

## الگوریتمی جدید و کارا برای جایابی و پوشش سه بعدی ربات های پرنده در فضای برداری

علی اصغر حیدری<sup>۱</sup>، فرید کریمی پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سیستم های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران  
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

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

### چکیده

مسئله جایابی حسگرها با بیشینه پوشش همواره به عنوان یکی از مراحل بنیادین توسعه زیرساخت های ارتباطی و مکانی مورد توجه پژوهشگران علوم مهندسی بوده است. در این پژوهش، به ارائه یک رویکرد کاملاً جدید برای جایابی ربات های پرنده با بیشینه پوشش در محیط های سه بعدی برداری پرداخته می شود. بدین منظور، نخست، یک الگوریتم هندسی برای تشخیص نواحی تحت پوشش توسعه داده شده است. به منظور بیشینه سازی میزان پوشش حسگرها نیز از الگوریتم بهینه سازی چرخه آب بهره گیری شده است. سپس، به منظور پیشگیری از همگرایی زودرس به نقاط زیر بهینه و ارتقاء کارایی و توان جستجوی الگوریتم در حل مسئله، به طراحی و توسعه یک الگوریتم بهبود یافته 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 روش ها 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 نشان دهنده عملکرد برتر رویکرد پیشنهادی با نرخ موفقیت ۷۳ درصد و سطح پوشش ۸۰ درصد در یک فضای سه بعدی برداری است.

**کلید واژه ها:** ربات پرنده، جایابی، پوشش، فضای برداری، بهینه سازی، الگوریتم چرخه آب.

\* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، امیرآباد شمالی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تلفن: ۰۹۱۲۱۹۰۳۱۴۸

Email : fkarimipour@ut.ac.ir

## 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<sup>۱</sup> مخصوصاً ربات‌های پرنده<sup>۲</sup> (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<sup>۳</sup> 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

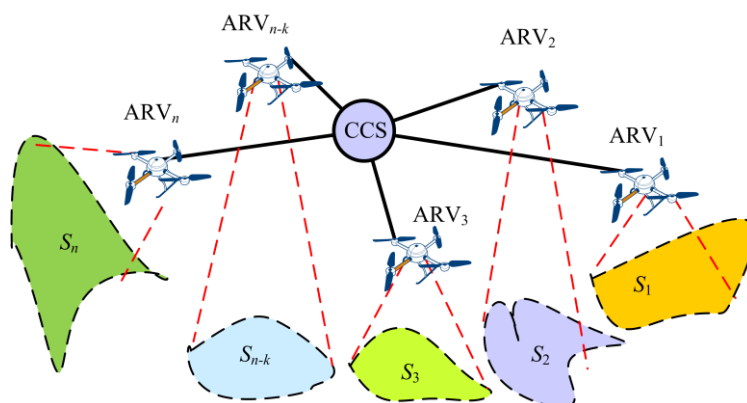
مقرون‌به‌صرفه نیست. به همین دلیل، می‌بایست تعادلی بین میزان پوشش منطقه و تعداد حسگرها در نظر گرفته شود. برای مثال، شکل (۱) مجموعه‌ای از ربات‌های پرنده را در یک سناریوی فرضی پوشش سه‌بعدی نمایش می‌دهد. در این شکل محدوده‌های تحت پوشش  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ، ربات‌های پرنده مجهز به حسگر، ایستگاه کنترل مرکزی<sup>۴</sup> (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، میسورولا و همکاران بر مبنای یک مدل رسترمینا به حل مسئله جایابی ربات‌های پرنده برای پایش چند مقیاسی از گسترش مکانی-زمانی<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> (WSN) طراحی شده است. تفاوت مدل بهینه‌سازی مطرح در این پژوهش با تحقیقات پیشین

<sup>۴</sup> Central control station<sup>۵</sup> Spatio-temporal<sup>۶</sup> Wireless sensor network<sup>۱</sup> Mobile sensors<sup>۲</sup> Aerial robotic vehicle<sup>۳</sup> Coverage

به توسعه روشی برای محاسبه مستقیم مساحت تحت پوشش در محیط های سه بعدی برداری دارد. به بیان دیگر، این تحقیق می کوشد تا مسئله بهینه سازی 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 ربات های پرنده برای استقرار در موقعیت بهینه و محاسبه پوشش بیشینه در یک فضای سه بعدی

با محدودیت های اجرایی و هزینه های عملیات سازگار نیست. در تحقیق دیگری، مسئله با حسگرهای جهت دار متحرک شبکه شده بررسی شده است. در آن روش از دو الگوریتم تکرار مبنای و نمودار ورونوی استفاده شده است [۱۳]. باتوجه به این روش، دو الگوریتم دارای پیچیدگی محاسباتی بالا بوده اند و نتایج محاسبه شده نیز از نظر عملی دارای محدودیت های فراوانی خواهند بود. ژو<sup>۱</sup> و همکاران نیز در یک تحقیق مروری جامع به بررسی مسائل مربوط به پوشش و ارتباط در شبکه های حسگر بی سیم پرداخته اند [۱۴]. بخشی از تحقیقات از الگوریتم های فرااکتشافی برای حل مسئله استفاده کرده اند. در ادامه تحقیقاتی بررسی می شود که در زمینه بهینه سازی پوشش حسگرها و جایابی بهینه با الگوریتم های فرا اکتشافی

در زمینه شبکه های حسگر بی سیم در آن است که در مدل مطرح در این پژوهش، حسگرهای شبکه شده می توانند بر روی ربات ها نصب شده باشند و فضای مسئله از نوع سه بعدی برداری است. در نتیجه، تابع هدف مسئله دشوارتر می شود و شرایط جدید و قیود دینامیکی به مسئله بهینه سازی افزوده خواهد شد. از آنجا که محاسبه پوشش در فضای سه بعدی برداری مدنظر است نه رستری، محاسبه تابع هدف مسئله نیاز

تاکنون این مسئله با مدل سازی 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 بهره گیری کردند [۱۰]. همچنین، در تحقیق دیگری، با استفاده از یک الگوریتم حریصانه، پوشش سراسری شبکه های دوبعدی با گره های 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]. آن ها بیان کردند که با روش توسعه داده شده باید حسگرها را به تعداد بالا و به صورت تصادفی در سراسر فضای سلولی مسئله جایابی کرد. نیاز به جایابی تعداد بالای حسگرها در این

<sup>1</sup> Zhu

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. از این‌روی، یکی از رویکردهای فراگیر، سریع و کارا برای حل مسئله این تحقیق با حسگرهای متحرک، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرااکتشافی تک هدفه به دلیل 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<sup>۱</sup> (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 همه‌جهتی دوبعدی با مدل پوشش احتمالی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۶]. یون و همکاران الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (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 فرااکتشافی 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 مورد پژوهش 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 محدودیت‌های 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)<sup>۳</sup> به‌عنوان مدل توپوگرافی بهره‌گیری شده و همچنین روش محاسبه پوشش با توجه به مدل رقمی 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

<sup>۱</sup> Artificial bee colony

<sup>۲</sup> Genetic algorithm

<sup>۳</sup> Digital surface model

بیشینه پوشش<sup>۳</sup> (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. به منظور 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<sup>۴</sup> (WCA) در مقایسه با بسیاری از الگوریتم‌های رایج فرا اکتشافی در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی، این الگوریتم برای حل مسئله انتخاب شد. بدین منظور، 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<sup>۵</sup> (GWO)، رقابت استعماری<sup>۶</sup> (ICA) و PSO به‌عنوان دیگر الگوریتم‌های کارآمد در تحقیقات مرتبط مقایسه می‌شود.

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 به صورت متحرک باشند و به صورت نقطه‌ای و محدوده‌ای، جهت‌دار و همه جهتی، باینری<sup>۱</sup> و احتمالی<sup>۲</sup> 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 بهینه‌سازی بوده، تاکنون عملکرد نسخه استاندارد آن برای حل مسائل جایابی و پوشش ارزیابی نشده است.

