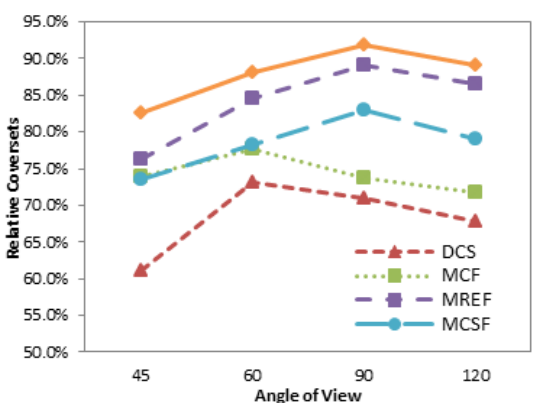
در حقیقت زاویه دید بر خلاف شعاع دید تأثیر قابل توجهی در افزایش تعداد اهداف پوشش داده شده توسط حسگر ندارد، فلذا تعداد حسگرهای فعال در هر مجموعه پوششی به ازای زوایای دید مختلف تقریباً مساوی می‌باشد. در نتیجه حداکثر مجموعه‌های پوششی حاصله نیز ثابت است. از آنجا که انرژی مصرفی در شبکه ارتباط تنگاتنگی با تعداد CS‌ها دارد، بنابراین به سبب ثابت بودن تعداد CS‌ها طول عمر شبکه نیز تغییر چندانی نخواهد کرد.

۵-۲-۴ چگونگی توزیع انرژی مصرفی بین حسگرها

توزیع متعادل انرژی مصرفی که نسبت مستقیم با زمان فعالیت حسگرها در مجموعه‌های پوششی مختلف دارد، از تخلیه زود هنگام تعداد اندکی از حسگرها در اثر تحمیل بار کاری بیش از حد جلوگیری کرده و لذا شبکه می‌تواند در مدت زمان طولانی‌تری به فعالیت خود ادامه دهد. برای اندازه‌گیری میزان توزیع انرژی در بین حسگرهای قابل استفاده مستقر در محیط از واریانس انرژی باقیمانده روی حسگرها در پایان کار شبکه استفاده شده است. روشن است که هرچه واریانس کمتر باشد، اختلاف انرژی باقیمانده روی گره‌ها کمتر است که این به منزله مشارکت بیشتر حسگرهای موجود در فعالیت نظارتی بر اهداف مورد نظر می‌باشد.

به منظور بررسی توزیع انرژی مصرفی روی حسگرها در الگوریتم‌های مختلف آزمایش‌هایی انجام شد. محیط شبیه‌سازی با تعداد ۱۵۰ حسگر برای پوشش ۲۰ هدف تنظیم گردید. زاویه دید و دامنه حسگری دوربین‌ها به ترتیب 60° و ۱۰۰ m در نظر گرفته می‌شود. انرژی اولیه حسگرها از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ تغییر می‌کند و برای هر حالت میانگین انحراف معیار (جزر واریانس) در هر روش و پس از ۱۰ بار اجرای آزمایش به دست آمده و نتیجه این آزمایش‌ها در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده است.

همان طور که انتظار می‌رفت روش حریصانه مبتنی بر انتخاب حسگر با بیشترین انرژی باقیمانده (MREF) بهترین عملکرد را از لحاظ توزیع متوازن انرژی نشان می‌دهد. در MREF اولویت در انتخاب حسگرها برای تشکیل مجموعه‌های پوششی با گره‌هایی است که انرژی باقیمانده بیشتری دارند، به عبارت دیگر حسگرهایی که در گذشته مشارکت کمتری



شکل ۱۰: نسبت تعداد واقعی مجموعه‌های پوششی به حد بالای آنها (k/L).

افزایش شعاع^۱ دید روش مبتنی بر SA کارایی بهتری در انتخاب حسگر-قطاع‌های مناسب از خود نشان می‌دهد و با افزایش تعداد مجموعه‌های پوششی و نزدیک شدن به حد بالا، طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. به طور خلاصه، هر چقدر R بزرگ‌تر باشد، هر حسگر-قطاع تعداد بیشتری هدف را پوشش می‌دهد، فلذا مجموعه‌های پوششی با تعداد حسگر-قطاع‌های کمتری تشکیل خواهد شد و در نتیجه با مصرف انرژی کمتر در هر مجموعه پوششی، می‌توان مدت بیشتری به نظارت^۲ بر اهداف مستقر در شبکه پرداخت.

