The 2nd National Conference on
Geospatial Information Technology (NCGIT)

K.N.Toosi University of Technology
Faculty of Geomatics Engineering

18 January 2017

دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲۹ دی ماه ۱۳۹۵

ارزیابی پوشش الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری در جایابی شبکه های سنسور بی‌سیم در محیط های رستری

فاطمه مافی [۱]، میثم ارگانی [۲]، فرید کریمی پور [۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
۲- استادیار گروه سنجش از دور و GIS ، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۳- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و علوم اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

چکیده :

در سال‌های اخیر، شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم (Wireless Sensor Networks) در کاربردهای متعددی مانند کنترل و نظارت بر پدیده‌های دینامیک مورد مطالعه قرارگرفته‌اند. یکی از مسائل مهم مورد مطالعه در این شبکه‌ها، جایابی (Deployment) بهینه حس‌گرها به‌منظور دستیابی به بیشینه‌ی مقدار پوشش (Coverage) است. ازاین‌رو، در اکثر تحقیقات برای رسیدن به پوشش حداکثر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متعددی استفاده‌شده است. در یک رده‌بندی کلی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای جایابی بهینه حس‌گر باهدف افزایش پوشش، به دو گروه الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی و سراسری تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های سراسری عموماً از یک روش تصادفی بر اساس یک روند تکاملی استفاده می‌کنند. در تمامی این الگوریتم‌ها، محاسبه‌ی تابع هدف جهت ارائه مدل پوشش حسگر در شبکه ضروری است. در واقع بهبود پوشش از طریق بهینه سازی تابع هدف در فضای مساله صورت می‌گیرد.

در این تحقیق، با مدلسازی رستری محیط در فضاهای دو و سه‌بعدی، عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری به‌منظور جانمایی بهینه حسگرها و در نتیجه ایجاد پوشش حداکثر شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم با رویکرد افزایش پوشش، ارزیابی و مقایسه شده‌اند. از آنجایی‌که هدف مقایسه عملکرد و نتایج الگوریتم های سراسری بوده است، منطقه مورد مطالعه و شرایط پیاده سازی یکسان فرض شده اند. در این مقاله، چند روش بهینه‌سازی برای جایابی سنسور، از جمله الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic Algorithm (GA))، L-BFGS(Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno)، VFCPSO (Virtual Force Co-evolutionary Particle Swarm Optimization) و CMA-ES (Covariance Matrix Adaption –Evolution Strategy) پیاده‌سازی شد و معیار ارزیابی الگوریتم‌ها برای مسئله جایابی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، مقدار پوشش بهینه و سرعت همگرایی الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی : شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، جایابی حس‌گر، پوشش شبکه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری، مدل رستری