در این تحقیق، به حل مسئله جایابی حسگرها با

<sup>3</sup> Maximum coverage sensor deployment problem

<sup>4</sup> Water cycle optimization algorithm

<sup>5</sup> Grey wolf optimizer

<sup>6</sup> Imperialist competitive algorithm

<sup>1</sup> Binary

<sup>2</sup> Probable

به صورت 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 الگوریتم‌ها

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 به منظور دستیابی به حداکثر مقدار پوشش چگونه محاسبه می‌شود؟

ساختار این پژوهش به این صورت است: در بخش ۲، رویکرد پیشنهادی برای محاسبه پوشش در محیط‌های سه‌بعدی برداری تشریح شده است. در بخش ۳، به تشریح جزئیات، تابع هدف و قیود مسئله طراحی شده بهینه‌سازی 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<sup>۱</sup> تصویر می‌شود. محدوده‌ی زاویه عملکرد حسگر نیز به صورت یک دایره به نام دایره پرسپکتیو<sup>۲</sup> 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.

$$\vec{N} = \text{cross}(\vec{v}_2 - \vec{v}_1, \vec{v}_3 - \vec{v}_2) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این فرمول از ضرب خارجی سه نقطه‌ی نخست

<sup>۱</sup> Perspective plane

<sup>۲</sup> Perspective circle

موقعیت تصویر شده‌ی حسگر بر روی صفحه پرسپکتیو ( $S$ ) هستند، محاسبه می‌شوند. اگر زاویه‌های ایجاد شده بین بردار جهت حسگر و تمامی بردارهای  $\vec{e}_{is}$  کمتر و بیشتر از  $90^\circ$  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  $90^\circ$  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

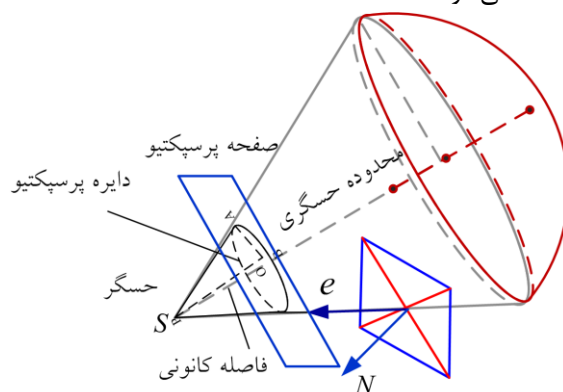
بدین منظور، یک کره با شعاع تشخیص  $R_s$  به‌عنوان محدوده‌ی عملکرد حسگر در نظر گرفته شده (شکل (۴)) و اگر فاصله اقلیدسی تمامی نقاط یک چندضلعی (به‌عنوان یکی از وجوه چندوجهی) با حسگر،  $d_{is}$  بزرگ‌تر از شعاع تشخیص باشند، آن چندضلعی در خارج از محدوده‌ی فاصله عملکرد حسگر است، اما اگر همه‌ی  $d_{is}$  ها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

چندضلعی استفاده شده است. برای محاسبه مؤلفه‌های بردار نرمال  $\vec{N}$  در چندضلعی‌های غیر محدب، می‌توان از فرمول بلین و نیوول<sup>۱</sup> در رابطه (۲) استفاده نمود [۴۱]:

رابطه (۲)

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

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<sup>۲</sup> نیز هست. با توجه به بردار  $\vec{e}$  که جهت آن از چندضلعی به سمت حسگر است و بردار نرمال  $\vec{N}$  (شکل (۲)) را ببینید، اگر  $\vec{e} \cdot \vec{N} < 0$  باشد، چندضلعی پشت به حسگر بوده و حذف می‌شود.



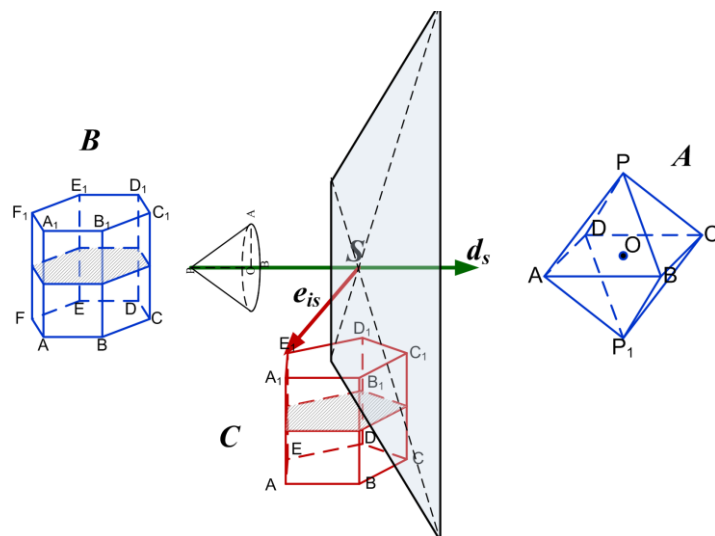
شکل ۲: حذف چندضلعی‌های پشت به حسگر

## ۲-۲- حذف چندضلعی‌های پشت صفحه‌ی پرسپکتیو

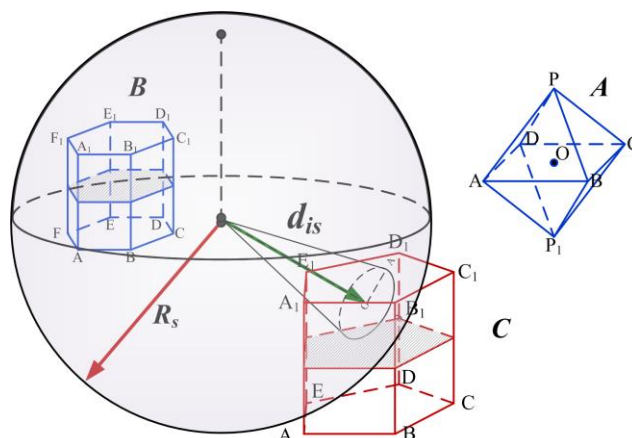
با توجه جهت دار بودن حسگرها، چندضلعی‌هایی واقع در پشت صفحه‌ی پرسپکتیو حذف می‌شوند. با توجه به شکل (۳)، به‌منظور حذف این چندضلعی‌ها، بردارهای  $\vec{e}_{is}$  که جهت آن‌ها از نقاط چندضلعی به سمت

<sup>1</sup> Blinn & Newell

<sup>2</sup> Non planar



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.

توجه به شکل (۵)، طبقه‌بندی چندضلعی‌های

تصویر شده بدین صورت است:

۱- چندضلعی‌هایی کاملاً قابل دید که به‌طور کامل

درون دایره پرسپکتیو قرار گرفته‌اند

(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 دایره پرسپکتیو که

بخشی از آن‌ها قابل دید است (چندضلعی C) و

## ۲-۴- تصویر چندضلعی‌ها بر روی صفحه‌ی

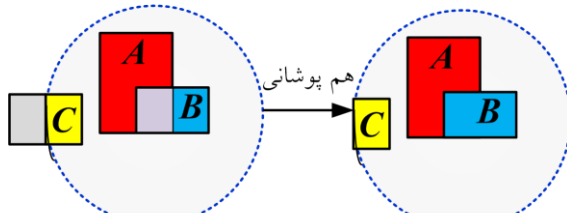
### پرسپکتیو و برهم‌نهی آن‌ها

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<sup>۱</sup> بر روی صفحه‌ی پرسپکتیو تصویر می‌شوند [۴۲].

