

جانمایی بهینه دستگاه لیزر اسکنر زمینی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

مرتضی حیدری مظفر^{۱*}، مسعود ورشوساز^۲، محمد سعادت سرشت^۳

^۱ استادیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا
m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
varshosazm@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
msaadatseresht@gmail.com

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۴، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

برای مدل‌سازی کامل سه بعدی یک محدوده، با استفاده از ابرنقاط لیزر اسکنر زمینی، با جابجایی و افزایش نقاط استقرار دستگاه می‌توان از میزان قسمت‌های اندازه‌گیری نشده آن محدوده کاست. اما جابجایی و افزایش نقاط استقرار، مستلزم صرف هزینه و زمان برای اندازه‌گیری‌های میدانی بیشتر بوده و در نتیجه باعث افزایش زمان و هزینه محاسباتی خواهد شد. بنابراین، برنامه‌ریزی اولیه برای انتخاب بهینه مکان استقرار دستگاه با هدف کامل بودن ابرنقاط مدل سه بعدی و نیز کاهش هزینه‌های میدانی و محاسبات دفتری در یک بازه زمانی معقول، ضروری است. در این مقاله، برای دستیابی به این هدف از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات استفاده شده است. در روش پیشنهادی، نقاط کاندید برای استقرار در فضای ابرنقاط تقریبی از محدوده اسکن به عنوان فضای جستجوی الگوریتم انتخاب می‌شوند. برای حل مسأله جانمایی بهینه دستگاه لیزر اسکنر زمین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، هر ذره، مجموعه‌ای از نقاط کاندید انتخاب شده و گروه مجموعه‌ای از ذرات می‌باشد. همچنین تابع هزینه با دو هدف، یکی کاهش نواحی پنهان در مدل و دیگری انتخاب کمترین تعداد ممکن نقاط استقرار در نظر گرفته می‌شود. با انتخاب مجموعه‌ای از چندتایی‌های تصادفی نقاط کاندید برای استقرار، به عنوان پاسخ اولیه، الگوریتم شروع به کار کرده و با حرکت دادن این پاسخ‌ها در فضای جستجو، در طی تکرارهای متوالی، الگوریتم جواب بهینه مسأله جانمایی لیزر اسکنر زمینی را بدست می‌آورد. در این فرآیند، انتخاب بهینه نقاط استقرار دستگاه به صورت اتوماتیک و تکراری بوده و اطمینان از چیدمان صحیح با حداقل تعداد نقاط لازم برای اندازه‌گیری کامل محدوده حاصل می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات می‌توان نقاط بهینه برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر را از میان تعداد بسیار زیادی از نقاط کاندید انتخاب کرد، به نحوی که ۹۶٪ منطقه با اطمینان کامل اسکن شود.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی گروه ذرات، جانمایی بهینه، لیزر اسکنر زمینی، نواحی پنهان

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

می‌توان در پروژه‌های نقشه‌برداری زمینی از لیزر اسکنر زمینی برای تولید نقشه یک محدوده مشخص استفاده کرد. گستردگی محدوده، پیچیدگی عوارض موجود در آن و محدودیت‌های دستگاه باعث می‌شود که با یک استقرار دستگاه تمامی مختصات‌های مورد نیاز برای تهیه نقشه، اندازه‌گیری نشوند. از اینرو، دستگاه بایستی در نقاط مختلف قرار گرفته و عملیات اسکن تا کامل شدن مدل نهایی، در ایستگاه‌های مختلف تکرار شود. از طرف دیگر افزایش تعداد ایستگاه‌ها مستلزم صرف هزینه و زمان بیشتر برای اندازه‌گیری داده‌های میدانی است. در خیلی از مواقع، افزایش تعداد ایستگاه‌ها نیز باعث ایجاد افزونگی داده‌ها است. افزونگی داده‌ها نیز به خودی خود، باعث صرف هزینه و زمان بیشتر برای محاسبات و ترسیم نقشه‌های خروجی خواهد شد. همچنین با وجود ایستگاه‌های اضافی برداشت، امکان ایجاد خطا در فرآیند هم‌مرجع کردن داده‌های ایستگاه‌های مختلف هم، بالاتر خواهد رفت.

با توجه به همه این مسائل، کاستن از تعداد نقاط استقرار دستگاه و رسیدن به چیدمان بهینه برای پوشش کامل در اندازه‌گیری با لیزر اسکنر زمینی اهمیت بالایی دارد. اغلب کاربران دستگاه با توجه به تجربه، مهارت و شناخت خود از منطقه، نقاط استقرار را به صورت غیر اتوماتیک انتخاب می‌کنند. در این حالت، در خیلی از مواقع تعداد نقاط استقرار بیشتر از حد مورد نیاز است. همچنین، برخی اوقات با وجود تعداد زیاد نقاط استقرار، همچنان اطمینان از کامل بودن داده‌ها نیز حاصل نشده است. با این مقدمه، مسأله جانمایی دستگاه لیزر اسکنر زمینی به عنوان یک موضوع بهینه‌سازی قابل طرح است. در این مقاله، استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات^۱ به منظور برنامه‌ریزی بهتر برای انجام عملیات برداشت زمینی و مدیریت زمان، هزینه و از آن مهمتر اطمینان از کافی بودن داده‌های اندازه‌گیری شده، در حین عملیات اسکن پیشنهاد شده است.

در بخش دوم این مقاله با عنوان تئوری و ابزارها، مروری بر تحقیقات گذشته موضوع جانمایی بهینه، میدان

دید و مسائل مرتبط با موضوع این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در خصوص مسأله جانمایی بهینه تحقیقات بسیار زیادی در حوزه‌های مختلف علوم، انجام گرفته است. در این مقاله روش بهینه‌سازی گروه ذرات به دلیل مزایای آن و همچنین کاربردی بودن آن در حوزه اندازه‌گیری با دستگاه لیزر اسکنر زمینی مورد توجه قرار گرفته است. در بخش سوم، روش پیشنهادی تشریح و جزئیات آن بیان شده است. مبنای تئوریک استفاده از نواحی پنهان میدان دید دستگاه به منظور محاسبه تابع هزینه، مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌سازی مسأله برای استفاده از الگوریتم گروه ذرات، با تعریف هر ذره به عنوان یک پاسخ مسأله جانمایی بهینه انجام شده است. مجموعه‌ای از پاسخ‌ها (ذرات) در کنار هم گروه را تشکیل داده و بر این اساس تئوری گروه ذرات برای پیدا کردن نقاط بهینه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی استفاده شده است. برای هر ذره (پاسخ) تابع هزینه محاسبه شده است. سرعت حرکت ذرات در فضای جستجو برای یافتن جواب بهینه مسأله در جهت کاستن از مقدار تابع هزینه محاسبه و با تکرار الگوریتم در نهایت بهترین ذره (پاسخ) بدست می‌آید. در بخش چهارم، روش پیشنهاد شده به طور کامل پیاده سازی و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش انتهایی مقاله نیز نتایج و پیشنهادات، برای انجام تحقیقات آتی در این زمینه ارائه شده است.

۲- تئوری و ابزارها

همان‌طور که می‌دانیم، تعیین محل‌های استقرار دستگاه لیزراسکنر بایستی به نحوی باشد که بیشترین پوشش از منطقه را داشته و دقت موردنیاز را ضمانت و در ضمن تعداد ایستگاه‌های موردنیاز را به حداقل ممکن خود برساند. برای نیل به این هدف در این مقاله، موضوعات و تحقیقات گذشته در قالب دو مسأله جانمایی و بهینه‌سازی بیان شده است. همچنین روش بهینه‌سازی گروه ذرات به عنوان ابزاری جهت تعیین موقعیت‌های بهینه استقرار مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش از مقاله، به تشریح تحقیقات انجام شده قبلی در هریک از این زمینه‌ها پرداخته و همچنین ضرورت انجام تحقیق حاضر مطرح شده است.

^۱ Particle Swarm Optimization (PSO)

۲-۱- مسأله جانمایی

جانمایی ایستگاه‌های استقرار دستگاه‌های مختلف و یافتن نواحی پنهان برای آنها کاربردهای فراوانی دارد. طراحی و جانمایی ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و شبکه‌های بیسیم از مواردی هستند که داشتن موقعیت مناسب ایستگاه برای آنها از جهت پوشش سراسری مهم است [۴-۱]. موضوع جانمایی چندین سنجنده و حسگر برای جمع‌آوری اطلاعات یک ناحیه مورد دلخواه موضوع تحقیقات زیادی در حوزه رباتیک، بینایی ماشین و همچنین شناسایی نظامی بوده است [۵]. برای داشتن بهترین منظر انتخاب بهترین مسیر عبور جاده نیز کاربردی است که می‌توان در حوزه سیستم اطلاعات مکانی برای مسأله جانمایی مطرح کرد [۶]. در طراحی‌های درون شهری و کاربردهای امنیتی مسأله تعیین بهترین مکان استقرار دوربین‌های فیلمبرداری و عکسبرداری مطرح است [۷]. در تمامی این موارد، موضوع انتخاب موقعیت‌های مناسب بر اساس میدان دید مطرح شده است. این تکنیک‌ها که با عنوان طراحی میدان دید [۸] و یا انتخاب بهترین دید بعدی [۹] برای تعیین نقاط مناسب برای جانمایی مطرح شده‌اند، به طور مستقیم قابل استفاده در جانمایی دستگاه لیزراسکندر زمینی نیستند. اسکات و همکاران او در [۸]، روش‌های طراحی میدان دید را در دو بخش با عنوان الگوریتم‌های مدل‌مبنا^۱ و غیر مدل‌مبنا^۲ دسته‌بندی کرده‌اند. طبقه‌بندی روش‌های میدان دید برمبنای کاربرد آنها نیز مطرح شده است [۱۰]. در این طبقه‌بندی روش‌های شناسایی و مدلسازی، نقشه‌برداری و تعیین موقعیت جهت ناوبری و اکتشاف، جستجو و ردیابی، بازسازی و نظارت مطرح شده است. در این روش‌ها ترکیبی از سنجنده‌های مختلف به منظور دستیابی به کاربردهای خاص مدنظر قرار گرفته‌اند. همچنین طبقه‌بندی روش‌های طراحی میدان دید برای استفاده در عملیات برداشت نقشه‌برداری با دستگاه لیزراسکندر زمینی نیز انجام شده است [۱۱].

گرچه موضوع جانمایی سنجنده‌ها و دوربین‌های تصویربرداری در حوزه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما مسأله جانمایی برای دستگاه‌های

لیزراسکندر زمینی در تحقیقات اندکی مورد توجه قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

قابل توجه‌ترین سیستم مرتبطی که تا کنون با موضوع جانمایی دستگاه لیزر اسکندر زمینی مطرح شده است، ربات AVEUE می‌باشد. این ربات مجهز به سیستم‌های ناوبری و تعیین موقعیت بوده و قابل استفاده در محوطه‌های داخلی و بیرونی ساختمان‌ها نیز هست. مدل اولیه این ربات توسط آلن در [۱۴] معرفی شد و در تحقیق بعدی [۱۵]، با عنوان اخذ داده و طراحی میدان دید برای مدلسازی سه بعدی تکمیل گردید. هرچند این ربات تنها از لیزراسکندر زمینی برای جمع‌آوری داده استفاده نمی‌کند، اما از آنجا که مجهز به لیزراسکندر زمینی نیز هست، می‌توان بخش طراحی میدان دید آن را در ارتباط با موضوع جانمایی در نظر گرفت. به دلیل استفاده از ربات متحرک، نقاط پیشنهادی الگوریتم طراحی میدان دید، حتما باید روی سطح صفحه دوبعدی اولیه تعریف شده به‌عنوان زمین حرکت ربات باشد تا ربات بتواند به آن نقاط برسد. در این تحقیق، همپوشانی میان ابرنقاط برداشت شده از ایستگاه‌های مختلف ضروری تلقی نمی‌شود. همچنین بهینه بودن ایستگاه‌های انتخاب شده به صورت سراسری نیز کنترل نمی‌شود. قیود مربوط به حداقل و حداکثر اندازه‌گیری فاصله توسط دستگاه لیزر اسکندر زمینی در این مورد در نظر گرفته نشده است. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که نیاز به بررسی، تحقیق و ارائه شیوه‌ای نوین در مسأله جانمایی دستگاه لیزر اسکندر زمینی وجود دارد.