نویسنده مکاتبه کننده : فرید کریمی‌پور
آدرس پستی : خیابان کارگر شمالی، بالاتر از جلال آل احمد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی
تلفن : ۰۲۱ - ۶۱۱۱۴۳۷۶
آدرس پست الکترونیک : fkarimipr@ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم در علوم مهندسی و تحقیقات علمی کاربردهای متعددی یافته اند. آمایش زندگی حیوانات، بررسی فعالیت‌های آتشفشان‌ها و پایش‌های زیست محیطی نمونه‌هایی از این کاربردها هستند [۱].
بدیهی است هر حس‌گر بخش خاصی از منطقه را پوشش می‌دهد و میزان پوشش منطقه، از مجموع سطح پوشش حس‌گرها به‌دست می‌آید. بنابراین جایابی بهینه حس‌گرها به‌منظور دستیابی به بیشینه مقدار پوشش یکی از مسائل مهم در زمینه شبکه‌های حس‌گر بیسیم می‌باشد.
موانع محیطی، نوع داده‌ای که برای مدل‌سازی محیط در نظر گرفته می‌شود و همچنین مدل تشخیص حس‌گر بر روی محاسبه پوشش شبکه تأثیر می‌گذارند. از انواع مدل‌های تشخیص حس‌گر به کار گرفته شده می‌توان به مدل تشخیص دایره‌ای ساده و مدل جهت‌دار اشاره کرد [۱ ، ۲ ، ۳]. همچنین مدل‌های محیط از نظر نوع داده‌ای که برای آن در نظر می‌گیرند به صورت برداری و رستری تقسیم‌بندی می‌شوند [۴، ۵ و ۶].
چیدمان سنسورها به صورت بهینه یک مساله بسیار چالش برانگیز است و ثابت شده است برای بیشتر فرمولهای جایابی، پیچیدگی بالایی دارد. برای مقابله با این پیچیدگی، چندین الگوریتم بهینه سازی جهت یافتن بهترین مکان قرار دادن سنسورها پیشنهاد شده است[۴ ، ۷ ، ۸ ،۹]. الگوریتم‌های سراسری همه فضای حل مساله در منطقه مورد مطالعه در جایابی شبکه حس‌گر بی‌سیم را در نظر می‌گیرند، یعنی به صورت یک جا در فضای مجهولات به جستجو راه حل برای بهینه‌کردن تابع هدف می پردازند. از ویژگی‌های بارز این الگوریتم‌ها، تصادفی بودن آن‌ها بر اساس یک روند تکاملی است. در تمامی این الگوریتم‌ها، محاسبه‌ی پوشش حسگر در شبکه به عنوان تابع هدف ضروری است. در واقع بهبود پوشش با توجه به نحوه محاسبه پوشش صورت می‌گیرد.
در تحقیق حاضر، عملکرد الگوریتم های بهینه‌سازی سراسری تکاملی در مدل رستری دو و سه‌بعدی با قدرت تفکیک‌های مختلف با وجود موانع و توپوگرافی محیط در آن‌ها [۱۰] اجرا، ارزیابی و مقایسه گردیده است. مدل همه جهتی باینری برای مدل پوشش سنسور در حالت دو بُعدی محیط و مدل جهتدار باینری برای مدل پوشش سنسور در حالت سه بُعدی محیط در نظر گرفته می شوند [۴]. از آنجاییکه هدف، مقایسه عملکرد و توانایی الگوریتم‌های سراسری در مساله پوشش شبکه های سنسور بی سیم می باشد، منطقه مورد مطالعه و شرایط پیاده سازی کاملاً یکسان فرض شده اند. در این مقاله، چندین روش بهینه‌سازی برای جایابی سنسورها، از جمله الگوریتم‌های ژنتیک [۱۱]، L-BFGS [۱۲]، VFCPSO [۱۳ ، ۹] و CMA-ES [۸] پیاده سازی شده اند. علت انتخاب این الگوریتم ها، ماهیت تکاملی آنها در مقایسه با سایر روش های سراسری در بهینه سازی جایابی شبکه های سنسور بی سیم بوده است. معیار ارزیابی الگوریتم‌ها برای مسئله جایابی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، مقدار پوشش بهینه و سرعت همگرایی الگوریتم‌ها در نظر گرفته می‌شود.
در بخش دوم و سوم، نتایج حاصل از ارزیابی روش های منتخب بهینه سازی ارائه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند و در ادامه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی مطرح خواهند شد.

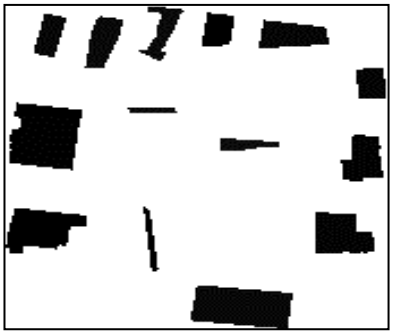
۲- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری تکاملی برای مسئله جایابی شبکه‌های حس‌گر پیاده‌سازی و پوشش شبکه به‌عنوان تابع هدف مسئله و مدل دو بُعدی و سه بُعدی رستری با قدرت تفکیک های مختلف به عنوان مدل محیط در نظر گرفته می شوند. همچنین مدل همه جهتی باینری برای مدل سنسور در مدل دو بُعدی محیط و مدل جهتدار باینری برای مدل سنسور در مدل سه بُعدی محیط در نظر گرفته شده اند [۴]. هدف رسیدن به بیشینه پوشش سنسورها است که با توجه به مقدار درصد پوشش تمامی سنسورهای منطقه بدست می آید. در این تحقیق، الگوریتمها با توجه به درصد پوشش (تابع هدف)، یعنی نسبت مساحت پوشش یافته به حداکثر توان پوشش سنسورها در منطقه،

