



مطالعه بر روی به کارگیری ربات‌های جمعی جهت پایش محیط، نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های پرتوزا

هادی اردینی*، امیر محمد بیگزاده

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران- ایران

*Email: hardini@aeoi.org.ir

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۳ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

چکیده

اکتشاف و نقشه‌برداری از محیط‌های پرتوی از جمله کارهای بالقوه پر چالش و دارای ریسک هستند که به دلایل ایمنی، استفاده از ربات‌ها می‌تواند مخاطرات ممکن برای افراد را کاهش دهد. با این حال، استقرار یک ربات ممکن است برای پوشش مؤثر کل منطقه کافی نباشد؛ از این رو، تکنیک‌های بهره‌گیری از چند ربات یا ربات‌های جمعی می‌تواند نقش به سزایی در کاهش زمان و بهبود فرایند اکتشاف و نقشه‌برداری پرتوی داشته باشد. همچنین سامانه‌های چند رباتی قابلیت اطمینان بالایی دارند و با از کار افتادن تعدادی از ربات‌ها به دلایلی نظیر پرتوگیری، باقی ربات‌ها به ادامه مأموریت خواهند پرداخت. این مقاله به مطالعه بهره‌گیری از چندین ربات خودکار به صورت هم‌زمان برای نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های آلوده می‌پردازد. این بررسی رویکردهای مختلفی از جمله تأثیر تعداد و دز دریافتی ربات‌ها را مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد ربات‌ها می‌تواند باعث افزایش سرعت گردد که این افزایش به صورت خطی نیست و با افزایش ربات‌ها، ازدحام زیاد شده و سرعت با نسبت کمتری افزایش می‌یابد لذا برای رسیدن به الگوی بهینه نیاز است از مدل‌های تکاملی‌تر، نظیر الگوی حرکتی الهام گرفته از طبیعت بهره برد. این مقاله افق‌های ارزشمندی را در مورد هماهنگی چند ربات برای جستجو در محیط‌های پرتوزا ارائه می‌دهد که دریچه‌ای برای بهره‌گیری از هوش جمعی در کاربردهای هسته‌ای خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: ربات جمعی، ربات گروهی، اکتشاف، نقشه‌برداری پرتوی، چشمه پرتوزا

A study on the use of swarm robotics for environmental monitoring, radiation mapping and the discovery of radioactive sources

H. Ardiny*, A.M. Beigzadeh

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEoi, P.O.Box: 14395-836, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 14.11.2023, Revised: 6.2.2024, Accepted: 7.2.2024

Abstract

Exploring and mapping radioactive environments presents potentially challenging and risky tasks. To ensure safety, the use of robots can help mitigate these risks. However, deploying a single robot may not be enough to effectively cover the entire area. Therefore, the technique of using multiple robots or a robot swarm can play a significant role in reducing time and improving the exploration and mapping process. Additionally, multi-robot systems have high reliability, and if a number of robots fail due to reasons such as radiation exposure, the remaining robots can continue the mission. This article focuses on the use of several autonomous robots simultaneously for radiation mapping and the discovery of radioactive sources. The study has examined various approaches, including the effect of the number and absorbed dose of robots. The results indicate that increasing the number of robots can enhance the speed of exploration, but the rate of increase is lower than the rate of the robot number due to the crowding of robots. To achieve optimal exploration, it is necessary to utilize more advanced models, such as movement patterns inspired by nature. This paper presents valuable insights into the coordination of collective robots for searching in radioactive environments, which could open up opportunities for the application of swarm intelligence in nuclear scenarios.

Keywords: Swarm robotics, Multi-robot, Exploration, Radiation mapping, Radioactive sources



۱. مقدمه

ربات‌های جمعی یا ازدحامی رشته‌ای از علم رباتیک است که مشتمل بر هماهنگی^۱ و کنترل گروه‌های بزرگی از ربات‌ها برای انجام یک کار مشترک است. مفهوم رباتیک ازدحامی از رفتار اجتماعی حشرات مانند مورچه‌ها و زنبورها الهام گرفته شده است که در تعداد زیادی برای رسیدن به یک هدف مشترک با یکدیگر همکاری می‌کنند. هماهنگی بین جمع ربات‌ها در سال‌های اخیر، به‌ویژه در حوزه اکتشاف و نقشه‌برداری پرتوی به یک حوزه مطالعاتی مهم تبدیل شده است [۱، ۲]. با توسعه فناوری‌های رباتیک پیشرفته، اکنون می‌توان از ربات‌ها برای کاوش و نقشه‌برداری مناطقی استفاده کرد که به دلیل پرتوایی بالا برای انسان دارای ریسک و چالش یا غیرقابل‌دسترس هستند. سامانه‌های چند رباتی با به‌کارگیری چندین ربات برای انجام عملیات مشترک در جهت یک هدف مشترک، کارایی و قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهند [۳]. در زمینه اکتشاف و نقشه‌برداری محیط‌های پرتوی، ربات‌ها می‌توانند برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد سطح تابش و ایجاد نقشه‌های دقیق از مناطق آلوده همکاری کنند که می‌تواند در جهت اطلاع‌رسانی برای انجام فعالیت‌های رفع آلودگی مواد پرتوزا و حفاظت از سلامت افراد مورد استفاده قرار گیرد [۴]. این حوزه تحقیقاتی، نویدبخش پیشرفت در درک افراد از محیط‌های پرتوزا و بهبود توانایی در پاسخ به حوادث هسته‌ای است. هماهنگی چندرباتی مزایای متعددی نسبت به سامانه‌های تک‌راتی دارد [۳].

یکی از مزیت‌های اصلی بهره‌گیری از سامانه‌های چند ربات افزایش کارایی در عملیات است. زیرا چندین ربات می‌توانند مناطق بزرگ‌تری را در زمان کمتری نسبت به یک ربات واحد پوشش دهند [۵]. این امر به‌ویژه در محیط‌های پرتوی بیشتر حائز اهمیت است، زیرا زمان صرف شده برای انجام عملیات در این مناطق باید به حداقل برسد تا از پرتوگیری غیر ضروری و گسترش بیشتر آلودگی جلوگیری گردد و با نقشه‌برداری هم‌زمان توسط تیم ربات‌ها، داده‌های ارزشمندی فراهم گردد. از دیگر مزایای سامانه‌های چندرباتی بحث افزایش قابلیت اطمینان است [۶]. با استفاده از چند ربات، خطر شکست تک‌نقطه‌ای کاهش می‌یابد. اگر یکی از ربات‌ها در یک محیط خطرناک خراب شود یا آسیب ببیند، ربات‌های دیگر می‌توانند به عملیات ادامه دهند. علاوه بر این، با توزیع حجم کار در چندین ربات، هر ربات جداگانه آسیب محیطی کمتری را تجربه می‌کند و احتمال خرابی مکانیکی کاهش می‌یابد. برای اینکه سیستم‌های

چندرباتی بتوانند به طور مؤثر اقدامات خود را هماهنگ کنند، ممکن است به الگوریتم‌های پیچیده و پروتکل‌های ارتباطی نیاز داشته باشند. این الگوریتم‌ها باید مکان و حرکت هر ربات و همچنین وظیفه‌ای که انجام می‌دهند و موانع موجود در مسیرشان را در نظر بگیرند [۷]. ارتباطات بین ربات‌ها نیز باید به دقت مدیریت شود تا اطمینان حاصل گردد که هر ربات اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری و تنظیم رفتار خود را براساس آن دارد. برخی از ربات‌ها نیز براساس الگوریتم‌های ساده‌تر و نزدیک به طبیعت با هم تعامل می‌کنند و ارتباط آنها از طریق نشانه‌گذاری محیط صورت می‌گیرد [۸، ۹]. به طور کلی، هماهنگی چند ربات پتانسیل بالایی برای بهبود توانایی در کاوش و نقشه‌برداری از محیط‌های پرتوی دارد. با ترکیب نقاط قوت ربات‌های متعدد، کارایی و ایمنی افزایش می‌یابد و در نهایت درک بهتر از این مناطق پیچیده و خطرناک به دست می‌آید [۱۰]. ربات‌های مجهز آشکارسازهای پرتوی می‌توانند در مناطق آلوده حرکت کنند و چشمه‌های پرتوزا را که ممکن است پنهان شده باشند یا یافتن آنها با روش‌های مرسوم دشوار باشد، کشف کنند. در صنعت هسته‌ای ربات‌های مختلف در عملیات مختلف قابلیت استفاده دارند. این ربات‌ها می‌توانند ربات‌های هوایی، زمینی و دریایی باشند [۱۱]. انتخاب یک ربات مناسب بستگی به شرایط منحصربه‌فرد کاربرد آن دارد. به عنوان مثال، در زمان حادثه فوکوشیما، محققان ربات‌های دریایی را برای بررسی قلب رآکتور انتخاب کردند، در حالی که ربات‌های هوایی برای نقشه‌برداری دز پرتوی در ناحیه چرنوبیل [۱۲] استفاده شدند. محققان متعددی کاربرد ربات‌ها را برای شناسایی و کشف چشمه‌های پرتوزا، ارزیابی میدان‌های پرتوی، برنامه‌ریزی مسیر چندهدفه ربات‌های متحرک مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳-۱۵].