کاواشیما و همکارانش در [۱۲]، روشی برای جانمایی دستگاه لیزر اسکندر زمینی که در مدلسازی سه بعدی شبکه لوله کشی پتروشیمی قابل استفاده است، پیشنهاد کرده‌اند. در روش پیشنهادی ایشان مکانیزمی برای انتخاب ایستگاه‌های اولیه مطرح نشده است. همچنین در این روش پوشش سراسری، کامل بودن مدل و تراکم موردنیاز ابرنقاط نهایی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این تحقیق حالت بهینه چیدمان ایستگاه‌های استقرار دستگاه لیزر اسکندر زمینی با حداقل تعداد نقاط اسکن بدست نمی‌آید. همچنین این روش تنها به منظور استفاده در محیط‌هایی که با شبکه‌بندی لوله‌های استوانه‌ای روبرو هستیم، قابل استفاده است.

^۱ Model-based view planning

^۲ Non Model-based view planning

سعادت سرشت در [۱۶]، ایده اصلی طراحی شبکه لیزراسکنر زمینی را با استفاده از داده‌های دوبعدی شبیه‌سازی شده را مطرح نموده است.

موضوع طراحی شبکه برداشت لیزراسکنر و تهیه برنامه مشاهداتی برای آن از جمله موضوعاتی است که علاوه بر افزایش کیفیت و دقت مدل بدست آمده، هزینه و زمان برداشت و محاسبات داده‌های ابرنقاط را کاهش می‌دهد. در تحقیق انجام گرفته، به روشی هوشمند اتوماسیون فرآیند طراحی شبکه لیزراسکنر زمینی مطرح و روی داده‌های شبیه‌سازی شده دوبعدی پیاده سازی شده است. همچنین پیشنهاد مؤلف برای تحقیقات آتی مدل‌سازی و فرمولاسیون کامل‌تر برای اجرا در محیط سه‌بعدی، انجام آزمون روی داده‌های واقعی و اجرای روش نامعین برای جانمایی همزمان سنجنده‌ها با روش‌های هوشمند عنوان شده است [۱۶].

در هر ایستگاه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی با وجود برداشت میلیون‌ها نقطه از سطح عوارض، همچنان دقت و صحت مورد نیاز نقشه‌برداری با داده‌های برداشت شده تأمین نمی‌شود. مشکل نواحی پنهان از جمله مواردی است که در اخذ اطلاعات توسط این دستگاه‌ها در هر ایستگاه وجود دارد [۱۷]. انتخاب هوشمندانه ایستگاه‌های استقرار از یک سو منجر به کاهش نواحی پنهان و از سوی دیگر کامل بودن اندازه‌گیری‌ها را تضمین می‌نماید. به همین دلیل، در این مقاله به دنبال ارائه روشی هستیم که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، چیدمان صحیح ایستگاه‌های استقرار قبل از برداشت با دستگاه لیزر اسکنر زمینی را پیشنهاد نماید.

بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد، برای یافتن بهترین چیدمان در جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری با دستگاه لیزر اسکنر زمینی، مسائل مختلفی وجود دارد. جانمایی لیزر اسکنرهای زمینی به عنوان یک نوع خاص از سنجنده‌ها که در نقشه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای استاندارد خاصی نمی‌باشد و بیشتر مواقع این کار به صورت تجربی انجام می‌شود. تجربی بودن روش انتخاب محل استقرار دستگاه باعث می‌شود، مکان‌های بهینه جهت اسکن منطقه انتخاب نشوند. از سوی دیگر، تهیه مدل سه بعدی کامل نیازمند پوشش سراسری محدوده پروژه و اندازه‌گیری تمامی عوارض مورد نظر است. جابه‌جایی دستگاه بیشتر به منظور حذف نواحی جاافتاده و سایه‌های

ایجاد شده در مدل است. بنابراین دستگاه بایستی حتی المقدور در نقاطی مستقر شود که بیشترین نواحی جاافتاده در اسکن از ایستگاه‌های قبلی را پوشش دهد. همان طور که می‌دانیم، حجم بسیار بالای اطلاعات برداشت شده نیز نیازمند پردازش‌های پیچیده و آماده‌سازی فراوان برای مدل نهایی است. از این رو استقرارهای نامناسب منجر به افزایش زمان و پیچیدگی‌های محاسباتی خواهند شد. تلاش در جهت انتخاب بهترین نقاط ممکن برای استقرار دستگاه می‌تواند از مدت زمان پردازش داده‌ها و پیچیدگی‌های آن بکاهد. با جابه جایی دستگاه لیزر اسکنر، هم مدت زمان برداشت افزایش یافته و هم مدت زمان پردازش داده‌های زمینی افزایش چشمگیری خواهد داشت. از طرف دیگر، محدودیت دسترسی به محیط اندازه‌گیری چه از لحاظ زمانی و چه از نقطه نظر مکانی ضرورت مکان‌یابی بهینه جهت استقرار مناسب دستگاه لیزر اسکنر را پر اهمیت‌تر می‌سازد. بنابراین، انتخاب موقعیت‌هایی که بیشترین پوشش را برای نواحی پنهان فراهم می‌کنند، یکی از عمده‌ترین مسائلی است که اهمیت مکان‌یابی بهینه جهت انتخاب ایستگاه‌های دستگاه لیزر اسکنر را نشان می‌دهد. در ادامه تحقیقات انجام گرفته در زمینه مسأله بهینه‌سازی برای رسیدن به این مقصود مد نظر قرار گرفته است.

۲-۲- مسأله بهینه‌سازی

چالش پیش رو در این مقاله، یافتن چینش بهینه محل قرارگیری دستگاه برای اندازه‌گیری با کمترین تعداد نقاط ممکن است. از این دیدگاه، می‌توان موضوع را به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی مطرح کرد. هدف اصلی در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، دستیابی به بهینه مطلق^۱ و یا به عبارتی بهینه‌سازی مسأله به صورت سراسری است. مسائل بهینه‌سازی به مسائلی گفته می‌شود که در آنها هدف تعیین متغیرهای یک تابع هزینه^۲ (یا تابع برازندگی^۳) به گونه‌ای است که تابع هزینه کمینه (تابع برازندگی بیشینه) گردد. روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی به عنوان دو روش کلی برای حل مسائل بهینه سازی مطرح هستند [۱۸-۲۰]. در روش‌های تحلیلی از

^۱ Optimal Absolute

^۲ Cost Function

^۳ Fitness Function

مورد توجه محققان قرار گرفته و تلاش‌های بسیاری برای بهبود عملکرد آن از جهات مختلف انجام شده است. اضافه کردن عامل ایستایی در فرمول محاسبه سرعت از جمله این تغییرات است [۲۹].

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشد. این ویژگی‌ها دلیل انتخاب این شیوه در خصوص جانمایی بهینه برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی، در این مقاله می‌باشد. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از:

- ✓ بهره‌مندی از حافظه
 - ✓ همکاری و اشتراک گذاری اطلاعات بین ذرات (پاسخ‌ها)
 - ✓ سرعت همگرایی بالا
 - ✓ انعطاف پذیری بهتر در برابر مشکل بهینه محلی
 - ✓ راحتی پیاده‌سازی و اجرا
- در ادامه به تشریح بیشتر الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات پرداخته می‌شود.

۲-۳- بهینه‌سازی گروه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، یک الگوریتم جستجو بر مبنای جمعیت است که مبتنی بر شبیه‌سازی رفتار جمعی پرندگان و یا ماهیان در درون دسته یا گروه آنها می‌باشد [۲۴، ۳۰]. در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، به هر عضو، ذره و به مجموعه ذرات، گروه گفته می‌شود. در فرایند حل مسأله، هر ذره در فضای جستجوی چند بعدی در حال حرکت است. هر ذره به عنوان یک پاسخ، مقدار تابع هزینه برای موقعیتی از فضای جستجو که در آن قرار گرفته است، را محاسبه می‌کند. سپس با ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که ذره قبلاً در آن قرار داشته است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات گروه، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌نماید. پس از حرکت جمعی، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا زمانی که جواب بهینه مورد نظر به دست آید. به عبارت دیگر تغییر جهت ذرات در فضای جستجو بر پایه تمایلات روانشناختی اجتماعی اعضا برای تبعیت از موفقیت خود و دیگر اعضا گروه، آنقدر تکرار می‌شود که شرایط توقف برآورده شود [۳۰]. شکل ۱، فرآیند کلی حرکت ذرات در فضای جستجو برای یافتن بهترین جواب را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

تابع هزینه (برازندگی) نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی مشتق گرفته و با تعیین اکسترم‌های آن نتیجه مطلوب بدست می‌آید. در صورتی که تابع مورد استفاده مشتق‌پذیر نباشد و یا اینکه تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری زیاد باشند، امکان استفاده از این روش‌ها وجود ندارد. روش‌های عددی به صورت کلی با مقداردهی به متغیرهای تصمیم‌گیری و ارزیابی نتایج حاصل از آن به دنبال بدست آوردن جواب بهینه هستند. روش‌های عددی نیز به دو دسته قطعی^۱ و تصادفی^۲ تقسیم می‌شوند [۱۹].

تعامل بین علم کامپیوتر و بهینه‌سازی منجر به ایجاد راه حل‌هایی برای مسائل جستجوی سراسری با نام فراابتکاری^۳ شد [۲۱]. در این روش‌ها از هوش جمعی استفاده می‌شود. هوش جمعی، یک سیستم هوش مصنوعی است که بر اساس رفتار جمعی سیستم‌های خود سازمانده غیر متمرکز عمل می‌کند [۲۲]. این بحث اولین بار توسط بانی و وانگ در سال ۱۹۹۳ در زمینه سیستم‌های رباتیک سلولی معرفی شد [۲۳]. مبانی هوش جمعی بر اساس مطالعه رفتار جانداران اجتماعی همچون برخی حشرات (زنبور عسل، مورچه)، پرندگان، ماهی‌ها و یا حتی انسان‌ها بنا نهاده شده است [۲۲]. یک سیستم مبتنی بر هوش جمعی، شامل جمعیتی از عامل‌های ساده است که در یک محیط قرار گرفته و با هم در تعامل هستند. با اینکه این عامل‌ها عملکرد ساده‌ای داشته و از یک سیستم کنترل مرکزی پیروی نمی‌کنند ولی همین تعامل ساده باعث بروز رفتارهای پیچیده از کل سیستم می‌شود. از نمونه‌های طبیعی این چنین سیستم‌هایی می‌توان کلونی مورچه‌ها، پرواز گروه پرندگان و حرکت گروه ماهی‌ها را نام برد. بر پایه این سیستم‌ها الگوریتم‌هایی با هدف بهینه‌سازی معرفی شده‌اند که از مهمترین آنها می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات [۲۴]، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^۴ [۲۵، ۲۶] و الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس حرکت زنبورهای عسل^۵ [۲۷، ۲۸] اشاره کرد. از زمان معرفی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات توسط ابره‌ارت و کندی در سال ۱۹۹۵ این روش به صورت گسترده‌ای

^۱ Deterministic

^۲ Stochastic

^۳ Meta-Heuristic

^۴ Ant Colony Optimization (ACO)