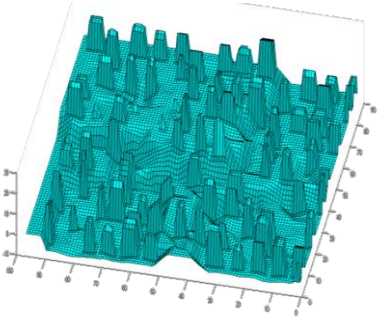
راه حلهای خود را به روز می‌کنند. معیار ارزیابی الگوریتم‌ها برای مسئله جایابی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، مقدار پوشش بهینه و سرعت همگرایی الگوریتم‌ها در نظر گرفته می‌شود.

برای ارزیابی الگوریتم‌ها در مدل دوبعدی محیط، یک منطقه به‌صورت دوبعدی با ابعاد ۱۸۰ در ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد و مدل رستری آن به‌عنوان ارزیاب مدل محیطی در فضای دوبعدی به کار گرفته شد (شکل (۱- الف)). در این منطقه ساختمان‌ها به‌عنوان موانع در مدل محیط در نظر گرفته شدند که ابعاد آن‌ها در قدرت تفکیک‌های مختلف، به‌دلیل دقت‌های مختلفی که دارند، متفاوت است.

در حالتی که مدل سه بعدی برای محیط جایابی حس‌گرها استفاده می‌شود، از یک منطقه با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ متر، مجموعه داده‌های رستری (مدل DSM) در قدرت تفکیک‌های مختلف استفاده می‌گردد (شکل (۱- ب)). این منطقه علاوه بر توپوگرافی زمین، شامل ساختمان‌ها و درختان است که به عنوان موانع در نظر گرفته می‌شوند. تعداد حس‌گرهای شبکه که به‌عنوان یکی از پارامترهای مسئله جایابی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم است، برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده اند. فاصله عملکرد حس‌گرها ثابت و برابر با ۱۵ متر است. در صورت استفاده از حس‌گر جهت‌دار زاویه عملکرد آن برابر با ۱۲۰ درجه خواهد بود. بازه ارتفاع حس‌گر در مدل سه‌بعدی برای مسئله جایابی نیز از ۰ (روی سطح زمین) تا ۱۰ متر ارتفاعی در نظر گرفته می‌شود. قدرت تفکیک مدل‌های دو و سه‌بعدی رستری، به‌عنوان مدل محیط جایابی شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده اند.



(الف)

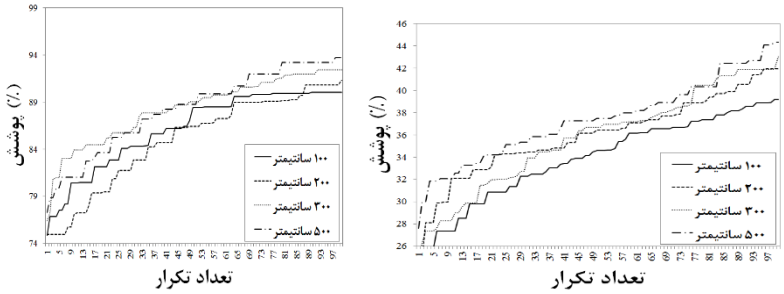


(ب)

