نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری

سال ششم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۷
Vol.6, No.1, Spring 2018
۱۵-۴۳

الگوریتمی جدید و کارا برای جایابی و پوشش سه‌بعدی ربات‌های پرنده در فضای برداری

علی‌اصغر حیدری [۱]، فرید کریمی پور [۲*]

۱- دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴

چکیده

مسئله جایابی حسگرها با بیشینه پوشش همواره به‌عنوان یکی از مراحل بنیادین توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و مکانی موردتوجه پژوهشگران علوم مهندسی بوده است. در این پژوهش، به ارائه یک رویکرد کاملاً جدید برای جایابی ربات‌های پرنده با بیشینه پوشش در محیط‌های سه‌بعدی برداری پرداخته می‌شود. بدین‌منظور، نخست، یک الگوریتم هندسی برای تشخیص نواحی تحت پوشش توسعه داده شده است. به‌منظور بیشینه‌سازی میزان پوشش حسگرها نیز از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب بهره‌گیری شده است. سپس، به‌منظور پیشگیری از همگرایی زودرس به نقاط زیر بهینه و ارتقاء کارایی و توان جستجوی الگوریتم در حل مسئله، به طراحی و توسعه یک الگوریتم بهبودیافته چرخه آب با پارامترهای کمتر و عملگرهای دینامیک پرداخته شده است. با در نظر گرفتن چندین سناریو با قیود مکانی مختلف، کارایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها از منظر میزان استحکام، زمان اجرا، میانگین و بهترین مقادیر پوشش، انحراف از معیار، سرعت همگرایی و آزمون آماری ویلکاکسون بررسی گردید. ارزیابی و تحلیل نتایج نشان‌دهنده عملکرد برتر رویکرد پیشنهادی با نرخ موفقیت ۷۳ درصد و سطح پوشش ۸۰ درصد در یک فضای سه‌بعدی برداری است.

کلید واژه‌ها: ربات پرنده، جایابی، پوشش، فضای برداری، بهینه‌سازی، الگوریتم چرخه آب.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، امیرآباد شمالی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
تلفن: ۰۹۱۲۱۹۰۳۱۴۸

Email : fkarimipour@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

۱- مقدمه

با رشد روزافزون علم رباتیک، به‌مرور به‌کارگیری، برنامه‌ریزی، مسیریابی و کنترل ربات‌ها و همچنین توسعه زیرساخت‌های نرم‌افزاری به‌منظور بهره‌گیری بهتر از ربات‌ها به یکی از موضوعات تحقیقاتی روز تبدیل شده است [۱، ۲ و ۳]. یکی از راه‌های پایش و مراقبت از تأسیسات حساسی همچون تأسیسات نفتی و هسته‌ای ایران بهره‌گیری از حسگرهای متحرک[1] مخصوصاًربات‌های پرنده[2] (ARV) در اطراف این تأسیسات است [۴]. عملیات جستجو و نجات پس از وقوع حوادث، آمایش زندگی حیوانات، بررسی فعالیت‌های آتش‌فشان‌ها و پایش‌های زیست‌محیطی نیز نمونه‌هایی دیگر از کاربردهای روزافزون این ربات‌ها هستند [۵]. هر ربات پرنده عمودپرواز می‌تواند به‌عنوان یک سکوی حامل، با یک یا چند حسگر با ایستادن در یک موقعیت ارتفاعی به پایش و ثبت محیط بپردازد. هر حسگر متصل بر روی ربات پرنده با توجه زاویه دید محدود خود تنها قادر به پوشش[3] بخش خاصی از سطوح قابل دید منطقه خواهد بود و میزان پوشش کل منطقه، می‌تواند از مجموع سراسر سطوح تحت پوشش همه این حسگرها به‌دست‌آید. برای پایش حداکثری منطقه با کمترین تعداد ربات پرنده، هر ربات باید به‌گونه‌ای مکان‌یابی شود که قادر به پوشش بخش بیشتری از محیط هدف خود باشد. منطقه تشخیص هر حسگر تحت تأثیر قدرت سیگنال آن و وجود موانع محیطی محدود می‌شود. گره‌های حسگری می‌بایست در مناطقی تعبیه شوند که قادر به جمع‌آوری اطلاعات بیشتری از محیط اطراف خود باشند. اگرچه افزایش تعداد حسگرها و محدوده‌ی عملکرد آن‌ها باعث افزایش سطح پوشش ناحیه می‌شود، ولی از نظر هزینه و امکانات مقرون‌به‌صرفه نیست. به همین دلیل، می‌بایست تعادلی بین میزان پوشش منطقه و تعداد حسگرها در نظر گرفته شود. برای مثال، شکل (۱) مجموعه‌ای از ربات‌های پرنده را در یک سناریوی فرضی پوشش سه‌بعدی نمایش می‌دهد. در این شکل محدوده‌های تحت پوشش S_1، S_2، ...، S_n، ربات‌های پرنده مجهز به حسگر، ایستگاه کنترل مرکزی[4] (CCS) و ارتباطات رادیویی بین ربات‌های پرنده و ایستگاه مرکزی نمایش داده شده است.

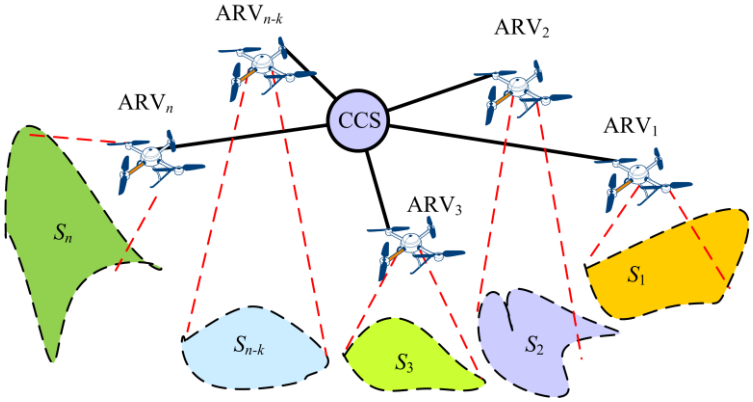
مسئله جایابی و بیشینه‌سازی پوشش با کمک ربات‌های پرنده در تحقیقات مرتبط با علوم رباتیک نیز مطرح بوده و برای کاربردهایی نظیر پایش و نظارت محیطی مورد نیاز است [۶]. برای مثال، میسوروالا و همکاران بر مبنای یک مدل رسترمبنا به حل مسئله جایابی ربات‌های پرنده برای پایش چند مقیاسی از گسترش مکانی-زمانی[5] آتش‌سوزی جنگل‌ها پرداختند. آن‌ها از روش‌های فیلتر کالمن، شبکه‌های عصبی و الگوریتم جستجوی حریصانه استفاده نمودند [۷]. در تحقیق دیگری، به حل مسئله پوشش منطقه با کمک چندین ربات پرنده و با استفاده از نمودار ورونوی پرداخته شده است [۸]. در نتیجه، روش‌ها و نتایج این تحقیق، علاوه بر کاربردهای پیشرفته ربات‌های پرنده در علوم ژئوماتیک، می‌تواند برای کاربری‌های دیگر در زمینه رباتیک نیز قابل استفاده باشد.

مدل توسعه داده شده برای جایابی ربات‌های پرنده و حداکثرسازی پوشش شبکه مطرح در این پژوهش بر اساس مفاهیم مدل‌های پوششی مطرح در زمینه پوشش و جایابی حسگرها در موضوع شبکه‌های حسگر بی‌سیم[6] (WSN) طراحی شده است. تفاوت مدل بهینه‌سازی مطرح در این پژوهش با تحقیقات پیشین

[1] Mobile sensors
[2] Aerial robotic vehicle
[3] Coverage
[4] Central control station
[5] Spatio-temporal
[6] Wireless sensor network

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

در زمینه شبکه‌های حسگر بی‌سیم در آن است که در مدل مطرح در این پژوهش، حسگرهای شبکه شده می‌توانند بر روی ربات‌ها نصب شده باشند و فضای مسئله از نوع سه بعدی برداری است. در نتیجه، تابع هدف مسئله دشوارتر می‌شود و شرایط جدید و قیود دینامیکی به مسئله بهینه‌سازی افزوده خواهد شد. از آنجا که محاسبه پوشش در فضای سه‌بعدی برداری مدنظر است نه رستری، محاسبه تابع هدف مسئله نیاز به توسعه روشی برای محاسبه مستقیم مساحت تحت پوشش در محیط های سه بعدی برداری دارد. به‌بیان دیگر، این تحقیق می کوشد تا مسئله بیشینه‌سازی نواحی تحت پوشش حسگرها را برای شرایطی خاص حل کند که: (الف) حسگرها روی ربات نصب شده باشند، (ب) مدل محیط به صورت برداری در محاسبات مربوط به تخمین پوشش حسگرها اعمال شود.



شکل ۱: توصیف سناریوی جایابی ربات‌های پرنده برای استقرار در موقعیت بهینه و محاسبه پوشش بیشینه در یک فضای سه بعدی

تاکنون این مسئله با مدل‌سازی و روش های مطرح در این تحقیق حل نشده است. بااین حال، تحقیقاتی پیرامون حسگرهای ثابت با حرکات جزئی و همچنین حسگرهای متحرک در فضای دوبعدی انجام شده است [۹]. در این زمینه، ریبی و همکاران از الگوریتم ژنتیک برای جایابی دو بعدی حسگرها و محاسبه پوشش و ارتباط حسگرها بهره‌گیری کردند [۱۰]. همچنین، در تحقیق دیگری، با استفاده از یک الگوریتم حریصانه، پوشش سراسری شبکه‌های دوبعدی با گره‌های متحرک کنترل شونده تخمین زده شد [۱۱]. در فضای سه بعدی، آلام و همکاران پوشش بیشینه حسگرها را در یک فضای سه بعدی سلولی و با استفاده از الگوریتم جایابی تصادفی محاسبه کردند [۱۲]. آن‌ها بیان کردند که با روش توسعه داده شده باید حسگرها را به تعداد بالا و به‌صورت تصادفی در سراسر فضای سلولی مسئله جایابی کرد. نیاز به جایابی تعداد بالای حسگرها در این با محدودیت های اجرایی و هزینه‌های عملیات سازگار نیست. در تحقیق دیگری، مسئله با حسگرهای جهت‌دار متحرک شبکه شده بررسی شده است. در آن روش از دو الگوریتم تکرارمبنا و نمودار ورونوی استفاده شده است [۱۳]. باتوجه به این روش، دو الگوریتم دارای پیچیدگی محاسباتی بالا بوده‌اند و نتایج محاسبه شده نیز از نظر عملی دارای محدودیت‌های فراوانی خواهند بود. ژو[1] و همکاران نیز در یک تحقیق مروری جامع به بررسی مسائل مربوط به پوشش و ارتباط در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته اند [۱۴]. بخشی از تحقیقات از الگوریتم های فرااکتشافی برای حل مسئله استفاده کرده اند. در ادامه تحقیقاتی بررسی می‌شود که در زمینه بیشینه‌سازی پوشش حسگرها و جایابی بهینه با الگوریتم های فرا اکتشافی

[1] Zhu

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

انجام شده است.

بر اساس مطالعات پیشین، یکی از رویکردهای کارا و موثر برای حل مسائل جایابی و پوشش حسگرها استفاده از الگوریتم‌های فرااکتشافی بهینه‌سازی بوده است. با افزایش شمار حسگرها در یک شبکه حسگر بی‌سیم، سطح تحت پوشش افزایش خواهد یافت اما از سوی دیگر، پیچیدگی حل مسئله نیز بیشتر خواهد شد. از منظر کارفرما نیز، افزایش تعداد حسگرها رویکردی بسیار پرهزینه، زمان‌بر و غیربهینه است. ازاین‌روی، یکی از رویکردهای فراگیر، سریع و کارا برای حل مسئله این تحقیق با حسگرهای متحرک، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرا اکتشافی تک هدفه به‌دلیل انعطاف‌پذیری، کارآمدی و کیفیت برتر پاسخ‌های به‌دست آمده بوده است. تحقیقات فراوانی در زمینه بررسی، مقایسه و توسعه این الگوریتم‌ها برای حل این مسئله انجام شده است. در این زمینه، از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی[1] (ABC) برای بهینه‌سازی پوشش حسگرها استفاده شد [۱۵]. آن‌ها از مدل تشخیص احتمالی برای حسگرها استفاده نمودند. الگوریتم ترکیبی توده ذرات (PSO) هم به‌منظور جایابی حسگرهای همه جهتی دوبعدی با مدل پوشش احتمالی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۶]. یون و همکاران الگوریتم ژنتیک[2] (GA) را بهبود داده و عملکرد آن را در حل مسئله سنجیدند [۱۷]، اما در این تحقیق، مشابه بسیاری از مقالات مشابه، مسئله در فضای دو بعدی و در ساده‌ترین حالت مدلسازی شده است. این رویکرد نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای صنعتی و سناریوهای سه‌بعدی واقعی باشد. اخیراً نیز عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی شبه مغناطیسی نیز در تخمین پوشش حسگرها ارزیابی شد. در این تحقیق، یک مدل تشخیص احتمالی جدید نیز بررسی شده و نتایج به‌دست آمده از نتایج الگوریتم‌های ABC و PSO بهتر بودند [۱۸]. الگوریتم‌های فرا اکتشافی دیگری نیز در حل نسخه‌های مختلف مسئله تحقیق استفاده شده است [۱۹, ۲۰]. در این زمینه، کالکرنی و همکاران روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده برای حل مسئله جایابی را به‌صورت جامع مرور کردند [۲۱]. تیسای و همکاران نیز بخشی از این الگوریتم‌ها را مرور نمودند [۲۲].

پس از بررسی تحقیقات متعدد، مشاهده می‌گردد که در زمینه مرتبط شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سناریوهای متفاوتی برای جایابی و پوشش حسگرها موردپژوهش واقع شده است. در بسیاری از تحقیقات، از مدل داده رستری برای مدل‌سازی فضای اطراف حسگرها استفاده می‌شود [۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷]. در تحقیقات معدودی نیز از مدل داده برداری برای مدل‌سازی محیط استفاده شده، اما مشاهده می‌شود که در این تحقیقات، فضای محیط به دو بعد ریاضی تقلیل داده شده و از وجود محدودیت های ارتفاعی، دینامیکی و همچنین توپوگرافی زمین صرف نظر شده است [۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲]. تنها برخی از تحقیقات تغییرات و توپوگرافی محیط را در طراحی مسئله پوشش حسگرها لحاظ کرده‌اند که باز هم مربوط به مدل رستری هستند [۳۳-۳۵]. در این تحقیقات از مدل رقمی سطح زمین (DSM)[3] به‌عنوان مدل توپوگرافی بهره‌گیری شده و همچنین روش محاسبه پوشش با توجه به مدل رقومی سطح زمین بهبود داده شده است.

با اینکه تحقیقاتی در زمینه این مسئله انجام شده، اما در برخی از سناریوهای واقعی و نیازهای روز، مدل برداری سه بعدی فضا در دست است و برخی یا همه حسگرها باید بر روی ربات پرنده متصل باشند. در چنین حالتی، تحقیقات پیشین برای محاسبه پوشش حسگرها راهکاری ارائه نمی‌دهند. زیرا ابتدا باید راهکاری را برای محاسبه پوشش در یک محیط برداری

[1] Artifitial bee colony
[2] Genetic algorithm
[3] Digital surface model

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

سه بعدی توسعه داد. سپس محدودیت‌های مربوط به ربات پرنده را تا حد ممکن در مدل بهینه‌سازی پوشش و جایابی اعمال نمود. در نهایت نیز باید پاسخ‌های بهینه مدل را با یک الگوریتم بهینه‌سازی کارا پیدا کرد.