یک سامانه ناوبری مستقل متشکل از گروهی از ربات‌های پاسخ اضطراری، با انعطاف‌پذیری و پایداری قوی توسط پنگ و همکاران طراحی شد [۱۶]. هدف این تحقیق کاهش خطرات زیست‌محیطی بود که سلامتی کارکنان سایت‌های پسمانداری مواد پرتوزا را پس از بلایای شدید جوی غیرمنتظره تهدید می‌کرد. لینگ و همکاران با استفاده از یک روش جستجوی مشترک، رویکرد جدیدی را برای شناسایی چشمه‌های پرتوزا کشف نشده، ارائه کردند. این امر از طریق اشتراک و ادغام داده‌های به‌دست‌آمده از چندین ربات در حین جستجو، مبتنی بر راهبرد انرژی آزاد^۲ به دست آمد. نویسندگان با موفقیت این



دیگری روش ساده و کارآمدی را برای تولید سناریوها و محیط‌های استقرار شبیه‌سازی شده پیشنهاد می‌کند که هم واقع‌بینانه و هم شامل آلودگی‌هایی با تابش‌های یون‌ساز هستند. این کار با ادغام این رویکرد با شبیه‌ساز فیزیک Gazebo که با سیستم عامل پرکاربرد ربات‌ها سازگار است، انجام شد. برای آزمایش اندرکنش پرتوهای یون‌ساز گسیل شده از چشمه‌های گاما در محیط، آشکارسازهای شبیه‌سازی شده که متصل به ربات‌های متحرک بودند مورد استفاده قرار گرفتند و پاسخ آنها با کد ترابرد پرتوی MCNP۶ مونت‌کارلو بررسی شد [۲۲].

گابریلک^۲ و همکاران یک سیستم چند رباتیکی را توصیف می‌کنند که به طور خاص برای نقشه‌برداری خودکار پرتوی و موقعیتیابی چشمه توسعه یافته است. رویکرد آنها شامل یک روش سه‌فازی است که از دو سکوی^۳ مجزا، یک سامانه هواپیمای بدون سرنشین^۴ و یک وسیله نقلیه زمینی بدون سرنشین^۵ برای انجام کارهایی مانند عکس‌برداری هوایی، نقشه‌برداری پرتوی هوایی، و نقشه‌برداری پرتوی زمینی به صورت متوالی استفاده می‌کرد [۲۳]. هو و همکاران روشی را برای اکتشاف مستقل چشمه‌های پرتوزا با استفاده از ربات‌های متحرک پیشنهاد کردند. رویکرد آنها از فرایندهای تصمیم‌گیری مارکوف با مشاهده‌پذیری جزئی^۶ برای پیمایش و جستجوی چشمه‌های پرتوزا ناشناخته از طریق دنباله‌ای از اندازه‌گیری پرتوی جمع‌آوری‌شده توسط ربات استفاده کرد [۲۳]. از دیگر کارهای تحقیقاتی در حوزه علوم و فنون هسته‌ای با استفاده از ربات‌ها (و یا جمعی از ربات‌ها) می‌توان به نقشه‌برداری پرتوی در محیط داخلی [۲۴]، تأمین ایمنی نیروگاه هسته‌ای با استفاده از ربات دیوارنورد [۲۵]، تصویربرداری پرتوی^۷ و سیستم رباتیک مبتنی بر طیف‌سنجی اشعه گاما برای نظارت بر رآکتورها [۲۶]، ادغام موقعیت چشمه‌های پرتوی در نقشه شبکه‌ای از محیط با استفاده از یک ربات متحرک [۲۷] اشاره کرد.

مطالعه حاضر آخرین فناوری را در هماهنگی چند ربات برای اکتشاف و نقشه‌برداری پرتوزا ارائه می‌کند. تکنیک‌های بهره‌گیری از چند ربات و ایجاد تعامل بین آنها می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش زمان و بهبود فرایند اکتشاف و نقشه‌برداری داشته باشد. همچنین سامانه‌های چندرباتی قابلیت اطمینان بالایی دارند و با از کار افتادن تعدادی از ربات‌ها به دلایلی نظیر پرتوگیری، باقی ربات‌ها به ادامه مأموریت خواهند پرداخت. این

فرایند محاسباتی فشرده را بهینه کردند که در نهایت منجر به بهبود قابل‌توجه در کارایی عملیات جستجو شد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی به نرخ بازدهی بیش از ۹۵ درصد برای یافتن چشمه، دست یافته است [۱۷]. مقاله دیگری الگوریتمی را برای هدایت تشکیل روبات‌های متحرک، مشروط به محدودیت‌های ارتباطی، از یک موقعیت دلخواه به محل منبع سیگنال فیزیکی در یک محیط مسطح پیشنهاد می‌کند. یک شکل دایره‌ای بین ربات‌ها برقرار می‌گردد که با توجه به نوع شکل‌گیری، یک برآورد دقیق از گرادیان سیگنال با ترکیب داده‌های جمع‌آوری شده توسط روبات‌ها به دست می‌آید. الگوریتم پیشنهادی به نام (GCRW)، از تخمین گرادیان برای سوگیری حرکت استفاده می‌کند و شبیه‌سازی‌ها نشان داده که این الگوریتم کارآمد است [۱۸]. علاوه بر این، محققان دیگری با استفاده از یک ربات متحرک، یک سامانه نقشه‌برداری پرتوی مستقل را پیاده‌سازی کردند که از یک روش برنامه‌ریزی مسیر پوشش بهره می‌برد. هندسه مربوط به منطقه مورد نظر جهت پایش، واحد آشکارساز پرتوی و پارامترهای اندازه‌گیری پرتوی در فرمول‌بندی موقعیت‌های نمونه‌گیری در نظر گرفته شدند. الگوریتم خوشه‌بندی K-means برای پوشش سیستماتیک تعداد زیادی از نقاط نمونه‌برداری اعمال شد. عملکرد و قابلیت اطمینان رویکرد پیشنهادی با یک سری شبیه‌سازی و آزمایش‌هایی در دنیای واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹]. ژانگ و همکاران در درجه اول کار خود را بر روی ایجاد یک ربات جستجوگر هوشمند برای شناسایی چشمه‌های پرتوزا با استفاده از فناوری محاسبات لبه^۱ ارائه می‌کنند. هدف آنها ارائه یک درک مناسب و راهنمایی برای تحقیقات آینده در زمینه توسعه ربات‌های هوشمند طراحی شده برای این منظور است [۲۰]. اردینی و همکاران سیستمی طراحی کردند که قابلیت کشف چشمه‌های گاما را در میان اشیای متحرک آلوده به ماده پرتوزا را داشت. این سامانه از یک دوربین IP و یک آشکارساز سوسوزن یدور سدیم بهره می‌برد که با داده‌برداری هم‌زمان به طور خودکار و از راه دور اشیای متحرک آلوده را کشف و موقعیتیابی می‌نمود. برای دستیابی به این هدف، الگوریتمی برای تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از تصاویر ثبت شده توسط دوربین و ردیابی حرکات اجسام طراحی شد که این اطلاعات را با داده‌های شمارش ثبت شده در آشکارساز تابش به منظور شناسایی اشیای آلوده مرتبط می‌کرد و برای این منظور از چندین ربات استفاده شد [۲۱]. مطالعه

2. Gabrilk

3. Platform

4. Unmanned Aircraft Systems (UAS)

5. Unmanned Ground Vehicles (UGV)

6. Partially Observable Markov Decision Processes (POMDP)

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46(1), Serial Number 111, 2025, P 136-147