شکل ۱ : (الف) مدل رستری باقدرت تفکیک ۱۰۰ سانتی‌متر ،(ب)مدل DSM باقدرت تفکیک ۲۰۰ سانتی‌متر

نمودار همگرایی برای مدل‌های رستری با قدرت تفکیک‌های مختلف بر مبنای الگوریتم‌های سراسری در شکل‌های (۲، ۳، ۴ و ۵) نمایش داده شده است. در جدول‌های (۱-الف تا د) ، مقدار پوشش نهایی، پوشش برداری، دقت پوشش و زمان محاسبه پوشش با استفاده از الگوریتم‌های سراسری نشان داده شده است.

راه حلهای الگوریتم ژنتیک به صورت اعشاری در نظر گرفته شدند. مدل دو بُعدی، با در نظر گرفتن مدل سنسور همه جهتی پیاده‌سازی شد. ابتدا مدل سنسور همه جهتی در محیط دو بُعدی برای الگوریتم ژنتیک پیاده سازی شد که در این حالت، راه حلها به صورت کروموزومی در نظر گرفته شدند. در این راه حلها موقعیت سنسورها به‌عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته می‌شود. سپس روند بهینه سازی الگوریتم ژنتیک برای مدل سه بُعدی با مدل جهت دار سنسور پیاده سازی گردید. تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم ژنتیک، برابر با ۵۰ در نظر گرفته شد. عملگر انتخاب مسابقه‌ای برای انتخاب راه‌حل نخبه در این الگوریتم در نظر گرفته شد. در این الگوریتم پارامتر نرخ تلفیق که به‌منظور تعیین درصدی از جمعیت فعلی به‌عنوان والدین برای تولید نسل جدید به‌کاربرده می‌شود برابر با ۷۰ در نظر گرفته شد، بدین معنی که ٪۷۰ جمعیت در هر تکرار برای تولید نسل بعدی با هم تلفیق می‌شوند. در واقع این پارامتر میزان تأثیر نسل قبل در نسل جدید را مشخص می‌کند. در این تحقیق پارامتر نرخ جهش برابر با ٪۳۰ در نظر گرفته شد. شرط توقف نیز در ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شد.

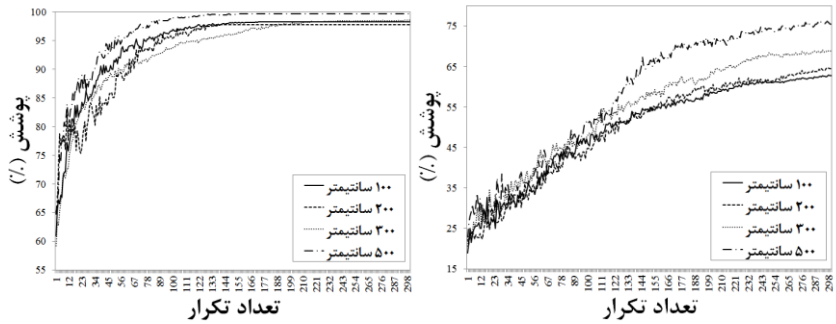


(ب) (الف)

شکل ۲- نمودار همگرایی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای مدل‌های رستری (الف) دوبعدی، (ب) سه‌بعدی

براساس نمودارهای همگرایی ارائه شده، روند همگرایی الگوریتم ژنتیک برای مدل دو بُعدی سریعتر از مدل سه بُعدی می‌باشد، که علت آن وجود پارامترهای بیشتر در مدل سه بُعدی نسبت به مدل دو بُعدی است. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در تمامی مدلهای رستری با قدرت تفکیکهای مختلف به مانند هم هستند.

در لگوریتم CMAE-S، پارامتر σ است که جهش الگوریتم را مشخص می‌کند، برابر با ۰/۱۶۷ در نظر گرفته شد. این پارامتر برای موقعیتهای دو بُعدی برابر با ۱ در نظر گرفته شد. در نهایت، شرط توقف این الگوریتم به دلیل اینکه دارای جمعیت کمتری نسبت به الگوریتمهای ژنتیک و بهینه‌سازی توده ذرات است، برابر با ۳۰۰ تکرار در نظر گرفته شد.