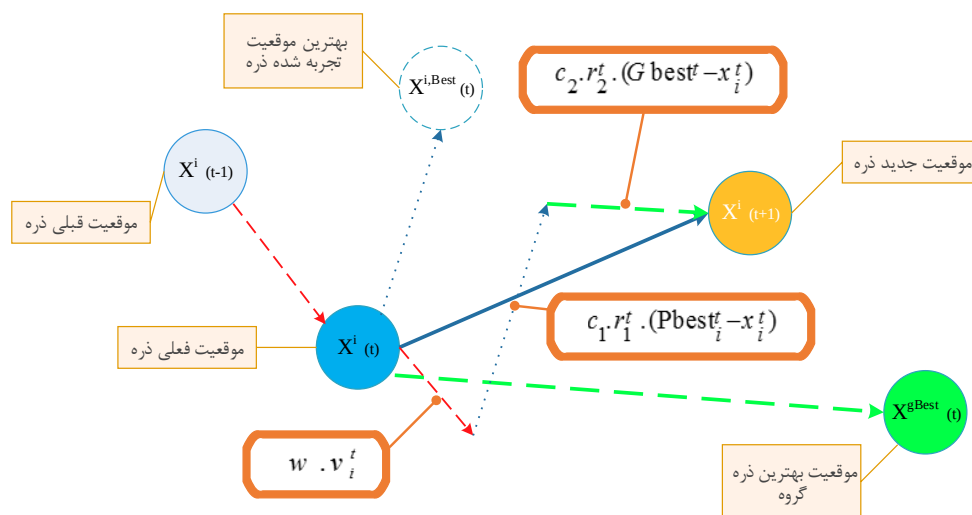
^۵ Bee Colony Optimization (BCO)

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات با تعدادی پاسخ اولیه (ذرات) شروع به کار می‌کند و با حرکت دادن این پاسخ‌ها (ذرات) در طی تکرارهای متوالی به دنبال یافتن جواب بهینه برای مسئله است. در هر تکرار دو مقدار GBest و PBest مشخص می‌شوند.

$Pbest_i^t$: مکان ذره (پاسخ) i ام در تکرار t ام را که مقدار تابع هزینه کمترین مقدار در طول حرکت آن ذره

بوده است، را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر نشان دهنده بهترین موقعیت مربوط به ذره i ام در تکرار t ام می‌باشد. $Gbest^t$: مکان بهترین پاسخ (ذره) در جمعیت فعلی پاسخ‌ها در تکرار t ام را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر نشان دهنده بهترین موقعیت همسایه‌ها در مرحله جاری است. پس از یافتن مقادیر فوق، سرعت حرکت ذرات از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1^t \cdot (Pbest_i^t - x_i^t) + c_2 \cdot r_2^t \cdot (Gbest^t - x_i^t) \quad (1)$$



شکل ۱- فرآیند حرکت به سمت جواب بهینه در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

نمود. در این حالت اگر سرعت هر ذره، از این حد فراتر رود در این صورت مقدار آن با Vmax جایگزین می‌شود. اندازه گروه الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات کمتر از جمعیت الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها می‌باشد، بنابراین مقاردهی اولیه در بکارگیری این الگوریتم، ساده‌تر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است [۳۰]. الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات به آسانی قابل اجراست و در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی گسسته و غیر خطی پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. نکته جالب اینکه این الگوریتم فقط عملگرهای اصلی ریاضی را بکار می‌برد و نتایج خوبی را فراهم می‌کند. به علت وجود مزایایی همچون مفهوم ساده، پیاده‌سازی آسان و همگرایی سریع نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امروزه الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات توجه زیادی را به خود جلب کرده است و کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف دارد. از اینرو، در این مقاله نیز از این الگوریتم به منظور یافتن چیدمان بهینه محل قرارگیری دستگاه لیزر اسکندر زمینی استفاده شده است.

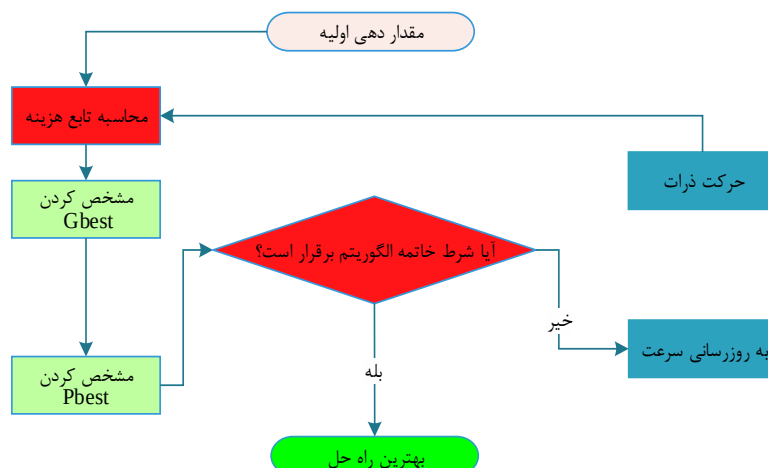
در رابطه (۱)، v_i^t سرعت ذره i ام در تکرار t ام، x_i^t موقعیت ذره i ام در تکرار t ام، w ضریب اینرسی، مقادیر r_1^t و r_2^t عددی تصادفی بین صفر و یک مربوط به ذره i ام در تکرار t ام هستند و ضرایب C_1 و C_2 هم که ضرایب یادگیری نامیده می‌شوند، که معمولاً برابر ۲ مقدار دهی می‌شوند. C_1 ، ضریب یادگیری شخصی^۱ و C_2 ضریب یادگیری جمعی^۲ است. مکان بعدی هر ذره نیز با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2)$$

شکل ۲، گام‌های الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات را بطور خلاصه نشان می‌دهد. در هر تکرار از الگوریتم، سرعت حرکت ذرات (میزان تغییرات برای هر ذره (پاسخ)) را می‌توان با یک مقدار از پیش تعیین شده Vmax محدود

^۱ Cognitive parameter

^۲ Social parameter



شکل ۲- فرآیند کلی بهینه سازی به روش PSO

۳- تعریف مدل و روش پیشنهادی

در این قسمت از مقاله چگونگی به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای جانمایی بهینه دستگاه لیزر اسکنر زمینی مطرح شده است. فرض بر این است که مدل تقریبی سه بعدی محوطه مورد نظر برای اسکنر با دستگاه لیزر اسکنر زمینی، وجود دارد. عوارض موجود و ابعاد تقریبی در این مدل اولیه در نظر گرفته می‌شوند. این مدل اولیه می‌تواند با روش‌های مختلف همچون نقشه‌های با مقیاس کوچکتر قبلی، فتوگرامتری، برداشت کروکی و یا اسکن‌های اولیه از محل با اتکا به تجربه کاربر دستگاه لیزراسکنر زمینی بدست آید. البته تأکید می‌شود، این مدل تقریبی بوده و به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. با وجود نرم‌افزارها مختلف امکان ایجاد این مدل تقریبی نیز میسر است. این مدل تقریبی از منطقه به شبکه منظمی (گرید) با ابعاد مشخص بعنوان مثال ۱۰ متر در ۱۰ متر تقسیم می‌گردد و نقطه مرکز هر کدام از سلول‌های این گریدبندی به عنوان نقطه کاندید برای استقرار دستگاه در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که برای هر کدام از ایستگاه‌های کاندید انتخاب شده بتوان، نقاط تارگت مستقل مشخص کرده و سیستم مختصات نهایی اندازه‌گیری برای تمامی ایستگاه یکسان خواهد بود. می‌دانیم، دستگاه لیزراسکنر زمینی نقاطی از مدل سه‌بعدی را که در خط دید مستقیم آن قرار دارند را اندازه‌گیری می‌کند و قسمت‌هایی از مدل که توسط دستگاه دیده نمی‌شوند، با عنوان ناحیه پنهان آن نقطه استقرار در نظر گرفته می‌شوند. نواحی پنهان هر نقطه

کاندید برای استقرار به عنوان مقدار هزینه آن نقطه لحاظ شده و بر این اساس هزینه استقرار دستگاه در هر کدام از نقاط کاندید محاسبه می‌شود.

روش پیشنهادی با به کارگیری بهینه‌سازی گروه ذرات، در هر بار تکرار یکی از نقاط کاندید را برای استقرار دستگاه انتخاب می‌کند به نحوی که با انجام اسکن از این نقطه، مقدار هزینه کل (مجموع میزان ناحیه پنهان سراسری از مدل نهایی و همچنین تعداد انتخاب شده از ایستگاه‌ها) کمترین مقدار ممکن باشد. پس از استقرار دستگاه در نقطه کاندید انتخاب‌شده اندازه‌گیری صورت گرفته و به مدل اولیه اضافه می‌شود. با این روش، با تکرار انتخاب بهترین نقطه برای استقرار در هر مرحله، در پایان اسکن محدوده موردنظر به طور کامل انجام می‌گیرد. در ادامه ابتدا، شیوه محاسبه هزینه برای هر کدام از نقاط کاندید برای استقرار توضیح داده می‌شود. سپس الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات با انتخاب مجموعه‌های تصادفی از میان نقاط کاندید به عنوان گروه ذرات کار خود را آغاز و نهایتاً چگونگی حرکت به سمت بدست آوردن ذره یا همان جواب بهینه از میان نقاط کاندید برای استقرار در هر مرحله بدست می‌آید.

۳-۱- شیوه محاسبه هزینه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی در k امین نقطه کاندید

برای نقطه کاندید استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی، V_k مجموعه کلیه نقاطی از مدل است که در محدوده برد دستگاه قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر V_k مجموعه قابل اندازه‌گیری دستگاه از نقطه k ام می‌باشد. رابطه (۳) تعریف ریاضی این مجموعه می‌باشد.

$$V_k = \left\{ \forall (x, y, z) \mid R_{\min} \leq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq R_{\max} \right\} \quad (3)$$

شوند. در این صورت هزینه کلی برای اندازه گیری از رابطه (۶) قابل محاسبه خواهد بود.

$$TotalCost = w_1 \cdot \sum_{i=1}^n L_{Occ_i} + w_2 \cdot n \quad (6)$$

در رابطه (۶) L_{Occ_i} ، تعداد اعضاء مجموعه نقاط اندازه گیری نشده از مدل اولیه مربوط به نقطه استقرار i ام و w_1 وزن مربوط به آن و n ، تعداد نقاط استقرار انتخاب شده و w_2 وزن مربوط به آن است. مشخص است که هر چقدر تعداد نقاط انتخابی کمتر و همچنین هزینه نهایی مربوطه پایین تر باشد، هزینه اجرایی عملیات اسکنینگ نیز کمتر خواهد شد. از سوی دیگر، این مساله منطبق بر انتخاب n تعداد از میان m مقدار در ریاضیات می باشد. که در این حالت تعداد جواب های ممکن برای مساله از رابطه (۷) بدست می آید.

$$N_s = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!} \quad (7)$$

N_s ، تعداد کل حالت های مختلف ممکن برای انتخاب ایستگاه ها می باشد. برای هر کدام از این حالت ها بایستی هزینه نهایی را محاسبه و حالتی را در نظر گرفت که کمترین هزینه را داشته باشد. از آنجایی که تعداد حالت ها بسیار زیاد است، در مرحله بعد، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات بهترین حالت از میان حالت های ممکن با بررسی زیرمجموعه هایی از آن ها بدست می آید.