1. Edge Calculation



در آنها حرکات تصادفی از خود نشان دهند. در این پژوهش نیز حرکت ربات‌ها را به عنوان یک موجود مستقل و با حرکت تصادفی در نظر گرفته شده است و به مطالعه رفتار آنها در مقیاس ماکروسکوپی پرداخته شده است. مستقل بودن رفتار هر ربات فردی کمک می‌کند که مأموریت جستجو و نقشه‌برداری با خراب شدن و از کار افتادن یک یا چند ربات دچار خلل نشود و تنها سرعت نقشه‌برداری کاهش می‌یابد. در این تحقیق با ترکیب شبیه‌ساز مخصوص کار ربات‌های گروهی و مدل به دست آمده از MCNPX محیط آزمون ساخته شد. در این شبیه‌سازی از ربات marXbot استفاده شده است که نمونه واقعی آن ساخته و با نرم‌افزار تطبیق داده شده است [۲۹]. هدف از این مطالعه بررسی پتانسیل بهره‌گیری از رباتیک جمعی به عنوان یک ابزار جدید و کارآمد برای پایش محیطی، نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های پرتوزا است. در این تحقیق با بررسی قابلیت‌های اجتماع رباتیکی در این مناطق خاص، به توسعه فناوری‌های نوآورانه کمک می‌گردد که می‌تواند حفاظت از محیط زیست، ایمنی هسته‌ای و قابلیت‌های واکنش اضطراری را افزایش دهد.

۲. شرح کار

۱.۲ شبیه‌سازی محیط در MCNPX

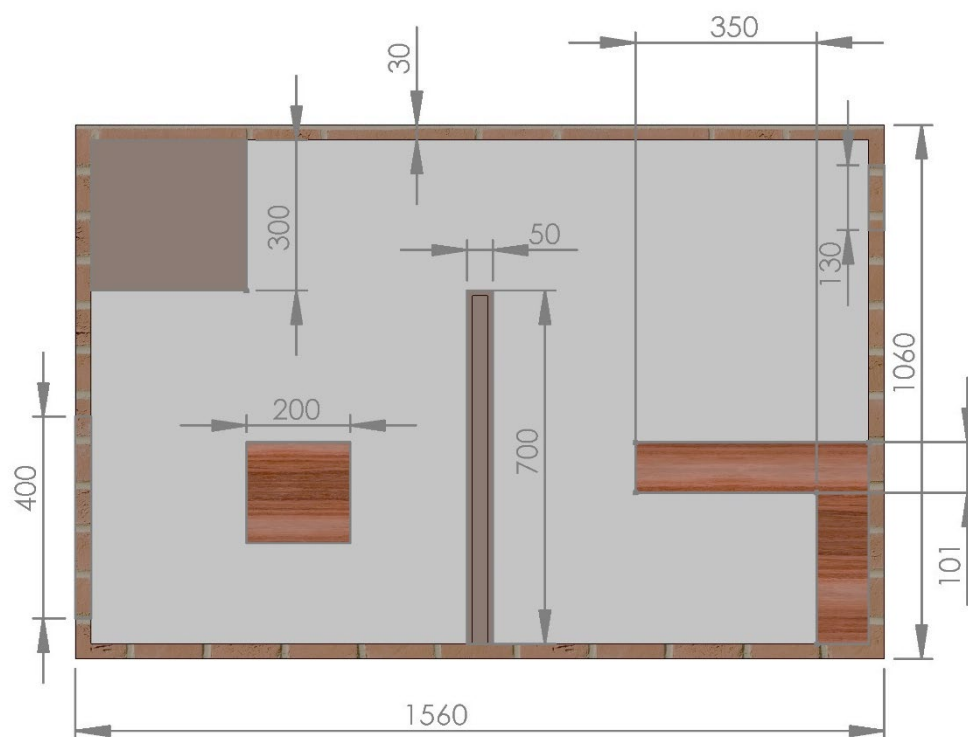
MCNPX یک کد کامپیوتری پرکاربرد برای شبیه‌سازی انتقال ذراتی مانند نوترون، فوتون و الکترون از داخل مواد است. این ابزار قدرتمندی برای محققان و مهندسين شاغل در زمینه‌های مهندسی هسته‌ای، حفاظت در برابر پرتوها، فیزیک پزشکی و سایر رشته‌های مرتبط است [۳۰]. در مطالعه حاضر ابتدا برای ایجاد یک سناریوی پرتوی نقشه کلی یک آزمایشگاه با ابعاد واقعی با کد مونت کارلو مدل‌سازی گردید ابعاد این آزمایشگاه که در زمینی به شکل مستطیل بنا شده است ۱۵ در ۱۰ مترمربع و دیوارهایی به ارتفاع ۶ متر است، ضخامت دیوارها ۳۰ سانتی‌متر و از جنس بتن بود که تصویری از نقشه شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است. نمایی از طرح سه‌بعدی آزمایشگاه مذکور در فضای مونت کارلو در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ایجاد مسیر حرکت در داخل آزمایشگاه مدل شده یک‌سری موانع از جنس چوب و بتن تعریف گردید.

مقاله به مطالعه بهره‌گیری از چندین ربات خودکار به صورت هم‌زمان برای نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های آلوده می‌پردازد. این بررسی رویکردهای مختلفی از جمله تأثیر تعداد، الگوی حرکت و دز دریافتی ربات‌ها را مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه، ابتدا از کد MCNPX برای شبیه‌سازی یک آزمایشگاه ابعاد واقعی استفاده شد و یک چشمه پرتوزا بسیار پرکاربرد گاما در صنعت هسته‌ای در آزمایشگاه شبیه‌سازی شده، قرار داده شد. سپس، از پلتفرم شبیه‌ساز چندرباتی ARGOS برای شبیه‌سازی هندسه آزمایشگاهی و بررسی کارایی و ایمنی اکتشاف و نقشه‌برداری پرتوزا با استفاده از روش‌های الهام گرفته شده از الگوهای زیستی برای هماهنگی چند ربات استفاده شد.

ARGOS یک شبیه‌ساز ربات چند فیزیک^۱ است. این شبیه‌ساز می‌تواند انبوهی از ربات‌ها در مقیاس بزرگ را به طور مؤثر شبیه‌سازی کند [۲۸]. با شبیه‌سازی محیط آزمایشگاه با استفاده از هر دو پلتفرم، این سناریو قادر به مدل‌سازی دقیق رفتار چشمه‌های پرتوزا و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های رباتیک ما بود. به طور کلی، ترکیب دو شبیه‌ساز MCNPX و ARGOS ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار چشمه‌های تابشی و بهینه‌سازی سیستم‌های رباتیک برای تشخیص، ردیابی و اکتشاف مواد با ماهیت خطرناک است.

روش‌ها و الگوهای متعددی برای حرکت ربات‌ها و تعامل آنها با یکدیگر وجود دارد که بیشتر آنها نیز الهام گرفته از طبیعت هستند. هر حیوانی الگوهای حرکتی و رفتارهای خاصی دارد که با نیازهای بقای آنها مرتبط است، مانند جستجوی غذا، دوری از شکارچیان و جفت‌یابی. این حرکات ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند نشانه‌های محیطی، تعاملات اجتماعی و رفتارهای غریزی قرار گیرند. با این حال، برخی از حیوانات ممکن است حرکات تصادفی را به عنوان بخشی از رفتار اکتشافی خود هنگام جستجوی منابع در محیط‌های غیر قابل پیش‌بینی نشان دهند. مگس سرکه رفتار راه‌رفتن تصادفی را هنگام کاوش در محیط‌های جدید از خود نشان می‌دهند. برخی از گونه‌های پلانکتون که ممکن است به طور تصادفی در ستون آب حرکت کنند تا شانس خود را برای مواجهه با غذا یا اجتناب از شکارچیان افزایش دهند. انواع خاصی از چتر دریایی که ممکن است به طور تصادفی در جریان‌های اقیانوسی برای یافتن زیستگاه یا اقلام طعمه مناسب حرکت کنند. برخی از جوندگان، مانند موش‌ها که ممکن است در هنگام جستجوی غذا یا کاوش

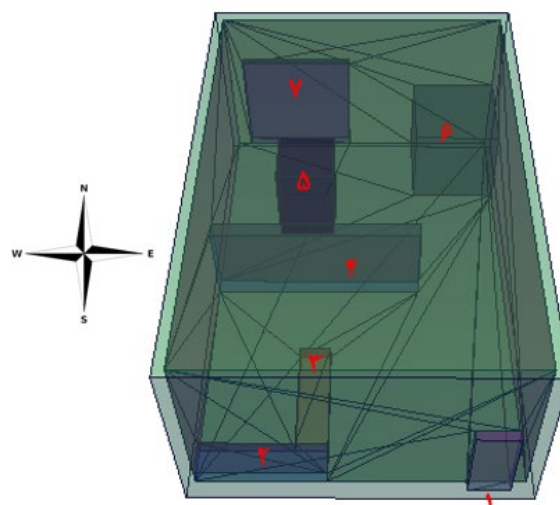




شکل ۱. نقشه شماتیک آزمایشگاه.