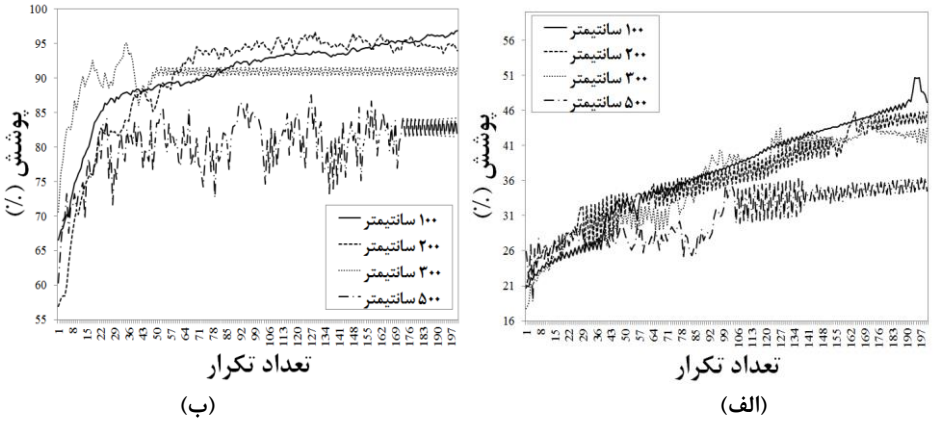
(ب) (الف)

شکل ۳- نمودار همگرایی بر مبنای الگوریتم CMA-ES برای مدل‌های رستری (الف) دوبعدی، (ب) سه‌بعدی

سرعت همگرایی الگوریتم CMA-ES در مدل دو بُعدی از مدل سه بُعدی بیشتر است. پراکندگی نمودار همگرایی در مدل سه بُعدی نیز بیشتر از مدل دو بُعدی میباشد. از تکرار ۱۷۷ به بعد روند بهبود در مدل دو بُعدی به شدت کاسته می‌شود. درحالیکه در مدل سه بُعدی نمودار همگرایی با کمی تعدیل به روند خود ادامه می‌دهد (شکل (۳)). نتایج نشان می‌دهد که مقدار پوشش در تمامی مدل‌ها به حداکثر خود رسیده‌اند که نشان از برتری این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های پیشین است.

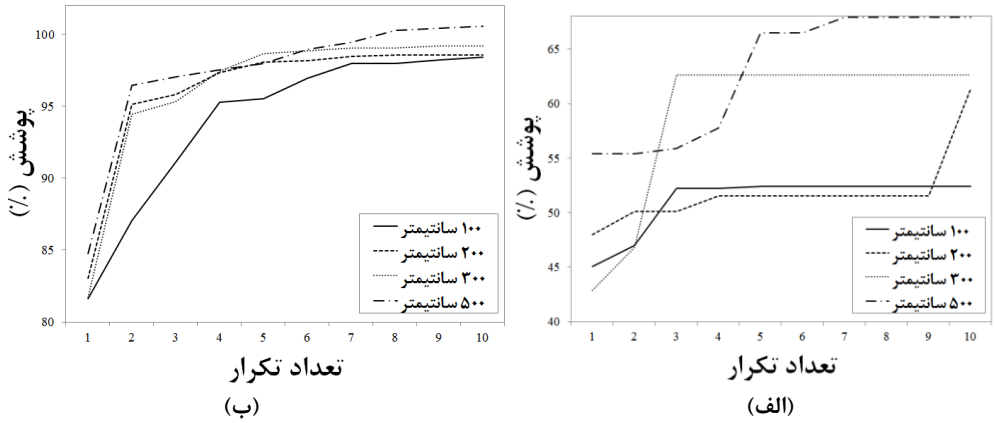
الگوریتم L-BFGS یک الگوریتم گرادیانت مبنا است. این الگوریتم از پارامترهای زیاد، به مانند الگوریتمهای دیگر این تحقیق برخوردار نیست و برای ایجاد ماتریس کواریانس هیسین، تنها از m حافظه ی قبلی خود استفاده می‌کند. مقدار m برابر با ۲۰ در نظر گرفته شد. برای محاسبه گرادیانت به‌صورت عددی، گام حرکت ε برابر با ۱ برای موقعیتهای دو بُعدی سنسور انتخاب شد. همچنین، گام حرکت برای متغیر ارتفاعی و متغیرهای جهتی به ترتیب ۰/۰۰۵۶ و ۰/۰۰۲۸ در نظر گرفته شدند. شرط توقف این الگوریتم برابر با ۲۰۰ در نظر گرفته شد، به این دلیل که از یک راه حل برای بهینه یابی تابع هدف استفاده می‌کند. به منظور مقایسه مدلهای رستری با قدرت تفکیکهای مختلف

