

آشکارساز مبتنی بر ربات بدون سرنشین هوایی جهت کشف چشمه رادیواکتیو (مدل‌سازی و تجربی)

INC29-1025

هادی اردینی، امیرمحمد بیگزاده*

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران

چکیده:

این مطالعه یک سامانه پیشگر هوایی رباتیک را معرفی می‌کند که متشکل از یک پهپاد عمودپرواز شش روتور، کریستال سوسونز NaI کوپل شده بر روی لامپ تقویت‌کننده نوری (PMT) و تجهیزات داده‌برداری و انتقال برخط داده‌ها می‌باشد. هدف این تحقیق، بررسی قابلیت و ظرفیت‌های این سامانه در کشف چشمه‌های پرتوزای رادیواکتیو خارج از کنترل می‌باشد. این مطالعه دارای دو بخش شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی سناریو است. ابتدا، یک سناریوی فرضی با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX مدل‌سازی شد. سناریوی مدل‌سازی شده برای یک زمین فوتبال به ابعاد ۵۰×۲۵ متر مربع که در آن یک چشمه رادیواکتیو جاسازی شده بود انجام شد. سپس سناریوی مدل‌سازی شده در شرایط واقعی توسط یک چشمه گسیلنده پرتوی گاما انجام شد. نتایج تجربی و مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند که خروجی آن‌ها تطابق بسیار خوبی را با یکدیگر نشان دادند. همچنین نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان دادند که این سامانه پیشگر قادر است چشمه نقطه‌ای Cs-137 با فعالیت ۱۰۰ میکروکوری را تا ارتفاع ۲/۵ متری کشف نماید.

کلیدواژه‌ها: پیشگر هوایی، ربات، صنعت هسته‌ای، رادیواکتیو، پرتوهای یون‌ساز

Unmanned arial robotic based detector for radioactive source finding (Modelling & Experimental)

Hadi Ardiny¹, AmirMohammad Beigzadeh^{1*}

1. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 14155-1339. Tehran, Iran.

Abstract:

This study proposes an unmanned aerial robotic monitoring system consisting of a NaI scintillation detector coupled on photo multiplier tube lamp (PMT) mounted to a multi-rotor UAV to detect radioactive sources. This study has two parts simulation of the system and its experimental test. First, an experimental scenario was modeled using the MCNPX Monte Carlo (MC) code. Then the same scenario was carried out in a real condition by a gamma emitter source. The results showed that the experimental and modeling results were compared with each other, which were in very good agreement. Also, simulation and experimental results have demonstrated that the robotic monitoring system is able to detect a point radioactive source Cs-137 with 100 μ Ci activity up to 2.5 meters.

Keywords: Aerial monitoring, robot, nuclear industry, radioactive, ionizing radiation.