<sup>۱</sup> Perspective geometry



[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

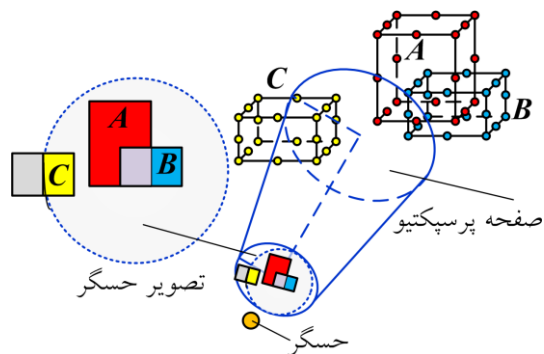
در این مرحله، پس از تعیین چندضلعی‌های قابل‌رؤیت حسگر در فضای سه‌بعدی، مساحت آن‌ها به‌عنوان میزان پوشش حسگر محاسبه می‌شوند. از این‌رو، چندضلعی‌های تصویر شده‌ای که از فرآیند برهم‌نهی خارج شدند و بخش سایه‌ای آن‌ها توسط چندضلعی‌های دیگر حذف شد، در انتها به صفحه‌ی چندضلعی سه‌بعدی خود انتقال می‌یابند (بخش 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 به فضای سه‌بعدی انتقال داده می‌شوند. محاسبه مساحت هر یک از این مثلث‌ها در فضای سه‌بعدی بر اساس رابطه (۳) قابل محاسبه است:

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

که این رابطه بر اساس ضرب خارجی بین دو بردار حاصل می‌شود. برای سنجش عملکرد این مدل، در یک مدل برداری شهری<sup>۵</sup>، حسگری با جهت  $[1, 1, -1]$  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

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



شکل ۵: طبقه‌بندی چندضلعی‌های تصویر شده 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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 کدام یک، عمق دید حسگر نزدیک‌تر است؛ (ب) روش افراز فضای باینری<sup>۳</sup> که به‌وسیله نیلور<sup>۴</sup> در فضای سه‌بعدی توسعه یافته است

<sup>۱</sup> Depth sorting

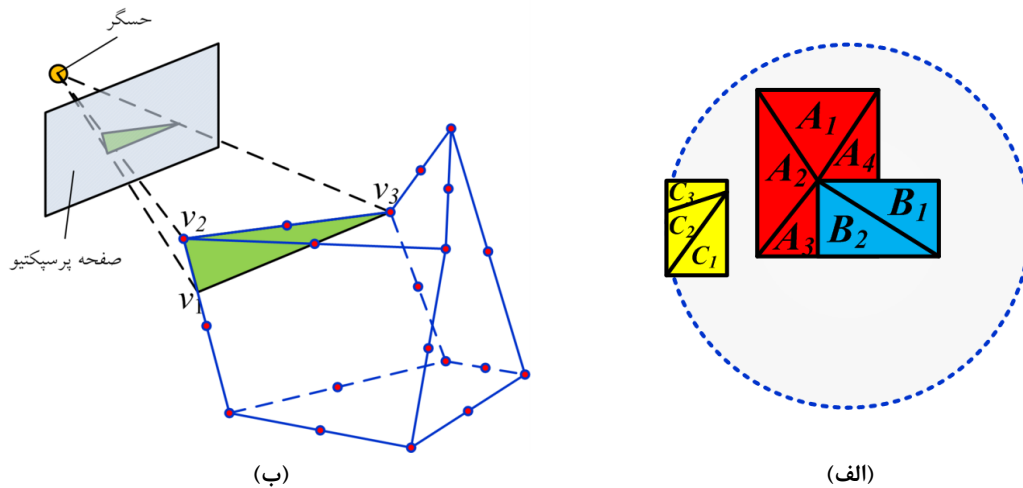
<sup>۲</sup> Leonov

<sup>۳</sup> Binary space partitioning

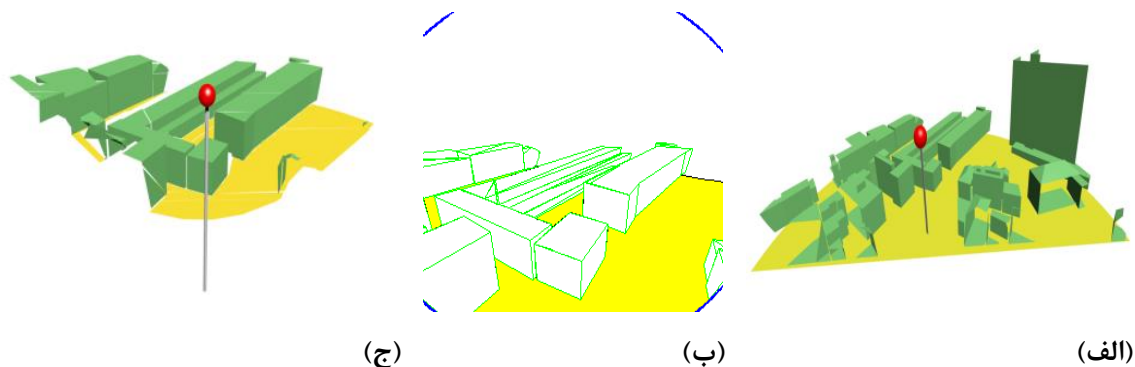
<sup>۴</sup> Naylor

<sup>۵</sup> City GML

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 قرار گرفته‌اند؛ (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

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)  $g_h = h_{safe} - \min(z_i - z_s(x_i, y_i)) \geq 0$ ، 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)

$$g_\phi = \max(\phi_i - \phi_i^{\max}) \geq 0, i = 0, 1, \dots, n-1$$

که در رابطه (۷)،  $\phi_k^{\max}$  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)

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

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 جابجایی 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)

اطلاعات پوششی را به‌صورت مستقیم به واحد پردازنده در ایستگاه هدایت و کنترل ارسال می‌نماید. از این‌روی، 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:

$$P_\alpha = 0.5 \times \omega \times [\cos(\alpha - \theta) + 1] \quad \text{رابطه (۴)}$$

که پارامتر  $\omega$  از پارامترهای فیزیکی حسگر است. زاویه  $\theta$  برابر با زاویه عملکرد حسگر و  $\alpha$  برابر با زاویه‌ای است که بردار حسگر به هدف با بردار جهت آن می‌سازد [۳۹]. با کاهش  $\omega$  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)

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^m S_t - \sum_{i=1}^n S_{\Delta,i}$$

$$\text{subject to } g_h, g_\phi \geq 0,$$

$$H_{AZ}, H_{PZ} = 0$$

که  $n$  تعداد کل مثلث‌های قابل تشخیص 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

هر رود تخصیص می‌یابد. نحوه جاری شدن شریان‌ها به سمت رودها و دریا و همچنین جاری شدن رودها به سمت دریاها موجب حرکت پاسخ‌های نامزد مسئله به سمت بهینه سراسری می‌گردد. در فرآیند جستجوی نواحی جدید به وسیله شریان‌ها (شاخه‌های آبی)، بر مبنای یک شرایط از پیش تعیین شده 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 هنگامی که الگوریتم به یک قید از پیش تعیین شده 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  $d_{max}$  به منظور تشکیل جمعیت اولیه پاسخ‌های الگوریتم. جمعیت اولیه شامل مجموعه‌ای از  $N_{pop}$  بردار اولیه است که هر بردار آن شامل پارامترهای موقعیت و جهت هر حسگر باشد.

**گام ۲:** تشکیل جمعیت اولیه به صورت تصادفی (وضعیت‌های 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 به عنوان رود و شریان‌ها در رابطه (۱۰ و ۱۱) متمایز می‌شوند.

باعث افزایش قطعیت ردیابی منطقه می‌شود و همچنین با از کار افتادن 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 بهینه‌سازی 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. از این رو، راه حل‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری بر اساس این مقدار به روز می‌شوند.

رابطه (۹)

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^m S_t - \sum_{i=1}^k S_{\Delta,i} / \sum_{i=1}^n S_{\Delta,i}$$

$$\text{subject to } g_h, g_\phi \geq 0,$$

$$H_{AZ}, H_{PZ} = 0$$

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در حل مسئله MCSDP

الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب یک روش بهینه‌سازی فیزیک مبنای است که در سال ۲۰۱۲ به منظور 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<sup>۱</sup> 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) به عنوان دریا انتخاب شده و سایر پاسخ‌ها برحسب برانزدگی به عنوان رودها و شریان‌ها انتخاب می‌شوند [۴۸]. سپس، تعدادی شریان به

<sup>1</sup> Stream

رابطه (۱۰)

$$\begin{bmatrix} X_{Sea} \\ X_{River_1} \\ \vdots \\ X_{Stream_{N_{sr}+1}} \\ \vdots \\ X_{Stream_{N_{pop}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 & \dots & X_N^1 & Y_1^1 & \dots & Y_N^1 & H_1^1 & \dots & H_N^1 & I_1^1 & J_1^1 & K_1^1 & \dots & I_N^1 & J_N^1 & K_N^1 \\ X_1^2 & \dots & X_N^2 & Y_1^2 & \dots & Y_N^2 & H_1^2 & \dots & H_N^2 & I_1^2 & J_1^2 & K_1^2 & \dots & I_N^2 & J_N^2 & K_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_1^N & \dots & X_N^N & Y_1^N & \dots & Y_N^N & H_1^N & \dots & H_N^N & I_1^N & J_1^N & K_1^N & \dots & I_N^N & J_N^N & K_N^N \end{bmatrix},$$