الگوریتم L-BFGS برای مدل دو و سه بُعدی پیاده‌سازی شدند. سپس، نمودار همگرایی آنها با در نظر گرفتن شرط توقف ۲۰۰ تکرار در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۴- نمودار همگرایی بر مبنای الگوریتم LBFGS برای مدل‌های رستری (الف) دوبعدی، (ب) سه‌بعدی

الگوریتم VFCPSO، از ترکیب الگوریتم CPSO و VF ایجاد شده است. الگوریتم CPSO به عنوان یک الگوریتم بهبودیافته از الگوریتم بهینه سازی توده ذرات است. این الگوریتم برای مسائلی مناسب است که پارامترهای زیاد در آن وجود دارد، به‌طوری‌که از به دام افتادن در بهینه های محلی جلوگیری می‌کند. الگوریتم VF به‌عنوان یک الگوریتم مکمل، از الگوریتمهای بهینه‌سازی محلی است که در مسئله جایابی سنسور از نزدیک شدن سنسور به موانع و سایر سنسورها جلوگیری می‌کند. پارامترهای این الگوریتم، علاوه بر پارامترهای مربوط به الگوریتم توده ذرات دارای یک پارامتر به‌صورت ضریب تأثیر الگوریتم VF در سرعت حرکت ذرات است. این ضریب برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شد. الگوریتم VFCPSO به این دلیل که به تعداد پارامترهای مسئله توده ایجاد می‌کند، جمعیت هر توده برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد. همچنین شرط توقف آن برابر با ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد.



شکل ۵- نمودار همگرایی بر مبنای الگوریتم VFCPSO برای مدل‌های رستری (الف) دوبعدی، (ب) سه‌بعدی

این الگوریتم به سرعت به مقدار بهینه نزدیک می‌شود. به طوریکه در دو تکرار روند رو به رشد مناسبی را طی می‌کند و بعد از آن روند بهبود به آرامی شکل می‌گیرد. پراکندگی نمودار همگرایی در مدل سه بُعدی زیاد می باشد (شکل (۵)).

جدول ۱- (الف) تا (د) مقادیر به‌دست‌آمده بر مبنای الگوریتم‌های ژنتیک ، CMA-ES، LBFGS و VFCPSO برای مدل‌های دو و سه‌بعدی

(الف) الگوریتم ژنتیک

بُعد محیط	قدرت تفکیک (سانتیمتر)	پوشش (٪)	زمان (ثانیه)
دوبعدی	۱۰۰	۹۰/۰۳۹	۸۷/۸۵۸
	۲۰۰	۹۱/۳۳۴	۲۴/۸۰۸
	۳۰۰	۹۲/۴۳۷	۱۳/۵۰۸
	۵۰۰	۹۳/۷۲۴	۷/۲۸۸
سه‌بعدی	۱۰۰	۳۹/۱۵۹	۱۲۲/۷۶۴
	۲۰۰	۴۱/۹۳۲	۳۴/۸۸۳
	۳۰۰	۴۳/۰۸۳	۱۸/۱۵۲
	۵۰۰	۴۴/۳۲۸	۹/۵۰۸