افزون بر وجود موانع محیطی و نوع داده رستری یا برداری که می‌تواند برای مدل‌سازی فضای تحت پوشش در نظر گرفته شود، مدل تشخیص حسگر نیز بر محاسبه میزان پوشش مؤثر است. از مدل‌های تشخیص حسگر به کار گرفته شده در پژوهش‌های پیشین می‌توان به مدل تشخیص دایره‌ای ساده و مدل جهت‌دار اشاره کرد [۲۳, ۲۵ و ۳۶]. این حسگرها می‌توانند در محیط مستقر شوند و یا به‌صورت متحرک باشند و به‌صورت نقطه‌ای و محدوده‌ای، جهت‌دار و همه جهتی، باینری[1] و احتمالی[2] داده‌های مختلفی از قبیل دما، فشار، نور، رطوبت، نوع خاک، حرکت وسایل نقلیه، غلظت آلاینده‌ها، صدا، سطح نویز، وجود و عدم وجود موانع، نیروهای مکانیکی، تصویر و ویدئو را از محیط اطراف خود دریافت کنند [۳۷, ۳۸]. در این تحقیق از یک مدل تشخیص احتمالی موجود برای حسگرها استفاده شده است [۳۹].

مسئله محاسبه جایابی و پوشش با مدل‌های برداری سه بعدی و با حضور ربات‌های پرنده و الگوریتم پیشنهادی این تحقیق، همچنان در هیچ تحقیقی مطرح نشده است. زیرا علاوه بر روش جدید محاسبه پوشش و توسعه یک مدل بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی نیز برای نخستین بار ارائه می‌شود. با آنکه الگوریتم چرخه آب دارای عملکرد کارایی در حل مسائل مقید بهینه سازی بوده، تاکنون عملکرد نسخه استاندارد آن برای حل مسائل جایابی و پوشش ارزیابی نشده است.

در این تحقیق، به حل مسئله جایابی حسگرها با بیشینه پوشش[3] (MCSDP) با رویکردی جدید و با در نظر گرفتن قیود مکانی مختلف در محیط‌های برداری شهری و با ربات‌های پرنده غیر متصل و قابل حرکت پرداخته شده است. هر ربات پرنده مجهز به حسگر بر اساس مدل تشخیص جهت‌دار احتمالی قادر به حرکت در راستاهای مختلف برای دستیابی به پوشش بیشینه است. از رویکرد پیشنهادی می‌توان برای مسئله MCSDP با حسگرهای ایستگاهی نیز بهره‌گیری کرد. به‌منظور حل این مسئله، به دلیل جزئیات هندسی بالا، پیچیدگی‌های محیط برداری مسئله، وجود ناپیوستگی در سطوح، عدم امکان حل سریع و کارآمد مسئله با روش‌های بهینه‌سازی گرادیان مبنا در فضاهای برداری، بر اساس پیشینه تحقیق، به تخمین میزان بیشینه پوشش با استفاده از الگوریتم‌های فرا اکتشافی پرداخته شده است.

به دلیل عملکرد قوی و کارای الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب[4] (WCA) در مقایسه با بسیاری از الگوریتم‌های رایج فرا اکتشافی در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی، این الگوریتم برای حل مسئله انتخاب شد. بدین‌منظور، برای ارتقاء عملکرد جستجو و اکتشاف الگوریتم، پیشگیری از همگرایی زودرس و کاهش وابستگی الگوریتم بهینه ساز به پارامترهای اولیه، نخست الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب [۴۰] با کاهش پارامترهای ثابت و استفاده از عملگرهای دینامیکی جدید بهبود داده شده و سپس بر اساس معیارهایی نظیر استحکام محاسباتی، بهترین، میانگین و انحراف از معیار نتایج، سرعت همگرایی و آزمون آماری با الگوریتم‌های جمعیت مبنای GA، گرگ خاکستری[5] (GWO)، رقابت استعماری[6] (ICA) و PSO به‌عنوان دیگر الگوریتم‌های کارآمد در تحقیقات مرتبط مقایسه می‌شود.

[1] Binary
[2] Probable

[3] Maximum coverage sensor deployment problem
[4] Water cycle optimization algorithm
[5] Grey wolf optimizer
[6] Imperialist competitive algorithm

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

به‌صورت خلاصه، مشارکت اصلی و نوآوری‌های این تحقیق بدین شرح است:

۱- ارائه رویکردی جدید برای محاسبه پوشش (تابع هدف) بر اساس مدل‌های برداری و سه‌بعدی (بخش ۳)
۲- توسعه یک مدل بهینه سازی جدید برای حل مسئله بیشینه‌سازی پوشش و جایابی بهینه ربات‌های پرنده (بخش ۴)
۳- ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب برای حل مدل توسعه داده شده (بخش ۲)
۴- ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله مورد مطالعه در مقایسه با الگوریتم استاندارد و دیگر الگوریتم ها

بنابراین، این پژوهش با رویکردهای جدیدی به سؤالات اساسی زیر پاسخ می‌دهد:

۱- چگونه می‌توان میزان پوشش را در محیط‌های برداری مدل‌سازی کرد؟
۲- چگونه می‌توان بیشینه پوشش مجموعه‌ای از ربات‌های پرنده را بر اساس این مدل محاسبه کرد؟
۳- در چه موقعیت‌هایی، این ربات‌ها می‌توانند بیشترین سطح قابل پوشش را رصد کنند؟ جایابی بهینه ربات‌ها به‌منظور دستیابی به حداکثر مقدار پوشش چگونه محاسبه می‌شود؟

ساختار این پژوهش به‌این صورت است: در بخش ۲، رویکرد پیشنهادی برای محاسبه پوشش در محیط‌های سه‌بعدی برداری تشریح شده است. در بخش ۳، به‌تشریح جزئیات، تابع هدف و قیود مسئله طراحی شده بهینه سازی پوشش در محیط‌های سه‌بعدی برداری پرداخته شده است. در بخش ۴ به توصیف گام‌های اصلی و ساختار الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب پرداخته شده است. در همین بخش، به طراحی و پیشنهاد یک الگوریتم کارا بر اساس این الگوریتم پرداخته شده است. در بخش ۵، به ارائه و تحلیل نتایج الگوریتم‌های مختلف در حل این مسئله پرداخته شده است. در نهایت، در بخش ۶ نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهاداتی برای کارهای آتی ارائه شده است.

۲- رویکرد پیشنهادی محاسبه پوشش در محیط‌های سه‌بعدی برداری

در این بخش، یک رویکرد جدید برای محاسبه پوشش حسگرها در محیط‌های سه‌بعدی برداری ارائه می‌گردد. بر اساس شکل (۲)، یک حسگر جهت‌دار بر روی یک صفحه تصویر به نام صفحه‌ی پرسپکتیو[1] تصویر می‌شود. محدوده‌ی زاویه عملکرد حسگر نیز به‌صورت یک دایره به نام دایره پرسپکتیو[2] تصویر می‌شود که بیانگر میدان دید حسگر است. بر این اساس، برای محاسبه‌ی مساحت ناحیه تحت پوشش حسگر مراحل زیر اجرا می‌شود:

۱- حذف چندضلعی‌های پشت به حسگر
۲- حذف چندضلعی‌های پشت صفحه‌ی پرسپکتیو
۳- حذف چندضلعی‌های خارج از محدوده‌ی فاصله حسگر
۴- تصویر کردن چندضلعی‌ها بر روی صفحه‌ی پرسپکتیو و برهم‌نهی آن‌ها با یکدیگر
۵- انتقال چندضلعی‌های تصویر شده به صفحات چندضلعی‌های سه‌بعدی خود

۲-۱- حذف چندضلعی‌های پشت به حسگر

در این مرحله، چندضلعی‌هایی حذف می‌شوند که به‌طورقطع در محدوده‌ی پوشش حسگر نیستند. بدین منظور، بردار نرمال هر چندضلعی مطابق رابطه (۱) محاسبه شده و با بردار اتصال چندضلعی به حسگر مقایسه می‌شود.

$$\vec{N} = cross\left(v_2 - v_1, v_3 - v_2\right) \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در این فرمول از ضرب خارجی سه نقطه‌ی نخست

[1] Perspective plane
[2] Perspective circle

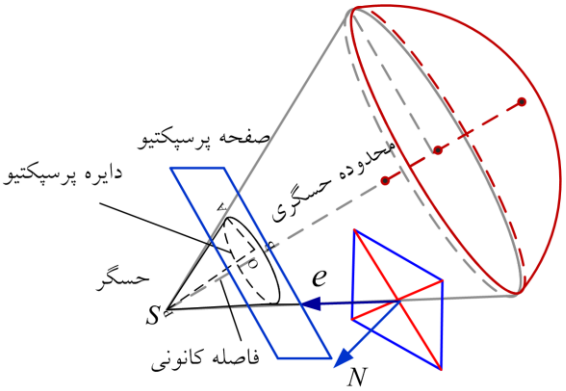
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

چندضلعی استفاده شده است. برای محاسبه مؤلفه‌های بردار نرمال $\overrightarrow{N}$ در چندضلعی‌های غیر محدب، می‌توان از فرمول بلین و نیوول[1] در رابطه (۲) استفاده نمود [۴۱]:

رابطه (۲)

$$\begin{cases} N_x = \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{next(i)}\right)\left(z_i + z_{next(i)}\right) \\ N_y = \sum_{i=1}^{n}\left(z_i - z_{next(i)}\right)\left(x_i + x_{next(i)}\right) \\ N_z = \sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_{next(i)}\right)\left(y_i + y_{next(i)}\right) \end{cases}$$

که در این رابطه، n نشان‌دهنده تعداد نقاط چندضلعی، (x_i,y_i,z_i) موقعیت نقطه‌ی i ام و $next(i)$ بیانگر نقطه‌ی بعد از i است. این روش قادر به تخمین بهترین بردار نرمال در چندضلعی‌های غیر هم صفحه[2] نیز هست. با توجه به بردار $\vec{e}$ که جهت آن از چندضلعی به سمت حسگر است و بردار نرمال $\overrightarrow{N}$ (شکل (۲) را ببینید)، اگر $\vec{e}.\overrightarrow{N} < 0$ باشد، چندضلعی پشت به حسگر بوده و حذف می‌شود.



شکل ۲: حذف چندضلعی‌های پشت به حسگر

۲-۲- حذف چندضلعی‌های پشت صفحه‌ی پرسپکتیو

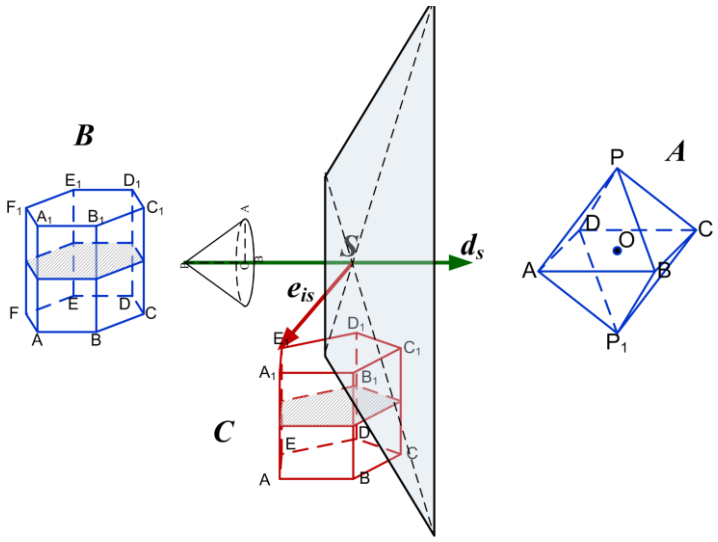
با توجه جهت‌دار بودن حسگرها، چندضلعی‌هایی واقع در پشت صفحه‌ی پرسپکتیو حذف می‌شوند. با توجه به شکل (۳)، به‌منظور حذف این چندضلعی‌ها، بردارهای $\overrightarrow{e_{is}}$ که جهت آن‌ها از نقاط چندضلعی به سمت موقعیت تصویر شده‌ی حسگر بر روی صفحه پرسپکتیو(S) هستند، محاسبه می‌شوند. اگر زاویه‌های ایجادشده بین بردار جهت حسگر و تمامی بردارهای $\overrightarrow{e_{is}}$ کمتر و بیشتر از ۹۰ درجه باشند، این چندضلعی به ترتیب و به‌طور کامل در جلو و پشت صفحه‌ی پرسپکتیو قرار می‌گیرد (چندضلعی A و B به‌عنوان یکی از وجوه در شکل (۳))، اما اگر بعضی از زوایا کمتر و بعضی بیشتر از ۹۰ درجه باشند، بخش‌های واقع در پشت صفحه‌ی پرسپکتیو حذف می‌گردد (وجوه چندوجهی C در شکل (۳)).

۲-۳- حذف چندضلعی‌های خارج از محدوده‌ی فاصله‌ی عملکرد حسگر

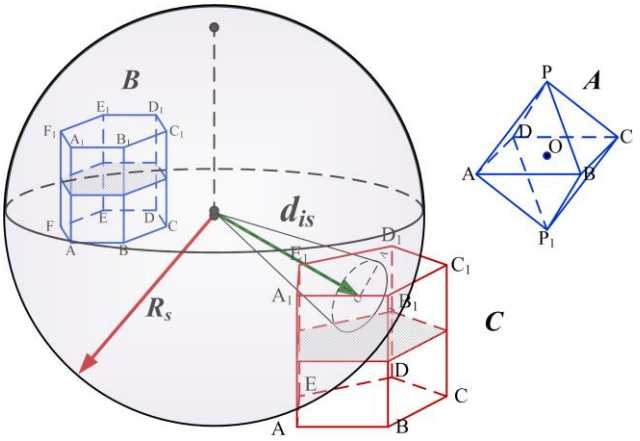
بدین‌منظور، یک کره با شعاع تشخیص R_s به‌عنوان محدوده‌ی عملکرد حسگر در نظر گرفته شده (شکل (۴)) و اگر فاصله اقلیدسی تمامی نقاط یک چندضلعی (به‌عنوان یکی از وجوه چندوجهی) با حسگر، d_{is}، بزرگ‌تر از شعاع تشخیص باشند، آن چندضلعی در خارج از محدوده‌ی فاصله عملکرد حسگر است، اما اگر همه‌ی d_{is} ها کوچک‌تر از شعاع تشخیص باشند، چندضلعی قابل‌تشخیص خواهد بود. در چندوجهی‌های متقاطع با کره، (چندوجهی C در شکل (۴))، وجوه خارج از کره حذف می‌شوند.

[1] Blinn & Newell
[2] Non planar

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]



شکل ۳: حذف وجوه B که در پشت صفحه‌ی پرسپکتیو قرار گرفته است. بخشی از وجوه C که در پشت صفحه‌ی پرسپکتیو قرار گرفته باید حذف شوند.



شکل ۴: حذف وجوهی از A که در خارج از محدوده‌ی فاصله عملکرد حسگر قرار دارد. بخشی از وجوه C که در خارج از محدوده‌ی فاصله عملکرد حسگر قرار گرفته باید حذف شوند.

۲-۴- تصویر چندضلعی‌ها بر روی صفحه‌ی پرسپکتیو و برهم‌نهی آن‌ها

در این مرحله، به حذف چندضلعی‌هایی که توسط دیگر چندضلعی‌ها از دید حسگر پنهان شده‌اند، پرداخته می‌شود. بر این اساس، چندضلعی‌های مورد تأیید در مراحل قبل، با هندسه پرسپکتیو[1] بر روی صفحه‌ی پرسپکتیو تصویر می‌شوند [۴۲]. با توجه به شکل (۵)، طبقه‌بندی چندضلعی‌های تصویر شده بدین‌صورت است:

۱- چندضلعی‌هایی کاملاً قابل دید که به‌طور کامل درون دایره پرسپکتیو قرارگرفته‌اند (چندضلعی‌های A و B).