دقیق در مورد توزیع فضایی شار ذرات، رسوب انرژی، یا سایر مقادیر مورد علاقه در یک حجم مشخص استفاده می‌شود. این امر با تقسیم حجم مورد نظر به یک شبکه یا مش از حجم‌های فرعی کوچک‌تر و سپس محاسبه مقادیر مربوطه در هر یک از این حجم‌های فرعی به دست می‌آید. ویژگی محاسبه مش در MCNPX به کاربران امکان می‌دهد اندازه و شکل مش و همچنین مقادیر خاصی را که باید در هر حجم فرعی محاسبه شوند، تعریف کنند. این می‌تواند شامل شار ذرات، رسوب انرژی، نرخ واکنش و سایر اطلاعات مرتبط باشد.

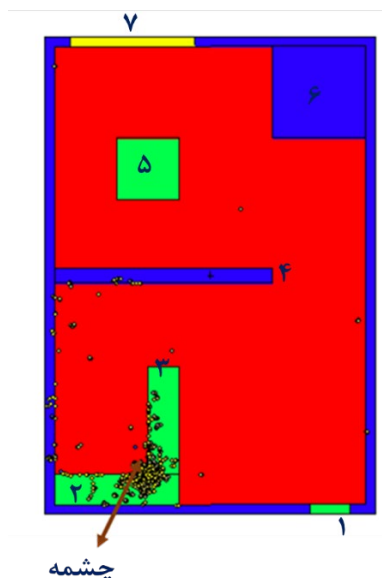
در شکل ۳ محل قرارگیری چشمه و توزیع آن در فضای آزمایشگاه در شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده شده است. نقاط طلایی‌رنگ در این شکل به ذرات گسیل شده از چشمه پرتوزا اشاره دارد که در محیط آزمایشگاه پراکنده شده است. محل اصلی قرارگیری چشمه نیز با بردار قرمز رنگ در شکل مشخص شده است. همچنین مدل MCNPX نیز در مدل واقعی تطبیق داده شده است. در این مدل یک ربات حامل چشمه به صورت تصادفی حرکت می‌کند و سیستم آشکارساز اطلاعات شمارش را در موقعیت‌های مختلف ثبت می‌نماید. همین محیط و رفتار در MCNPX مدل گردید و نتایج آن با واقعیت تطبیق داده شد که در شکل ۴ حاصل آن نمایش داده شده است. شبیه‌سازی این امکان را به وجود آورد که بیش از ۲۰۰ آزمایش به سرعت انجام گردد و نتایج ارزشمندی حاصل گردد. خطای انجام محاسبات توسط کد MCNP، عدد ۰/۰۰۲ درصد بود.



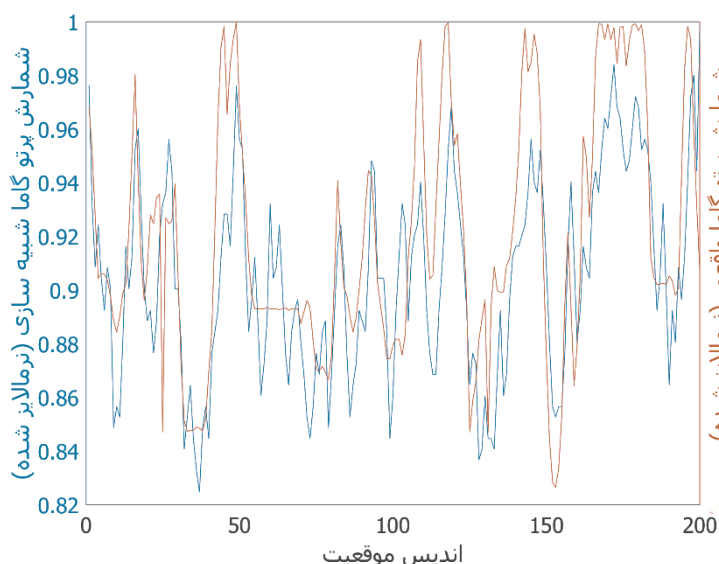
شکل ۲. محیط آزمون مدل شده در MCNPX (۱) درب چوبی، ۲ و ۳) میز چوبی، ۴) دیواره بتنی، ۵) مانع چوبی، ۶) مانع بتنی و ۷) درب آهنی.

برای ایجاد سناریوی پرتوی از چشمه گامزای بسیار پرکاربرد در صنعت هسته‌ای سزیم-۱۳۷ که انرژی گامای گسیلی از آن ۶۶۱/۶۵۷ کیلو الکترون‌ولت است به‌عنوان یک چشمه خارج از کنترل، در مدل‌سازی استفاده گردید. این چشمه در نقاط مختلف در آزمایشگاه مدل شده قرار داده شد. برای اندازه‌گیری شار ذرات گسیلی از این چشمه در فضای آزمایشگاه از تالی مش استفاده گردید. در کد MCNPX، محاسبه مش روشی است که برای به دست آوردن اطلاعات

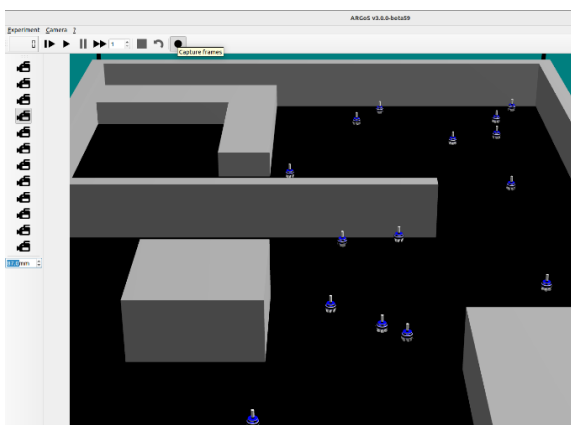




شکل ۳. تصویر دوبعدی از محل قرارگیری چشمه گاما و گسیل ذرات از محل قرارگیری آن به محیط اطراف در سناریوی مدل شده و پخش ذرات در فضای آزمایشگاه (۱) درب چوبی، ۲ و ۳ (میز چوبی، ۴ دیواره بتنی، ۵ مانع چوبی، ۶ مانع بتنی و ۷ درب آهنی).



شکل ۴. تطبیق داده‌های حاصل از مدل‌سازی MCNPX و آزمایش‌های واقعی که چشمه توسط ربات در موقعیت تصادفی مختلف قرار گرفته و اطلاعات پرتوی توسط سیستم آشکارساز ثبت شده است.



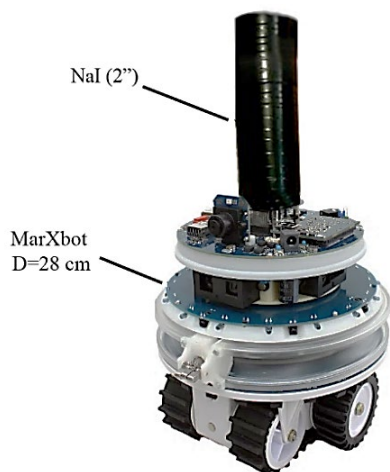
شکل ۵. مدل‌سازی محیط آزمون در ARGOS با ۲۰ ربات هم‌زمان.