گام ۴: محاسبه شدت جریان هر رود و دریا (وضعیت

بهترین حسگر با بیشترین سطح تحت پوشش)

بر اساس رابطه (۱۴ و ۱۵):

$$C_n = Cost_n - Cost_{N_{sr}+1}, \quad n=1,2,\dots,N_{sr} \quad (14)$$

رابطه (۱۵)

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

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:

$$N_{sr} = 1 + \text{تعداد رودها} \quad (11)$$

$$N_{streams} = N_{pop} - N_{sr}, \quad (12)$$

که در این رابطه شریان‌ها، رودها و دریای اولیه آرایه‌هایی  $(1 \times N)$ -بعدی 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)

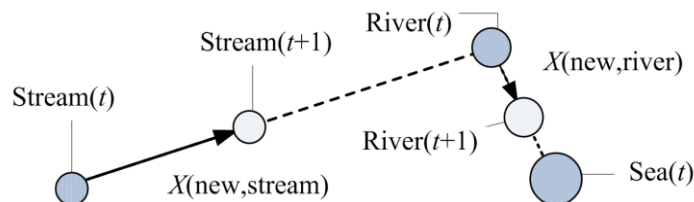
$$C_i = Cost_i = \sum_{t=1}^m S_t - \sum_{i=1}^k S_{\Delta,i} / \sum_{i=1}^n S_{\Delta,i} \\ = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i), \quad i=1,2,3,\dots,N_{pop},$$

$$X_{Stream}(t+1) = X_{Stream}(t) + r_1 \otimes K \otimes (X_{River}(t) - X_{Stream}(t)), \quad (16)$$

$$X_{Stream}(t+1) = X_{Stream}(t) + r_2 \otimes K \otimes (X_{Sea}(t) - X_{Stream}(t)), \quad (17)$$

جهات مختلف به سمت نقاط بهتر حرکت کنند. نحوه حرکت جریانات در شکل (۹) نیز قابل مشاهده است.

که در این رابطه، ضرب عبارت‌ها از نوع عضو در عضو است،  $r_1$  و  $r_2$  دو متغیر تصادفی در بازه (۰، ۱) هستند و  $K$  یک ثابت است که توسط طراح الگوریتم توصیه شده در بازه (۱، ۲) باشد تا پاسخ‌های نامزد قادر باشند از



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

می‌شوند:

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

$$X_{River}(t+1) = X_{River}(t) + r_3 \otimes K \otimes (X_{Sea}(t) - X_{River}(t)), \quad (18)$$

(پوشش بیشتری) داشته باشد.

گام ۷: جایگزینی رود با شریانی که هزینه کمتری

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

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

**گام ۱۰:** پس از بررسی شرط تبخیر، بارش به صورت رابطه (۱۹) پاسخ‌های جدید (وضعیت‌های نامزد برای حسگرها) را در محیط‌های نامقید تولید می‌کند:

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}}(t+1) = Lb + r_5 \otimes (Ub - Lb), \quad (19)$$

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 به صورت رابطه (۲۰) تغییر می‌کند:

رابطه (۲۰)

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}}(t+1) = X_{\text{sea}} + \mu^{0.5} \otimes \text{randn}(1, N_{\text{var}}),$$

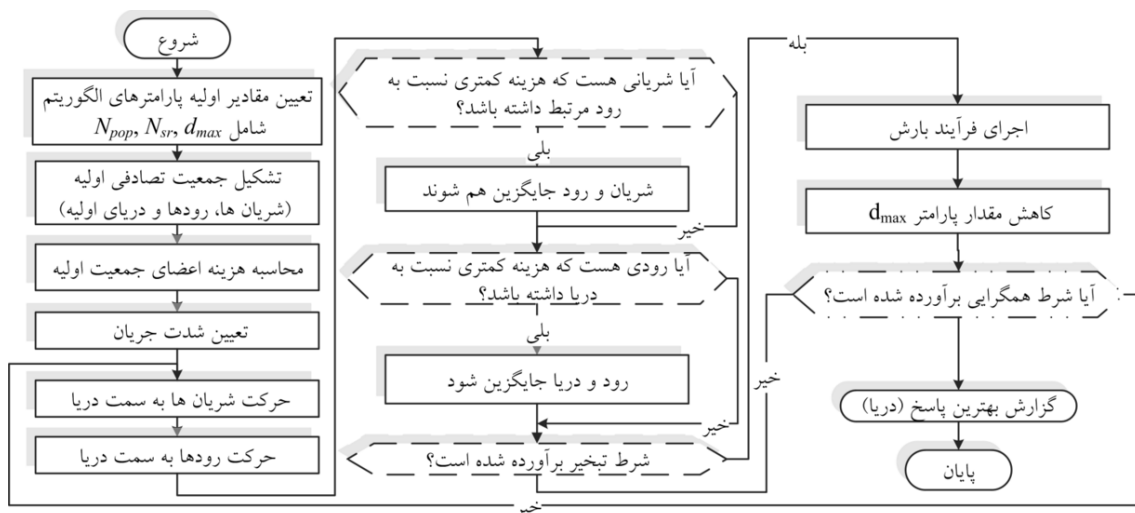
در رابطه بالا ضریب  $\mu$  مشابه مفهوم واریانس، شعاع جستجوی اطراف پاسخ‌های بهینه (وضعیت حسگرهای برتر) را کنترل می‌کند.

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

$$d_{\text{max}}(t+1) = d_{\text{max}}(t) - d_{\text{max}}(t)/t_{\text{max}}, \quad (21)$$

**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 به کارگیری این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی، ابتدا پس از تعیین پارامترهای اولیه الگوریتم، متغیرهای مسئله MCSDP به صورت 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، ۱۷ و ۱۸) به سمت پاسخ‌های بهتر (وضعیت‌های ممکن حسگرهای با پوشش بیشتر) حرکت می‌دهد. برای مشاهده مثال‌ها و مطالعه بیشتر در مورد نحوه به کارگیری این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی به مرجع [۴۰] مراجعه شود.



شکل ۱۰: مراحل اجرای الگوریتم چرخه آب

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  $K$ )، به صورت دینامیکی و بر مبنای یک معادله نزولی در مسیر پیشرفت الگوریتم کاهش یابد [۵۲]. این ضرایب کاهش 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 پراکنده سازی 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، جریان‌ها و رودها بر اساس معادلات دینامیکی در رابطه (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) به سمت دریا حرکت می‌کنند:

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

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

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

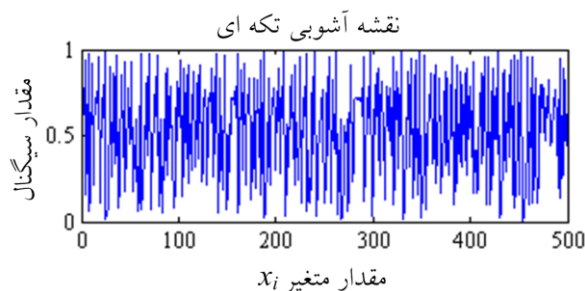
که در این روابط،  $K_f$  و  $K_i$  مقادیر نهایی و ابتدایی عملگر خطی کاهش طراحی شده است که مقادیر آن همچون الگوریتم اصلی در بازه (۱،۲) قرار دارند. نحوه تعریف این متغیرها در مسئله MCSDP نیز مشابه رابطه (۱۰)

#### ۴-۱- الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته چرخه آب

در الگوریتم استاندارد چرخه آب، تنها یک راهکار برون رفت از نقاط زیر بهینه در نظر گرفته شده و آن این است که برای جریان‌هایی 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 (به صورت دینامیکی) می‌تواند عملکرد روش را متناسب با میزان پیشرفت الگوریتم بهبود دهد [۵۱]. در این صورت، در مواجهه با مسائل پیچیده‌تر نیازی به تحلیل حساسیت الگوریتم نسبت به پارامترهای اولیه نیست؛ زیرا این پارامترها به صورت 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 جریان‌ها به رودها و دریاها و همچنین حرکت رودها به سمت دریاها، بار اصلی فرآیند متمرکز سازی را بر عهده دارند

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

$$K(t) = (K_i + (K_f - K_i) \times (t/t_{\max})) \times UF(t), \quad \text{رابطه (۲۵)}$$



شکل ۱۱: رفتار سیگنال تکه‌ای

نحوه اجرای شبه کد الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۲) قابل مشاهده 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 پاسخ‌های بهینه، بهترین مقادیر پوشش، میانگین مقادیر پوشش، و انحراف از معیار (دقت) مقادیر پوشش ربات‌ها از محیط با الگوریتم‌های جمعیت مبنای ژنتیک GA، GWO [۵۳]، ICA و PSO که به عنوان الگوریتم‌های مستحکم در تحقیقات مرتبط شناخته شده‌اند مورد بررسی مقایسه‌ای 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 الگوریتم‌ها و نوع آزمون آماری به کار 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.