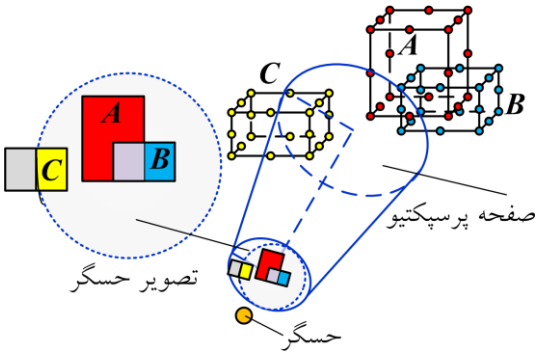
۲- چندضلعی‌هایی کاملاً غیرقابل دید که به‌طور کامل در خارج از دایره پرسپکتیو قرار گرفته و در محدوده‌ی زاویه عملکرد حسگر واقع نشده‌اند.

۳- چندضلعی‌هایی متقاطع با دایره‌ی پرسپکتیو که بخشی از آن‌ها قابل دید است (چندضلعی C) و

[1] Perspective geometry

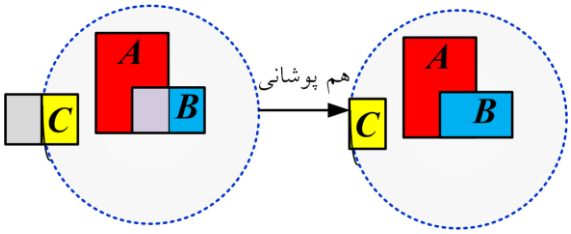
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

نواحی قابل دید این چندضلعی‌ها، به کمک تقاطع آن‌ها با دایره پرسپکتیو استخراج می‌شوند (شکل (۵)).



شکل ۵: طبقه‌بندی چندضلعی‌های تصویرشده بر روی صفحه‌ی پرسپکتیو بر اساس موقعیت آن‌ها نسبت به دایره پرسپکتیو

با داشتن بخش‌های قابل دید چندضلعی‌ها که در محدوده‌ی زاویه عملکرد قرار دارند، آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده تا قسمت‌های پنهان از دید حسگر حذف شوند. بدین منظور، هر چندضلعی بر اساس ترتیب دهی عمقی[1] با یکدیگر برهم‌نهی می‌شوند [۴۳]. ترتیب دهی عمقی به‌منظور اطمینان از وقوع برهم‌نهی هر چندضلعی با چندضلعی‌های واقع در پشت آن است (شکل (۶)). به‌منظور افزایش دقت برهم‌نهی، از روش برداری پیشنهادشده توسط لئونو[2] بهره‌گیری شده است [۴۴]. در الگوریتم ترتیب دهی عمقی، چندضلعی‌ها از دورترین تا نزدیک‌تری فاصله نسبت به دید حسگر مرتب می‌شوند. دو روش برای ترتیب دهی عمقی وجود دارد: (الف) بررسی یکی از نقاط تقاطع بین دو چندضلعی تصویر شده و تعیین اینکه در کدام‌یک، عمق دید حسگر نزدیک‌تر است؛ (ب) روش افراز فضای باینری[3] که به‌وسیله نیلور[4] در فضای سه‌بعدی توسعه یافته است [۴۵]. در این روش، یک ساختار درختی به‌منظور حفظ اطلاعات نسبی عمق بین چندضلعی‌ها ایجاد می‌شود.



شکل ۶: برهم‌نهی چندضلعی‌ها با دایره پرسپکتیو و با یکدیگر

در این مرحله، پس از تعیین چندضلعی‌های قابل‌رؤیت حسگر در فضای سه‌بعدی، مساحت آن‌ها به‌عنوان میزان پوشش حسگر محاسبه می‌شوند. ازاین‌رو، چندضلعی‌های تصویر شده‌ای که از فرآیند برهم‌نهی خارج شدند و بخش سایه‌ی آن‌ها توسط چندضلعی‌های دیگر حذف شد، در انتها به صفحه‌ی چندضلعی سه‌بعدی خود انتقال می‌یابند (بخش (ب) شکل (۷)).

این چندضلعی‌ها تنها چندضلعی‌هایی هستند که توسط حسگر پوشش داده می‌شوند. به‌منظور محاسبه مساحت چندضلعی‌ها، ابتدا آن‌ها مطابق بخش (الف) شکل (۷) به مثلث‌های تشکیل‌دهنده تجزیه شده و سپس به‌فضای سه‌بعدی انتقال داده می‌شوند. محاسبه مساحت هر یک از این مثلث‌ها در فضای سه‌بعدی بر اساس رابطه (۳) قابل محاسبه است:

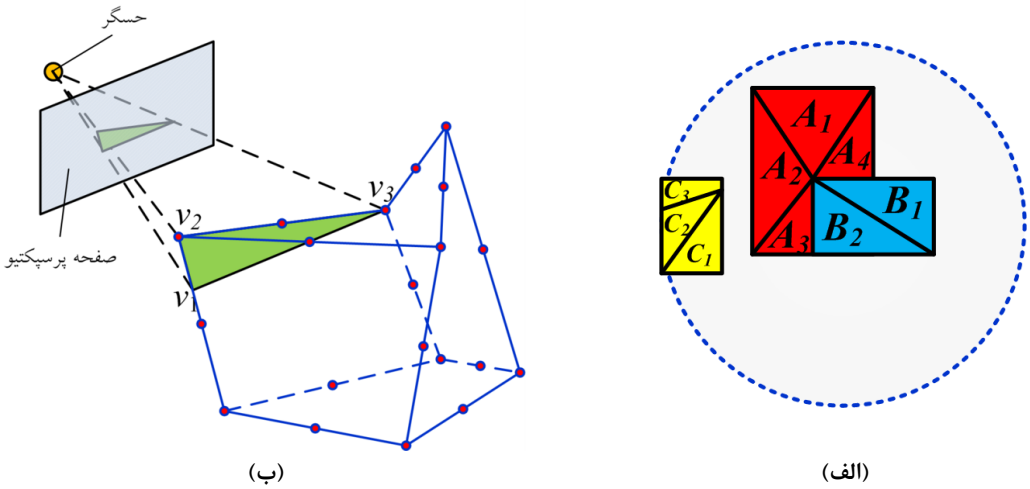
$$S_{\Delta} = 0.5 \times \left| cross\left(\vec{v}_2 - \vec{v}_1, \vec{v}_3 - \vec{v}_2\right)\right| \qquad \text{رابطه (۳)}$$

که این رابطه بر اساس ضرب خارجی بین دو بردار حاصل می‌شود. برای سنجش عملکرد این مدل، در یک مدل برداری شهری[5]، حسگری با جهت [۱,۱,-۱] و میدان دید ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این مدل شامل ساختمان‌هایی است که هر کدام از آن‌ها از مجموعه‌ی چندضلعی‌های سه‌بعدی به وجود آمده‌اند. شکل (۸)، مراحل محاسبه‌ی پوشش منطقه تحت پوشش حسگر را برای این نمونه

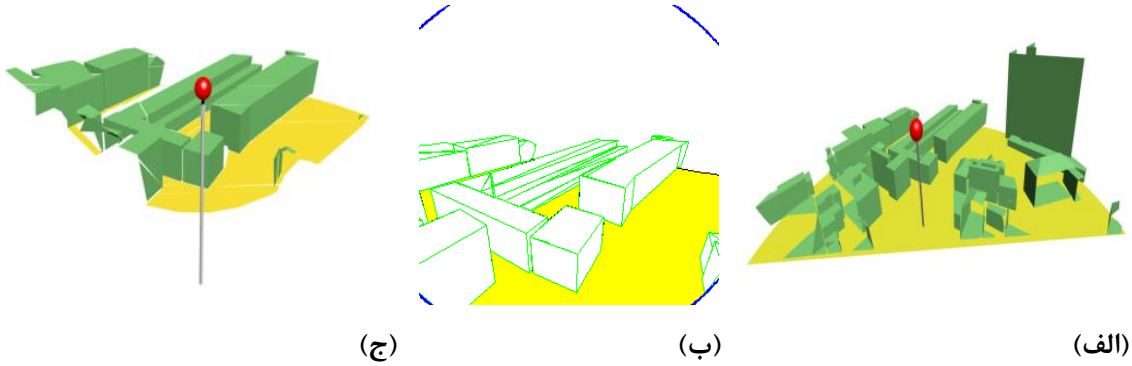
[1] Depth sorting
[2] Leonov
[3] Binary space partitioning
[4] Naylor
[5] City GML

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

مطالعاتی نشان می‌دهد که مساحت آن برابر با ۱۴۳۲۳۱/۷۲۹ مترمربع است.



شکل ۷: (الف) تبدیل چندضلعی‌ها به مثلث‌های تشکیل دهنده‌ی آن؛ (ب) انتقال مثلث‌ها



شکل ۸: (الف) چندضلعی‌هایی که روبه‌رو به حسگر هستند و در محدوده‌ی فاصله‌ی عملکرد آن قرارگرفته‌اند؛ (ب) دید پرسپکتیو چندضلعی‌های قابل دید توسط حسگر؛ (ج) چندضلعی‌های سه‌بعدی قابل دید توسط حسگر در فضای سه‌بعدی

این رویکرد قادر است مساحت چندضلعی‌های کناری ساختمان‌ها را نیز در محاسبه پوشش لحاظ کند. درحالی‌که، این امر در رابطه با روش‌های محاسبه پوشش در مدل رستری محیط انجام نمی‌شود. در بخش بعد، به بیان جزئیات مدل بهینه‌سازی مسئله MCSDP پرداخته شده است.

۳- ساختار مسئله MCSDP

در این بخش، به تشریح ساختار مسئله بهینه‌سازی MCSDP با رویکردی نوین و با لحاظ نمودن قیود مکانی مختلف در محیط‌های برداری شهری و با ربات‌های پرنده غیر متصل و متحرک پرداخته شده است. هر ربات پرنده مجهز به یک حسگر بر مبنای مدل تشخیص جهت‌دار احتمالی مجاز به حرکت در راستاهای مختلف برای دستیابی به بیشترین پوشش از محیط اطراف است. از رویکرد پیشنهادی می‌توان برای مسئله MCSDP با حسگرهای ایستگاهی عادی نیز بهره‌گیری کرد. هر ربات پرنده

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

اطلاعات پوششی را به‌صورت مستقیم به واحد پردازنده در ایستگاه هدایت و کنترل ارسال می‌نماید. ازاین‌روی، نیازی به تبادل اطلاعات با دیگر حسگرها و لحاظ قید حفظ ارتباط بین حسگرها نیست و هر حسگر به‌صورت مستقل مجاز به جابجایی برای بیشینه‌سازی سطح تحت پوشش خود از عوارض است. همچنین فرض بر این است که میزان انرژی مصرفی حسگرها در طی اجرای مأموریت پایش و پوشش منطقه هدف کافی باشد. تابع احتمال جهت حسگر ربات پرنده نیز بر اساس عملکرد واقع‌گرایانه‌ای که در ردیابی احتمالی حسگرها در محیط‌های سه‌بعدی رخ می‌دهد، با توجه به رابطه (۴) بیان می‌شود:

رابطه (۴)
$$P_\alpha = 0.5\times\omega\times\left[\cos(\alpha-\theta)+1\right]$$

که پارامتر ω از پارامترهای فیزیکی حسگر است. زاویه θ برابر با زاویه عملکرد حسگر و α برابر با زاویه‌ای است که بردار حسگر به هدف با بردار جهت آن می‌سازد [۳۹]. با کاهش ω توان ردیابی هدف تقویت می‌شود.

تابع هدف مسئله MCSDP مطرح در این پژوهش، به‌صورت بیشینه‌سازی مجموع مساحت تحت پوشش مجموعه حسگرها با توجه به رویکرد ارائه‌شده در بخش پیشین است. تابع هدف و قیود مسئله به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌گردند:

رابطه (۵)
$$\begin{aligned}&\text{Minimize } \sum_{t=1}^{m} S_t - \sum_{i=1}^{n} S_{\Delta,i}\\&\text{subject to } \ g_h, g_\varphi \geq 0,\\&\qquad H_{AZ}, H_{PZ} = 0\end{aligned}$$

که n تعداد کل مثلث‌های قابل‌تشخیص در بخش قبل، m تعداد کل مثلث‌ها و S_t مساحت مثلث‌های سطح است. در رابطه با قیدهای لحاظ شده در مسئله MCSDP با رویکرد حداکثر پوشش، می‌توان به (الف) قید عدم استقرار در منطقه ممنوعه، H_{AZ}، (ب) استقرار در منطقه اجباری، H_{PZ} و (ج) پوشش چندتایی یعنی پوشش توسط حداقل k حسگر اشاره نمود. با توجه به محدودیت‌های فنی در حرکت ربات پرنده، در مسئله پیش رو با قیود دیگری نیز مواجه خواهیم بود. این قیود با توجه به (د) محدودیت‌های ارتفاع پرواز و لزوم حفظ ایمنی ربات، (ه) زوایای چرخش پرواز تعیین شده است. بر اساس قید شرط ایمنی در معادله (۶)، باید کمینه اختلافات ارتفاع نقاط حسگری (مؤلفه z_i) با حداقل ارتفاع در آن موقعیت (ارتفاع ثبت‌شده از محیط) بیش از ارتفاع ایمن h_{safe} باشد.

رابطه (۶)
$$g_h = h_{safe} - \min\left(z_i - z_s\left(x_i, y_i\right)\right) \geq 0,$$

که در این رابطه h_{safe} پارامتر ایمنی به‌منظور پیشگیری از وقوع برخورد حسگر با زمین و z_s بیانگر ارتفاع هر موقعیت در روی مدل رقمی زمین است که در این پژوهش برای همه نقاط ثابت و برابر صفر است. بر اساس قید (ه)، محدودیت بیشینه زاویه چرخش، ربات حسگر تنها مجاز به یک حد مشخص از تغییر جهت در هر نقطه است. بر مبنای قید رابطه (۷)، زاویه بیشینه چرخش باید در محدوده زیر باشد:

رابطه (۷)
$$g_\varphi = \max\left(\varphi_i - \varphi_i^{\max}\right) \geq 0,\ i = 0,1,\ldots,n-1$$

که در رابطه (۷)، $\varphi_k^{\max}$ بیانگر بیشینه زاویه چرخش افقی در هر موقعیت است که بر مبنای رابطه (۸) به فراخور بیشینه اضافه بار پهلویی $n_{\max}$، شتاب گرانش g و اندازه سرعت میانگین حرکت ربات V قابل برآورد است [۴۶].

رابطه (۸)
$$\varphi_k^{\max} = \frac{n_{\max} g}{V}\left[\left(x_{i+1}-x_i\right)^2 + \left(y_{i+1}-y_i\right)^2\right]^{1/2}$$

قید (الف) به این صورت اعمال می‌شود: اگر مختصات حسگر در درون بازه‌های منطقه ممنوعه قرار گرفت، موقعیت تصادفی جدید حسگر به نحوی انتخاب شود که در درون منطقه ممنوعه قرار نگیرد. در قید (ب)، حسگرها باید در یک منطقه از پیش تعیین‌شده جایابی شوند و عدم قرار گرفتن آن‌ها به‌منزله‌ی حذف راه‌حل و ایجاد راه‌حلی است که حسگرها به‌طور مجدد در درون کران‌های منطقه اجباری قرار گیرند. قید (ج)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

باعث افزایش قطعیت ردیابی منطقه می‌شود و همچنین با ازکارافتادن بعضی از حسگرها، از پوشش منطقه کاسته نمی‌شود. هر چه k بیشتر باشد، قطعیت پوشش منطقه بالاتر می‌رود. برای رسیدن به این هدف، می‌توان تعداد حسگرها را بالا برد که موجب افزایش هزینه عملیات خواهد شد. تابع هدف در رابطه با این قید، مطابق رابطه (۹)، عبارت است از بیشینه‌سازی نسبت مساحت کل منطقه‌ای که توسط k حسگر پوشش می‌یابند به حداکثر مساحتی که حسگرها در این حالت قادر به پوشش آن هستند. برای تبدیل مسئله به کمینه‌سازی نسبت نظیر از کل مساحت مدل کسر شده است. ازاین‌رو، راه‌حل‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری بر اساس این مقدار به‌روز می‌شوند.