۵-۲-۳ اثر زاویه دید دوربین‌ها

در ادامه آزمایش‌ها به بررسی تأثیر زاویه‌های دید (AoV) حسگرهای دوربینی روی طول عمر شبکه می‌پردازیم. تعداد حسگرها ۱۵۰ و تعداد اهداف ۲۰ عدد در نظر گرفته می‌شود. شعاع دید روی ۱۰۰ متر ثابت شده و زاویه دید دوربین‌ها از 45° تا 120° متغیر است و سپس کارایی الگوریتم‌ها برای هر یک از زاویه‌ها با هم مقایسه می‌شود. شکل ۹ نتایج آزمایش‌ها پس از ۱۰ بار اجرا در هر سناریو و میانگین‌گیری را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود میانگین طول عمر شبکه در زوایای دید گوناگون تفاوت چندانی با هم ندارند. البته مطابق نمودار، میانگین طول عمر شبکه در روش SA پیشنهادی با فاصله‌ای قابل توجه از سایر روش‌های حریصانه قرار دارد ولی طول دوره حیات شبکه مستقل از اندازه زاویه دید دوربین‌هاست. به عبارتی افزایش میدان دید تأثیری در زمان عملیاتی شبکه برای پوشش اهداف مورد نظر ندارد.

1. Radius
2. Monitoring

- sensors," *International J. of Advanced Studies in Computers, Science and Engineering*, vol. 4, no. 9, p. 28, 2015.
- [11] M. Cardei, M. T. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Proc. 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM'05*, vol. 3, pp. 1976-1984, 13-17 Mar. 2005.
- [12] J. M. Gil and Y. H. Han, "A target coverage scheduling scheme based on genetic algorithms in directional sensor networks," *Sensors*, vol. 11, no. 2, pp. 1888-1906, 2011.
- [13] G. S. Kasbekar, Y. Bejerano, and S. Sarkar, "Lifetime and coverage guarantees through distributed coordinate-free sensor activation," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 19, no. 2, pp. 470-483, Apr. 2011.
- [14] M. Hosseini, M. Dehghan, and H. Pedram, "Lifetime improvement of visual sensor networks for target coverage through uniform energy consumption," *International J. of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 14, no. 4, pp. 249-266, 2013.
- [15] M. C. Wu and W. F. Lu, "On target coverage problem of angle rotatable directional sensor networks," in *Proc. 7th Int. Conf. on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS'13*, pp. 605-610, 3-5 Jul. 2013.
- [16] V. P. Munishwar, V. Kolar, and N. B. Abu-Ghazaleh, "Coverage in visual sensor networks with Pan-Tilt-Zoom cameras: the MaxFoV problem," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1492-1500, 27 Apr.-2 May 2014.
- [17] M. Cardei and D. Z. Du, "Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 333-340, May 2005.
- [18] L. Ding, W. Wu, J. Willson, L. Wu, Z. Lu, and W. Lee, "Constant-approximation for target coverage problem in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1584-1592, Mar. 2012.
- [19] Y. Li and S. Gao, "Designing k-coverage schedules in wireless sensor networks," *J. of Combinatorial Optimization*, vol. 15, no. 2, pp. 127-146, Feb. 2008.
- [20] A. Rossi, A. Singh, and M. Sevaux, "Lifetime maximization in wireless directional sensor network," *European J. of Operational Research*, vol. 231, no. 1, pp. 229-241, Nov. 2013.
- [21] S. Kirkpatrick, "Optimization by simulated annealing: quantitative studies," *J. of Statistical Physics*, vol. 34, no. 5-6, pp. 975-986, Mar. 1984.
- [22] V. Cerny, "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm," *J. of Optimization Theory and Applications*, vol. 45, no. 1, pp. 41-51, Jan. 1985.
- [23] N. Metropolis and S. Ulam, "The monte carlo method," *J. of the American Statistical Association*, vol. 44, no. 247, pp. 335-341, 1949.
- [24] D. H. Ackley, G. E. Hinton, and T. J. Sejnowski, "A learning algorithm for boltzmann machines," *Cognitive Science*, vol. 9, no. 1, pp. 147-169, Jan. 1985.

بهرروز شاهرخ زاده مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد خود را در مهندسی کامپیوتر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب دریافت نمود و در حال حاضر دانشجوی دوره دکتری مهندسی کامپیوتر در دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین می باشد. نام برده از سال ۱۳۸۸ به عنوان عضو هیأت علمی و با درجه مربی در دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین مشغول به فعالیت است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان شبکه های حسگر بی سیم، بهینه سازی چندعامله، الگوریتم های تکاملی، نظریه بازی ها و شبکه های چندرسانه ای می باشد.

مهدی دهقان در سال ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی کامپیوتر را به ترتیب در سال های ۱۳۷۴ و ۱۳۸۰ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نموده است. نام برده از سال ۱۳۷۴ به عنوان پژوهشگر در حوزه مدیریت شبکه و کیفیت تامین سرویس های آن با مرکز تحقیقات مخابرات ایران همکاری داشته است. دکتر دهقان از سال ۱۳۸۳ در دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر مشغول به فعالیت گردید و هم اکنون استاد این دانشکده می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه های چندرسانه ای، مدیریت شبکه، شبکه های موردی سیار و محاسبات تحمل پذیری خطا.