۳-۲- انتخاب ایستگاه های بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات

همان طور که قبلاً گفته شد، در این مقاله برای یافتن بهترین چینش ایستگاه های استقرار لیزر اسکنر، از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات استفاده می شود. مجموعه ای از ایستگاه های کاندید برای استقرار دستگاه به عنوان یک ذره (پاسخ) در نظر گرفته می شود. مجموعه ای از ذرات (پاسخ های مختلف) که گروه اولیه را تشکیل می دهند وارد الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات شده و در هر مرحله از تکرار، برای هر ذره موقعیت و سرعت ذره در فضای جستجو محاسبه می شود. از میان این ذرات (پاسخ ها)

در این رابطه، (x, y, z) مختصات نقاط مدل و پارامترهای $R_{\min}$ و $R_{\max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر فاصله قابل اندازه گیری دستگاه لیزر اسکنر زمینی است. لیزر اسکنر زمینی از میان این مجموعه نقاط، نقاطی که در خط دید مستقیم دستگاه در نقطه کاندید قرار داشته باشند را اندازه گیری می کند. $VisP_k$ زیر مجموعه ای از مجموعه V_k می باشد که از نقطه استقرار k ام قابل دید بوده و اندازه گیری می شوند. نحوه بدست آوردن این مجموعه نقاط را رابطه (۴) نشان می دهد.

$$VisP_k = \{ \exists (x, y, z) \in V_k \mid Los(x, y, z) = 1 \} \quad (4)$$

منظور از عبارت $Los(x, y, z) = 1$ آن است که نقطه با مختصات (x, y, z) از نقطه مبدأ مختصات قابل دید بوده و مانعی میان مبدأ و این نقطه وجود ندارد. در روش پیشنهادی این بدان معناست که این نقطه در خط دید^۱ دستگاه لیزر اسکنر می باشد. چرا که در اندازه گیری با دستگاه لیزر اسکنر زمینی نقطه استقرار دستگاه مبدأ سیستم مختصات و نقطه هدف نیز روی عارضه در داخل این سیستم مختصات تعیین موقعیت می شود.

با استفاده از رابطه های (۳) و (۴) مجموعه Occ_k ، به عنوان مجموعه نقاطی که از نقطه استقرار k ام اندازه گیری نشده اند، محاسبه می شود. رابطه (۵) بیان ریاضی این مجموعه را نشان می دهد.

$$Occ_k = V_k - VisP_k \quad (5)$$

L_{Occ_k} ، تعداد اعضاء مجموعه Occ_k به عنوان هزینه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی در k امین نقطه کاندید در نظر گرفته خواهد شد. به این ترتیب با در نظر گرفتن مراحل مختلف شیوه محاسبه هزینه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی در k امین نقطه کاندید، هزینه استقرار دستگاه برای تمامی نقاط کاندید محاسبه می شود. اگر تعداد کل نقاط کاندید برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر در مدل برابر m در نظر گرفته شود. در این صورت از کل نقاط تنها کافی است n نقطه برای اندازه گیری انتخاب

^۱ Line of sight (Los)

بهترین ذره (پاسخ) ذخیره می‌شود. گروه‌های مختلفی از ذرات به صورت تصادفی در مراحل تکرار الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرند و این کار آن قدر تکرار خواهد شد تا بهترین ذره شرط‌های توقف الگوریتم را بر آورده نماید. به عبارت دیگر برای یافتن بهترین حالت (ذره)، مجموعه‌ای از حالت‌ها (گروه) در فرآیند بهینه‌سازی گروه ذرات به حرکت در می‌آیند تا بهترین حالت بدست آید.

بهترین حالت از میان حالت‌ها زمانی مشخص می‌گردد که شرایط توقف تعیین شده برای الگوریتم گروه ذرات برآورده شود. به طور کلی شرایط توقف می‌تواند به صورت یکی از موارد زیر تعریف شود:

- ✓ رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ (رسیدن به مقدار هزینه مطلوب از نقطه نظر تعداد ایستگاه و همچنین نواحی پنهان)
- ✓ سپری شدن تعداد تکرار / زمان مشخص
- ✓ سپری شدن تعداد تکرار / زمان مشخص بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه
- ✓ بررسی شدن تعداد مشخصی از پاسخ‌ها^۱ (NFE)

اعمال هر یک از شرایط فوق در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات میسر است. هزینه مطلوب برای حالتی در نظر گرفته می‌شود که تعداد ایستگاه‌های انتخاب شده، به تعداد مشخص (به عنوان مثال ۲۰ ایستگاه از میان ۴۰۰ ایستگاه کاندید) و همچنین میزان ناحیه پنهان سراسری به حد تعریف شده (به عنوان نمونه ۵٪ کل نقاط ابرنقاط مدل نهایی) برسد. البته از نظر محاسباتی، الگوریتم بهینه‌سازی اگر بتواند با تعداد کمتری از بررسی پاسخ‌ها به نتیجه حالت بهینه دست پیدا کند، الگوریتم مناسب‌تری خواهد بود. در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات مورد استفاده در این مقاله، تعداد کل پاسخ‌های تصادفی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد.

$$NFE = n_{pop} + t \times (2 \times n_{pop} + 1) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، n_{pop} اندازه گروه و t تعداد تکرار الگوریتم می‌باشد. فرآیند کلی روش پیشنهادی برای استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای جانمایی بهینه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی، در شکل ۳ نشان داده شده است.

علاوه بر مزایا و ویژگی‌هایی که الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (مطرح شده در بخش مسأله بهینه‌سازی) دارد، این الگوریتم دارای برخی محدودیت‌ها و معایب نیز می‌باشد، که بر کارایی عملکرد آن مؤثر است.

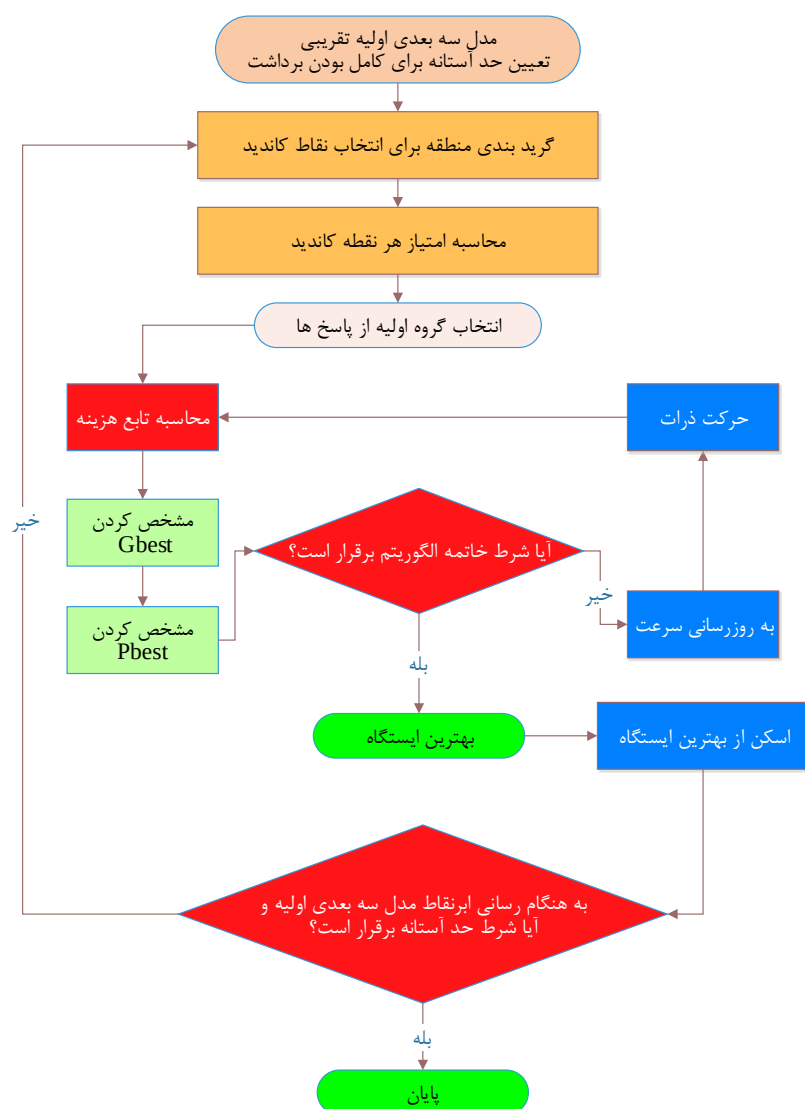
✓ همگرایی زودرس: عمده‌ترین مسئله الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات همگرایی زودرس آن می‌باشد. در این الگوریتم ذرات (جواب‌ها) به تدریج در فضای جستجو، در نزدیکی بهترین نقطه بهینه عمومی (بهترین جواب) حرکت می‌کنند و بقیه فضا را مورد کاوش قرار نمی‌دهند. به عبارتی ذرات (جواب‌ها) همگرا می‌شوند. چرا که سرعت ذرات با افزایش تکرار کاهش می‌یابد و بنابراین الگوریتم مجبور می‌باشد به بهترین موقعیتی که تاکنون کشف کرده، همگرا شود و تضمینی نیست که بهترین راه حل سراسری باشد. این مسئله حاصل مکانیزم نامناسب تعادل میان جستجوی سراسری و محلی می‌باشد. در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، در تکرارهای اول جستجوی سراسری ترجیح داده می‌شود و به بهبود عملکرد آن کمک می‌کند و در تکرارهای آخر، جستجوی سراسری کاهش، و جهت بهره‌گیری بیشینه از اطلاعات به دست آمده جستجوی محلی ترجیح داده می‌شود.

✓ گرفتار شدن در بهینه محلی: در طول فرایند جستجو ممکن است برخی ذرات در گروه در بهینه محلی گرفتار شوند و در جستجوهای بعدی شرکت نکنند. این موضوع در بهینه‌سازی چندهدفه با ابعاد بالا مرسوم است. ذرات (جواب‌های) بهینه محلی موجب همگرایی زودرس و ارائه راه‌حل ضعیف می‌شوند.

✓ کاهش تنوع گروه: در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات پس از مقداردهی اولیه به ذرات، ذرات در گروه معمولاً در تکرارهای پی‌درپی فرآیند جستجو به جواب‌های بهینه محلی یا سراسری در فضای جستجو همگرا می‌شوند. ذرات تحت تاثیرپذیری و تبعیت از بهترین ذره کشف شده در کل گروه اطراف آن ذره جمع می‌شوند و یا به عبارتی منقبض می‌گردند، در نتیجه در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات تنوع گروه به مرور زمان کاهش می‌یابد.

برای غلبه بر این مسائل، در این مقاله با الگو گرفتن از عملکرد جهش در الگوریتم ژنتیک، به نوعی در طی تکرارهای متوالی (با ایجاد پاسخ‌های جدید بر اساس ترکیب جواب‌های بهینه فعلی) از امکان جستجوی سراسری فضا برای دستیابی به بهترین جواب بهره گرفته شد.