۱. مقدمه

ایمینی افراد و کارکنان پرتوی در بهره‌گیری از چشمه‌های رادیواکتیو در بخش‌های مختلف صنعت هسته‌ای یکی از اولویت‌های اصلی است [۱]. خطرانی مانند نشت مواد رادیواکتیو، ذوب شدن هسته راکتور و آسیب به تأسیسات یا تجهیزاتی که چشمه‌های رادیواکتیو را در خود جای داده‌اند، چالش‌های جدی برای انسان هستند. از این‌رو، محققان همواره در تلاش بوده‌اند تا از اثرات مضر این‌گونه مواد بکاهند [۲]. پایش هوایی از جمله اهدافی است که ربات‌ها می‌توانند در اجرای آن بسیار مؤثر باشند. امروزه استفاده از پایشگرهای مواد رادیواکتیو نصب‌شده بر روی پهپادها مورد توجه قرار گرفته است. تکنیک هوایی طیف‌سنجی اشعه گاما برای جستجوی چشمه گمشده ۷۴ گیگابکرلی Cs-137 در دلتای نیجر با استفاده از آشکارسازهای حجمی مستقر در بالگرد، نیجریه استفاده شده است. نقشه‌برداری از مناطق پرجمعیت واری و مسیره‌های رودخانه واقع در آن، نشان داد که چشمه گمشده در این زمان به شکل بدون حفاظ در این منطقه وجود نداشته است. سیگنال‌هایی که احتمالاً به دلیل چشمه رادیوسزیوم داخل حفاظ بود ثبت شدند. قرائت تابش زیاد در بخشی از دهکده فرکادو^۲، در حاشیه رودخانه ثبت شد؛ که مرتبط به یک چشمه توریم/اورانیوم بود [۳][۴]. عملکرد نمونه‌گیر هوا و آشکارساز گاما در یک هواپیمای کوچک بدون سرنشین توسط روی^۳ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. وسیله نقلیه (پهپاد) قادر به حمل محموله با جرم تا ۰٫۵ کیلوگرم بود. عملکرد نمونه‌گیر با کمک دختران رادون که به‌طور معمول در اتمسفر وجود دارد بررسی شد [۵]. اولین نمایش عملی تصویربرداری هوایی پرتوی گاما با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین برای بررسی سریع پرتوایی در فوکوشیما توسط موجیزوکی^۴ و همکارانش انجام شد. پس از فاجعه هسته‌ای ژاپن در سال ۲۰۱۱، مقادیر قابل توجهی از مواد رادیواکتیو (بیشتر Cs-137 و Cs-134) در محیط زیست رها شد. با این حال، توزیع مواد رادیواکتیو در مناطق وسیعی از کوه، جنگل و ساتویاما نزدیک به شهر هنوز ناشناخته است؛ بنابراین، عملیات پاک‌سازی در چنین مناطقی با مشکل مواجه می‌شود. در این کار، اولین تصویربرداری هوایی از پرتوی گاما از حیاط مدرسه در فوکوشیما با استفاده از پهپادی که دارای دوربین کامپتون با حساسیت بالا است گزارش شده است. [۴].

در تحقیق [6] از ربات ماتریس 600 به همراه دزیومتر ARD100 با دو عدد آشکارساز سطح انرژی بالا و پایین استفاده شده است. در این تحقیق مطالعه بر روی سناریوی حرکت پرنده جهت آشکارسازی بهینه صورت گرفته است. در تحقیق [7] استفاده از یک ربات پرنده و آشکارساز گایگر-مولر جهت شناسایی چشمه پرتوی استفاده است. که نتایج نشان از کارکرد صحیح این سیستم است. در تحقیق [8] یک پهپاد پرنده جهت تشخیص تشعشع گاما و نوترون طراحی و توسعه یافته است. در این سیستم از یک آشکارساز سوسوزن CLLB با اندازه متوسط، و یک سوسوزن پلاستیکی بزرگ، EJ-276، به منظور ارزیابی و شناسایی مواد پرتوی استفاده شده است. در جمع‌بندی کارهای صورت گرفته، می‌توان گفت البته تحقیقات فراوانی در حوزه تهیه نقشه تابش و استخراج چشمه‌ها با کمک پهپادهای خودکار صورت گرفته است و تحقیقات به‌روز و جدیدی را نیز در این حوزه شاهد هستیم. اما در حوزه شبیه‌سازی و انطباق رفتار آن با نتایج تجربی برای پهپاد پایشگر تحقیق مؤثری صورت نگرفته است.