رابطه (۹)

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^{m} S_t - \sum_{i=1}^{k} S_{\Delta,i} \Big/ \sum_{i=1}^{n} S_{\Delta,i}$$
$$\text{subject to } g_h, g_\varphi \geq 0,$$
$$H_{AZ}, H_{PZ} = 0$$

۴- الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در حل مسئله MCSDP

الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب یک روش بهینه‌سازی فیزیک مبنا است که در سال ۲۰۱۲ به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی مقید مطرح شده است و از عملکرد مستحکمی در حل مسائل مهندسی برخوردار است [۴۰, ۴۷]. ایده و منطق این الگوریتم بر مبنای نحوه توزیع شریان‌های[1] آبی در سطح زمین و جاری شدن آن‌ها به سمت رودها و دریا شکل گرفته است. جمعیت اولیه الگوریتم شامل مجموعه‌ای تصادفی از شریان‌های آبی، رودها و دریا است. در این الگوریتم بهترین پاسخ مسئله (بهینه سراسری) به‌عنوان دریا انتخاب‌شده و سایر پاسخ‌ها برحسب برازندگی به‌عنوان رودها و شریان‌ها انتخاب می‌شوند [۴۸]. سپس، تعدادی شریان به هر رود تخصیص می‌یابد. نحوه جاری شدن شریان‌ها به‌سمت رودها و دریا و همچنین جاری شدن رودها به‌سمت دریاها موجب حرکت پاسخ‌های نامزد مسئله به سمت بهینه سراسری می‌گردد. در فرآیند جستجوی نواحی جدید به‌وسیله شریان‌ها (شاخه‌های آبی)، بر مبنای یک شرایط از پیش تعیین‌شده میزانی از آب هر شریان، رود و یا دریا تبخیر شده (حذف تدریجی پاسخ‌های ضعیف) و از طریق بارش (تولید جواب‌های جدید) نقاط جدیدی در فضای جستجو پراکنده می‌شوند. چرخه تبخیر، بارندگی و جاری شدن آب‌ها تا هنگامی‌که الگوریتم به یک قید از پیش تعیین‌شده برسد ادامه می‌یابد. در ادامه، گام‌های اصلی الگوریتم در حل مسئله این تحقیق بیان می‌گردد [۴۰, ۴۸ و ۴۹].

گام ۱: تعیین پارامترهای اولیه الگوریتم شامل تعداد شریان‌ها N_{sr}، جمعیت اولیه الگوریتم N_{pop} و تعیین حداکثر تکرارها و پارامتر دقت d_{max} به‌منظور تشکیل جمعیت اولیه پاسخ‌های الگوریتم. جمعیت اولیه شامل مجموعه ای از N_{pop} بردار اولیه است که هر بردار آن شامل پارامترهای موقعیت و جهت هر حسگر باشد.

گام ۲: تشکیل جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی (وضعیت های نامزد برای همه ربات‌ها) و تشکیل شریان‌ها، رودها و دریای اولیه بر اساس کدینگ راه حل‌های مسئله MCSDP در رابطه (۱۰). بهترین وضعیت با شناسه دریا شناخته شده و سایر پاسخ‌های ممکن مسئله نیز به‌عنوان رود و شریان‌ها در رابطه (۱۰ و ۱۱) متمایز می‌شوند.

[1] Stream

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

رابطه (۱۰)

$$\begin{bmatrix} X_{\text{Sea}} \\ X_{\text{River}_1} \\ \vdots \\ X_{\text{Stream}_{N_{sr}+1}} \\ \vdots \\ X_{\text{Stream}_{N_{pop}}} \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} X_1^1 & \dots & X_N^1 & Y_1^1 & \dots Y_N^1 & H_1^1 & \dots & H_N^1 & I_1^1 & J_1^1 & K_1^1 & \dots & I_N^1 & J_N^1 & K_N^1 \\ X_1^2 & \dots & X_N^2 & Y_1^2 & \dots Y_N^2 & H_1^2 & \dots & H_N^2 & I_1^2 & J_1^2 & K_1^2 & \dots & I_N^2 & J_N^2 & K_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \; \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_1^N & \dots & X_N^{N_{pop}} & Y_1^N & \dots Y_N^{N_{pop}} & H_1^N & \dots & H_N^{N_{pop}} & I_1^N & J_1^N & K_1^N & \dots & I_N^{N_{pop}} & J_N^{N_{pop}} & K_N^{N_{pop}} \end{bmatrix},$$

رابطه (۱۱) N_{sr} = تعداد رودها + ۱

رابطه (۱۲) $N_{\text{streams}} = N_{\text{pop}} - N_{\text{sr}},$

که در این رابطه شریان‌ها، رودها و دریای اولیه آرایه‌هایی ($1\times N$)-بُعدی بوده و نشان‌دهنده پاسخ‌های اولیه مسئله بر اساس ساختار معادله (۱۰) هستند.

گام ۳: محاسبه هزینه هر شریان بر اساس معادله (۱۳) که بر اساس مساحت تحت پوشش هر حسگر محاسبه می‌شود:

رابطه (۱۳)

$$C_i = \text{Cost}_i = \sum_{t=1}^{m} S_t - \sum_{i=1}^{k} S_{\Delta,i} / \sum_{i=1}^{n} S_{\Delta,i} = f\left(x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i\right),\ i = 1,2,3,\dots,N_{pop},$$

گام ۴: محاسبه شدت جریان هر رود و دریا (وضعیت بهترین حسگر با بیشترین سطح تحت پوشش) بر اساس رابطه (۱۴ و ۱۵):

رابطه (۱۴) $C_n = \text{Cost}_n - \text{Cost}_{N_{sr+1}},\ n = 1,2,\dots,N_{sr}$

رابطه (۱۵)

$$NS_n = \text{round}\left\{\left|C_n / \sum_{i=1}^{N_{sr}} C_n\right| \times N_{\text{streams}}\right\},\ n = 1,2,\dots,N_{sr}$$

که در این رابطه NS_n تعداد جریانات را نشان می‌دهد.

گام ۵: در این مرحله، شریان‌ها بر اساس رابطه (۱۶ و ۱۷)، به رودها و دریا جاری می‌شوند:

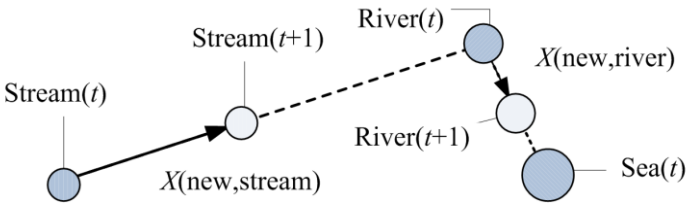
رابطه (۱۶)

$$X_{\text{Stream}}(t+1) = X_{\text{Stream}}(t) + r_1 \otimes K \otimes \left(X_{\text{River}}(t) - X_{\text{Stream}}(t)\right),$$

رابطه (۱۷)

$$X_{\text{Stream}}(t+1) = X_{\text{Stream}}(t) + r_2 \otimes K \otimes \left(X_{\text{Sea}}(t) - X_{\text{Stream}}(t)\right),$$

که در این رابطه، ضرب عبارت‌ها از نوع عضو در عضو است، r_1 و r_2 دو متغیر تصادفی در بازه (۱،۰) هستند و K یک ثابت است که توسط طراح الگوریتم توصیه‌شده در بازه (۲، ۱) باشد تا پاسخ‌های نامزد قادر باشند از جهات مختلف به سمت نقاط بهتر حرکت کنند. نحوه حرکت جریان‌ها در شکل (۹) نیز قابل‌مشاهده است.



شکل ۹: نحوه جاری شدن جریانات به رودها و رودها به دریا

گام ۶: رودها بر اساس رابطه (۱۸) به دریا جاری می‌شوند:

رابطه (۱۸)

$$X_{\text{River}}(t+1) = X_{\text{River}}(t) + r_3 \otimes K \otimes \left(X_{\text{Sea}}(t) - X_{\text{River}}(t)\right),$$

گام ۷: جایگزینی رود با شریانی که هزینه کمتری (پوشش بیشتری) داشته باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

گام ۸: جایگزینی رود با دریایی که هزینه بیشتری (پوشش کمتری) داشته باشد.

گام ۹: بررسی شرط تبخیر برای مسائل نامقید: درصورتی‌که $\left|X_{\text{Sea}} - X^{i}_{\text{River}}\right| < d_{\max}$ باشد و یا عدد تصادفی r_4 از ۰.۱ کمتر باشد، فرآیند بارش آغاز می‌شود. در این رابطه، d_{max} یک پارامتر کنترلی برای الگوریتم است که در مسائل مقید برابر 10^{-5} و در مسائل نامقید برابر 10^{-16} انتخاب می‌شود. به‌منظور بهبود کارایی الگوریتم، برای شریاناتی که به‌طور مستقیم به دریا می‌ریزند، فرم دوم شرط تبخیر نیز اجرا می‌گردد. در این شرط، درصورتی‌که $\left|X_{\text{Sea}} - X^{i}_{\text{stream}}\right| < d_{\max}$ باشد نیز فرآیند بارش شروع می‌گردد.

گام ۱۰: پس از بررسی شرط تبخیر، بارش به‌صورت رابطه (۱۹) پاسخ‌های جدید (وضعیت های نامزد برای حسگرها) را در محیط‌های نامقید تولید می‌کند:

$$X^{\text{new}}_{\text{Stream}}(t+1) = Lb + r_5 \otimes (Ub - Lb), \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که Lb و Ub به ترتیب نشان‌دهنده کران بالا و پایین متغیرهای مسئله MCSDP هستند و r_5 یک متغیر تصادفی است. برای مسائل مقید، معادله بارش به‌صورت رابطه (۲۰) تغییر می‌کند:

$$X^{\text{new}}_{\text{Stream}}(t+1) = X_{\text{sea}} + \mu^{0.5} \otimes randn\left(1, N_{\text{var}}\right), \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

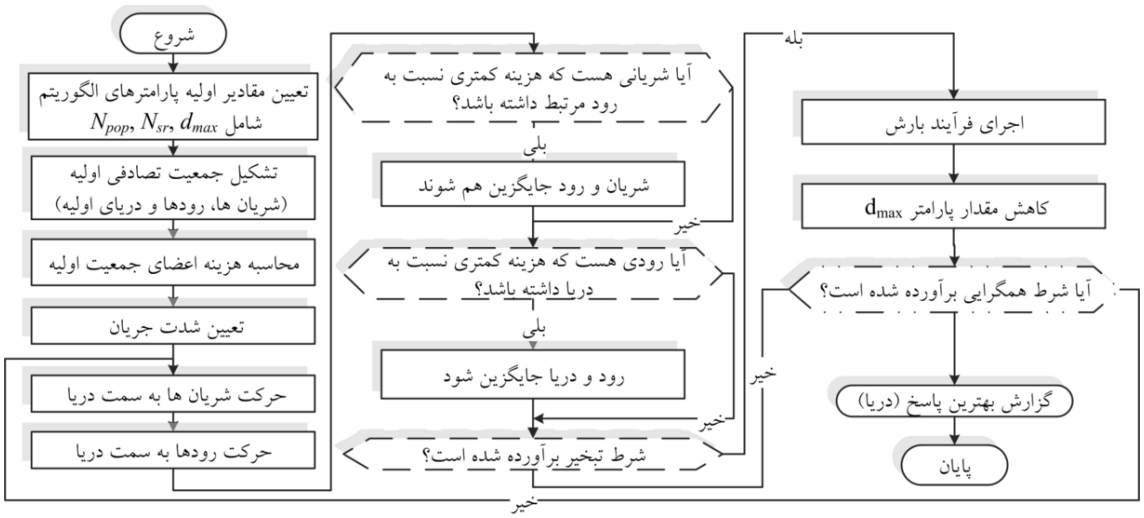
در رابطه بالا ضریب μ مشابه مفهوم واریانس، شعاع جستجوی اطراف پاسخ‌های بهینه (وضعیت حسگرهای برتر) را کنترل می‌کند.

گام ۱۱: کاهش ضریب d_{max} مطابق رابطه (۲۱) که t_{max} نشان‌دهنده حداکثر تکرارها است:

$$d_{\max}(t+1) = d_{\max}(t) - d_{\max}(t)/t_{\max}, \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

گام ۱۲: بررسی شرایط توقف الگوریتم. در صورت لزوم تکرارهای بیشتر الگوریتم به گام ۵ بازمی‌گردد.

فلوچارت الگوریتم چرخه آب در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. برای به‌کارگیری این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی، ابتدا پس از تعیین پارامترهای اولیه الگوریتم، متغیرهای مسئله MCSDP به‌صورت جمعیت اولیه در رابطه (۱۰) به الگوریتم معرفی می‌شوند. سپس تابع هدف مسئله MCSDP بر اساس رابطه (۱۳) تعریف می‌شود. پس از آن، الگوریتم در هر مرحله راه‌حل‌های تصادفی اولیه را بر اساس روابط (۱۶، ۱۷و ۱۸) به سمت پاسخ‌های بهتر (وضعیت های ممکن حسگرهای با پوشش بیشتر) حرکت می‌دهد. برای مشاهده مثال‌ها و مطالعه بیشتر در مورد نحوه به‌کارگیری این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی به مرجع [۴۰] مراجعه شود.



شکل ۱۰: مراحل اجرای الگوریتم چرخه آب

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

۴-۱- الگوریتم پیشنهادی بهبودیافته چرخه آب

در الگوریتم استاندارد چرخه آب، تنها یک راهکار برون‌رفت از نقاط زیر بهینه در نظر گرفته شده و آن این است که برای شریان‌هایی که مستقیماً به دریا می‌ریزند، عملگر بارش و تبخیر جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود؛ اما این ایده نمی‌تواند به خوبی از همگرایی زودرس الگوریتم جلوگیری کند [۴۸]، چنانچه در برخی مسائل و در ابتدای جستجو الگوریتم به نقاط زیر بهینه همگرا می‌شود. پارامترهای الگوریتم چرخه آب در کارایی آن مؤثرند [۴۷, ۵۰]. کاهش تعداد پارامترهای ثابت الگوریتم از طریق تعیین خودکار پارامترها (به‌صورت دینامیکی) می‌تواند عملکرد روش را متناسب با میزان پیشرفت الگوریتم بهبود دهد [۵۱]. در این صورت، در مواجه با مسائل پیچیده‌تر نیازی به تحلیل حساسیت الگوریتم نسبت به پارامترهای اولیه نیست؛ زیرا این پارامترها به‌صورت دینامیکی در طول تکرارهای الگوریتم تغییر می‌کنند. این مهم زمانی تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد که روش اصلی دچار همگرایی زودرس به نقاط بهینه محلی باشد [۵۲]. در این صورت تغییرات دینامیکی پارامترها می‌تواند موجب فرار الگوریتم از این نقاط شود [۵۱]. از سوی دیگر، بهبود خاصیت متنوع سازی خود وابسته به سازوکار عملگرهای جستجوی الگوریتم است. در روش چرخه آب، نحوه جاری شدن شریان‌ها به رودها و دریاها و همچنین حرکت رودها به سمت دریاها، بار اصلی فرآیند متمرکز سازی را بر عهده دارند و بخش عمده عملکرد الگوریتم نیز به این عملگرها وابسته است.