۲.۲ تلفیق ARGOS و مدل MCNPX جهت اجرای آزمایش‌ها

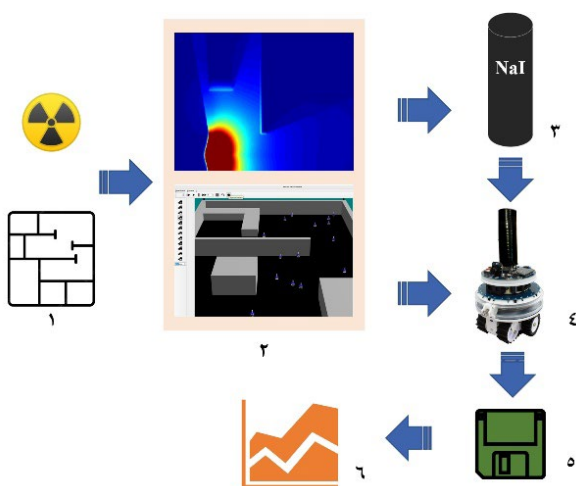
ARGOS یک شبیه‌ساز ربات چندفیزیکی^۱ است و می‌تواند شبیه‌سازی‌ها را در مقیاس بزرگ (تعداد ربات بالا در یک زمان) انجام دهد (شکل ۵). این شبیه‌ساز در عین حال که می‌تواند سریع با قابلیت اجرای هم‌زمان چندین ربات باشد و در عین حال انعطاف‌پذیر و منطبق بر نیاز کاربر است. دسترسی باز به متن برنامه و ماژولار بودن ساختار برنامه کمک زیادی در طراحی ربات جدید، افزودن حسگر و عملگر جدید به ربات نموده است.

1. MultiPhysics

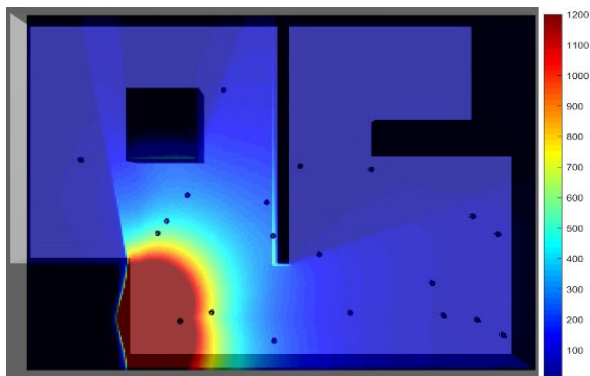




شکل ۶. ربات marXbot مجهز شده به آشکارساز سوسوزن یدور سدیم و PMT



شکل ۷. آزمایش‌ها؛ در مرحله نقشه محیط و محل چشمه به MCNPX و ARGOS داده شده و در مرحله ۲ شبیه‌سازی آماده می‌گردد و مدل MCNPX اجرا می‌گردد. آشکارساز یدور سدیم براساس مدل MCNPX در مرحله ۳ شبیه‌سازی می‌گردد و با محیط شبیه‌سازی ARGOS در مرحله ۴ ترکیب می‌گردد. در مرحله ۵ اطلاعات ذخیره می‌گردد و در مرحله ۴ نتایج جمع‌آوری و تحلیل می‌گردد.



شکل ۸. تلفیق مدل پرتوی به‌دست آمده با MCNPX با شبیه‌ساز، رنگ نشان‌دهنده شدت شمارش برحسب CPS است.

شبیه‌سازی و ایجاد هماهنگی بین چند ربات یک کار پیچیده و چالش‌برانگیز است. این نیاز به بررسی دقیق فضای فیزیکی، تعاملات بین ربات‌ها و اهداف کلی آزمون دارد. هر ربات باید طوری برنامه‌ریزی شود که در محیط حرکت کند، از برخورد با ربات‌های دیگر جلوگیری کند و وظایف خاصی را انجام دهد. علاوه بر این، محیط آزمایش که باید به طور دقیق در شبیه‌سازی نشان داده شود، نرم‌افزار قابلیت اجرا با تعداد ربات بالا و هم‌زمان در زمان کم را داشته باشد، با افزایش تعداد ربات پیچیدگی آزمایش به طور تصاعدی افزایش می‌یابد و نیاز به مدل‌سازی و هماهنگی دقیق برای اطمینان از نتایج دقیق و قابل اعتماد دارد. با این حال، با تخصص و منابع مناسب، مدل‌سازی محیط آزمایشی در ARGOS با چندین ربات هم‌زمان می‌تواند بینش ارزشمندی در مورد سیستم‌های چندروباتی و کاربردهای بالقوه آنها ارائه داد.

در شکل ۵ محیط GUI نرم‌افزار ARGOS نمایش داده شده است که می‌توان در آن محیط طراحی شده، ربات‌ها و نحوه حرکت آنها را در زوایای مختلف و با سرعت‌های متفاوت مشاهده نمود. در این شکل توزیع اولیه ۲۰ ربات را برای پایش هم‌زمان محیط آزمون در فضای ARGOS نمایش داده شده است. تمامی دیوارها و موانع موجود در داخل آزمایشگاه در این محیط قرار داده شده است. برهمین اساس ربات marXbot انتخاب شد در نرم‌افزار آشکارساز شبیه‌ساز شده NaI به همراه PMT جهت شمارش پرتوگاما به آن افزوده گردد. ربات marXbot یک ربات ماژولار، چندطبقه است که هر ماژول در یک طبقه واقع شده است و مستقل کار می‌کند. این ربات توسعه یافته ربات S-bot است که برای آزمایش‌های ربات‌های با هوش جمعی طراحی و ساخته شده است. به جهت ماژولار بودن ساختار فیزیکی و نرم‌افزاری و پشتیبانی شبیه‌ساز ARGOS از این ربات، برای آزمایش‌ها این ربات انتخاب شد و استوانه آشکارساز سوسوزن همانند شکل ۶ بر روی ربات قرار گرفت.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص شده است، ابتدا نقشه دوبعدی و محل چشمه‌ها به کد MCNPX داده می‌شود و خروجی این کد به عنوان ورودی اطلاعات حسگر آشکارساز به نرم‌افزار ARGOS داده می‌شود. نرم‌افزار ARGOS با توجه به نقشه محیط و خروجی MCNPX محیط را مدل می‌نماید (شکل ۸). در این نرم‌افزار حسگرها اطلاعات نظیر موقعیت و میزان تشعشع را با توجه به محیط مدل شده، قرائت می‌کنند و تمام اطلاعات در حافظه ربات ذخیره می‌گردد. پس از اتمام زمان آزمایش، اطلاعات تمام ربات‌ها بازخوانی می‌گردد تا به بررسی پارامترهای مهم نظیر عملکرد ربات در پایش محیط و مقدار پرتوگیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

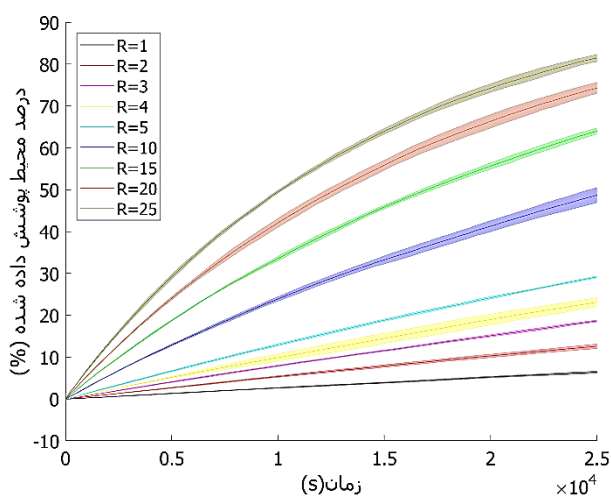


شده است. نتایج آزمایش در بخش بعد به تفصیل بیان شده است.

۴. نتایج و بحث

بررسی افزایش تعداد ربات در افزایش سرعت پایش دارای اهمیت است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۹ نمایش داده شده است، افزایش ربات‌ها باعث افزایش درصد ناحیه پایش شده از محیط است. تعداد ربات‌های در نظر گرفته شده در محیط از ۱ تا ۲۵ افزایش داشته است؛ اما مقدار محیط پیمایش به نسبت غیرخطی افزوده شده است. افزایش ربات‌ها باعث افزایش محیط پیمایش شده می‌گردد؛ ولی از طرفی مکان‌های بیشتری مجدد مورد پیمایش قرار می‌گیرد. به همین علت بعد از ۱۰ ربات نمودارها تقریباً منحنی می‌گردد و با نزدیک شدن به پایش کامل، افزایش مقدار پایش شده به شدت کاهش می‌یابد.