محمدرضا شاهرخ زاده مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی کامپیوتر به ترتیب در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

در عملیات حسگری محیط داشته اند، شانس بالاتری برای انتخاب شدن دارند. MREF با مشارکت دادن بیشتر حسگرها در فرایند حسگری، بهترین عملکرد را در توزیع متوازن انرژی مصرفی روی گره های شبکه دارد. با توجه به نمودار ترسیم شده در شکل ۱۱ انحراف معیار روش MREF به طور قابل ملاحظه ای از سایر روش های حریصانه پایین تر است. توزیع انرژی روش پیشنهادی SA نیز در فاصله بسیار نزدیک از بهترین جواب حریصانه (MREF) قرار دارد و به این معنی است که SA علاوه بر بهبود سایر پارامترها مثل طول عمر شبکه، از نظر بهره وری کارآمد انرژی ذخیره شده در حسگرهای شبکه نیز به حد نصاب خوبی رسیده است.

۶- نتیجه گیری

این مقاله، یک الگوریتم مبتنی بر SA برای حل مسأله پوشش هدف در شبکه های حسگر بصری ارائه می دهد که با فرض اطلاع از موقعیت استقرار حسگرها و اهداف، از قابلیت چرخش دوربین ها استفاده کرده و با انتخاب قطاع های حداکثری در زمان چندجمله ای بیشترین مجموعه های پوششی برای نظارت بر همه اهداف را می یابد. نتایج شبیه سازی ها نشان از برتری الگوریتم پیشنهادی بر سایر روش های متداول در ادبیات مانند الگوریتم های حریصانه دارد. یک پارامتر مؤثر در SA پیشنهادی، ملاحظه تعداد حسگرهای باقیمانده (دارای انرژی) در پایان کار و واریانس انرژی موجود در آنها برای انتخاب جواب های بهتر است که موجب توزیع متعادل بار کاری و مشارکت تعداد بیشتری از حسگرها در پوشش اهداف می شود. با انجام بهبودی هایی در نسخه اولیه، توانستیم به طول عمر بالاتر شبکه دست یابیم که البته در برابر هزینه زمان اجرای بیشتر، حاصل می شود. دینامیک بودن محیط تحت نظارت، مثلاً جابه جایی اهداف در طول زمان و نیز لحاظ پارامترهای کیفی پوشش مانند تشخیص چهره از نمای روبه روی اهداف از برنامه های تحقیقاتی در آینده می باشد.

مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] S. Soro and W. Heinzelman, "A survey of visual sensor networks," *Advances in Multimedia*, vol. 2009, 21 pp., 2009.
- [3] H. H. Yen, "Efficient visual sensor coverage algorithm in wireless visual sensor networks," in *Proc. 9th Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf., IWCMC'13*, pp. 1516-1521, 1-5 Jul. 2013.
- [4] J. Ai and A. A. Abouzeid, "Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks," *J. of Combinatorial Optimization*, vol. 11, no. 1, pp. 21-41, Feb. 2006.
- [5] Y. Cai, W. Lou, M. Li, and M. Li, "Energy efficient target-oriented scheduling in directional sensor networks," *IEEE Trans. on Computers*, vol. 58, no. 9, pp. 1259-1274, Sep. 2009.
- [6] K. Han, L. Xiang, J. Luo, and Y. Liu, "Minimum-energy connected coverage in wireless sensor networks with omni-directional and directional features," in *Proc. of the 13th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 85-94, 11-14 Jun. 2012.
- [7] Y. Hong, et al., "Target-temporal effective-sensing coverage in mission-driven camera sensor networks," in *Proc. of 22nd Int. Conf. on Computer Communications and Networks, ICCCN'13*, 9 pp., 30 Jul.-2 Aug. 2013.
- [8] Y. H. Kim, Y. H. Han, Y. S. Jeong, and D. S. Park, "Lifetime maximization considering target coverage and connectivity in directional image/video sensor networks," *The J. of Supercomputing*, vol. 65, no. 1, pp. 365-382, Jul. 2013.
- [9] F. Xiao, et al., "Surface coverage algorithm in directional sensor networks for three-dimensional complex terrains," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 397-406, Aug. 2016.
- [10] S. Xu, W. Lyu, and H. Li, "Optimizing coverage of 3D wireless multimedia sensor networks by means of deploying redundant

دریافت کرده و در حال حاضر با درجه مربی به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه جامع علمی کاربردی مشغول به فعالیت است. نامبرده پیش از پیوستن به دانشگاه جامع علمی کاربردی در فاصله سال‌های ۸۶ تا ۹۱ کارشناس مسئول توسعه نرم‌افزار شرکت صنایع هفت الماس بود. پژوهش‌های علمی مورد علاقه وی بر روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، الگوریتم‌های تکاملی، پایگاه داده‌های بلادرنگ و داده‌های حجیم متمرکز است.