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  $d_{max}$  به صورت 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: در صورتی که نامساوی  $|X_{sea} - X_{stream}^i| < UF(t)$  برای  $i = 1, 2, 3, \dots, NS_n$  برقرار باشد، آنگاه فرآیند دینامیکی بارش اجرا می‌گردد. هم‌چنین رابطه (۲۶ و ۲۷) نیز به صورت دینامیکی تغییر خواهد کرد.

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

رابطه (۲۷) —————

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

که در این رابطه،  $\mu_i$  و  $\mu_f$  بیانگر مقادیر انتهایی و ابتدایی ضریب موردنظر هستند. این ضریب به صورت خطی با شروع از  $0/8$  به  $0/1$  کاهش می‌یابد. در مولد  $UF$ ، نقشه آشوبی تکه‌ای<sup>۱</sup> به کمک معادله بازگشتی در رابطه (۲۸) و در هر تکرار تولید می‌شود:

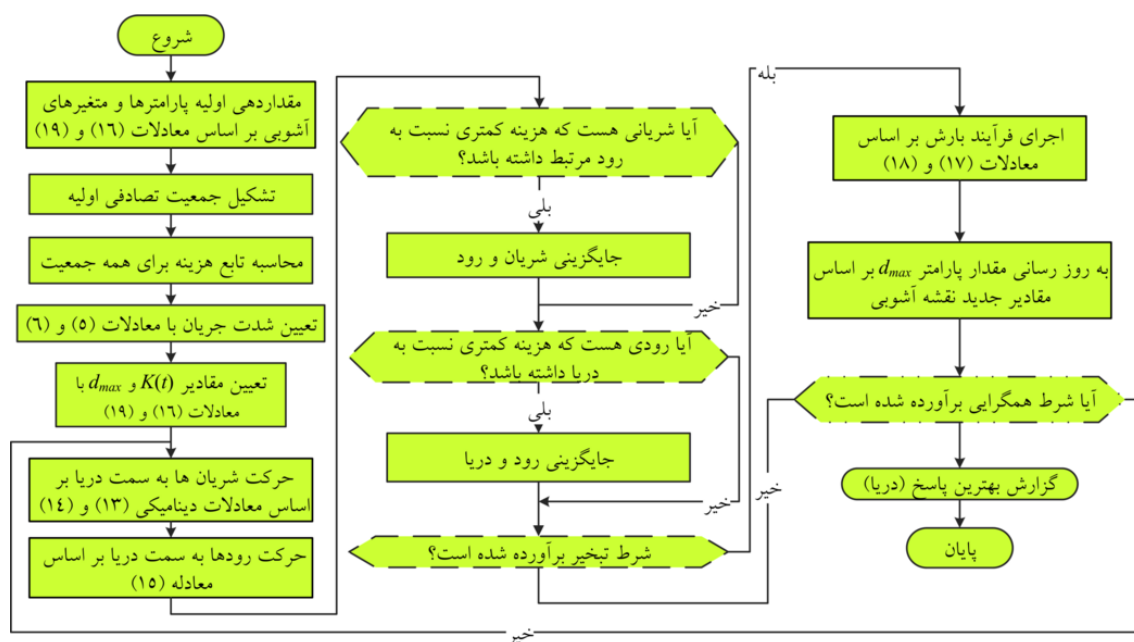
رابطه (۲۸)

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

که در این رابطه،  $x_k$  متغیری در بازه واحد و  $P$  پارامتری کنترلی مثبتی است که برابر  $0.35$  انتخاب می‌شود. شکل (۱۱) رفتار این سیگنال را در طی  $500$  تکرار و با شروع از مقدار اولیه  $0.7$  نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Piecewise map





شکل ۱۲: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی چرخه آب

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 به منظور 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 کارآمدگی و تجربه کافی نیاز دارد، از این‌رو،

به منظور انجام این ارزیابی‌ها، پارامترها و داده‌های ورودی مسئله MCSDP بدین صورت 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  $40 \text{ km/h}$ ،  $n_{\max}$  برابر ۶، شتاب گرانش  $g$  برابر  $9.81 \text{ m/s}^2$ ، 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  $\alpha$  و  $\beta$ ، به ترتیب برابر ۱۰ و ۱ برای عملکرد احتمالی فاصله و  $\omega$  برابر ۳

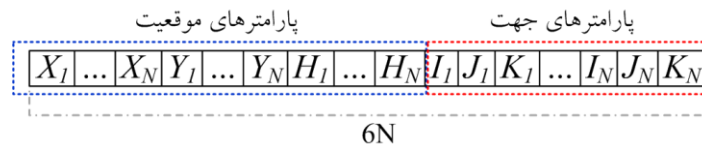
اولیه پارامترها، میانگین ۵۰ اجرای مستقل به عنوان نتیجه نهایی هر الگوریتم در نظر گرفته شده است. جمعیت اولیه همه الگوریتم ها برابر ۵۰ بوده است. تعداد تکرارهای داخلی همه الگوریتم ها نیز برابر ۵۰۰ تکرار بوده است.

برای نحوه کدبندی الگوریتم GA در حل مسئله، مطابق شکل (۱۳)، موقعیت و جهت حسگرها به عنوان متغیرهای کروموزومی در نظر گرفته شده اند. ونگ<sup>۲</sup> و همکاران، از الگوریتم GA به منظور انتخاب حسگرهای متحرک در مسئله MCSDP از الگوریتم GA بهره گیری کردند و موقعیت گره های حسگری را به عنوان 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 الگوریتم ها نیز به دلیل مشابهت ساختاری، جمعیت اولیه به عنوان کشور، گرگ، یا یک ذره مطابق این مدل ساخته شده و در مراحل بعد مطابق با عملگرهای هر الگوریتم تا زمان همگرایی الگوریتم ها مورد اصلاح و بهبود قرار می گیرد [۶۱].

شرط پایان تمامی الگوریتم ها بر اساس به کارگیری همزمان چندین معیار لحاظ شده است. در شرایطی که سرعت بهبود بهترین راه حل یافت شده در تکرارهای پیاپی کمتر از یک هزارم باشد، یا تعداد تکرارها به بیشینه مجاز تکرارها برسد و یا اختلاف بهترین و بدترین پاسخ های یافت شده کمتر از یک هزارم باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد. بر این اساس، شبه کد شرط ترکیبی توقف ترکیبی می تواند به صورت شکل (۱۴) طراحی و برای ارزیابی روش های پیاده سازی شده به کار گرفته شود.