راهکار دیگری که می‌تواند موجب بهبود عملکرد الگوریتم چرخه آب شود این است که برخی پارامترهای ثابت و اجباری الگوریتم که مقدار آن‌ها توسط کاربر تغییر نمی‌کند (نظیر پارامتر K)، به‌صورت دینامیکی و بر مبنای یک معادله نزولی در مسیر پیشرفت الگوریتم کاهش یابد [۵۲]. این ضرایب کاهشی دینامیکی می‌تواند به این دلیل مؤثر باشد که وقوع اصل مهم تعادل در متنوع سازی و متمرکزسازی را ممکن می‌کند. الگوریتمی که قدرت متنوع سازی آن با افزایش تکرارها کمتر شود و جای آن را به قدرت متمرکز سازی بدهد، محیط مسئله را بهتر از الگوریتمی جستجو می‌کند که قادر به برقراری تعادل مناسبی بین این دو ویژگی نیست. برای مثال، در تکرارهای پایانی الگوریتم نواحی مستعد محیط یافت شده و نیازی به پراکنده‌سازی نقاط نیست، آنچه روش در تکرارهای نهایی نیاز دارد، متمرکز کردن پاسخ‌ها به سمت ناحیه احتمالی وقوع بهینه سراسری است. در الگوریتم چرخه آب، در تکرارهای پایانی نیاز به بارش و تولید جریان‌های جدید کمتر می‌شود؛ زیرا نواحی مستعد وجود دریا یافت شده و باید اطراف این نواحی با دقت (تمرکز) بیشتری جستجو گردد.

بر این اساس، در نسخه پیشنهادی این مقاله، شریان‌ها و رودها بر اساس معادلات دینامیکی در رابطه (۲۲، ۲۳ و ۲۴) به سمت دریا حرکت می‌کنند:

$$X_{\text{Stream}}(t+1)=X_{\text{Stream}}(t)+K(t)\otimes\left(X_{\text{Sea}}(t)-X_{\text{Stream}}(t)\right),$$ رابطه (۲۲)

$$X_{\text{Stream}}(t+1)=X_{\text{Stream}}(t)+K(t)\otimes\left(X_{\text{River}}(t)-X_{\text{Stream}}(t)\right),$$ رابطه (۲۳)

$$X_{\text{River}}(t+1)=X_{\text{River}}(t)+K(t)\otimes\left(X_{\text{Sea}}(t)-X_{\text{River}}(t)\right),$$ رابطه (۲۴)

که در روابط بالا $K(t)$ تابعی نزولی و آشوبی است که بر اساس رابطه (۲۵) تعیین می‌شود:

رابطه (۲۵)

$$K(t)=\left(K_i+\left(K_f-K_i\right)\times\left(t/t_{\max}\right)\right)\times UF(t),$$

که در این روابط، K_f و K_i مقادیر نهایی و ابتدایی عملگر خطی کاهشی طراحی‌شده است که مقادیر آن همچون الگوریتم اصلی در بازه (۱،۲) قرار دارند. نحوه تعریف این متغیرها در مسئله MCSDP نیز مشابه رابطه (۱۰)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

و مراحل مطرح در بخش قبل بوده است. هم‌چنین t_{max} بیشینه تکرارهای الگوریتم، t تعداد تکرارهای جاری و $UF\ (t)$ بیانگر تابع مولد الگوهای آشوبی در هر تکرار است. در اصلاح دیگر، پارامتر ثابت d_{max} به‌صورت آشوبی و در هر تکرار الگوریتم تعیین می‌شود. این امر باعث کاهش پارامترهای ثابت اولیه و تغییر مقادیر آن متناسب با میزان پیشرفت جستجو و سطح پیچیدگی هندسه مسئله می‌گردد. در این شرایط، شرط تبخیر و بارش برای مسائل مقید به این صورت تعدیل می‌شود: درصورتی‌که نامساوی $\left|X_{\text{Sea}} - X^{i}_{\text{stream}}\right| < UF(t)$ برای $i = 1,2,3,...,NS_n$ برقرار باشد، آنگاه فرآیند دینامیکی بارش اجرا می‌گردد. همچنین رابطه (۲۶ و ۲۷) نیز به‌صورت دینامیکی تغییر خواهد کرد.

$$X^{\text{new}}_{\text{Stream}} = X_{\text{sea}} + \left[\mu(t)\right]^{0.5} \otimes UF(t), \qquad \text{رابطه (۲۶)}$$

رابطه (۲۷)

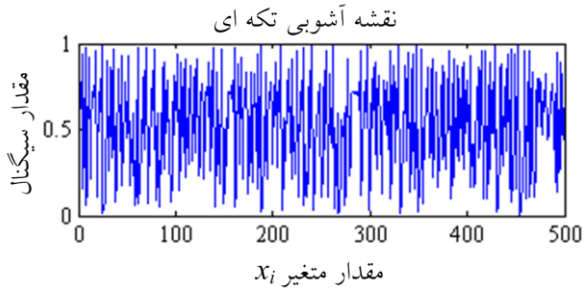
$$\mu(t) = \left(\mu_i + \left(\mu_f - \mu_i\right) \times \left(t/t_{\max}\right)\right),$$

که در این رابطه، μ_f و μ_i بیانگر مقادیر انتهایی و ابتدایی ضریب موردنظر هستند. این ضریب به‌صورت خطی با شروع از ۰/۸ به ۰/۱ کاهش می‌یابد. در مولد UF، نقشه آشوبی تکه‌ای[1] به کمک معادله بازگشتی در رابطه (۲۸) و در هر تکرار تولید می‌شود:

رابطه (۲۸)

$$x_{k+1} = \begin{cases} \dfrac{x_k}{P} & 0 \le x_k < P \\ \dfrac{x_k - P}{0.5 - P} & P \le x_k < 0.5 \\ \dfrac{1 - P - x_k}{0.5 - P} & 0.5 \le x_k < 1 - P \\ \dfrac{1 - x_k}{P} & 1 - P \le x_k < 1 \end{cases}$$

که در این رابطه، x_k متغیری در بازه واحد و P پارامتری کنترلی مثبتی است که برابر ۰.۳۵ انتخاب می‌شود. شکل (۱۱) رفتار این سیگنال را در طی ۵۰۰ تکرار و با شروع از مقدار اولیه ۰.۷ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: رفتار سیگنال تکه‌ای

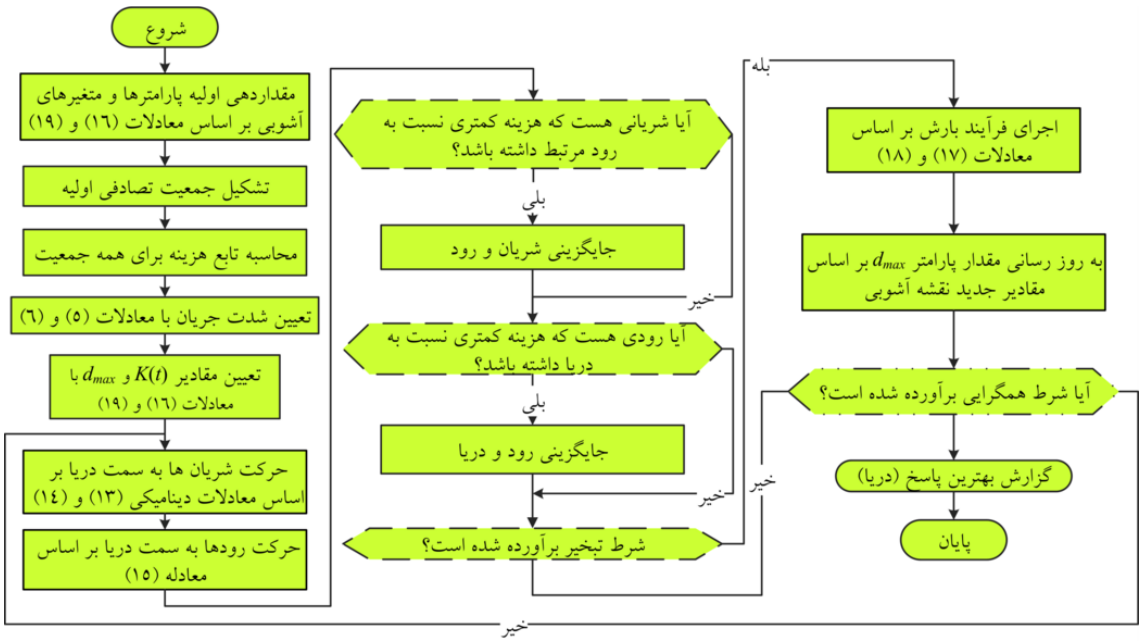
نحوه اجرای شبه کد الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۲) قابل‌مشاهده است.

۵- ارزیابی و تحلیل نتایج

در این بخش، کارایی الگوریتم پیشنهادی بر اساس میانگین زمان اجرا در حل مسئله مذکور، میانگین سرعت همگرایی به پاسخ های بهینه، بهترین مقادیر پوشش، میانگین مقادیر پوشش، و انحراف از معیار (دقت) مقادیر پوشش ربات ها از محیط با الگوریتم‌های جمعیت مبنای ژنتیک GA، GWO [۵۳]، ICA و PSO که به‌عنوان الگوریتم‌های مستحکم در تحقیقات مرتبط شناخته‌شده‌اند مورد بررسی مقایسه ای قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا پارامترهای اولیه مسئله و الگوریتم‌ها تعیین شده و سپس به بیان شرط پایان الگوریتم‌ها، مشخصات سیستم و محیط پیاده‌سازی و معیارهای ارزیابی الگوریتم ها و نوع آزمون آماری به‌کار گرفته شده برای تشخیص اختلافات معنادار الگوریتم‌ها از منظر آماری پرداخته شده است. سپس، برای بررسی تأثیر قیود مکانی مختلف بر کارایی الگوریتم‌ها و تحلیل میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها نسبت به این قیود، چهار حالت از سناریوهای موجود برای مسئله حاضر در نظر گرفته شده است.

[1] Piecewise map

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]



شکل ۱۲: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی چرخه آب

به منظور انجام این ارزیابی‌ها، پارامترها و داده‌های ورودی مسئله MCSDP بدین‌صورت انتخاب شده است: تعداد حسگرهای متحرک ۵۰، فاصله عملکرد حسگرها ثابت و برابر با ۴۵ متر، زاویه عملکرد حسگرهای جهت‌دار ۱۲۰ درجه، بیشینه ارتفاع پرواز ربات پرنده حسگر یا ارتفاع ایمن ۴۰ متر، مقدار k برابر با ۳، میانگین سرعت مجاز V برای ربات برابر ۴۰km/h، n_{max} برابر ۶، شتاب گرانش g برابر ۹/۸۱m/s^2، در مدل جهت‌دار حسگری، متغیرهای مورد جستجو علاوه بر موقعیت حسگر، شامل جهت حسگر در راستای x، y و z نیز خواهند بود. همچنین در این حالت، برای هر ربات حسگر متغیر ارتفاعی h نیز اضافه گردید. در این حالت با در نظر گرفتن تعداد ۲۰ حسگر جهت‌دار مقدار پارامترهای متغیر مورد جستجو برابر با ۱۲۰ خواهد بود. برای محاسبه تابع هدف، مدل احتمالی پوشش که رویکردی واقع‌گرایانه است، در نظر گرفته شده و راه‌حل‌های یافت شده الگوریتم‌ها بر اساس تابع هدف احتمالی پوشش به روز می‌شوند. پارامترهای احتمالی حسگر α و β، به ترتیب برابر ۱۰ و ۱ برای عملکرد احتمالی فاصله و ω برابر ۳ برای عملکرد احتمالی جهت حسگر در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به عملکرد برتر الگوریتم‌های مورد مقایسه در بسیاری از مسائل مهندسی، این الگوریتم‌ها می‌توانند معیار مناسبی به‌منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی باشند. الگوریتم‌های ژنتیک و توده ذرات از اولین روش‌های محاسبات تکاملی هستند [۵۴, ۵۵]. الگوریتم رقابت استعماری نیز بر اساس پدیده رقابت کشورهای قدرتمند در تصاحب و استعمار کشورهای ضعیف‌تر توسط کارولوکس ارائه شد. این الگوریتم دارای پارامترهای اولیه ای است که ابتدا باید توسط کاربر تعیین شوند. برای مطالعه ساختار و مطالعه جزئیات بیشتر برای این الگوریتم می‌توان به مراجع مراجعه نمود [۵۶, ۵۷]. الگوریتم گرگ خاکستری نیز در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکاران بر اساس الگوبرداری از شیوه حمله و شکار گرگ‌ها ارائه شد و عملکرد کارای آن در بسیاری تحقیقات مهندسی به اثبات رسیده است [۵۳, ۵۸]. انتخاب پارامترهای اولیه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به کارآزمودگی و تجربه کافی نیاز دارد، ازاین‌رو،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

با بهره‌گیری از تحلیل تاگوچی[1] [۵۹]، مناسب‌ترین مقادیر آغازین برای پارامترهای الگوریتم‌ها انتخاب شده است که به علت محدودیت در صفحات از ذکر جدول‌های آن خودداری شده است. در پایان تحلیل تاگوچی، بهترین تنظیمات الگوریتم‌ها در حل مسئله یافت شد. در الگوریتم ژنتیک، عملگر انتخاب مسابقه‌ای، جمعیت اولیه ۵۰ (تعداد بردارهای وضعیت نامزد برای ربات‌ها متشکل از پارامترهای جهت و موقعیت هر ربات)، نرخ تلفیق ٪۶۵، نرخ جهش ٪۳۰ انتخاب شده است. در الگوریتم توده ذرات، جمعیت ۵۰ برای بردارهای وضعیت ربات‌ها، ضریب اینرسی برابر ۱ و ضرایب شتاب به ترتیب برای ضرایب شخصی و اجتماعی جمعیت ربات‌ها برابر با ۱ و ۲ مقداردهی شدند. همچنین به‌منظور جستجو در محدوده‌ی متغیرهای مسئله MCSDP بیشینه سرعت ۱۰+ و کمینه آن ۱۰- در نظر گرفته شد (۲٫۳ شعاع حسگر). در الگوریتم رقابت استعماری، تعداد ۸ امپریالیست (بهترین بردارهای وضعیت ممکن ربات‌ها با توجه به میزان منطقه تحت پوشش از بین همه بردارهای وضعیت اولیه)، ضریب همسان‌سازی بردارهای وضعیت ۲، ضریب میانگین هزینه کلونی بردارهای اولیه ربات‌ها بر اساس میزان پوشش آن‌ها ۰٫۱، نرخ انقلاب (میزان جهش اعمال شده در متغیرهای بردارهای اولیه ربات‌ها) ۰٫۲۵، ضریب زاویه همسان‌سازی بردارهای ربات‌ها ۰/۷۵ لحاظ شده است. الگوریتم گرگ خاکستری، فاقد پارامترهای اولیه است. در الگوریتم چرخه آب و روش پیشنهادی نیز، ضریب دقت بهبود بردارهای اولیه وضعیت ربات‌ها $۱٫۱۰^{۵}$، تعداد شریان‌ها (بهترین پاسخ های زیربهینه مسئله MCSDP بر اساس میزان پوشش از منطقه برای حرکت به سمت ربات با بیشترین میزان پوشش از منطقه در هر تکرار) ۸ انتخاب شده است. بااین‌حال، برای کاهش وابستگی هرچه بیشتر الگوریتم‌ها نسبت به نحوه انتخاب و مقدار اولیه پارامترها، میانگین ۵۰ اجرای مستقل به‌عنوان نتیجه نهایی هر الگوریتم در نظر گرفته شده است. جمعیت اولیه همه الگوریتم ها برابر ۵۰ بوده است. تعداد تکرارهای داخلی همه الگوریتم‌ها نیز برابر ۵۰۰ تکرار بوده است.