در حالت پایش با یک ربات، تقریباً ۷/۲ درصد از سطح بعد از ۲۸۰۰۰ ثانیه پایش شده است و انتظار این است که مقدار پایش برای ۱۰ ربات حدود ۷۲ درصد و برای بیش از ۱۰ پایش محیط زودتر ۲۸۰۰۰ ثانیه به اتمام رسیده باشد. اما جدول ۱ نشان می‌دهد که ۱۰ ربات ۵۲ درصد را پوشش داده‌اند و ۲۵ ربات نیز تا ۸۳ درصد توانسته‌اند محیط را پوشش دهند. با تصویر کردن مکان‌های حضور ربات‌ها می‌توان به وضوح این مطلب را دریافت که با افزایش زمان و یا تعداد ربات‌ها، بازدید مکان‌های تکراری افزایش چشمگیری می‌یابد. شکل ۱۰ تعداد حضور ربات‌ها در هر نقطه از نقشه را به تصویر کشیده است که آبی کمترین مقدار و قرمز بیشترین مقدار است که بیش از ۳۰ بازدید است.



شکل ۹. مساحت پایش شده توسط ۱ الی ۲۵ ربات.

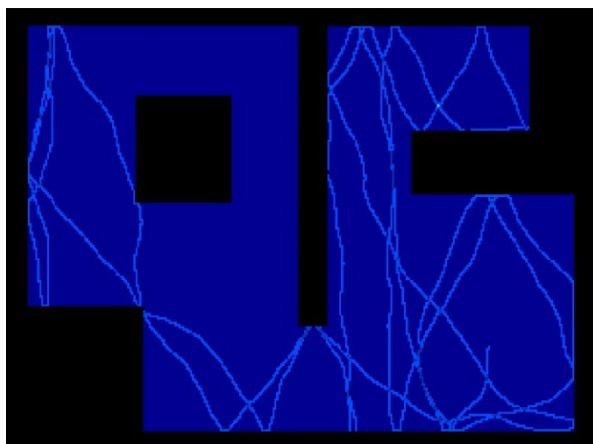
همان‌طور که در شکل ۷ مشخص شده است، ابتدا نقشه دوبعدی و محل چشمه‌ها به کد MCNPX داده می‌شود و خروجی این کد به عنوان ورودی اطلاعات حسگر آشکارساز به نرم‌افزار ARGOS داده می‌شود. نرم‌افزار ARGOS با توجه به نقشه محیط و خروجی MCNPX محیط را مدل می‌نماید (شکل ۸). در این نرم‌افزار حسگرها اطلاعات نظیر موقعیت و میزان تشعشع را با توجه به محیط مدل شده، قرائت می‌کنند و تمام اطلاعات در حافظه ربات ذخیره می‌گردد. پس از اتمام زمان آزمایش، اطلاعات تمام ربات‌ها بازخوانی می‌گردد تا به بررسی پارامترهای مهم نظیر عملکرد ربات در پایش محیط و مقدار پرتوگیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. روش انجام آزمایش‌ها

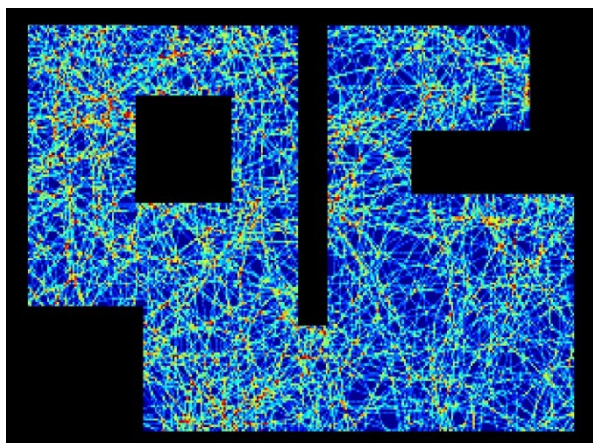
در ربات‌های جمعی، هر ربات فردی نسبتاً ساده است و قابلیت‌های محدودی دارد. با این حال، جمع شدن آنها و همکاری با یکدیگر به شیوه‌ای هماهنگ، می‌تواند وظایف پیچیده‌ای را انجام دهد که دستیابی به آن برای یک ربات به‌تنهایی دشوار یا غیرممکن است. یکی از چالش‌های رباتیک ازدحامی، توسعه الگوریتم‌ها و سیستم‌های کنترلی است که به ربات‌ها اجازه می‌دهد به طور مؤثر ارتباط برقرار کنند و هماهنگ شوند. ساده کردن رفتار ربات‌ها اجازه افزودن ربات‌ها را می‌دهد. در این مقاله ربات انتخاب شده، علاوه بر ساده بودن ساختار ربات، سعی شده است رفتارهای آن نیز ساده باشد. و ربات‌ها به عنوان یک موجود مستقل و با حرکت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم حرکت هر ربات به این صورت است که سرعت چرخ‌های چپ و راست براساس یک توزیع پواسون متغیر و تصادفی است و مقدار متوسط سرعت برای هر چرخ ۵ cm/s قرار داده شده است. همچنین به دور ربات ۲۴ حسگر مجاورتی مادون قرمز قرار داده شده است تا از برخورد ربات‌ها با یکدیگر و برخورد ربات‌ها با دیوار جلوگیری به عمل بیاید. این حسگرها تا ۱۵ سانتی‌متر برد دارند. الگوریتم عدم برخورد از مانع مقادیر فاصله از اطراف را به کمک حسگرها را محاسبه کرده و ربات را به جهتی می‌چرخاند که احتمال برخورد وجود نداشته باشد. برای مطالعه مستقل از مکان اولیه رفتار جمعی ربات‌ها، آنها را به صورت تصادفی در زمین قرار گرفته‌اند و ادامه حرکت آنها نیز به صورت تصادفی ادامه پیدا کرده است. آزمایش‌ها برای تعداد ربات‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ انجام شده است تا عملکرد جمعی ربات‌ها براساس تعداد مورد بررسی قرار گیرد. همچنین جهت اطمینان از تکرارپذیری هر آزمایش ۵ بار تکرار



شکل ۱۴ نمونه‌ای از نقشه پرتوی به دست آمده بعد از پیمایش محیط با به کارگیری ۲۵ ربات را نشان می‌دهد که به خوبی مقادیر شدت پرتوی در هر نقطه را به تصویر می‌کشد و محل چشمه را نیز می‌توان مشاهده نمود.

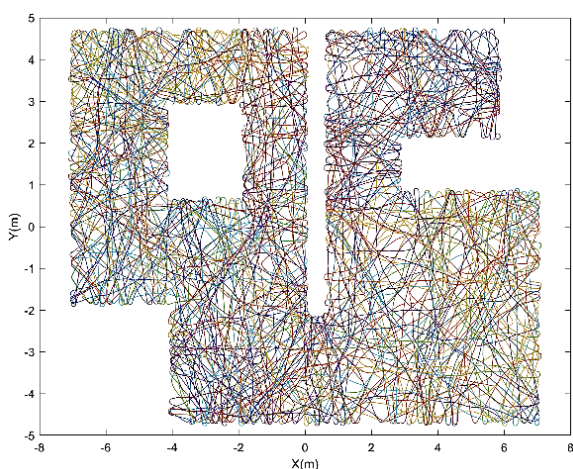


(الف)



(ب)

شکل ۱۵. نقشه مکان‌های دیده شده توسط ربات‌ها، الف) یک ربات ب) ۲۵ ربات. رنگ آبی کمترین و رنگ قرمز بیشترین تعداد بازدید را نشان می‌دهد. رنگ سیاه نشان‌دهنده دیوار و مکان‌های غیر قابل دسترسی است.



شکل ۱۱. مسیرهای طی شده توسط ربات‌ها (تعداد ربات ۲۵ عدد).

تعداد ربات	درصد مساحت پایش شده	خطا (درصد)
۱	۷٫۲	۰٫۳۱
۲	۱۴٫۰	۰٫۵۷
۳	۲۰٫۷	۰٫۲۱
۴	۲۵٫۵	۰٫۸۷
۵	۳۲٫۰	۰٫۳۶
۱۰	۵۲٫۵	۱٫۰۴
۱۵	۶۸٫۲	۰٫۴۵
۲۰	۷۸٫۳	۱٫۰۲
۲۵	۸۳٫۰	۰٫۷

علی‌رغم این که نقاط بازدید نشده وجود دارد ولی باز ربات‌ها مکان‌های تکراری زیادی را بررسی کرده‌اند. اگرچه شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان می‌دهند می‌توان با اشتراک‌گذاری اطلاعات بین ربات‌ها و تعیین مسیر براساس مکان‌های بازدید نشده، راندمان را افزایش داد و نقاط خالی را سریع و کامل پوشش داد ولی با انجام این امر، پیچیدگی در ارتباط و محاسبات مانع جدی در پیاده‌سازی رفتار جمعی خواهد بود.