^۱ Number of Function Evaluation



شکل ۳- فرآیند به کارگیری الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات برای انتخاب ایستگاه های استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی

شده است، اگر مجموع دو عدد φ_1 و φ_2 عدد φ بوده و از ۴ بزرگتر باشد. در این صورت طبق رابطه (۹) می توان ضریب انقباض را به عنوان ضریب کلی سرعت در نظر گرفت. همچنین با داشتن این ضریب مقادیر یادگیری شخصی و جمعی نیز قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن این شرایط مقادیر بهینه برای پارامترهای الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات به صورت جدول ۱ بدست آمده است. در این مقاله نتیجه اعمال این روش مقداری به پارامترها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 > 4$$

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (9)$$

$$c_1 = \chi \times \varphi_1$$

$$c_2 = \chi \times \varphi_2$$

الگوریتم گروه ذرات همچون هر الگوریتم بهینه سازی دارای پارامترهای مختلفی است که رسیدن به مقادیر صحیح پارامترهای آن، خود نیز به نوعی یک مسأله فرابینه سازی^۱ محسوب می شود [۳۱]. با توجه به تحقیقات انجام شده، مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم گروه ذرات مطابق مقادیر جدول ۱ بدست آمده اند [۳۱]. با تعریف یک پارامتر به نام ضریب انقباض^۲ برای سرعت حرکات ذرات کارایی الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات بهبود پیدا می کند. این ضریب را با χ نمایش می دهند که در کل رابطه (۱) ضرب می شود. در تحقیق انجام شده برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم گروه ذرات نشان داده

^۱ Meta Optimization

^۲ Constriction Factor

جدول ۱- مقادیر پارامترهای بهینه برای الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات [۳۱]

$w = \chi$	φ	$c_2 = \chi \times \varphi_2$	$c_1 = \chi \times \varphi_1$	φ_2	φ_1
۰,۷۲۹۸	۴,۱	۱,۴۹۶۲	۱,۴۹۶۲	۲,۰۵	۲,۰۵

به این ترتیب، با تعریف فضای جستجو و با به کارگیری الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات، حداقل تعداد نقاط استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی برای برداشت کامل و دقیق منطقه مورد نظر بدست می آید. در بخش بعدی پیاده سازی روش انجام شده و نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

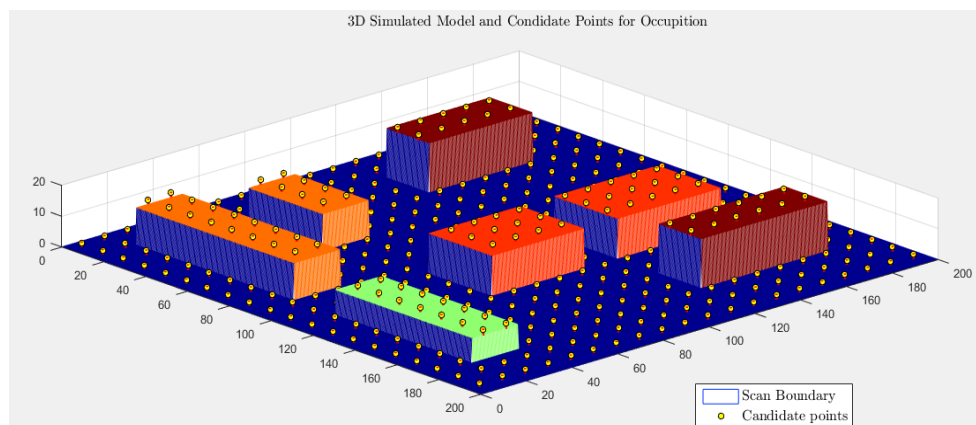
۴- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این مقاله، با تعریف پارامترها و ساختار الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات، امکان پیاده سازی و اجرای آن برای جانمایی بهینه موقعیت قرارگیری دستگاه لیزر اسکنر زمینی فراهم شد. این پیاده سازی در محیط برنامه نویسی MATLAB صورت گرفت. روش پیشنهادی بر روی داده نمونه، مورد آزمایش قرار گرفت. یک محدوده با وسعت ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر، قسمتی از یک منطقه شهری که چندین ساختمان با ارتفاعهای مختلف (۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ متری) درون آن وجود دارد، به صورت سه بعدی شبیه سازی شد. در شکل ۴، مدل شبیه سازی محدوده ای که باید اسکن شود، بر مبنای اطلاعات کلی منطقه و در جدول ۲، مشخصات و جزئیات محدوده شبیه سازی شده برای پیاده سازی این روش نشان داده شده است. از آنجا

که در این قسمت هدف ارزیابی روش پیشنهاد شده است، ابرنقاط مدل شبیه سازی شده به عنوان مدل نهایی منطقه ای که باید اسکن شود، در نظر گرفته شد. همچنین از روی این ابرنقاط نهایی، ابرنقاط مدل اولیه با کاهش رزولوشن فاصله ای ابرنقاط اولیه تهیه شد. در هر مرحله از تکرار روش پیشنهادی، ابرنقاط اولیه با برداشت از روی مدل نهایی در استقرار بر روی نقطه کاندید انتخاب شده توسط الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات بهنگام رسانی شده و تا رسیدن به حد آستانه نهایی تعریف شده تکرار عملیات صورت می پذیرد. به عبارت دیگر در این آزمایش ها به این شیوه عملکرد روش پیشنهادی به صورت دقیق مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است. اگر این آزمایش بر روی داده واقعی نیز بخواهد صورت بگیرد، بایستی مدل نهایی از محدوده اسکن جهت بررسی دقت و صحت روش پیشنهادی موجود باشد، لذا در این مقاله علاوه بر داده شبیه سازی شده از داده های واقعی مربوطه به به ساختمان موزه ویلهلم بوش در هاننور آلمان که در سال ۲۰۰۴ از ۱۴ ایستگاه مختلف اندازه گیری شده بود، نیز استفاده شد. در این مقاله، رابطه (۶) به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شده است. هزینه انتخاب هر نقطه کاندید برای استقرار دستگاه نیز به شیوه گفته شده در مرحله قبل محاسبه شد. مجموعه ای از جواب ها (گروه ذرات) که در هر مرحله به صورت تصادفی انتخاب می شوند، با استفاده از این تابع هزینه، مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت جواب بهینه مشخص شده است.

جدول ۲- مشخصات منطقه شبیه سازی شده برای پیاده سازی روش پیشنهادی

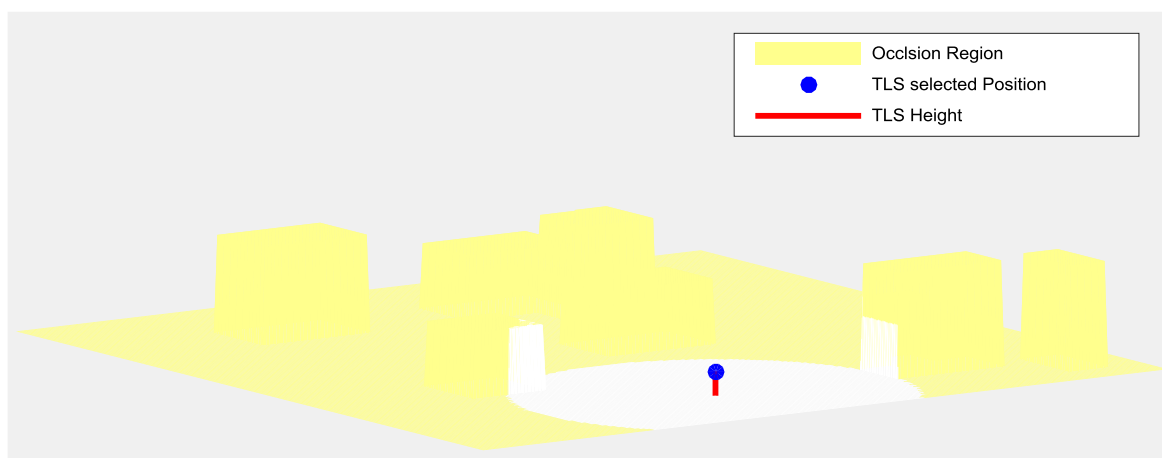
وسعت منطقه	ابعاد گرید برای نقاط کاندید	ابعاد منطقه برای محاسبه میدان دید	تعداد کل نقاط مدل	تعداد نقاط کاندید ارزیابی شده
۴۰۰۰۰	۱۰ × ۱۰	۲۰۰ m × ۲۰۰ m	۱۶۰۸۰۱	۴۰۰



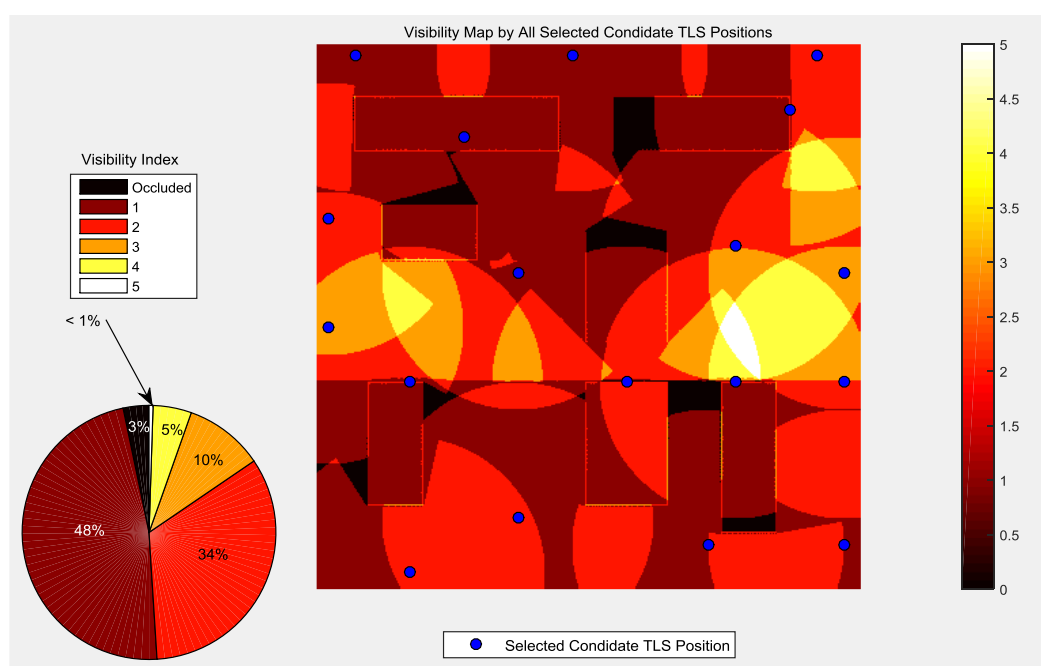
شکل ۴- مدل سه بعدی شبیه سازی شده و نقاط کاندید برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی

به عنوان نمونه، در یکی از آزمایش‌های انجام‌شده برای ارزیابی روش پیشنهادی ایستگاه‌های متوالی برای اسکن محدوده یکی پس از دیگری انتخاب شدند. در شکل ۵، اولین ایستگاه که در میان تمامی ایستگاه‌های کاندید کمترین هزینه استقرار را دارد، نشان شده است. در تکرارهای بعدی تا پوشش کامل محدوده، ۱۷ ایستگاه از میان ۴۰۰ ایستگاه کاندید به عنوان بهترین جواب انتخاب شده است. با استفاده از این جواب تقریباً ۹۷٪ ابر نقاط مدل نهایی قابل اسکن می‌باشد. بدیهی است که ابرنقاط برخی از ایستگاه‌ها با هم دیگر همپوشانی داشته باشد. در شکل ۶، نقشه پوشش میدان دید نهایی نقاط کاندید انتخاب شده به همراه نمودار وضعیت پوششی میدان دید

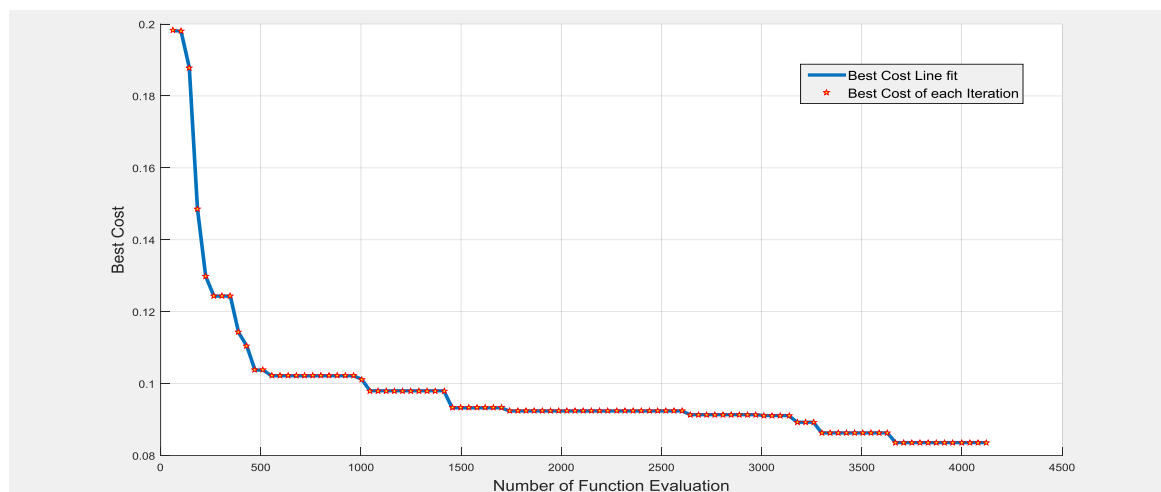
(تعداد دیده شدن نقاط مختلف ابرنقاط نهایی مدل با رنگ‌های مختلف بین صفر تا پنج بار) در خروجی مرحله نهایی این آزمایش نشان داده شده است. این شکل موقعیت نقاط کاندید نهایی انتخاب شده را از نمای بالا در محدوده اسکن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص شده است، اسکن ۴۸ درصد منطقه تنها یکبار و از یک ایستگاه انجام شده است. این موضوع تایید انتخاب بهینه نقاط استقرار است. در شکل ۷ نیز نمودار چگونگی کاهش مقدار تابع هزینه برای جواب‌های مختلف برای انتخاب ایستگاه کاندید مناسب برای استقرار، در یکی از تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در جانمایی دستگاه لیزر اسکنر زمینی نشان داده است.