برای نحوه کدبندی الگوریتم GA در حل مسئله، مطابق شکل (۱۳)، موقعیت و جهت حسگرها به‌عنوان متغیرهای کروموزومی در نظر گرفته شده‌اند. ونگ[2] و همکاران، از الگوریتم GA به‌منظور انتخاب حسگرهای متحرک در مسئله MCSDP از الگوریتم GA بهره‌گیری کردند و موقعیت گره‌های حسگری را به‌عنوان متغیرهای ورودی الگوریتم استفاده نمودند [۶۰]. در این تحقیق نیز از ساختاری مشابه استفاده شده است. در الگوریتم WCA و نسخه جدید MWCA نیز هر جریان بر این اساس کد شده است. در سایر الگوریتم‌ها نیز به دلیل مشابهت ساختاری، جمعیت اولیه به‌عنوان کشور، گرگ، یا یک ذره مطابق این مدل ساخته شده و در مراحل بعد مطابق با عملگرهای هر الگوریتم تا زمان همگرایی الگوریتم‌ها مورد اصلاح و بهبود قرار می‌گیرد [۶۱].

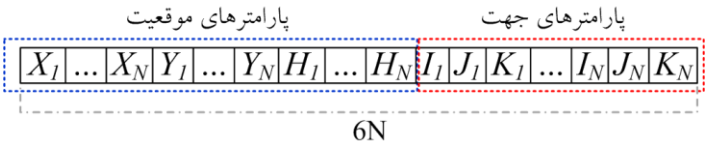
شرط پایان تمامی الگوریتم‌ها بر اساس به‌کارگیری همزمان چندین معیار لحاظ شده است. در شرایطی که سرعت بهبود بهترین راه‌حل یافت شده در تکرارهای پیاپی کمتر از یک‌هزارم باشد، یا تعداد تکرارها به بیشینه مجاز تکرارها برسد و یا اختلاف بهترین و بدترین پاسخ‌های یافت شده کمتر از یک‌هزارم باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد. بر این اساس، شبه کد شرط ترکیبی توقف ترکیبی می‌تواند به‌صورت شکل (۱۴) طراحی و برای ارزیابی روش‌های پیاده‌سازی شده به‌کار گرفته شود.

[1] Taguchi

[2] Wang

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]



شکل ۱۳: مدل کروموزومی راه‌حل‌ها برای مدل سه‌بعدی محیط

```
if the average improvement of best(i) is below 0.001
for i=1:500 generations,
check if maximum distance (best(i)-worst(i)) < 0.001
break and return { best, mean, worst, std, time}
plot the convergence curve and display the found sensors
else if the iteration <500, continue
```

شکل ۱۴: شبه کد شرط پایان الگوریتم‌ها

مشخصات سیستم پیاده‌سازی و نرم‌افزارهای پیاده‌سازی‌های استفاده شده نیز در جدول (۱) ارائه شده است. در این پیاده‌سازی‌ها از هیچ نرم‌افزار و الگوریتم تجاری نیز استفاده نشده است. با توجه به مراحل بازگشتی موجود در عملگرهای تعدیل‌شده و مزایای زبان‌های تابعی، از زبان برنامه‌نویسی تابعی هسکل[1] [۶۲] نیز در ساخت و اجرای مولد آشوبی استفاده شده است.

جدول ۱: جزئیات سیستم، زبان و نرم‌افزارهای پیاده‌سازی

مشخصات پیاده‌سازی	جزئیات پیاده‌سازی
مشخصات رایانه	Pentium IV processor CPU, 1.7 GHz, 512 MB RAM, Windows 7
زبان‌های برنامه‌نویسی	MATLAB R2012a (7.14), Haskell, C++
نرم‌افزارها	MATLAB, Hugs98[2]
الگوریتم‌ها	GA, PSO, GWO, ICA, WCA, MWCA

یکی از معیارهای استاندارد در ارزیابی میزان کارایی الگوریتم‌ها از منظر استحکام[3] محاسباتی، مقایسه تعداد دفعات اجراهای موفق الگوریتم در مجموعه‌ای از پیاده‌سازی‌های متوالی و مستقل است. بدین منظور، نرخ موفقیت هر الگوریتم در توانایی جستجو و اکتشاف پاسخ‌های مسئله بر اساس رابطه (۲۹) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۲۹)
$$Sr = 100 \times [\Xi_{best} / \Theta_{total}]$$

که در این رابطه، Ξ_{best} بیانگر تعداد اجراهای موفق الگوریتم موردبررسی و Θ_{total} تمام اجراهای یک الگوریتم را نشان می‌دهد که در این پژوهش برابر ۵۰ بوده است. شرط احتساب یک اجرا به‌عنوان یک اجرای موفق می‌تواند بر اساس رابطه (۳۰) به‌دست آید:

رابطه (۳۰)
$$\sum_{e=1}^{Dim} \left(P_e^{gb} - P_e^{B}\right)^2 \le \left(L_{\max} - L_{\min}\right) \times 10^{-1},$$

در رابطه (۲۶)، P_e^{gb} بهترین پاسخ سراسری یافت شده در تکرار جاری، P_e^{B} بهترین پاسخ در مجموع همه شبیه‌سازی‌ها، Dim بعد مسئله، $L_{\max}$ و $L_{\min}$ نیز بیانگر کران متغیرهای مسئله می‌باشند. بر اساس این رابطه، اگر اختلاف پاسخ یافت شده با بهترین پاسخ مسئله از یک‌دهم کمتر باشد، اجرای جاری می‌تواند به‌عنوان یک اجرای موفق محسوب شود.

[1] Haskell
[2] Hugs 98 : http://haskell.org/hugs
[3] Robustness

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

به‌منظور تحلیل و مقایسه برتری آماری نتایج الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های مورد مقایسه، آزمون آماری ویلکاکسون[1] در سطح اطمینان ۹۵ درصد اجرا شده است. این آزمون آماری ناپارامتریک به‌منظور بررسی همانندی دو نمونه وابسته با مقیاس رتبه‌ای استفاده می‌شود. در این آزمون آماری، اندازه اختلاف رتبه‌ها در نظر گرفته می شود. از این رو، می‌توان جواب‌های متفاوتی برابرای متغیرها مشاهده کرد. این آزمون در نهایت به این سوال پاسخ می دهد: آیا دو نمونه مورد بررسی نشان دهنده دو جمعیت متفاوت هستند؟ خواننده می تواند برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد این آزمون، لزوم اجرای آزمون، مطالعه جزئیات و نحوه بکارگیری آن برای مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به مرجع [۶۳] مراجعه نماید.

به‌منظور بررسی تأثیر قیود و محدودیت‌های مکانی مختلف بر کارایی الگوریتم‌ها و تحلیل میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها نسبت این قیود، روش‌های پیاده‌سازی شده با در نظر گرفتن چهار حالت از سناریوهای موجود مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در مسئله (۱)، تابع هدف با قیود منطقه اجباری (ب) و پوشش چندتایی (ج)، در مسئله (۲)، تابع هدف با قیود منطقه ممنوعه (الف) و پوشش چندتایی (ج)، در مسئله (۳)، تابع هدف با قیود منطقه ممنوعه (الف) و اجباری (ب)، در مسئله (۴)) تابع هدف بدون هیچ محدودیتی در نظر گرفته و حل شده است. در هر ۴ مسئله، قیود مربوط به ایمنی و چرخش ربات حسگر نیز لحاظ شده است.

نتایج آماری الگوریتم‌های مختلف بر اساس میزان بهترین، میانگین و انحراف از معیار میزان پوشش به‌دست‌آمده به همراه نتایج آزمون آماری، زمان اجرا و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در جدول‌های (۲، ۳، ۴، ۵ و ۶) قابل‌مشاهده است. در این جدول‌ها، مقادیر هر ستون بیانگر عملکرد الگوریتم مطرح در آن ستون بر اساس معیارهای بیان شده در سطرهای آن جدول است. در این جدول‌ها، رتبه هر الگوریتم با توجه به معیار همان سطر به‌صورت اندیس مقادیر گزارش شده است و در نتایج آزمون آماری ویلکاکسون، / نشان‌دهنده طرف اول مقایسه‌ها، + نشان‌دهنده برتری آماری، ≅ به معنای برابری آماری و // بیانگر بهتر نبودن آماری الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه است.

بر اساس بهترین مقادیر پوشش در جدول (۲) مشاهده می‌شود که نتایج الگوریتم پیشنهادی از دیدگاه آماری، در همه موارد، دارای اختلاف معناداری نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد مقایسه بوده است. در مجموع ۵۰ اجرای مستقل، MWCA قادر به پوشش بیشینه ۷۱ درصدی از منطقه بوده و در مجموع ۱۲۵.۴۵ ثانیه نتایجی را با بهترین رتبه و با انحراف از معیار ۱.۳۳۶ محاسبه نموده است. این در حالی است که کارایی الگوریتم WCA با توجه به مقادیر انحراف از معیار در رتبه ۵ و تنها بهتر از الگوریتم ICA بوده است. با توجه به مقادیر نرخ موفقیت، استحکام محاسباتی الگوریتم از رتبه ششمبه رتبه اول رسیده است. برتری نتایج به‌دست‌آمده به‌دلیل بهبود توان الگوریتم در پراکنده‌سازی پاسخ‌های جدید در فضای جستجو به کمک عملگرهای ترکیبی جدید است. به‌موجب اصلاحات به‌عمل‌آمده در عملگر متنوع سازی، روش جدید با نرخ بالای متنوع سازی به جستجوی نواحی پرداخته و با تکرارهای بیشتر با موفقیت به‌سمت متمرکز سازی پاسخ‌ها پیش رفته است.

[1] Wilcoxon signed ranks test

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

جدول ۲: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به‌دست‌آمده در مجموع ۵۰ اجرا و زمان محاسبات و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در حل مسئله نمونه ۱ به همراه نتایج آزمون آماری و رتبه الگوریتم‌ها

مسئله	معیار پوشش	MWCA	WCA	ICA	GA	PSO	GWO
۱	بهترین	۷۱۱	۵۸۳	۴۷۵	۳۸۶	۴۹۴	۶۷۲
	میانگین	۶۵۱	۵۳۳	۴۲۵	۳۷۶	۴۶۴	۶۱۲
	انحراف از معیار	۱٫۳۳۶۱	۳٫۱۲۷۵	۳٫۳۳۶۶	۲٫۲۲۲۳	۲٫۸۵۵۴	۱٫۹۸۵۲
	زمان (ثانیه)	۱۲۵٫۴۵۱	۱۳۱٫۵۱۲	۱۵۴٫۶۲۴	۱۷۶٫۹۲۶	۱۶۴٫۹۶۵	۱۳۸٫۲۵۳
	نرخ موفقیت	۶۹۱	۴۰۶	۵۲۳	۴۶۴	۴۴۵	۵۸۲
	آزمون آماری	/	+	+	+	+	+

جدول ۳: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به‌دست‌آمده در مجموع ۵۰ اجرا و زمان محاسبات و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در حل مسئله نمونه (۲) به همراه نتایج آزمون آماری و رتبه الگوریتم‌ها

مسئله	معیار پوشش	MWCA	WCA	ICA	GA	PSO	GWO
۲	بهترین	۶۴۲	۵۰۳	۴۴۵	۳۳۶	۴۷۴	۶۵۱
	میانگین	۵۹۱	۴۸۳	۴۳۴	۲۹۶	۴۱۵	۵۷۲
	انحراف از معیار	۱٫۴۱۸۲	۳٫۱۰۸۵	۳٫۱۴۹۶	۲٫۰۰۲۳	۲٫۹۲۳۴	۱٫۱۷۳۱
	زمان (ثانیه)	۱۳۳٫۱۵۱	۱۳۸٫۸۵۲	۱۶۱٫۹۲۴	۱۸۴٫۵۲۶	۱۶۸٫۶۶۵.	۱۴۲٫۷۴۳.
	نرخ موفقیت	۶۲۱	۳۸۶	۵۳۳	۳۹۴	۳۹۴	۶۲۱
	آزمون آماری	/	+	+	+	+	//

با توجه به مقادیر جدول (۳)، بیشترین پوشش به‌دست‌آمده با کمترین انحراف از معیار در مسئله (۲) توسط الگوریتم GWO به دست آمده که از عملگرهای جستجوی محلی با پتانسیل بالا برخوردار است اما روش پیشنهادی در رتبه دوم قرار گرفته است، بااین‌حال، الگوریتم MWCA بر اساس میانگین مقادیر پوشش، زمان محاسبات و استحکام محاسباتی بهتر از روش‌های مورد مقایسه عمل کرده است. با توجه به آزمون آماری، اصلاحات ساختاری موجب بروز بهبود معناداری در کیفیت نتایج نسبت به سایر روش‌ها به‌استثنای روش GWO گردیده و نرخ موفقیت الگوریتم استاندارد را از ۳۸ به ۶۲ درصد افزایش داده است. در مقایسه با مسئله (۱)، میزان پوشش بیشینه و متوسط و نرخ موفقیت در مسئله (۲) دچار کاهش و از سوی دیگر زمان محاسبات و انحراف از معیار نتایج دچار افزایش گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن محدودیت‌های منطقه ممنوعه می‌تواند بار محاسباتی بیشتری را لحاظ قیود منطقه اجباری به الگوریتم‌ها تحمیل کند.

بر اساس نتایج جدول (۴)، به‌کارگیری همزمان قیود مربوط به مناطق اجباری و ممنوعه و عدم لحاظ قید پوشش چندتایی موجب بهبود نسبی میزان بهینگی و دقت نتایج با توجه به شاخص‌های بهترین، میانگین، انحراف از معیار مقادیر پوشش و زمان اجرا در مقایسه با مقادیر نظیر در مسائل (۱) و (۲) گردیده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

جدول ۴: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به‌دست‌آمده در مجموع ۵۰ اجرا و زمان محاسبات و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در حل مسئله نمونه ۳ به همراه نتایج آزمون آماری و رتبه الگوریتم‌ها

مسئله	معیار پوشش	MWCA	WCA	ICA	GA	PSO	GWO
۳	بهترین	۷۳۱	۶۱۳	۴۶۵	۴۱۶	۵۱۴	۶۶۲
	میانگین	۶۷۱	۵۴۳	۴۲۵	۳۹۶	۴۸۴	۶۳۲
	انحراف از معیار	۱٫۰۸۵۱	۳٫۹۳۳۶	۳٫۴۰۶۵	۲٫۳۰۳۲	۳٫۰۲۸۴	۲٫۴۳۰۳
	زمان (ثانیه)	۱۱۴٫۱۷۱	۱۳۱٫۸۱۲	۱۴۹٫۰۵۴	۱۷۰٫۷۶۶	۱۵۸٫۳۱۵	۱۳۴٫۹۳۳
	نرخ موفقیت	۶۷۱	۴۲۶	۵۶۳	۴۷۴	۴۶۵	۵۸۲
	آزمون آماری	/	+	+	+	+	+

الگوریتم‌های GA، PSO و ICA به‌طور تقریبی با یک سطح از استحکام با این مسئله روبرو شده‌اند. در مقایسه با مسائل (۱) و (۲)، در این مسئله، الگوریتم MWCA می‌تواند با دقت و سرعت محاسباتی بیشتری به میانگین پوشش بیشتری از منطقه برسد.