¹ Warri² Forcados³ Roy Pöllänen⁴ Mochizuki

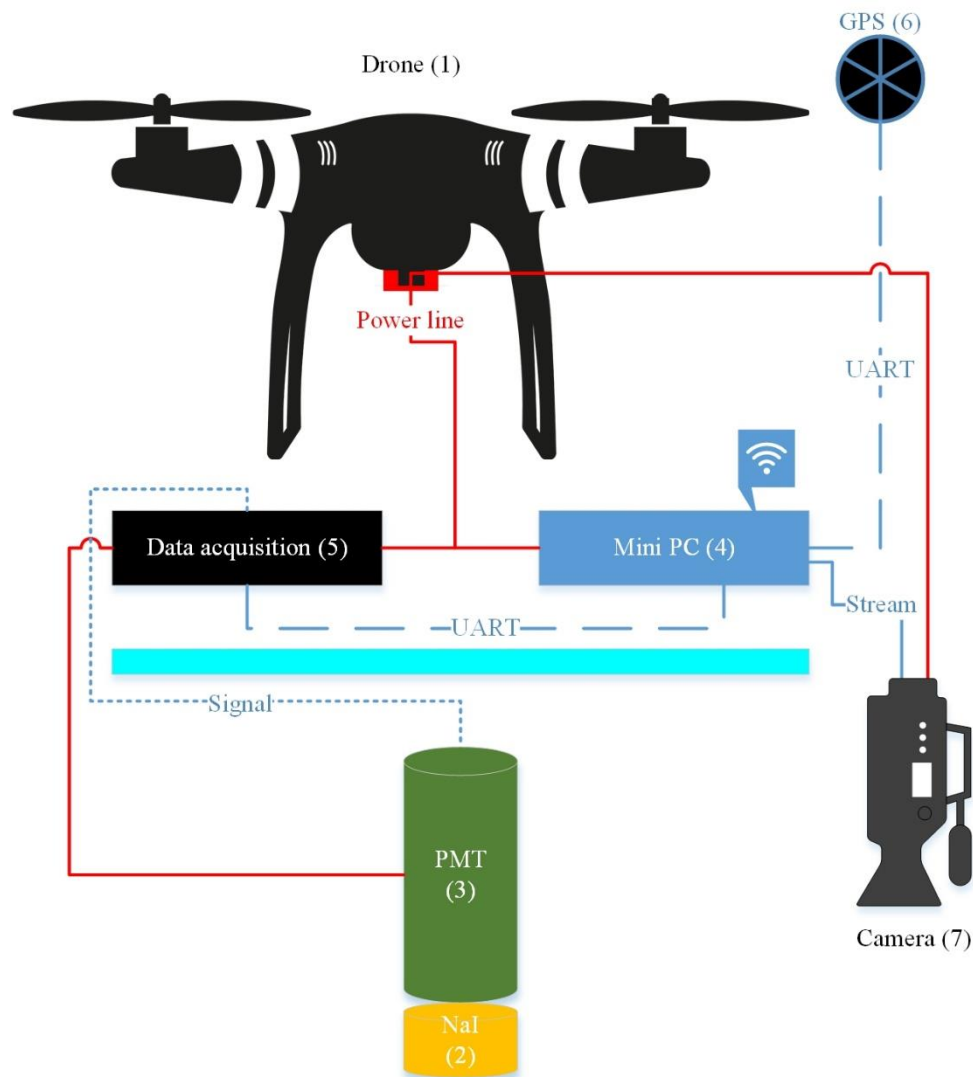
جدول ۱. مروری بر تحقیقات پیشین.

مرجع	موارد کشف‌شده	شرکت	نوع آشکارساز	نام ربات	محل آزمایش	روش
[۳]	سیگنال‌های از حضور چشمه‌های توریم/اورانیوم	Shell Petroleum	آشکارسازهای حجیم سوسوزن مایع ۷ لیتری	Bristows helicopters	دلتای نیجر	تکنیک هوایی برای طیف‌سنجی پرتو گاما
[۴]	نقشه دوز چشمه گاما‌زای سزیم ۱۳۷ در هوا		Gamma Spotter;) FURUKAWA (CO., LTD	Spreading Wings S 1000 DJI	حیاط مدرسه در فوکوشیما	تصویربرداری هوایی پرتو گاما با دوربین Compton
[۵]	دختران رادون در جو	Scientific Advisory Board for Defence (MATINE)	طیف‌سنج سوسوزن یدور سزیم پرتوی گاما (RT10)	Battery-driven Patria mini-UAV	هلسینکی، فنلاند	نمونه‌برداری هوا و طیف‌سنجی با یدور سزیم
[۶]	توزیع دوز تابش محیطی ۴ عدد چشمه رادیواکتیو گاما‌زای Americium-241	National Key R&D Program of China	آشکارساز نوری سیلیکون+سوسوزن یدور سزیم	Martice 600	نامعلوم	کشف چشمه رادیواکتیو با پهیپاد چند روتوری
[۷]			شمارنده گایگر مولر	نامعلوم	نامعلوم	کشف چشمه رادیواکتیو با پهیپاد چند روتوری
[۸]	آشکارسازی پرتوهای نوترون و گاما میدان‌های آمیخته نوترون و گاما		آشکارساز سوسوزن سایز متوسط CLLB + سوسوزن پلاستیک سایز بزرگ	نامعلوم	نامعلوم	کشف چشمه رادیواکتیو با پهیپاد چند روتوری
[۹]	توزیع رادیواکتیویته از رسوبات سزیم رادیواکتیو ناشی از انفجار	MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), Japan,		RMAX(G1) ساخت شرکت یاماها موتور	نیروگاه فوکوشیما دایچی	پایش تشعشعات هوایی اطراف نیروگاه هسته‌ای با بالگرد بدون سرنشین