شکل ۵- میدان دید یک نقطه کاندید نمونه انتخاب شده برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی



شکل ۶- نقشه پوشش محدوده ابرنقاط نهایی و چیدمان نقاط انتخاب شده برای استقرار دستگاه به همراه نمودار تعداد دفعات دیده شدن نقاط مدل



شکل ۷- نمودار وضعیت تابع هزینه برای اندازه گروه ۲۰ و تعداد ۱۰۰ تکرار (۴۱۲۰ پاسخ مختلف)

عبور از جواب‌های محلی مورد بررسی و آزمون قرار گرفت و عملکرد الگوریتم با تغییر هر یک از موارد مورد بررسی واقع شد.

به عنوان مثال، در یک سری از آزمایش‌ها تمامی مقادیر الگوریتم ثابت نگه داشته شد و تنها با افزایش تعداد ذرات چگونگی تغییر وضعیت تابع هزینه بدست آمد. شکل ۸، نمودار تغییرات مقدار تابع هزینه برای تعداد ذرات مختلف را نشان می‌دهد. تابع هزینه مورد استفاده در این مقاله به صورت دوهدفه عمل می‌نماید. هدف اول کاستن از تعداد نقاط استقرار و هدف دوم کاستن از مقدار نواحی پنهان از مدل تقریبی سه بعدی اولیه است. با تغییر پارامترهای تنظیمی مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی، تعداد نقاط کاندید انتخاب شده برای استقرار دستگاه و همچنین درصد نواحی پوشش داده نشده از کل محدوده مدل در این آزمایش‌ها تغییر پیدا می‌نماید. گرچه با تکرارهای زیاد و آزمون و خطا مقادیر مناسبی برای پارامترها بدست آمد که در نهایت جواب بهینه با حداقل تعداد نقاط کاندید و حداقل نواحی پنهان را نتیجه داد. اما به دلیل ماهیت تصادفی بودن جواب‌ها رسیدن به مقدار بهینه با توجه به آزمایشات مختلف به درستی میسر نیست. شکل ۹، وضعیت تغییر تعداد ایستگاه‌های انتخاب شده را در آزمایش قبل نسبت به افزایش تعداد ذرات و همچنین تغییرات درصد نواحی پنهان در برخی از آزمایشات را نشان می‌دهد. قابل توجه است که نتایج مندرج در شکل ۸ و شکل ۹ با مقادیر تنظیمی اولیه به دست آمده‌اند. در این آزمایش‌ها مقادیر پارامترهای ضریب اینرسی w برابر ۰٫۴، ضریب یادگیری شخصی c_1 و ضریب یادگیری جمعی c_2

نکته قابل توجه در خصوص الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات آن است که این الگوریتم تحت تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل بعد مسأله، تعداد ذرات، اندازه همسایگی، حداکثر سرعت، ضرایب یادگیری شخصی و جمعی مقیاس‌گذاری می‌شود. هر یک از این پارامترها نتیجه نهایی را در خروجی الگوریتم تغییر می‌دهند.

✓ تعداد ذرات : مقدار ذرات بیشتر در گروه امکان جستجوی سراسری بیشتری فراهم می‌کند. اگر بتوان با تعداد ذرات کمتر به جواب بهینه رسید، بنابراین استفاده از تعداد ذرات بیشتر تنها هزینه محاسباتی را افزایش داده و به صرفه نخواهد بود.

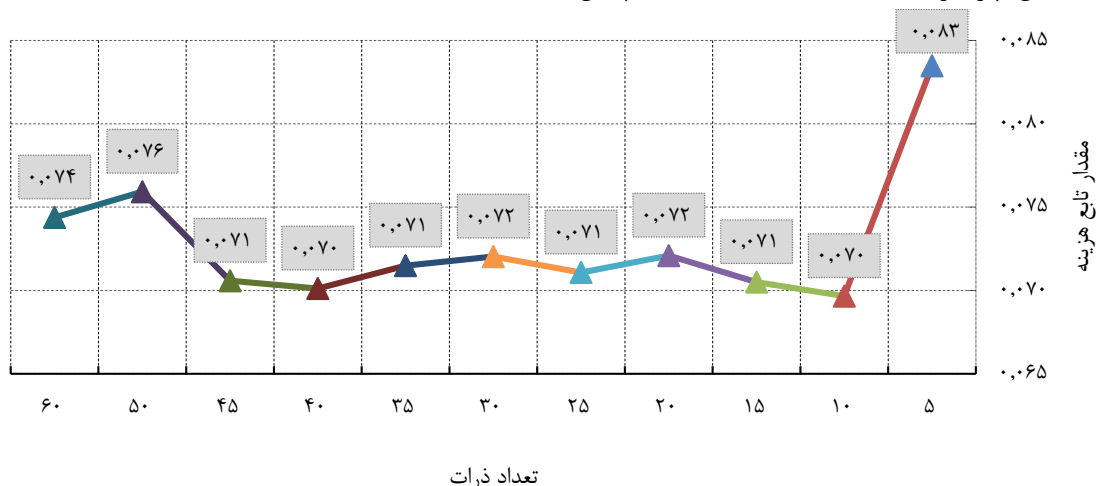
✓ تعداد تکرارها: تعداد تکرارها نیز بسته به نوع مسأله است، لذا یکی از مسائل مهم یافتن تعداد تکرارهای مناسب است.

✓ ضرایب یادگیری شخصی و جمعی : این ضرایب گاه با عنوان ضرایب اعتماد هم شناخته می‌شوند. به عبارت بهتر هر کدام نشان‌دهنده آن هستند که یک ذره چقدر به تبعیت از بهترین خاطره شخصی و یا بهترین خاطره جمعی در فضای جستجوی حرکت نماید. لذا انتخاب صحیح این مقادیر می‌تواند نتیجه نهایی را بهبود بخشد.

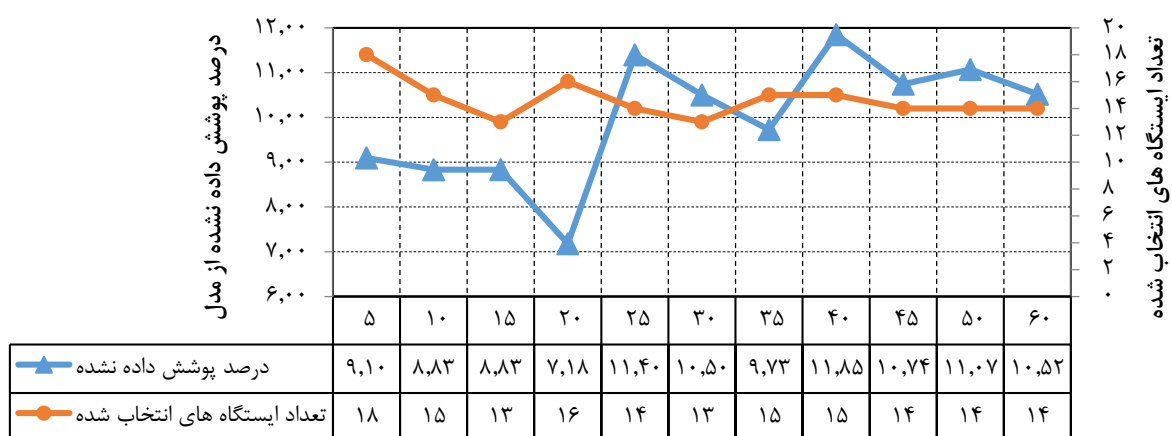
یکی از روش‌های دستیابی به مقادیر بهینه برای پارامترهای الگوریتم آن است که در شرایط ثابت تنها یکی از پارامترها را تغییر داده و حالت‌های رخ داده را مورد بررسی قرار دهیم. در این مقاله تعداد ذرات، مقادیر ضریب یادگیری شخصی و گروهی، ضریب اینرسی، همچنین حداکثر تعداد دفعات تکرار الگوریتم و نرخ جهش برای

هر دو برابر ۲ در نظر گرفته شده و همچنین حداکثر تعداد دفعات تکرار الگوریتم نیز ثابت و برابر ۱۰۰ تکرار بوده است. با وجود اعمال اپراتور جهش برای حل معایب روش بهینه سازی گروه ذرات کمترین مقدار تابع هزینه بدست آمده با این پارامترها عدد ۰,۰۷ شده است. همچنین

حداکثر پوششی که برای محدوده در این حالت، نقاط انتخابی ایجاد می کنند برابر با ۹۳ درصد می باشد. به عبارت دیگر حدود ۷ درصد از منطقه وجود دارد که با اسکن از نقاط کاندید انتخاب شده همچنان اسکن نخواهند شد.