با بهره گیری از تحلیل تاگوچی<sup>۱</sup> [۵۹]، مناسب ترین مقادیر آغازین برای پارامترهای الگوریتم ها انتخاب شده است که به علت محدودیت در صفحات از ذکر جدول های آن خودداری شده است. در پایان تحلیل تاگوچی، بهترین تنظیمات الگوریتم ها در حل مسئله یافت شد. در الگوریتم ژنتیک، عملگر انتخاب مسابقه ای، جمعیت اولیه ۵۰ (تعداد بردارهای وضعیت نامزد برای ربات ها 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 ربات ها، ضریب اینرسی برابر ۱ و ضرایب شتاب به ترتیب برای ضرایب شخصی و اجتماعی جمعیت ربات ها برابر با ۱ و ۲ مقداردهی شدند. همچنین به منظور جستجو در محدوده ی 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 ربات ها با توجه به میزان منطقه تحت پوشش از بین همه بردارهای وضعیت اولیه)، ضریب همسان سازی بردارهای وضعیت ۲، ضریب میانگین هزینه کلونی بردارهای اولیه ربات ها بر اساس میزان پوشش آن ها ۰/۱، نرخ انقلاب (میزان جهش اعمال شده در متغیرهای بردارهای اولیه ربات ها) ۰/۲۵، ضریب زاویه همسان سازی بردارهای ربات ها 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 ربات ها<sup>۵</sup> ۱/۱۰، تعداد شریان ها (بهترین پاسخ های زیربینه 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. با این حال، برای کاهش وابستگی هرچه بیشتر الگوریتم ها نسبت به نحوه انتخاب و مقدار

<sup>2</sup> Wang<sup>1</sup> Taguchi



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: شبه‌کد شرط پایان الگوریتم‌ها

پیاپی‌سازی‌های متوالی و مستقل است. بدین منظور، نرخ موفقیت هر الگوریتم در توانایی جستجو و اکتشاف پاسخ‌های مسئله بر اساس رابطه (۲۹) محاسبه می‌گردد:

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

که در این رابطه،  $\Xi_{best}$  بیانگر تعداد اجراهای موفق الگوریتم موردبررسی و  $\Theta_{total}$  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)

$$\sum_{e=1}^{Dim} (P_e^{gb} - P_e^B)^2 \leq (L_{max} - L_{min}) \times 10^{-1},$$
 در رابطه (۲۶)، بهترین پاسخ سراسری یافت شده در تکرار جاری،  $P_e^B$  بهترین پاسخ در مجموع همه شبیه‌سازی‌ها،  $Dim$  بعد مسئله،  $L_{min}$  و  $L_{max}$  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.

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<sup>۱</sup> [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 <sup>۲</sup>                              |
| الگوریتم‌ها           | GA, PSO, GWO, ICA, WCA, MWCA                             |

یکی از معیارهای استاندارد در ارزیابی میزان کارایی الگوریتم‌ها از منظر استحکام<sup>۳</sup> محاسباتی، مقایسه تعداد دفعات اجراهای موفق الگوریتم در مجموعه‌ای از

<sup>۱</sup> Haskell

<sup>۲</sup> Hugs 98 : <http://haskell.org/hugs>

<sup>۳</sup> Robustness

معیارهای بیان شده در سطرهای آن جدول است. در این جدول‌ها، رتبه هر الگوریتم با توجه به معیار همان سطر به صورت اندیس مقادیر گزارش شده است و در نتایج آزمون آماری ویلکاکسون، / نشان‌دهنده طرف اول مقایسه‌ها، + نشان‌دهنده برتری آماری،  $\cong$  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 ششم به دلیل بهبود رسیده است. برتری نتایج به دست آمده به دلیل بهبود توان الگوریتم در پراکنده سازی پاسخ‌های جدید در فضای جستجو به کمک عملگرهای ترکیبی جدید است. به موجب اصلاحات به عمل آمده در عملگر متنوع سازی، روش جدید با نرخ بالای متنوع سازی به جستجوی نواحی پرداخته و با تکرارهای بیشتر با موفقیت به سمت متمرکز سازی پاسخ‌ها پیش رفته است.

به منظور تحلیل و مقایسه برتری آماری نتایج الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های مورد مقایسه، آزمون آماری ویلکاکسون<sup>۱</sup> در سطح اطمینان ۹۵ درصد اجرا شده است. این آزمون آماری ناپارامتریک به منظور بررسی همانندی دو نمونه وابسته با مقیاس رتبه‌ای استفاده می‌شود. در این آزمون آماری، اندازه اختلاف رتبه‌ها در نظر گرفته می‌شود. از این رو، می‌توان جواب‌های متفاوتی برای متغیرها مشاهده کرد. این آزمون در نهایت به این سوال پاسخ می‌دهد: آیا دو نمونه مورد بررسی نشان‌دهنده دو جمعیت متفاوت هستند؟ خواننده می‌تواند 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.

به منظور 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 به دست آمده به همراه نتایج آزمون آماری، زمان اجرا و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در جدول‌های (۲، ۳، ۴، ۵ و ۶) قابل مشاهده است. در این جدول‌ها، مقادیر هر ستون بیانگر عملکرد الگوریتم مطرح در آن ستون بر اساس

<sup>1</sup> Wilcoxon signed ranks test

جدول ۲: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به‌دست آمده 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 | ۱,۳۳۶   | ۳,۱۲۷   | ۳,۳۳۶   | ۲,۲۲۲   | ۲,۸۵۵   | ۱,۹۸۵   |
|       | 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 به‌دست آمده 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 | ۱,۴۱۸   | ۳,۱۰۸   | ۳,۱۴۹   | ۲,۰۰۲   | ۲,۹۲۳   | ۱,۱۷۳   |
|       | زمان (ثانیه)    | ۱۳۳,۱۵۱ | ۱۳۸,۸۵۲ | ۱۶۱,۹۲۴ | ۱۸۴,۵۲۶ | ۱۶۸,۶۶۵ | ۱۴۲,۷۴۳ |
|       | نرخ موفقیت      | ۶۲۱     | ۳۸۶     | ۵۳۳     | ۳۹۴     | ۳۹۴     | ۶۲۱     |
|       | آزمون آماری     | /       | +       | +       | +       | +       | //      |

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.

با توجه به مقادیر جدول (۳)، بیشترین پوشش به‌دست آمده 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، با این حال، 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

جدول ۴: بهترین، میانگین و انحراف از معیار مقادیر پوشش به دست آمده 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          | ۷۳ <sub>۱</sub>     | ۶۱ <sub>۳</sub>     | ۴۶ <sub>۵</sub>     | ۴۱ <sub>۶</sub>     | ۵۱ <sub>۴</sub>     | ۶۶ <sub>۲</sub>     |
|       | میانگین         | ۶۷ <sub>۱</sub>     | ۵۴ <sub>۳</sub>     | ۴۲ <sub>۵</sub>     | ۳۹ <sub>۶</sub>     | ۴۸ <sub>۴</sub>     | ۶۳ <sub>۲</sub>     |
|       | انحراف از معیار | ۱/۰۸۵ <sub>۱</sub>  | ۳/۹۳۳ <sub>۶</sub>  | ۳/۴۰۶ <sub>۵</sub>  | ۲/۳۰۳ <sub>۲</sub>  | ۳/۰۲۸ <sub>۴</sub>  | ۲/۴۳۰ <sub>۳</sub>  |
|       | زمان (ثانیه)    | ۱۱۴/۱۷ <sub>۱</sub> | ۱۳۱/۸۱ <sub>۲</sub> | ۱۴۹/۰۵ <sub>۴</sub> | ۱۷۰/۷۶ <sub>۶</sub> | ۱۵۸/۳۱ <sub>۵</sub> | ۱۳۴/۹۳ <sub>۳</sub> |
|       | نرخ موفقیت      | ۶۷ <sub>۱</sub>     | ۴۲ <sub>۶</sub>     | ۵۶ <sub>۳</sub>     | ۴۷ <sub>۴</sub>     | ۴۶ <sub>۵</sub>     | ۵۸ <sub>۲</sub>     |
|       | 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 به دست آمده در مجموع ۵۰ اجرا و زمان محاسبات و نرخ موفقیت الگوریتم‌ها در حل مسئله نمونه ۴ به همراه نتایج آزمون آماری و رتبه الگوریتم‌ها