جدول ۵: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به‌دست‌آمده در مجموع ۵۰ اجرا و زمان محاسبات و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در حل مسئله نمونه ۴ به همراه نتایج آزمون آماری و رتبه الگوریتم‌ها

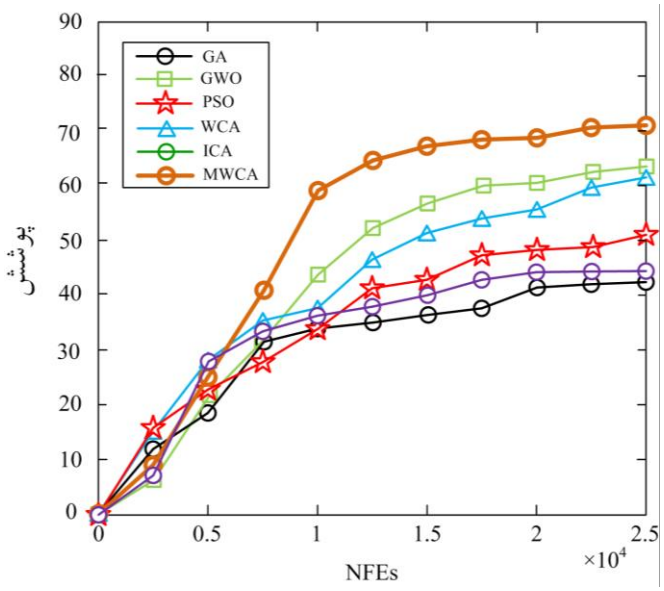
مسئله	معیار پوشش	MWCA	WCA	ICA	GA	PSO	GWO
۴	بهترین	۸۰۱	۶۲۳	۵۰۵	۴۶۶	۵۷۴	۶۹۲
	میانگین	۷۱۱	۶۱۳	۴۴۵	۴۲۶	۴۹۴	۶۳۲
	انحراف از معیار	۱٫۰۱۲۱	۳٫۸۷۳۵	۳٫۳۹۲۶	۲٫۴۹۷۴	۲٫۳۵۹۳	۱٫۱۲۸۲
	زمان	۱۱۱٫۲۸۱	۱۲۹٫۴۶۳	۱۴۱٫۹۳۴	۱۶۸٫۰۸۶	۱۴۹٫۱۳۵	۱۲۸٫۱۲۲
	نرخ موفقیت	۷۳۱	۴۴۶	۵۹۳	۴۷۵	۵۱۴	۶۱۲
	آزمون آماری	/	≅	+	+	+	//

با توجه به نتایج همه شاخص‌ها در جدول (۵) مشاهده می‌شود که الگوریتم جدید MWCA دارای رتبه اول بوده است. همچنین، الگوریتم پیشنهادی با توجه به معیارهای بهترین، میانگین و انحراف از معیار نتایج، توانسته است میزان پوشش بیشتری را با دقت بهتر نسبت به سایر روش‌ها به‌دست بیاورد و بر این اساس مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های GWO، WCA، PSO، ICA و GA در اولویت‌های بعدی قرار گرفته اند. میزان انحراف از معیار الگوریتم استاندارد WCA تنها بهتر از الگوریتم ICA بوده، اما الگوریتم MWCA در کمترین زمان به بیشترین حد دقت رسیده است. این مهم می‌تواند به‌علت بهبود حد توازن بین متنوع سازی و متمرکزسازی در جریان جستجو و جایابی با الگوریتم پیشنهادی باشد. الگوریتم پیشنهادی از منظر برتری آماری مشابه الگوریتم استاندارد است، اما از منظر استحکام جایابی، طراحی عملگرهای تعدیل‌شده در الگوریتم جدید منجر به افزایش ۲۹ درصدی در نرخ موفقیت الگوریتم اولیه شده است. از مقایسه نتایج مسئله نامقید (۴) با مسائل مقید (۱) تا (۳) مشخص می‌شود که کارایی الگوریتم‌ها با لحاظ محدودیت‌های بیشتر، کاهش یافته و با حذف محدودیت‌های فضای جستجو بهبودیافته است. به‌طور مثال، حداکثر پوشش در مسئله (۴) به میزان

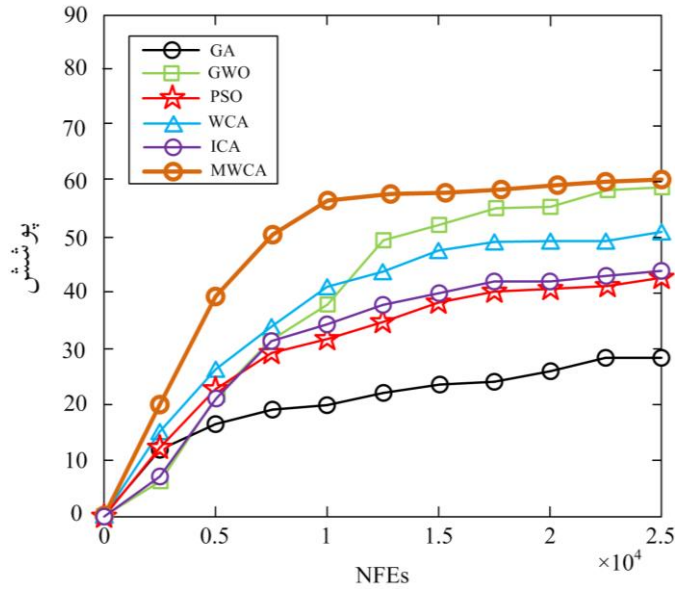
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

۷٪ نسبت به مسئله (۳)، ۱۶٪ نسبت بـه مسـئله (۲) و ۹٪ نسبت بـه مسـئله (۱) دچـار افـزایش شـده اسـت. عملکرد و نتایج نزدیک الگوریتم‌های MWCA و GWO در حـل مسـائل چهارگانـه بـه آن دلیـل اسـت کـه در الگوریتم GWO نیز تعادل رویکردهای متنـوع سـازی و متمرکز سازی در جستجوی مناطق مسـتعد بـه‌صـورت دینامیکی و متناسـب بـا پیشـرفت الگـوریتم در فضـای مسئله تعدیل می‌گردد.

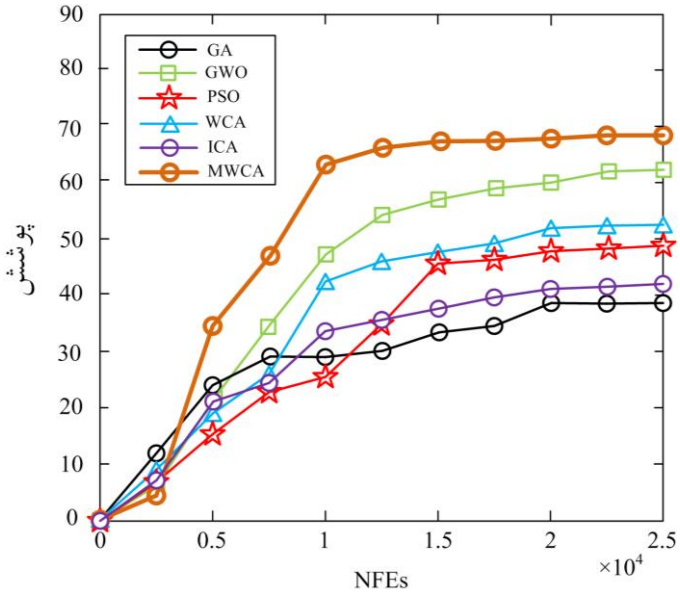
برای تحلیل و مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم‌ها، نمـودار همگرایی آن به همراه روش‌های مختلـف بـرای مقـادیر میانگین پوشش در سناریوهای چهارگانه در شکل (۱۵) منعکس گردیده است.



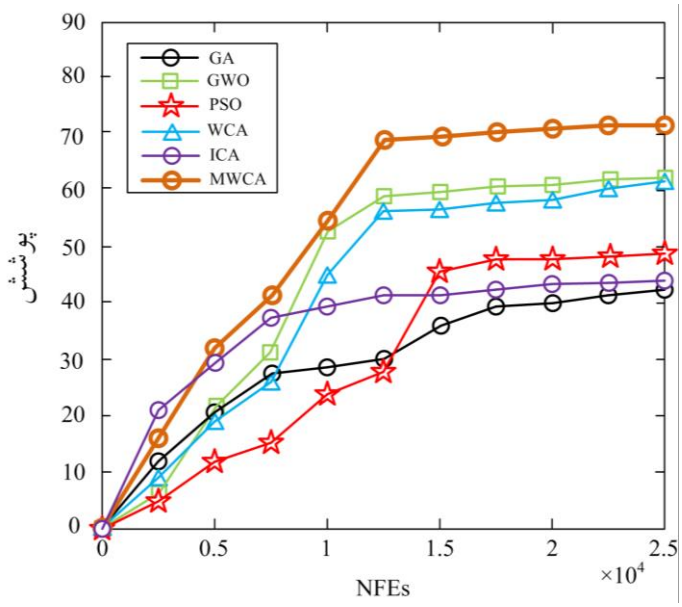
(الف) رفتار همگرایی در مسئله (۱)



(ب) رفتار همگرایی در مسئله (۲)



(ج) رفتار همگرایی در مسئله (۳)



(د) رفتار همگرایی در مسئله (۴)

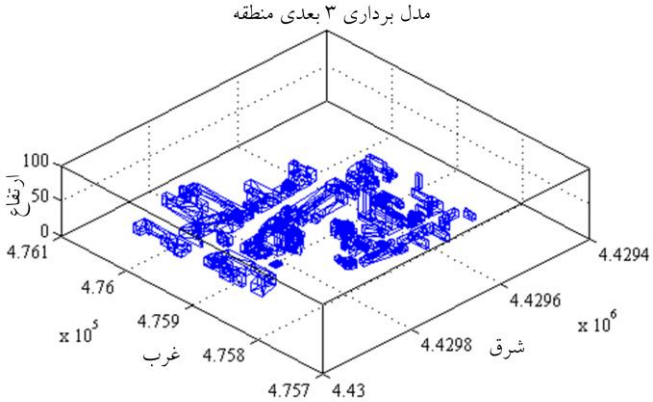
شکل ۱۵: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم‌ها در حل سناریوهای مورد آزمایش

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

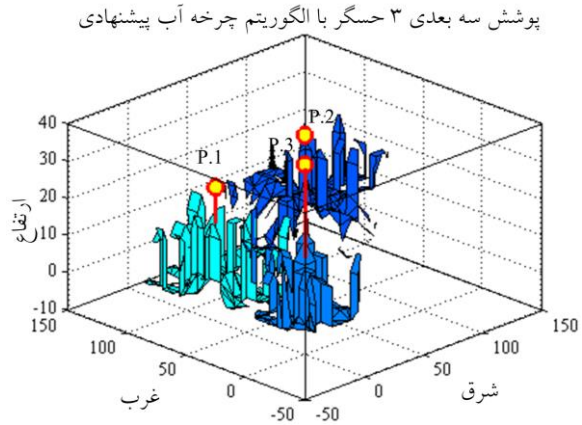
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

با توجه به منحنی‌های همگرایی در شکل (۱۵)، الگوریتم MWCA با نرخ بهتری نسبت به WCA و سایر روش‌ها همگرا شده و به پوشش بیشتری دست یافته است. همگرایی روش GWO به‌دلیل ماهیت جستجوی دینامیکی آن به روش MWCA نزدیک بوده و الگوریتم GA نیز با کمترین سرعت همگرا شده است. دلیل این بهبود می‌تواند بهتر بودن قدرت پراکنده‌سازی الگوریتم MWCA در سراسر تکرارها و انتقال به‌موقع روند جستجوی آن از پراکنده‌سازی به سمت متمرکزسازی پاسخ‌ها باشد. با توجه به نرخ‌های همگرایی مشخص می‌شود که به‌کارگیری محدودیت‌های مکانی در مسئله (۲) موجب افت بیشتر نرخ همگرایی و دقت روش‌ها بوده که در قسمت (ب) شکل (۱۵) قابل‌مشاهده است. از دیگر سوی، در حالت نامقید الگوریتم‌ها با نرخ همگرایی بهتری قادر به محاسبه پوشش بوده‌اند. با توجه به نتایج سرعت همگرایی در این شکل مشخص می‌شود که به‌کارگیری قیود در مسئله موجب تحمیل بار محاسباتی اضافی به همه الگوریتم‌ها می‌گردد.

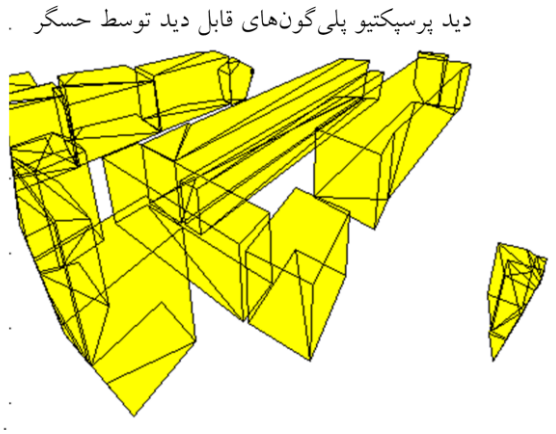
در انتها، بخشی از نتایج محاسبه پوشش سه‌بعدی در شکل (۱۶) نمایش داده شده که برای نمایش واضح سطح جزئیات قابل‌محاسبه بر مبنای رویکرد جدید و الگوریتم پیشنهادی، برای تراکم ۳ حسگر به‌دست‌آمده است.



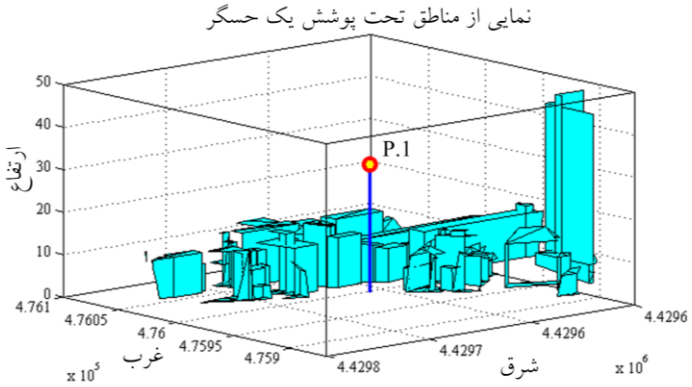
(ب) سراسر مدل برداری منطقه



(الف) پوشش بیشینه و جایابی بهینه برای ۳ حسگر



(د) بهترین دید پرسپکتیو از داخل حسگر

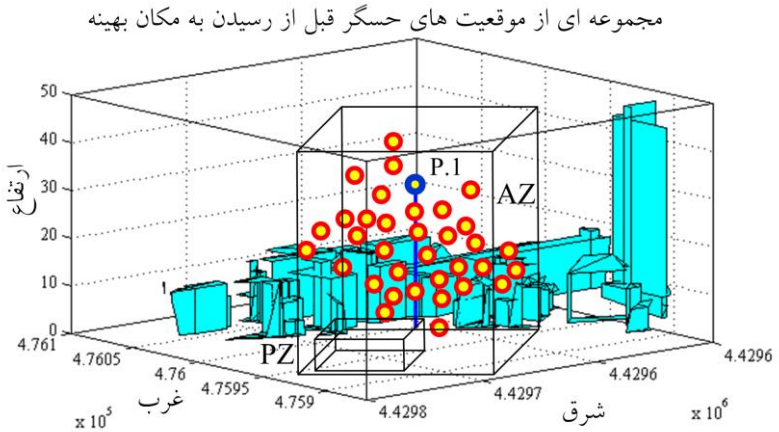


(ج) نمایی از حداکثر پوشش حسگر اول به مساحت ۵.۳۲۴۲۷

شکل۱۶: عملکرد رویکرد پیشنهادی (الف): نتایج بیشترین پوشش ممکن، (ب): مدل برداری منطقه، (ج): بخشی از منطقه تحت پوشش، (د) دید حسگر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

با توجه به سطح جزئیات هندسی نتایج این شکل در کنار نتایج محاسباتی گزارش شده در جدول‌های پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد جدید ارائه شده در این تحقیق برای تعیین جایابی بهینه و پوشش ربات‌ها در محیط های برداری قادر به محاسبه نتایج قابل قبولی برای ربات‌ها بوده است. با توجه به مشاهدات و نتایج این تحقیق، رویکرد پیشنهادی محاسبه پوشش برداری می تواند با عملکرد کارایی به محاسبه و تعیین پوشش حسگرها در مدل‌های سه‌بعدی برداری بپردازد. این مدل‌ها از دقت هندسی بالایی نسبت به مدل‌های رستری برخوردارند و با توجه به داده‌ها و مدل‌های محیطی واقع‌گرایانه به‌کار رفته و کارایی روش پیشنهادی، رویکرد جدید می‌تواند پاسخگوی نیازهای روز مرتبط با کاربردهای جایابی بهینه حسگرهای رباتیک باشد. بخشی از تاریخچه جابجایی حسگر اول نیز قبل رسیدن به نقطه بهینه در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. این موقعیت‌ها درون یک محدوده اجباری (AZ) و خارج از یک محدوده ممنوعه (PZ) واقع شده‌اند و عوارض برداری نمایش داده شده در این شکل نیز نشان‌دهنده ناحیه تحت پوشش ربات پس از استقرار در موقعیت بهینه است.