(ب) الگوریتم CMA-ES

بُعد محیط	قدرت تفکیک (سانتیمتر)	پوشش (٪)	زمان (ثانیه)
دوبعدی	۱۰۰	۹۷/۷۹۲	۷۹/۰۳۸
	۲۰۰	۹۸/۲۳۷	۱۷/۸۵۱
	۳۰۰	۹۸/۵۲۷	۱۰/۵۶۶
	۵۰۰	۹۹/۶۳۰	۶/۱۸۸
سه‌بعدی	۱۰۰	۶۲/۸۱۳	۱۰۳/۶۳۸
	۲۰۰	۶۴/۴۷۳	۲۸/۴۳۹
	۳۰۰	۶۸/۸۳۹	۱۴/۱۴۳
	۵۰۰	۷۵/۴۵۱	۱۰/۶۲۸

(ج) الگوریتم LBFGS

بُعد محیط	قدرت تفکیک (سانتیمتر)	پوشش (٪)	زمان (ثانیه)
دوبعدی	۱۰۰	۹۶/۹۱۴	۹۲/۱۹۶
	۲۰۰	۹۶/۷۰۹	۴۱/۳۰۴
	۳۰۰	۹۵/۱۱۰	۲۲/۵۴۲
	۵۰۰	۸۸/۲۴	۱۲/۳۱۲
سه‌بعدی	۱۰۰	۵۰/۶۵۱	۱۳۲/۳۰۱
	۲۰۰	۴۵/۷۸۴	۴۰/۰۳۰
	۳۰۰	۴۳/۴۱۳	۲۳/۸۰۰
	۵۰۰	۳۶/۳۳۲	۱۶/۶۸۲

(د) الگوریتم VFCPSO

بُعد محیط	قدرت تفکیک (سانتیمتر)	پوشش (٪)	زمان (ثانیه)
دوبعدی	۱۰۰	۹۸/۴۰۷	۷۷/۲۹۰
	۲۰۰	۹۸/۵۸۰	۱۷/۴۱۹
	۳۰۰	۹۹/۲۰۷	۹/۳۰۱
	۵۰۰	۹۹/۹۹۹	۷/۳۶۵
سه‌بعدی	۱۰۰	۵۲/۴۰۰	۱۰۱/۵۸۰
	۲۰۰	۶۱/۳۷۰	۲۸/۷۶۹
	۳۰۰	۶۲/۶۲۴	۱۳/۶۹۸
	۵۰۰	۶۷/۹۰۶	۱۱/۱۷۳

۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری تکاملی به‌منظور ایجاد پوشش حداکثر شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم با رویکرد افزایش مقدار پوشش، در مدل محیط رستری ارزیابی و مقایسه شده‌اند.

مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی بیانگر آن است که الگوریتم VFCPSO به علت رویکرد دوگانه‌ی محلی و سراسری که دارد، از میان همه‌ی الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده دارای توانایی بیشتری است. الگوریتم CMA-ES به دلیل اینکه همبستگی بین موقعیت راه‌حل‌ها را در نظر می‌گیرد، نسبت به همتای خود یعنی الگوریتم ژنتیک از توان بیشتری در بهینه کردن مقدار پوشش برخوردار است. الگوریتم L-BFGS در مدل رستری با قدرت تفکیک بالاتر، دارای بیشترین مقدار پوشش است و در این حالت از سرعت همگرایی خوبی برخوردار است. زمان محاسبه پوشش در مدل سه بعدی بیشتر از زمان محاسبه پوشش در مدل دوبعدی محیط است. الگوریتم VFCPSO نسبت به الگوریتم‌های دیگر از زمان