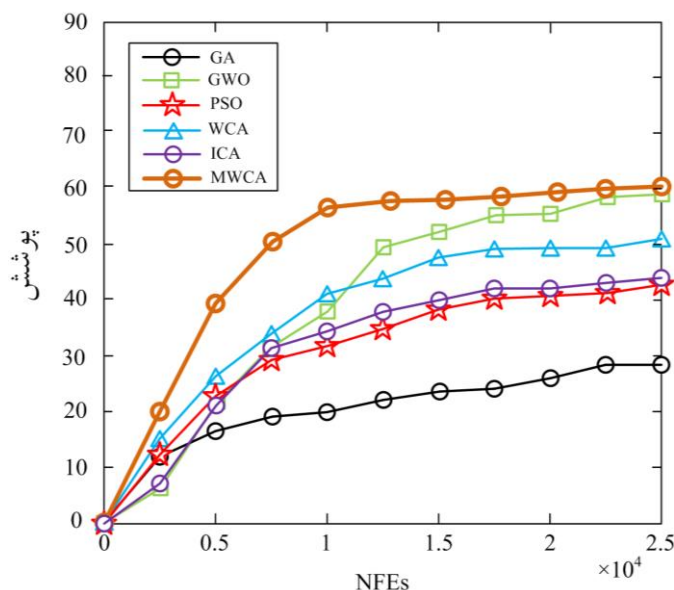
| مسئله | معیار پوشش      | MWCA                | WCA                 | ICA                 | GA                  | PSO                 | GWO                 |
|-------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ۴     | بهترین          | ۸۰ <sub>۱</sub>     | ۶۲ <sub>۳</sub>     | ۵۰ <sub>۵</sub>     | ۴۶ <sub>۶</sub>     | ۵۷ <sub>۴</sub>     | ۶۹ <sub>۲</sub>     |
|       | میانگین         | ۷۱ <sub>۱</sub>     | ۶۱ <sub>۳</sub>     | ۴۴ <sub>۵</sub>     | ۴۲ <sub>۶</sub>     | ۴۹ <sub>۴</sub>     | ۶۳ <sub>۲</sub>     |
|       | انحراف از معیار | ۱/۰۱۲ <sub>۱</sub>  | ۳/۸۷۳ <sub>۵</sub>  | ۳/۳۹۲ <sub>۶</sub>  | ۲/۴۹۷ <sub>۴</sub>  | ۲/۳۵۹ <sub>۳</sub>  | ۱/۱۲۸ <sub>۲</sub>  |
|       | زمان            | ۱۱۱/۲۸ <sub>۱</sub> | ۱۲۹/۴۶ <sub>۳</sub> | ۱۴۱/۹۳ <sub>۴</sub> | ۱۶۸/۰۸ <sub>۶</sub> | ۱۴۹/۱۳ <sub>۵</sub> | ۱۲۸/۱۲ <sub>۲</sub> |
|       | نرخ موفقیت      | ۷۳ <sub>۱</sub>     | ۴۴ <sub>۶</sub>     | ۵۹ <sub>۳</sub>     | ۴۷ <sub>۵</sub>     | ۵۱ <sub>۴</sub>     | ۶۱ <sub>۲</sub>     |
|       | 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 به دست بیاورد و بر این اساس مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های GWO، WCA، PSO، ICA و GA در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند. 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

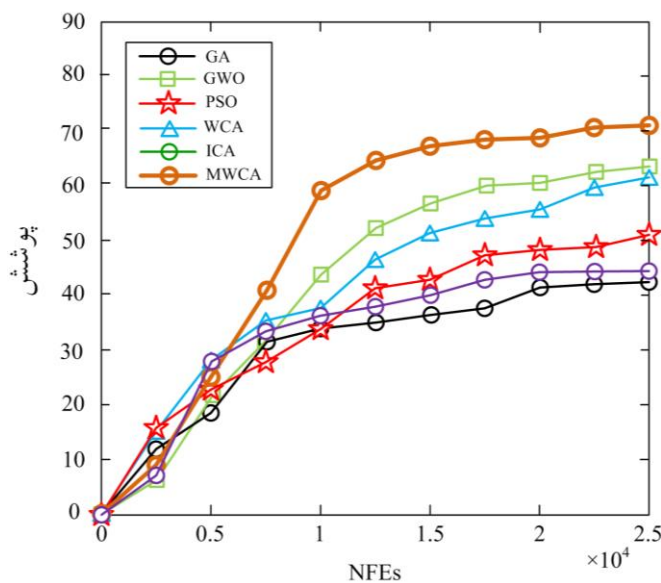
به علت بهبود حد توازن بین متنوع سازی و متمرکزسازی در جریان جستجو و جایابی با الگوریتم پیشنهادی باشد. الگوریتم پیشنهادی از منظر برتری آماری مشابه الگوریتم استاندارد است، اما از منظر استحکام جایابی، طراحی عملگرهای تعدیل شده در الگوریتم جدید منجر به افزایش ۲۹ درصدی در نرخ موفقیت الگوریتم اولیه شده است. 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 بهبود یافته است. به‌طور مثال، حداکثر پوشش در مسئله (۴) به میزان

دینامیکی و متناسب با پیشرفت الگوریتم در فضای مسئله تعدیل می گردد. برای تحلیل و مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم ها، نمودار همگرایی آن به همراه روش های مختلف برای مقادیر میانگین پوشش در سناریوهای چهارگانه در شکل (۱۵) منعکس گردیده است.

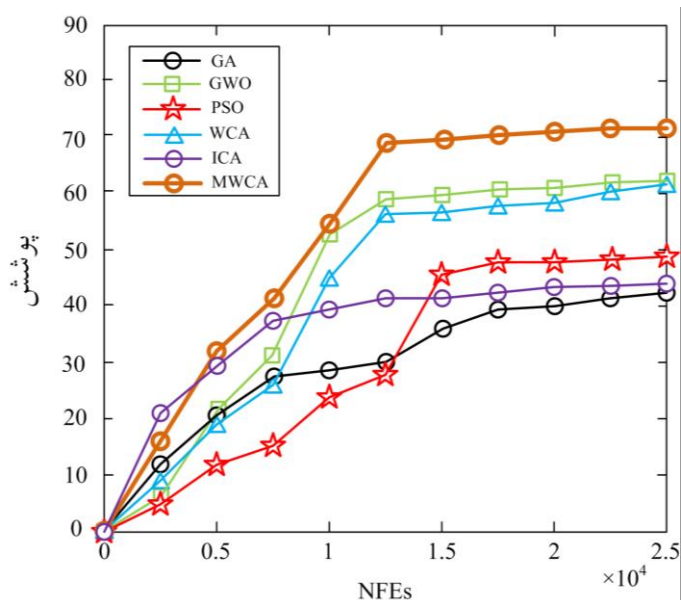
۷٪ نسبت به مسئله (۳)، ۱۶٪ نسبت به مسئله (۲) و ۹٪ نسبت به مسئله (۱) دچار افزایش شده است. عملکرد و نتایج نزدیک الگوریتم های MWCA و GWO در حل مسائل چهارگانه به آن دلیل است که در الگوریتم GWO نیز تعادل رویکردهای متنوع سازی و متمرکز سازی در جستجوی مناطق مستعد به صورت



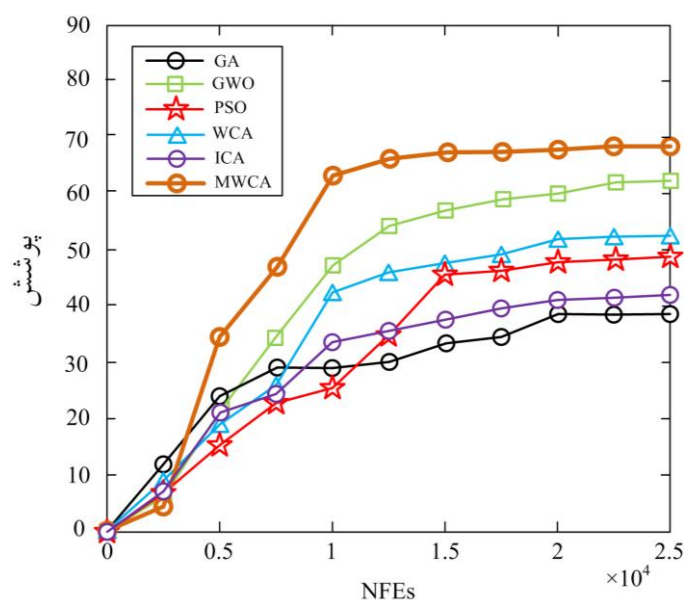
(ب) رفتار همگرایی در مسئله (۲)



(الف) رفتار همگرایی در مسئله (۱)



(د) رفتار همگرایی در مسئله (۴)



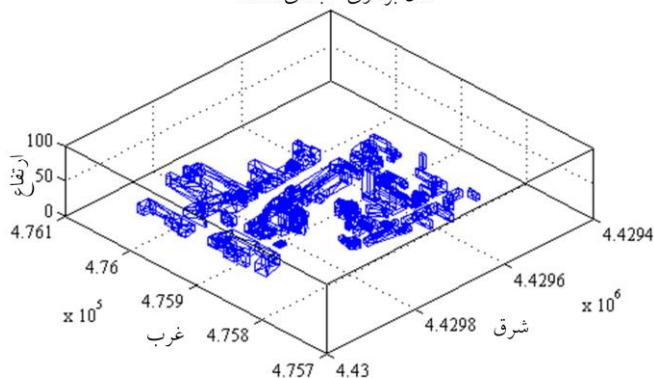
(ج) رفتار همگرایی در مسئله (۳)

شکل ۱۵: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم ها در حل سناریوهای مورد آزمایش

نرخ همگرایی و دقت روش‌ها بوده که در قسمت (ب) شکل (۱۵) قابل مشاهده 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 به کارگیری قیود در مسئله موجب تحمیل بار محاسباتی اضافی به همه الگوریتم‌ها می‌گردد.