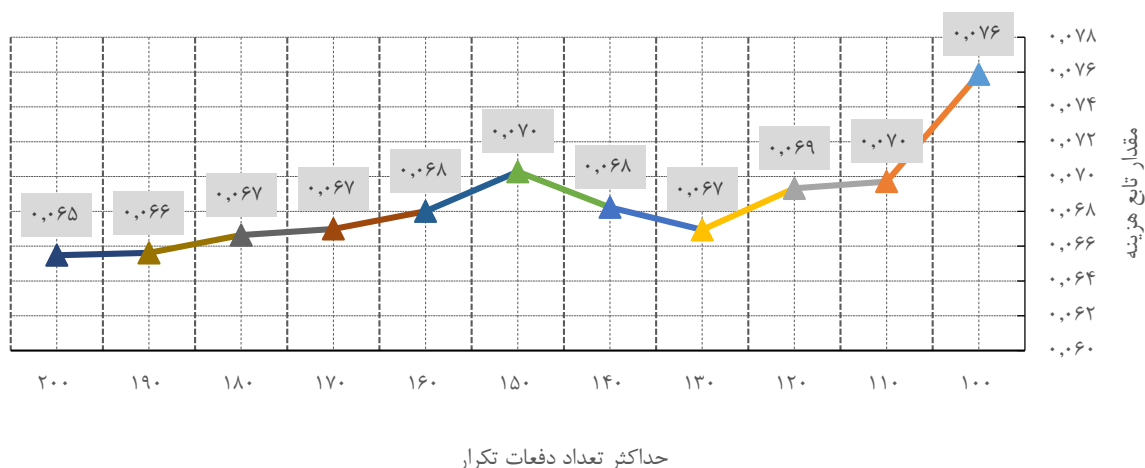
شکل ۸- نمودار تغییرات تابع هزینه با ثابت نگه داشتن پارامترها و تغییر تعداد ذرات گروه



شکل ۹- نمودار وضعیت نواحی پنهان از محدوده مدل در اسکن و همچنین وضعیت تعداد نقاط کاندید انتخاب شده

همان طور که گفته شد، در سال های اخیر اصلاحات متنوعی بر روی الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات برای تسریع در یافتن جواب بهینه و افزایش کیفیت جواب آن اعمال شده است. از جمله این اصلاحات همان طور که در بخش روش پیشنهادی نیز به آن اشاره شده است، استفاده از محدودیت سرعت و ضریب انقباض می باشد. برای اینکه تأثیر این پارامتر بر روند کاهش هزینه قابل مشاهده شود. در یک آزمایش با افزایش تعداد تکرار الگوریتم از ۱۰۰ تکرار تا ۲۰۰ تکرار با گام های ۱۰ تایی وضعیت کاهش مقدار تابع هزینه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، با استفاده از مقادیر

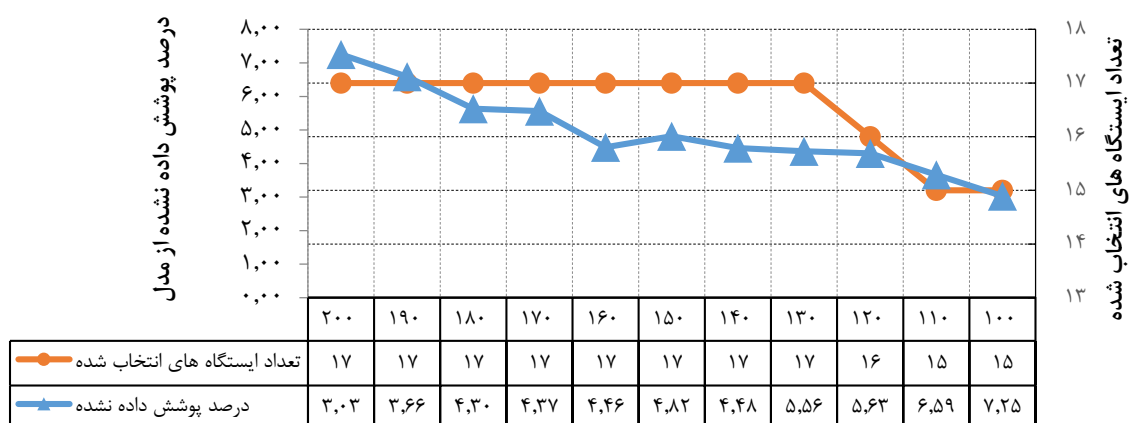
جدول ۱، نمودار مقدار تابع هزینه برای تکرارهای مختلف الگوریتم محاسبه شده است. با افزایش تعداد حداکثر دفعات تکرار الگوریتم، مقدار نهایی تابع هزینه کاهش می یابد.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات مقدار تابع هزینه در تعداد تکرارهای مختلف با استفاده از پارامترهای بهینه

بهتری توسط الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات بدست آمده است. نکته قابل توجه آن است که با افزایش تعداد تکرارها مقدار تابع هزینه نیز به نوعی کاسته شده است.

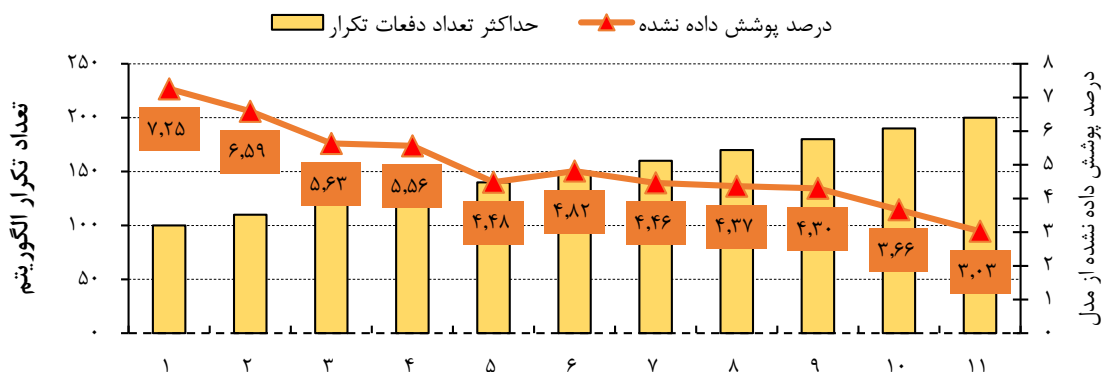
وضعیت نواحی پنهان و همچنین تعداد نقاط انتخابی با استفاده از ضریب انقباض در الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص شده است، در این حالت جواب بهینه



شکل ۱۱- نمودار وضعیت درصد نواحی پوشش داده نشده از محدوده مدل در اسکن و همچنین وضعیت تعداد نقاط کاندید انتخاب شده

بهینه‌سازی گروه ذرات با ۱۷ ایستگاه از میان ۴۰۰ ایستگاه تنها ۳,۰۳ درصد از منطقه جزء ناحیه پنهان می‌باشد.

در این آزمایش چگونگی افزایش پوشش منطقه با افزایش تعداد تکرار الگوریتم، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ۲۰۰ تکرار برای الگوریتم

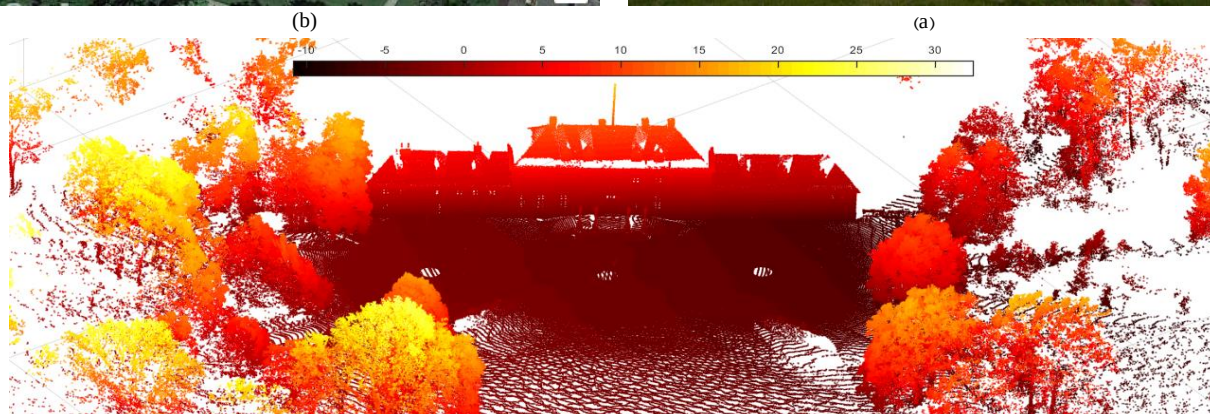


شکل ۱۲- وضعیت کاهش نواحی پنهان با افزایش تعداد تکرار الگوریتم گروه ذرات

برای ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده در این مقاله، آزمایشی بر روی داده واقعی دستگاه لیزر اسکنر زمینی نیز انجام شد. برای این منظور، داده واقعی مربوط به ساختمان موزه ویلهلم بوش در هاننور آلمان [۳۲] که در سال ۲۰۰۴ از ۱۴ ایستگاه مختلف اندازه‌گیری شده بود، به کار گرفته شد. در شکل ۱۳، موقعیت جانمایی ایستگاه‌های استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی، تصویری از ساختمان موزه و همچنین ابرنقاط هم مرجع شده ۳ ایستگاه آن نشان داده شده است.

در این مرحله، ابرنقاط نهایی ۱۴ ایستگاه هم مرجع شده، به عنوان هدف برای انجام اسکن به الگوریتم معرفی شد. در این شرایط هدف آن است که توانایی انتخاب نقاط کاندید برای استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی توسط الگوریتم با حالت انجام شده پروژه مقایسه شود. همان طور که شکل ۱۳، قسمت (a)، نشان داده شده است، انتخاب نقاط استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی با مهارت خوبی در اطراف ساختمان مزبور در آن زمان انجام شده است. در شکل ۱۳، قسمت (b)، موقعیت ۱۴ ایستگاه استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی در اطراف ساختمان موزه نشان داده شده است. در شکل ۱۳، قسمت (c)، ابرنقاط هم

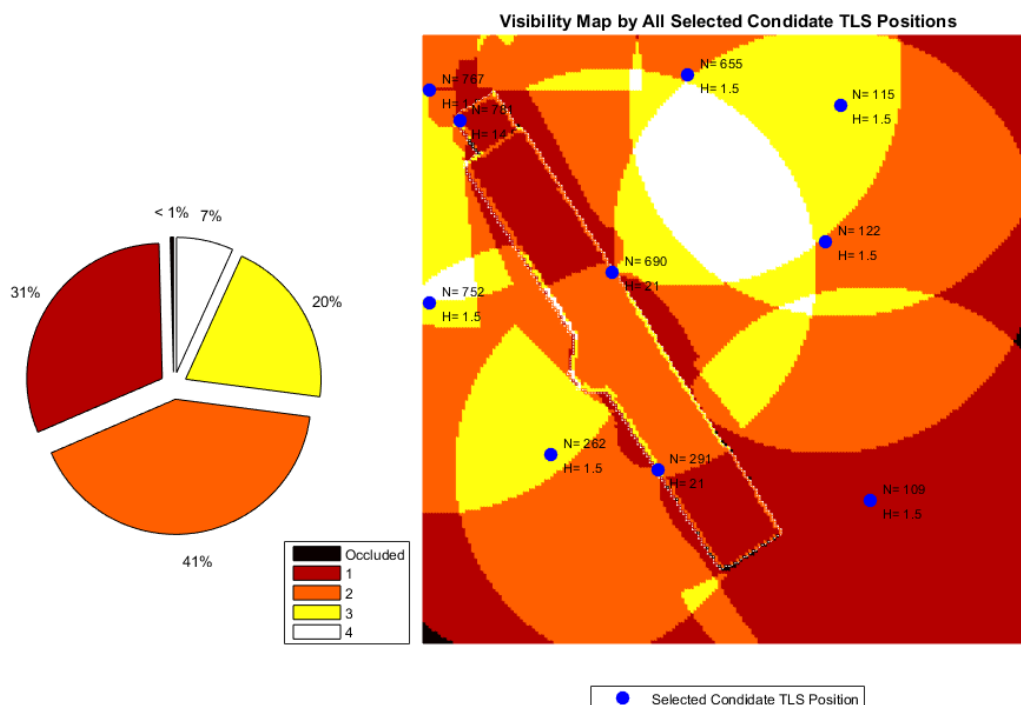
مرجع شده ۳ ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه لیزر اسکنر زمینی برای این محدوده نشان داده شده است. به عنوان ورودی سیستم جانمایی موقعیت دستگاه لیزر اسکنر زمینی، مدل بسیار ساده شده محدوده موزه استفاده شد. نتایج اعمال الگوریتم بر روی این مدل اولیه در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص شده است، الگوریتم با شبکه‌بندی به اضلاع ۵ متری محدوده اولیه، ۱۰ نقطه کاندید انتخاب کرده است. چیدمان نهایی نقاط انتخاب شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل رنگ‌های مختلف نشان‌دهند تعداد دفعات دیده‌شدن نقاط ابرنقاط نهایی است. همان‌طور که به صورت نمودار نیز مشخص شده است، ۷ درصد نقاط از چهار ایستگاه، ۲۰ درصد نقاط از سه ایستگاه، ۴۱ درصد نقاط از دو ایستگاه، ۳۱ درصد از یک ایستگاه و کمتر از ۱ درصد نقاط از هیچ کدام از ایستگاه‌های نهایی انتخاب شده قابل اندازه‌گیری نیستند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزاری در راستای انتخاب نقاط بهینه اسکنر مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۳- (a) محدوده موزه Wilhelm Busch Museum بر روی تصویر ماهواره ای و موقعیت‌های نقاط استقرار دستگاه لیزر اسکنر، (b) تصویر مقابل موزه، (c) ابرنقاط سه ایستگاه لیزر اسکنر زمینی، (d) مدل سه بعدی نهایی تهیه شده از ابرنقاط برداشت شده