محاسبه پوشش کمتری برخوردار است. نتیجه دیگر این است که در نظر گرفتن مدل محیط با قدرت تفکیک بیشتر، الزاماً باعث رسیدن به جایابی بهتر، از لحاظ پوشش نمی‌شود؛ زیرا افزایش قدرت تفکیک، ممکن است فضای جستجوی الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری را افزایش داده و موجب می‌شود که علاوه بر خطر به دام افتادن الگوریتم در پاسخ‌های بهینه محلی، بهینه مسئله به پوشش کمتری دست یابد. همچنین با افزایش قدرت تفکیک مدل محیط سرعت محاسبه پوشش برای هر یک از الگوریتم‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار پوشش نهایی در مدل سه‌بعدی نسبت به مدل دوبعدی در تمامی الگوریتم‌ها به مقدار کمتری رسید. دلیل آن وجود توپوگرافی و پارامترهای بیشتر حس‌گر یعنی ارتفاع حس‌گر و جهت مؤلفه‌ی z حس‌گر در مدل سه‌بعدی است. با کاهش قدرت تفکیک در مدل‌های رستری تأثیر عوامل محیطی مانند موانع و توپوگرافی کم شده و باعث می‌شود که خطای بیشتری در محاسبه پوشش ایجاد شود.

در مراحل آتی این تحقیق، مسئله جایابی با اهداف دیگر شبکه یعنی توپولوژی ارتباطات، حداقل انرژی مصرفی و حداکثر طول عمر تلفیق خواهند شد. همچنین کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری با استفاده از این اهداف در مدل‌های محیط پیچیده‌تر مقایسه خواهند شد.

منابع

[1]. Werner-Allen, G. et al. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. in Wireless Sensor Networks, 2005. Proceeedings of the Second European Workshop on. 2005. IEEE.

[2]. Cortés, J. and S. Martínez, T Karatas, F Bullo. (2004), Coverage Control for Mobile Sensing Networks. IEEE Transaction on Robotics and Automation. 20: P.243-255.

[3]. Hossain, A. and P. K. Biswas, S. Chakrabarti. (2008), Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network. Proceedings of the 10th Colloquium and the 3rd ICIIS, IEEE. P.1-5.

[4]. Argany, M. et al. A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach. A Voronoi Approach. Transacton on Computational Sciences Journal, 2011. 14: p. 151-172.

[5]. Argany, M. et al. Impact of the quality of spatial 3D city models on sensor networks placement optimization. GEOMATICA, 2012. 66: p. 291—305.

[6]. Argany, M., Mostafavi, M.A., Gagné, C., Context-Aware Local Optimization of Sensor Network Deployment. Journal of Sensor and Actuator Networks (JSAN), 4, 160-188, 2015.

[7].A. Efrat, S. Har-Peled, J.S.B. Mitchell" ,Approximation algorithms for two optimal location pin Proc. of the 3rd International Conference on Broadband Communications Networks and Systems (Broadnets , (05' Boston, Massachusetts,, .2005.

[8]. Vahab Akbarzadeh, et al. Topography-Aware Sensor Deployment Optimization with CMA-ES. Parallel Problem Solving from Nature, PPSN XI, 2010.

[9]. Van den Bergh, F. and A.P. Engelbrecht, A cooperative approach to particle swarm optimization. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2004. 8(3): p. 225-239.

[10]. Afghantoloee A, Doodman S, Karimipour F, Mostafavi MA. Coverage Estimation of GeoSensors in 3D Vector Environments. submitted to the GIResearch Conference 2014.

[11]. Jourdan, D. and O.L. de Weck. Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm. in Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th. 2004. IEEE.

[12]. Akbarzadeh, V. et al. Probabilistic Sensing Model for Sensor Placement Optimization based on Line-of-sight Coverage. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013. 62: p. 293-303.

[13]. Locatelli, M. and U. Raber, Packing equal circles in a square: a deterministic global optimization approach. Discrete Applied Mathematics, 2002. 122(1): p. 139-166.