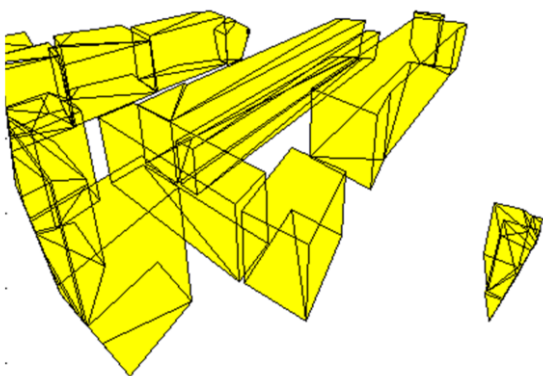
در انتها، بخشی از نتایج محاسبه پوشش سه‌بعدی در شکل (۱۶) نمایش داده شده که برای نمایش واضح سطح جزئیات قابل محاسبه بر مبنای رویکرد جدید و الگوریتم پیشنهادی، برای تراکم ۳ حسگر به دست آمده است.

مدل برداری ۳ بعدی منطقه



(ب) سراسر مدل برداری منطقه

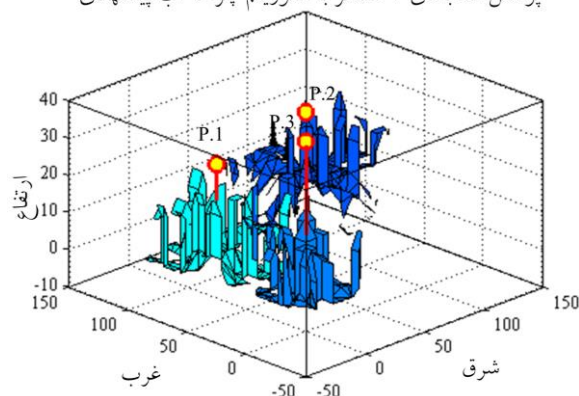
دید پرسپکتیو پلی‌گون‌های قابل دید توسط حسگر



(د) بهترین دید پرسپکتیو از داخل حسگر

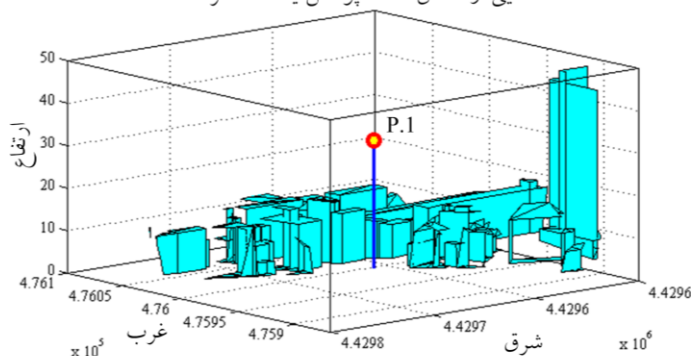
با توجه به منحنی‌های همگرایی در شکل (۱۵)، الگوریتم MWCA با نرخ بهتری نسبت به WCA و سایر روش‌ها همگرا شده و به پوشش بیشتری دست یافته است. همگرایی روش GWO به دلیل ماهیت جستجوی دینامیکی آن به روش MWCA نزدیک بوده و الگوریتم GA نیز با کمترین سرعت همگرا شده است. دلیل این بهبود می‌تواند بهتر بودن قدرت پراکنده‌سازی الگوریتم MWCA در سراسر تکرارها و انتقال به موقع روند جستجوی آن از پراکنده‌سازی به سمت متمرکزسازی پاسخ‌ها باشد. با توجه به نرخ‌های همگرایی مشخص می‌شود که به کارگیری محدودیت‌های مکانی در مسئله (۲) موجب افت بیشتر

پوشش سه بعدی ۳ حسگر با الگوریتم چرخه آب پیشنهادی



(الف) پوشش بیشینه و جایابی بهینه برای ۳ حسگر

نمایی از مناطق تحت پوشش یک حسگر



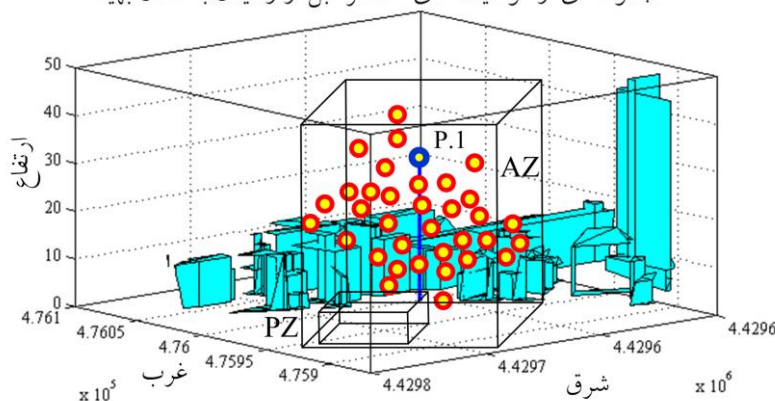
(ج) نمایی از حداکثر پوشش حسگر اول به مساحت ۵.۳۲۴۲۷

شکل ۱۶: عملکرد رویکرد پیشنهادی (الف): نتایج بیشترین پوشش ممکن، (ب): مدل برداری منطقه، (ج): بخشی از منطقه تحت پوشش، (د) دید حسگر



با توجه به داده‌ها و مدل‌های محیطی واقع‌گرایانه به کار 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.

مجموعه ای از موقعیت‌های حسگر قبل از رسیدن به مکان بهینه



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

ویلکاکسون مورد بررسی مقایسه‌ای واقع گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، 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 به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات تخمین جایابی و پوشش حسگرهای رباتیک و توسعه زیرساخت‌های نرم‌افزاری لازم بهره‌گیری نمود. در تحقیقات آتی می‌توان به ارزیابی عملکرد

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 محیط‌های برداری قادر به محاسبه نتایج قابل قبولی برای ربات‌ها بوده است. با توجه به مشاهدات و نتایج این تحقیق، رویکرد پیشنهادی محاسبه پوشش برداری می‌تواند با عملکرد کارایی به محاسبه و تعیین پوشش حسگرها در مدل‌های سه بعدی برداری بپردازد. این مدل‌ها از دقت هندسی بالایی نسبت به مدل‌های رستری برخوردارند و

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، به ارائه یک رویکرد جدید و کارا برای حل مسئله MCSDP با حسگرهای رباتیک در محیط‌های سه بعدی برداری پرداخته شد. بدین منظور، 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 به صورت 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

عملکرد الگوریتم‌ها برای تخمین پوشش در محیط‌های رستری می‌تواند خود موضوع تحقیقات دیگری باشد.

الگوریتم پیشنهادی در رویارویی با مسائل دیگر مهندسی پرداخت. در این تحقیق، از مدل‌های برداری به علت دقت بالا بهره‌گیری شد، با این حال، ارزیابی

## 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. Miljevic, 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. Hnaïen, 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.

- 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. Karıcı, "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 *Proceedings 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,"

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. Transaction 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.

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. Mirvahami, 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. Roustae, "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.



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

Ali Asghar Heidari<sup>1</sup>, Farid Karimipour<sup>\*2</sup>

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