جدول ۳- نتایج اعمال الگوریتم برای پیشنهاد نقاط مناسب برای استقرار لیزر اسکنر زمینی

آزمایش	برد دستگاه		تعداد نقاط کاندید انتخاب شده	میزان پوشش داده نشده از محدوده مورد نظر برای اسکن (درصد)
	حداقل	حداکثر		
۱	۱	۷۰	۱۰	۰/۳۹٪



شکل ۱۴- جانمایی ایستگاه‌های پیشنهادی برای انجام اسکن در محدوده موزه

افزایش داده و نقاط بیشتری را برای یافتن حالت بهینه استقرار بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد تعداد ذرات بین ۲۰ تا ۴۰ ذره، تکرار میان ۱۰۰ تا ۱۵۰ تکرار می‌تواند به سرعت جواب بهینه را در مسأله پیدا کند. ایجاد مکانیزم جهش در زمان‌هایی که مسأله در جواب‌های بهینه محلی گرفتار شده است، باعث شد که بتوان انتخاب بهتری را نسبت به حالت اولیه الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات انجام داد.

۵- نتایج و پیشنهادها

در برداشت محوطه‌های بیرونی ساختمان‌ها و عوارض طبیعی با دستگاه لیزر اسکنر زمینی، انتخاب موقعیت‌هایی که بیشترین پوشش را برای نواحی پنهان فراهم می‌کنند، یکی از عمده‌ترین مسائلی است که اهمیت مکان‌یابی بهینه برای این نوع دستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در عمل، تعیین محل‌های استقرار دستگاه لیزراسکنر بایستی به نحوی باشد که بیشترین پوشش از منطقه را داشته و دقت موردنیاز را ضمانت و در ضمن تعداد ایستگاه‌های موردنیاز

بررسی‌های مختلف روی پارامترهای الگوریتم گروه ذرات نشان داد که مقادیر آن‌ها به شدت روی سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی تأثیرگذار هستند. در خصوص مقادیر مربوط به ضرایب یادگیری شخصی یا جمعی و همچنین ضریب انقباض مقادیری که در جدول ۱ آمده است، مطابق با نتایج حاصل نتیجه بهتری را نشان داد. به عبارت دیگر ایجاد تعادل میان حرکت در راستای بهترین خاطره شخصی و همچنین حرکت در راستای بهترین تجربه جمعی با یک سرعت مناسب نتیجه تنظیم صحیح این پارامترها می‌باشد. از آن جا که مسأله جانمایی دستگاه لیزراسکنر زمینی با استفاده از آنالیز میدان دید و کاهش نواحی پنهان و همچنین تعداد حداقلی برای ایستگاه‌های استقرار مدل‌سازی شده است، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات بخوبی می‌تواند محل‌های مطلوب را با مینیمم کردن تابع هزینه دو هدفه انتخاب نماید.

روش ارائه شده برای مسائل با ابعاد مختلف نیز بسادگی قابل پیاده‌سازی است. به عنوان مثال می‌تواند در گریدبندی مدل اولیه فواصل نقاط کاندید برای استقرار را

را به حداقل ممکن خود برساند. در این مقاله با استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی یک راه حل پیشرونده برای این مسأله مطرح شد. در این مقاله، موضوع جانمایی دستگاه لیزر اسکنر مشابه مسأله ترکیب انتخاب یک مجموعه کوچک از یک مجموعه بزرگ در نظر گرفته شد. با ایجاد شرایط لازم برای انتخاب یک ایستگاه کاندید و امتیازدهی بر اساس میدان دید هر ایستگاه، امکان انتخاب بهینه فراهم شد. به این ترتیب مسأله جانمایی دستگاه لیزر اسکنر زمینی به یک مسأله بهینه‌سازی منجر می‌شود.

حل مسأله بهینه‌سازی به صورت عددی به دو روش قطعی و تصادفی میسر است. در مواردی که فضای جستجو پیچیده و بزرگ باشد، امکان استفاده از روش‌های قطعی کمتر است. لذا در این مقاله از روش‌های عددی تصادفی استفاده شد. در میان روش‌های عددی تصادفی نیز الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات با توجه به ماهیت مسأله و عملکرد آن مد نظر قرار گرفت.

استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی نیازمند شناخت دقیق الگوریتم و تأثیر پارامترهای مختلف آن بر نتیجه می‌باشد. در این مقاله با توجه به شرایط آزمونی که فراهم شد، تأثیر هر یک از پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

مورد توجه قرار گرفت. موضوع بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به بهترین جواب ممکن در جانمایی دستگاه لیزر اسکنر زمینی آنالیز شد. با توجه به تحقیقات گسترده‌ای که در حوزه هوش مصنوعی در این زمینه انجام شده است، مقادیر مناسب مورد توجه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با استفاده از این ابزار امکان انتخاب بهینه نقاط استقرار دستگاه با تأکید بر کاهش نواحی پنهان و همچنین کاهش تعداد نقاط استقرار امکان‌پذیر است.

روش استفاده از الگوریتم گروه ذرات به خوبی، محل‌های بهینه برای استقرار دستگاه را با تعداد ذرات کم و همچنین تعداد تکرارهای نسبتاً کم بدست می‌آورد. برای غلبه بر مشکل همگرایی زودرس، رفتار شدن در جواب‌های بهینه محلی و کاهش تنوع جواب‌ها از ترکیب با عملگر جهش الگوریتم ژنتیک و همچنین ضریب انقباض کمک گرفته شد.

استفاده از سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچه‌ها و سایر الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند برای انتخاب بهینه نقاط استقرار دستگاه لیزر اسکنر زمینی مورد استفاده قرار بگیرد. در کارهای آینده به دنبال به کارگیری این روش‌ها در این زمینه خواهیم بود.

مراجع

- [1] L. De Floriani, P. Marzano, and E. Puppo, "Line-of-sight communication on terrain models," International Journal of Geographical Information Systems, vol. 8, pp. 329-342, 1994/07/01 1994.
- [2] V. Akbarzadeh, J.-C. Lévesque, C. Gagné, and M. Parizeau, "Efficient Sensor Placement Optimization Using Gradient Descent and Probabilistic Coverage," Sensors, vol. 14, pp. 15525-15552, 2014.
- [3] F. Yap and H.-H. Yen, "A Survey on Sensor Coverage and Visual Data Capturing/Processing/Transmission in Wireless Visual Sensor Networks," Sensors, vol. 14, pp. 3506-3527, 2014.
- [4] A. H.-R. Ko, A.-L. Joussetme, R. Sabourin, and F. Gagnon, "A dominance-based stepwise approach for sensor placement optimization," Applied Soft Computing, vol. 28, pp. 466-482, 3// 2015.
- [5] H. R. Topcuoglu, M. Ermiş, and M. Sifyan, "Positioning and Utilizing Sensors on a 3-D Terrain Part I—Theory and Modeling," Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 376-382, 2011.
- [6] M. Argany, M. Mostafavi, F. Karimipour, and C. Gagné, "A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach," in Transactions on Computational Science XIV. vol. 6970, M. Gavrilova, C. J. K. Tan, and M. Mostafavi, Eds., ed :Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 151-172.
- [7] A. T. Murray, K. Kim, J. W. Davis, R. Machiraju, and R. Parent, "Coverage optimization to support security monitoring," Computers, Environment and Urban Systems, vol. 31, pp. 133-147, 3// 2007.
- [8] W. R. Scott, G. Roth, and J.-F. Rivest, "View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection," ACM Computing Surveys, vol. 35, pp. 64-96, 2003.
- [9] C. Connolly, "The determination of next best views," in Robotics and Automation .Proceedings. 1985 IEEE International Conference on, 1985, pp. 432-435.

- [10] S. Chen, Y. Li, and N. M. Kwok, "Active vision in robotic systems: A survey of recent developments," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, pp. 1343-1377, 2011.
- [۱۱] م. حیدری مظفر، م. ورشوساز، م. سعادت سرشت، "طبقه‌بندی روش‌های طراحی میدان دید برای استفاده در عملیات برداشت نقشه برداری با دستگاه لیزراسکنر زمینی،" presented at the "یکمین همایش ملی ژئوماتیک تهران - برج میلاد، ۱۳۹۳.
- [12] K. Kawashima, S. Yamanishi, S. Kanai, and H. Date, "Finding the next-best scanner position for as-built modeling of piping systems," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, p. 313, 2014.
- [13] S. Soudarissanane, "The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry," TU Delft, Delft University of Technology, 2016.
- [14] P. Allen, I. Stamos, A. Gueorguiev, E. Gold, and P. Blaer, "AVENUE: Automated site modeling in urban environments," in *3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001. Proceedings. Third International Conference on, 2001, pp. 357-364.
- [15] P. S. Blaer and P. K. Allen, "Data acquisition and view planning for 3-D modeling tasks," in *Intelligent Robots and Systems*, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, 2007, pp. 417-422.
- [۱۶] م. سعادت سرشت، "امکان سنجی اتوماسیون طراحی شبکه برای لیزر اسکنر زمینی،" *مجله مواد مهندسی*, pp. 24-37, 1386.
- [۱۷] م. حیدری مظفر، "طراحی و پیاده سازی الگوریتمی به منظور مکان‌یابی بهینه ایستگاه های لیزر اسکنر زمینی با تاکید بر کاهش نواحی پنهان" پروپوزال دکتری، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
- [18] K. Rose, "Deterministic annealing for clustering, compression, classification, regression, and related optimization problems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 2210-2239, 1998.
- [19] S. S. Rao and S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*: John Wiley & Sons, 2009.
- [20] R. Kolisch and S. Hartmann, "Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis," in *Project Scheduling*. vol. 14, J. Węglarz, Ed., ed: Springer US, 1999, pp. 147-178.
- [21] E.-G. Talbi, *Metaheuristics :From Design to Implementation*: Wiley Publishing, 2009.
- [22] C. P. Lim, L. C. Jain, and S. Dehuri, *Innovations in swarm intelligence* vol. 248: Springer Science & Business Media, 2009.
- [23] G. Beni and J. Wang, "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems," in *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* vol. 102, P. Dario, G. Sandini, and P. Aebischer, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 1993, pp. 703-712.
- [24] R. C. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, 1995, pp. 39-43.
- [25] A. Colorni, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "Distributed optimization by ant colonies".
- [26] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 53-66, 1997.
- [27] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization".
- [28] D. Karaboga and B. Akay, "A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence," *Artificial Intelligence Review*, vol. 31, pp. 61-85, 2009/06/01 2009.
- [29] S. Yuhui and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, 1998, pp. 69-73.
- [30] M. Clerc, *Particle swarm optimization* vol. 93: John Wiley & Sons, 2010.
- [31] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- [32] ikg.uni-hannover. (2015, 3th Novembor). Terrestrial Laser Scans. Available: <http://www.ikg.uni-hannover.de/index.php?id=413&L=1>