تجهیزات مکانیکی و خصوصاً تجهیزات الکترونیکی نظیر نیمه‌هادی در برابر پرتو بسیار آسیب‌پذیر هستند. به همین جهت مقدار پرتو دریافت شده توسط ربات‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ متوسط پرتوهای دریافت شده توسط ربات‌ها در تمام آزمایش‌ها برحسب شمارش بر ثانیه نشان می‌دهد.

تغییرات متوسط پرتو دریافتی برحسب افزایش تعداد ربات تغییرات زیادی نداشته است، لذا تعداد ربات‌ها باعث کاهش یا افزایش پرتوگیری لحظه‌ای نخواهد شد. اما از آنجا که با افزایش ربات‌ها، زمان پیمایش کاهش خواهد یافت، بنابراین هر ربات پرتو کمتری دریافت خواهد نمود.

مسئله بعدی که حائز اهمیت است مقدار مسافت طی شده توسط ربات است که نشان‌دهنده مصرف انرژی (باتری) در ربات‌ها است. شکل ۱۳ مقدار متوسط مسافت طی شده در یک ثانیه توسط چرخ‌های هر ربات را برحسب تعداد ربات‌های یک گروه نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد افزایش تعداد ربات‌ها تغییری را در متوسط مسافت طی شده در واحد زمان را نداشته است. اما از آنجا که با افزایش ربات‌ها، زمان پیمایش کاهش خواهد یافت مصرف انرژی توسط هر ربات نیز کاهش خواهد یافت.

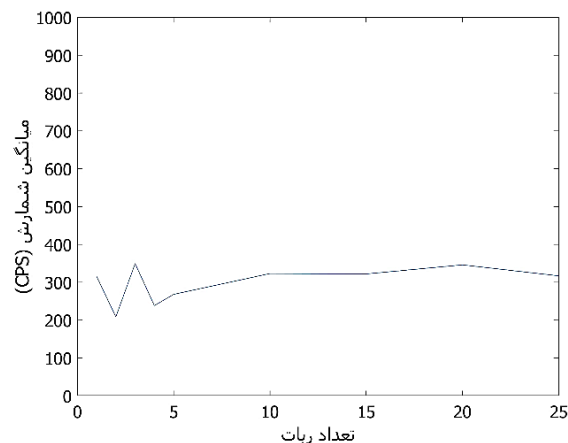


۵. نتیجه‌گیری و تحقیقات آینده

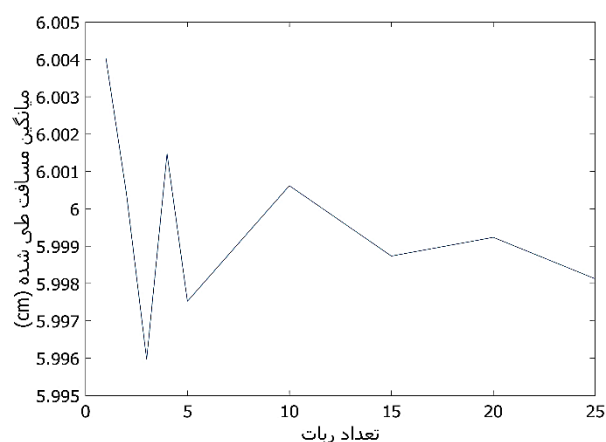
در مطالعه حاضر برای ایجاد یک سناریوی پرتوی ابتدا نقشه کلی یک آزمایشگاه با ابعاد واقعی با کد مونت‌کارلو مدل‌سازی گردید ابعاد این آزمایشگاه مستطیلی ۱۵ در ۱۰ مترمربع و دیوارهایی به ارتفاع ۶ متر و دارای موانع داخلی از جنس چوب و بتن بود. برای پایش محیط ربات marXbot انتخاب شد و آشکارساز شبیه‌ساز شده NaI به همراه PMT جهت شمارش پرتوگاما به آن سوار شد. مسئله افزایش تعداد ربات در افزایش سرعت پایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به صورت درصد مساحت پایش شده گزارش شد. این مقاله نشان داد که بهره‌گیری از چندین ربات برای نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های پرتوزا می‌تواند ایمنی، سرعت را افزایش دهد و باعث بهبود فرایند کلی اکتشاف گردد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد ربات، نرخ افزایش سرعت پایش محیط کمتر از نسبت نرخ افزایش ربات است. یکی از الگوهای حرکت برخی از موجودات زنده در طبیعت، حرکات تصادفی را به عنوان بخشی از رفتار اکتشافی در محیط‌های غیرقابل پیش‌بینی از خود نشان می‌دهند. ربات‌ها نیز مانند موجود مستقلی فرض شده‌اند که دارای سرعت‌های تصادفی هستند و به جستجوی محیط می‌پردازند. مطالعه رفتار جمعی آنها نشان داد با افزایش تعداد ربات زمان اکتشاف کاهش می‌یابد و به عبارتی در زمان مشخص مساحت بیشتری مورد پوشش قرار می‌گیرد. اما انتظار افزایش مساحت پوشش داده شده یا زمان پایش متناسب با افزایش ربات رشد نمی‌کند و با افزایش ربات‌ها مکان‌های از قبل بررسی شده بارها مورد بررسی مجدد قرار می‌گیرند که این امر از کیفیت پایش می‌کاهد.

مقدار متوسط دز دریافتی و انرژی مصرفی هر ربات در واحد زمان با افزایش تعداد ربات ثابت می‌ماند که البته به دلیل کاهش زمان پایش با افزایش تعداد ربات، مجموع دز دریافتی و انرژی صرفی در مجموع زمان کاهش خواهد داشت.

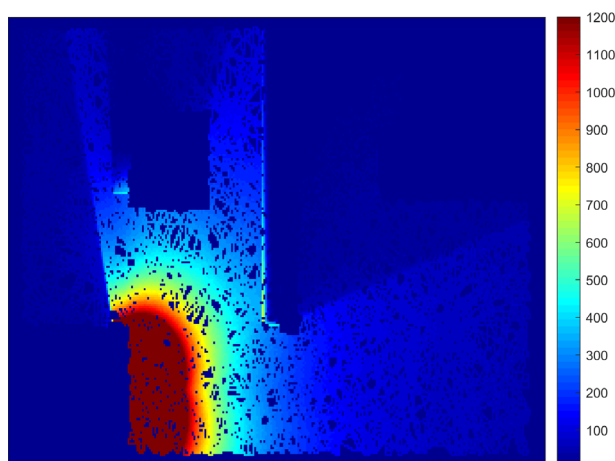
یک راهکار برای رسیدن به رفتار جمعی بهینه‌تر، استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر در هر دو مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی است. اشتراک گذاشتن اطلاعات بین ربات‌ها، داشتن اطلاعات محیط از قبل، دسترسی به سیستم‌های موقعیت‌یابی می‌تواند باعث تقویت پایش گردد؛ اما به پیچیدگی ربات جمعی می‌افزاید و با افزایش تعداد ربات‌ها، سیستم ربات جمعی پیچیده‌تر خواهد شد. یک نگاه دیگر که عمدتاً به طبیعت نزدیک است استفاده از مکانیسم‌های ساده‌تر برای تک‌تک ربات‌ها است و در عوض بهره‌گیری از قابلیت جمعی بودن ربات



شکل ۱۲. متوسط پرتو برخورد شده (لحظه‌ای) با هر ربات در طی آزمایش بر حسب CPS بر حسب تعداد ربات‌های گروه.



شکل ۱۳. متوسط مسافت طی توسط هر ربات در یک ثانیه بر حسب افزایش تعداد ربات‌های گروه.



شکل ۱۴. نمونه‌ای از نقشه پرتوی به‌دست آمده بعد از پیمایش محیط با به‌کارگیری ۲۵ ربات و زمان ۲۸۰۰۰ ثانیه، رنگ نشان‌دهنده شدت شمارش بر حسب CPS است.