شکل ۱۷: تاریخچه جابجایی RAV قبل از رسیدن به موقعیت بهینه

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، به ارائه یک رویکرد جدید و کارا برای حل مسئله MCSDP با حسگرهای رباتیک در محیط‌های سه‌بعدی برداری پرداخته شد. بدین‌منظور، الگوریتم چرخه آب به کمک یک سیگنال آشوبی و تغییر نحوه حرکت شریان‌ها اصلاح گردید و در مقایسه با الگوریتم‌های WCA، GA، PSO، GWO و ICA برای حل مسئله به کار گرفته شد. مسئله مورد نظر بر اساس وجود یا عدم وجود قیود مکانی به‌صورت چهار سناریو پیاده‌سازی شد. سپس، کارایی الگوریتم‌ها بر اساس میزان استحکام، سرعت محاسباتی، میانگین و بهترین مقادیر پوشش، انحراف از معیار، سرعت همگرایی و آزمون آماری ویلکاکسون موردبررسی مقایسه‌ای واقع گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، رویکرد پیشنهادی قادر به تعیین پوشش و جایابی بهینه گره‌های متحرک بوده و از عملکرد قابل قبولی بر اساس معیارهای مختلف برخوردار بوده است. الگوریتم چرخه آب پیشنهادی قادر است نسبت به سایر الگوریتم‌ها در زمان کمتر و با سرعت همگرایی بیشتری به بیشینه پوشش منطقه دست یابد. بر اساس نتایج می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به کارایی محاسباتی رویکرد پیشنهادی، می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات تخمین جایابی و پوشش حسگرهای رباتیک و توسعه زیرساخت‌های نرم‌افزاری لازم بهره‌گیری نمود. در تحقیقات آتی می‌توان به ارزیابی عملکرد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

الگوریتم پیشنهادی در رویارویی با مسائل دیگر مهندسی پرداخت. در این تحقیق، از مدل‌های برداری به علت دقت بالا بهره‌گیری شد، بااین‌حال، ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها برای تخمین پوشش در محیط‌های رستری می‌تواند خود موضوع تحقیقات دیگری باشد.

مراجع

[1] P. Corke, S. Hrabar, R. Peterson, D. Rus, S. Saripalli, and G. Sukhatme, "Autonomous deployment and repair of a sensor network using an unmanned aerial vehicle," in Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on, 2004, pp. 3602-3608.

[2] N. R. Ahmed, J. Cortes, and S. Martinez, "Distributed Control and Estimation of Robotic Vehicle Networks: An Overview of Part 2," IEEE Control Systems, vol. 36, pp. 18-21, 2016.

[3] J. Haugen and L. Imsland, "Monitoring moving objects using aerial mobile sensors," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, pp. 475-486, 2016.

[4] T. F. Villa, F. Gonzalez, B. Miljievic, Z. D. Ristovski, and L. Morawska, "An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives," Sensors, vol. 16, p. 1072, 2016.

[5] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, pp. 2624-2661, 2016.

[6] M. Saska, V. Vonásek, J. Chudoba, J. Thomas, G. Loianno, and V. Kumar, "Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles," Journal of Intelligent & Robotic Systems, pp. 1-24, 2016.

[7] M. F. Mysorewala, D. O. Popa, and F. L. Lewis, "Multi-scale adaptive sampling with mobile agents for mapping of forest fires," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 54, pp. 535-565, 2009.

[8] A. Pierson and M. Schwager, "Adaptive inter-robot trust for robust multi-robot sensor coverage," in Robotics Research, ed: Springer, 2016, pp. 167-183.

[9] C. Y. Ma, D. K. Yau, N. K. Yip, N. S. Rao, and J. Chen, "Stochastic steepest descent optimization of multiple-objective mobile sensor coverage," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, pp. 1810-1822, 2012.

[10] M. Rebai, H. Snoussi, F. Hnaien, and L. Khoukhi, "Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks," Computers & Operations Research, vol. 59, pp. 11-21, 2015.

[11] M. Vecchio and R. López-Valcarce, "Improving area coverage of wireless sensor networks via controllable mobile nodes: A greedy approach," Journal of Network and Computer Applications, vol. 48, pp. 1-13, 2015.

[12] S. N. Alam and Z. J. Haas, "Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment," Ad Hoc Networks, vol. 34, pp. 157-169, 2015.

[13] F. Li, J. Luo, S. Xin, and Y. He, "Autonomous deployment of wireless sensor networks for optimal coverage with directional sensing model," Computer Networks, vol. 108, pp. 120-132, 2016.

[14] C. Zhu, C. Zheng, L. Shu, and G. Han, "A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks," Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, pp. 619-632, 2012.

[15] C. Ozturk, D. Karaboga, and B. Gorkemli, "Probabilistic dynamic deployment of wireless sensor networks by artificial bee colony algorithm," Sensors, vol. 11, pp.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

6056-6065, 2011.

[16] X. Wang, S. Wang, and J.-J. Ma, "An improved co-evolutionary particle swarm optimization for wireless sensor networks with dynamic deployment," Sensors, vol. 7, pp. 354-370, 2007.

[17] Y. Yoon and Y.-H. Kim, "An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks," IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 43, pp. 1473-1483, 2013.

[18] R. Özdağ and A. Karcı, "Probabilistic dynamic distribution of wireless sensor networks with improved distribution method based on electromagnetism-like algorithm," Measurement, vol. 79, pp. 66-76, 2016.

[19] H. Zhu and Y. Shi, "Brain storm optimization algorithm for full area coverage of wireless sensor networks," in 2016 Eighth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), 2016, pp. 14-20.

[20] G. Wang, L. Guo, H. Duan, L. Liu, and H. Wang, "Dynamic deployment of wireless sensor networks by biogeography based optimization algorithm," Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 1, pp. 86-96, 2012.

[21] R. V. Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy, "Bio-inspired algorithms for autonomous deployment and localization of sensor nodes," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 40, pp. 663-675, 2010.

[22] C.-W. Tsai, T.-P. Hong, and G.-N. Shiu, "Metaheuristics for the Lifetime of WSN: A Review," IEEE Sensors Journal, vol. 16, pp. 2812-2831, 2016.

[23] G. Werner-Allen, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees, and M. Welsh, "Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network," in Proceeedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks, 2005., 2005, pp. 108-120.

[24] M. Argany, M. A. Mostafavi, V. Akbarzadeh, C. Gagné, and R. Yaagoubi, "Impact of the quality of spatial 3D city models on sensor networks placement optimization," Geomatica, vol. 66, pp. 291-305, 2012.

[25] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo, "Coverage control for mobile sensing networks," in Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, 2002, pp. 1327-1332.

[26] M. Argany, M. A. Mostafavi, and C. Gagné, "Context-Aware Local Optimization of Sensor Network Deployment," Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 4, pp. 160-188, 2015.

[27] S. Temel, N. Unaldi, and O. Kaynak, "On deployment of wireless sensors on 3-D terrains to maximize sensing coverage by utilizing cat swarm optimization with wavelet transform," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 44, pp. 111-120, 2014.

[28] R. Shorey, A. Ananda, M. C. Chan, and W. T. Ooi, Mobile, wireless, and sensor networks: technology, applications, and future directions: John Wiley & Sons, 2006.

[29] M. A. Guvensan and A. G. Yavuz, "On coverage issues in directional sensor networks: A survey," Ad Hoc Networks, vol. 9, pp. 1238-1255, 2011.

[30] H. Ma, X. Zhang, and A. Ming, "A coverage-enhancing method for 3d directional sensor networks," in INFOCOM 2009, IEEE, 2009, pp. 2791-2795.

[31] G. Wang, G. Cao, and T. F. La Porta, "Movement-assisted sensor deployment," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 5, pp. 640-652, 2006.

[32] Y. Wang and G. Cao, "On full-view coverage in camera sensor networks," in INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE, 2011, pp. 1781-1789.

[33] v. Akbarzadeh, C. Gagn'e, M. Parizeau, and M. A. Mostafavi, "Black-box Optimization of Sensor Placement with Elevation Maps and Probabilistic Sensing Models,"

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

presented at the International Symposium on Robotic and Sensors Environment, ROSE, 2011.

[34] M. Argany, M. A. Mostafavi, F. Karimipour, and C. Gagné, "A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach," A Voronoi Approach. Transacton on Computational Sciences Journal, vol. 14, pp. 151-172, 2011.

[35] M. Argany, M. A. Mostafavi, V. Akbarzadeh, C. Gagné, and R. Yaagoubi, "Impact of the quality of spatial 3D city models on sensor networks placement optimization," GEOMATICA, vol. 66, p. 291—305, 2012.

[36] A. Hossain, P. Biswas, and S. Chakrabarti, "Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network," in 2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, 2008, pp. 1-5.

[37] X. Chen, K. Makki, K. Yen, and N. Pissinou, "Sensor network security: a survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, pp. 52-73, 2009.

[38] J. C. Lee, V. C. Leung, K. H. Wong, J. Cao, and H. C. Chan, "Key management issues in wireless sensor networks: current proposals and future developments," IEEE Wireless Communications, vol. 14, pp. 76-84, 2007.

[39] V. Akbarzadeh, C. Gagné, M. Parizeau, M. Argany, and M. A. Mostafavi, "Probabilistic sensing model for sensor placement optimization based on line-of-sight coverage," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, pp. 293-303, 2013.

[40] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, and M. Hamdi, "Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems," Computers & Structures, vol. 110, pp. 151-166, 2012.

[41] J. F. Blinn and M. E. Newell, "Texture and reflection in computer generated images," Communications of the ACM, vol. 19, pp. 542-547, 1976.

[42] D. Hoiem, A. A. Efros, and M. Hebert, "Putting objects in perspective," International Journal of Computer Vision, vol. 80, pp. 3-15, 2008.

[43] J. D. Foley and A. Van Dam, Fundamentals of interactive computer graphics vol. 2: Addison-Wesley Reading, MA, 1982.

[44] M. Leonov, "Polyboolean library," Polyboolean library, 2004.

[45] B. Naylor, "Binary space partitioning trees as an alternative representation of polytopes," Computer-Aided Design, vol. 22, pp. 250-252, 1990.

[46] E. Besada-Portas, L. de la Torre, M. Jesus, and B. de Andrés-Toro, "Evolutionary trajectory planner for multiple UAVs in realistic scenarios," IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, pp. 619-634, 2010.

[47] A. A. Heidari, R. A. Abbaspour, and A. R. Jordehi, "Gaussian bare-bones water cycle algorithm for optimal reactive power dispatch in electrical power systems," Applied Soft Computing, vol. 57, pp. 657–671, 2017.

[48] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems," Applied Soft Computing, vol. 30, pp. 58-71, 2015.

[49] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems," Soft Computing, vol. 19, pp. 2587-2603, 2015.

[50] A. A. Heidari, R. A. Abbaspour, and A. R. Jordehi, "An efficient chaotic water cycle algorithm for optimization tasks," Neural Computing and Applications, vol. 28, pp. 57–85, 2017.

[51] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Empirical study of particle swarm optimization," in Evolutionary Computation, 1999. CEC 99.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

Proceedings of the 1999 Congress on, 1999.

[52] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Damangir, "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems," Applied mathematics and computation, vol. 188, pp. 1567-1579, 2007.

[53] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, 2014.

[54] A. A. Heidari and M. R. Delavar, "A Modified Genetic Algorithm for Finding Fuzzy Shortest Paths in Uncertain Networks," Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., vol. XLI-B2, pp. 299-304, 2016.

[55] A. A. Heidari, S. S. Mirvahabi, and S. Homayouni, "An Effective Hybrid Support Vector Regression with Chaos-Embedded Biogeography-Based Optimization Strategy for Prediction of Earthquake-Triggered Slope Deformations," Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., vol. XL-1/W5, pp. 301-305, 2015.

[56] M. A. Ardeh, M. B. Menhaj, E. Esmailian, and H. Zandhessami, "EXPLICA: An Explorative Imperialist Competitive Algorithm based on the notion of Explorers with an expansive retention policy," Applied Soft Computing, vol. 54, pp. 74-92, 2017.

[57] T. Niknam, E. T. Fard, N. Pourjafarian, and A. Rousta, "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 24, pp. 306-317, 2011.

[58] A. A. Heidari and P. Pahlavani, "An efficient modified grey wolf optimizer with Lévy flight for optimization tasks," Applied Soft Computing, vol. 60, pp. 115-134, 2017.

[59] G. Taguchi, Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes, 1986.

[60] X. Wang, S. Wang, and D. Bi, "Dynamic sensor nodes selection strategy for wireless sensor networks," in Communications and Information Technologies, 2007. ISCIT'07. International Symposium on, 2007, pp. 1137-1142.

[61] X. Bai, S. Li, C. Jiang, and Z. Gao, "Coverage optimization in wireless mobile sensor networks," in Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on, 2009, pp. 1-4.

[62] K. Hammond and G. Michaelson, Research directions in parallel functional programming: Springer Science & Business Media, 2012.

[63] J. Derrac, S. García, D. Molina, and F. Herrera, "A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms," Swarm and Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 3-18, 2011.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.1, Spring 2018

A Novel and Efficient Algorithm for three-dimensional Coverage and Deployment of Aerial Robots in Vector Spaces

Ali Asghar Heidari[1], Farid Karimipour[*2]

1- PhD student in GIS, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran
2- Assistant professor, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran

Abstract

The maximum coverage sensor deployment problem has attracted researchers of engineering sciences always as one of the fundamental phases in developing of communication and geospatial infrastructures. In this research, a novel strategy is proposed to tackle the maximum coverage robotic sensor deployment task in 3D vector spaces. For this purpose, first, a geometric algorithm is developed in order to detect the covered areas. The water cycle optimization algorithm is utilized to maximize the sensor coverage. Then, to avoid the problem of premature convergence to local optima and to improve the efficiency and searching potential on the problem, an improved water cycle algorithm with dynamic operations and fewer parameters is designed and developed. With regard to several scenarios with different spatial constraints, the efficiency of the proposed algorithm is compared to other methods based on robustness, running time, best and average of the coverage results, standard deviation, convergence speed, and wilcoxon statistical test. The assessment of the results reveals the superior performance of the proposed approach by success rate of 73% and coverage of 80% in a 3D vector space.

Key words: Aerial robots, Deployment, Coverage, Vector space, Optimization, Water cycle algorithm

Correspondence Address GIS Group, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran.
Tel : +98 912 190 3148.
Email : fkarimipour@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-07-27]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.15]