8. Dorigo M. SWARM-BOT: an experiment in swarm robotics. in *Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*. 2005. SIS 2005, IEEE. 2005;192–200. doi: 10.1109/SIS.2005.1501622.
9. Rubenstein M, Ahler C, Nagpal R. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE. 2012 May;3293–3298. doi: 10.1109/ICRA.2012.6224638.
10. Fahimi F. Autonomous Robots. Boston, MA: Springer US. 2009. doi: 10.1007/978-0-387-09538-7.
11. Sousa P, Ferreira A, Moreira M, Santos T, Martins A, Dias A, Almeida J, Silva E. ISEP/INESC TEC Aerial Robotics Team for Search and Rescue Operations at the EuRathlon Challenge 2015. in *2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, IEEE. 2016 May;156–161. doi: 10.1109/ICARSC.2016.49.
12. Tsitsimpelis I, Taylor C.J, Lennox B, Joyce M.J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Prog. Nucl. Energy*, 2019 Mar;111:109–124. doi: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023.
13. Mascarich F, Kulkarni M, De Petris P, Wilson T, Alexis K. Autonomous mapping and spectroscopic analysis of distributed radiation fields using aerial robots. *Auton. Robots*. 2023 Feb;47(2):139–160. doi: 10.1007/s10514-022-10064-7.
14. Zhang D, Luo R, Yin Y, Zou S. Multi-objective path planning for mobile robot in nuclear accident environment based on improved ant colony optimization with modified A*. *Nucl. Eng. Technol*. 2023 May;55(5):1838–1854. doi: 10.1016/j.net.2023.02.005.
15. Ardiny H, Beigzadeh A, Mahani H. MCNPX simulation and experimental validation of an unmanned aerial radiological system (UARS) for rapid qualitative identification of weak hotspots. *J. Environ. Radioact*. 2023 Mar;258:107105. doi: 10.1016/j.jenvrad.2022.107105.
16. Peng T, Tang D, Wu J. Design of an autonomous navigation system for emergency disposal robots at radioactive waste sites under extreme climatic conditions. *J. Phys. Conf. Ser*. 2023 Jan;2419(1):012088. doi: 10.1088/1742-6596/2419/1/012088.
17. Ling M, Huo J, Moiseev G.V, Hu L, Xiao Y. Multi-robot collaborative radioactive source search based on particle fusion and adaptive step size. *Ann. Nucl. Energy*. 2022 Aug;173:109104. doi: 10.1016/j.anucene.2022.109104.
18. Renzaglia A, Briñón-Arranz L. Search and Localization of a Weak Source with a Multi-robot Formation. *J. Intell. Robot. Syst*. 2020 Mar;97(3–4):623–634. doi: 10.1007/s10846-019-01014-0.
19. Abd Rahman N.A, Sahari K.S.M, Hamid N.A, Hou Y.C. A coverage path planning approach for autonomous radiation mapping with a mobile robot. *Int. J. Adv. Robot. Syst*. 2022 Jul;19(4): 1-17. doi: 10.1177/17298806221116483.

به واسطه ساده بودن رفتار تک ربات در مقیاس‌های بزرگ امکان‌پذیر خواهد بود به طور مثال فرومون که مورچه‌ها جهت مسیریابی استفاده می‌نمایند روش‌های نسبتاً ساده و کارآمدی هستند که در طبیعت به کار گرفته می‌شود. مطالعه و به کارگیری این مکانیسم‌های طبیعی فرصت‌های جدیدی را برای تحقیق و توسعه در این جهت به کارگیری ربات‌های جمعی در کاربردهایی نظیر هسته‌ای باز می‌کند.

تشکر و قدردانی

از همکاران گروه دستگاه‌وری و تصویربرداری، پژوهشکده کاربرد پرتوها و پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به جهت حمایت جهت انجام تحقیقات تشکر می‌نماییم.

مراجع

1. Dorigo M, Theraulaz G, Trianni V. Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View]. *Proc. IEEE*. 2021 Jul;109(7):1152–1165. doi: 10.1109/JPROC.2021.3072740.
2. Yan Z, Jouandeau N, Cherif A.A. A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination. *Int. J. Adv. Robot. Syst*. 2013 Dec;10(12):399. doi: 10.5772/57313.
3. Burgard W, Moors M, Stachniss C, Schneider F.E. Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Trans. Robot*. 2005 Jun;21(3):376–386. doi: 10.1109/TRO.2004.839232.
4. Ducros C, Hauser G, Mahjoubi N, Girones P, Boisset L, Sorin A, Jonquet E, Falciola J.M, Benhamou A. RICA: A Tracked Robot for Sampling and Radiological Characterization in the Nuclear Field. *J. F. Robot*. 2017 May;34(3):583–599. doi: 10.1002/rob.21650.
5. Collins L, Ghassemi P, Esfahani E.T, Doermann D, Dantu K, Chowdhury S. Scalable Coverage Path Planning of Multi-Robot Teams for Monitoring Non-Convex Areas. in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE. 2021 May;7393–7399. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561550.
6. Liang W, Ning Z, Xie S, Hu Y, Lu S, Zhang D. Secure fusion approach for the Internet of Things in smart autonomous multi-robot systems. *Inf. Sci. (Ny)*. 2021 Nov;579:468–482. doi: 10.1016/j.ins.2021.08.035.
7. Parker L.E. Distributed Algorithms for Multi-Robot Observation of Multiple Moving Targets. *Auton. Robots*. 2002;12(3):231–255. doi: 10.1023/A:1015256330750.



20. Zhang W, Shi C, Bai L, Zhang Z.H. Design and Implementation of an Intelligent Searching Robot for Radioactive Sources Based on Edge Computing. *Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.* 2023 May;37(06). doi: 10.1142/S0218001423510059.
21. Ardiny H, Beigzadeh A, Askari M. Detecting and tracking multiple mobile radioactive sources by data fusion of a surveillance camera and a sodium iodide (NaI) detector. *Rev. Sci. Instrum.* 2022 Dec;93(12). doi: 10.1063/5.0122498.
22. Wright T, West A, Licata M, Hawes N, Lennox B. Simulating Ionising Radiation in Gazebo for Robotic Nuclear Inspection Challenges. *Robotics.* 2021 Jul;10(3):86. doi: 10.3390/robotics10030086.
23. Gabrlik P, Lazna T, Jilek T, Sladek P, Zalud L. An automated heterogeneous robotic system for radiation surveys: Design and field testing. *J. F. Robot.* 2021 Aug;38(5):657–683. doi: 10.1002/rob.22010.
24. Abd Rahman N.A, Mohamed Sahari K.S, Abdul Jalal M.F, Rahman A.A, Abd Adziz M.I, Hassan M.Z. Mobile robot for radiation mapping in indoor environment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020 Apr;785(1):012021. doi: 10.1088/1757-899X/785/1/012021.
25. Kim D, Kim Y.-S, Noh K, Jang M, Kim S. Wall-Climbing Robot with Active Sealing for Radiation Safety of Nuclear Power Plants. *Nucl. Sci. Eng.* 2020 Dec;194(12):1162–1174. doi: 10.1080/00295639.2020.1777023.
26. Tsitsimpelis I, West A, Licata M, Aspinall M.D, Jazbec A, Snoj L, Martin P.A, Lennox B. Joyce M.J. Simultaneous, Robot-Compatible γ -Ray Spectroscopy and Imaging of an Operating Nuclear Reactor. *IEEE Sens. J.* 2021 Feb;21(4):5434–5443. doi: 10.1109/JSEN.2020.3035147.
27. Xiao Y, Zhang C, Luo J, Yang C, Liu C. Integrating the radiation source position into a grid map of the environment using a mobile robot. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 2020 Oct;976:164253. doi: 10.1016/j.nima.2020.164253.
28. Pincioli C, Trianni V, O'Grady R, Pini G, Brutschy A, Brambilla M, Mathews N, Ferrante E, Di Caro G, Ducatelle F, Birattari M, Gambardella L.M, Dorigo M. ARGoS: a modular, parallel, multi-engine simulator for multi-robot systems. *Swarm Intell.* 2012 Dec;6(4):271–295. doi: 10.1007/s11721-012-0072-5.
29. Ardiny H. Functional and adaptive construction for rescue. *EPFL.* 2016. doi: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-7683>.
30. Waters L.S, McKinney G.W, Durkee J.W, Fensin M.L, Hendricks J.S, James M.R, Johns R.C, Pelowitz D.B. The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code. in *AIP Conference Proceedings*, AIP. 2007;81–90. doi: 10.1063/1.2720459.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

اردینی، هادی، بیگزاده، امیرمحمد. (۱۴۰۴). مطالعه بر روی به کارگیری ربات‌های جمعی جهت پایش محیط، نقشه‌برداری پرتوی و کشف چشمه‌های پرتوزا. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱(۱)، ۱۳۶-۱۴۷. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1628>. URL: https://jonsat.nstri.ir/article_1628.html.