در کار حاضر برای کاهش هزینه و زمان در گام اول مدلی مطابق با سناریوی هندسه تجربی با استفاده از شبیه‌ساز مونت‌کارلو صورت پذیرفت. در مدل شبیه‌سازی شده، یک چشمه نقطه‌ای Cs-137 در یک زمین فوتبال جاسازی شد. در این مدل به تعداد پانزده آشکارساز سوسوزن یدور سدیم به ابعاد استاندارد ۲ اینچ (مشابه آشکارساز نصب‌شده بر روی پایشگر هوایی) در فواصل مکانی معینی در سرتاسر زمین و هم‌ارتفاع قرار گرفتند. در مرحله بعد ارتفاع آشکارسازها برای ارزیابی تأثیر افزایش ارتفاع بر روی قدرت آشکارسازی و میزان شمارش ثبت‌شده در آشکارسازها تغییر یافت. شبیه‌سازی مونت‌کارلو امکان ارزیابی انواع سناریوهای رادیولوژیکی، کاهش هزینه و زمان در آزمایش‌های تجربی را به کاربر قبل از هرگونه آزمایش در فضای واقعی می‌دهد. در گام بعدی، همین سناریو در محیط واقعی در یک زمین فوتبال با پایشگر هوایی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی MCNP با یافته‌های تجربی مقایسه شد این قیاس نشان داد که شبیه‌سازی با شرایط واقعی مطابقت مطلوبی دارد.

۲. مواد و روش‌ها

طرح پهپاد پایشگر راه‌اندازی شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است که توسط نویسندگان برای پایش نظارت رادیولوژیکی هوایی طراحی و توسعه یافته است.



شکل ۱. طرح‌واره قسمت‌های مختلف پهپاد پایشگر رادیولوژیکی مورد استفاده در این مطالعه.

همان‌طور که از شکل مشخص است، این پایشگر به‌طور کلی شامل بخش‌های: (۱) پهباد شش روتور، (۲) کریستال سوسوزن NaI، (۳) تیوپ PMT، (۴) مینی کامپیوتر مرکزی، (۵) سیستم داده‌برداری (۶) سیستم ناوبری مبتنی بر GPS (۷) دوربین است. با توجه به مطالعات اولیه در ربات‌های هوایی بدون سرنشین و کارهای مشابه صورت گرفته در حوزه هسته‌ای که برخی از آن‌ها نیز در فصل قبل مرور شد، به‌طور کلی امکان استفاده از دو نوع پهباد عمده بال ثابت و چند روتوره امکان‌پذیر بود. هرکدام از پهبادهای دارای ویژگی‌هایی است که با توجه به شرایط موردنیاز جهت کارهای پایش محیطی دقیق و پایش در محیط‌های نسبتاً ناهموار پهباد چند روتوره انتخاب شد. پهبادهای بال ثابت نیاز به باند پرواز دارند که عدم وجود باند پرواز در خیلی از مناطق مورد پایش باعث می‌شود تا نوع چند روتوره انتخاب گردد (جدول ۲).

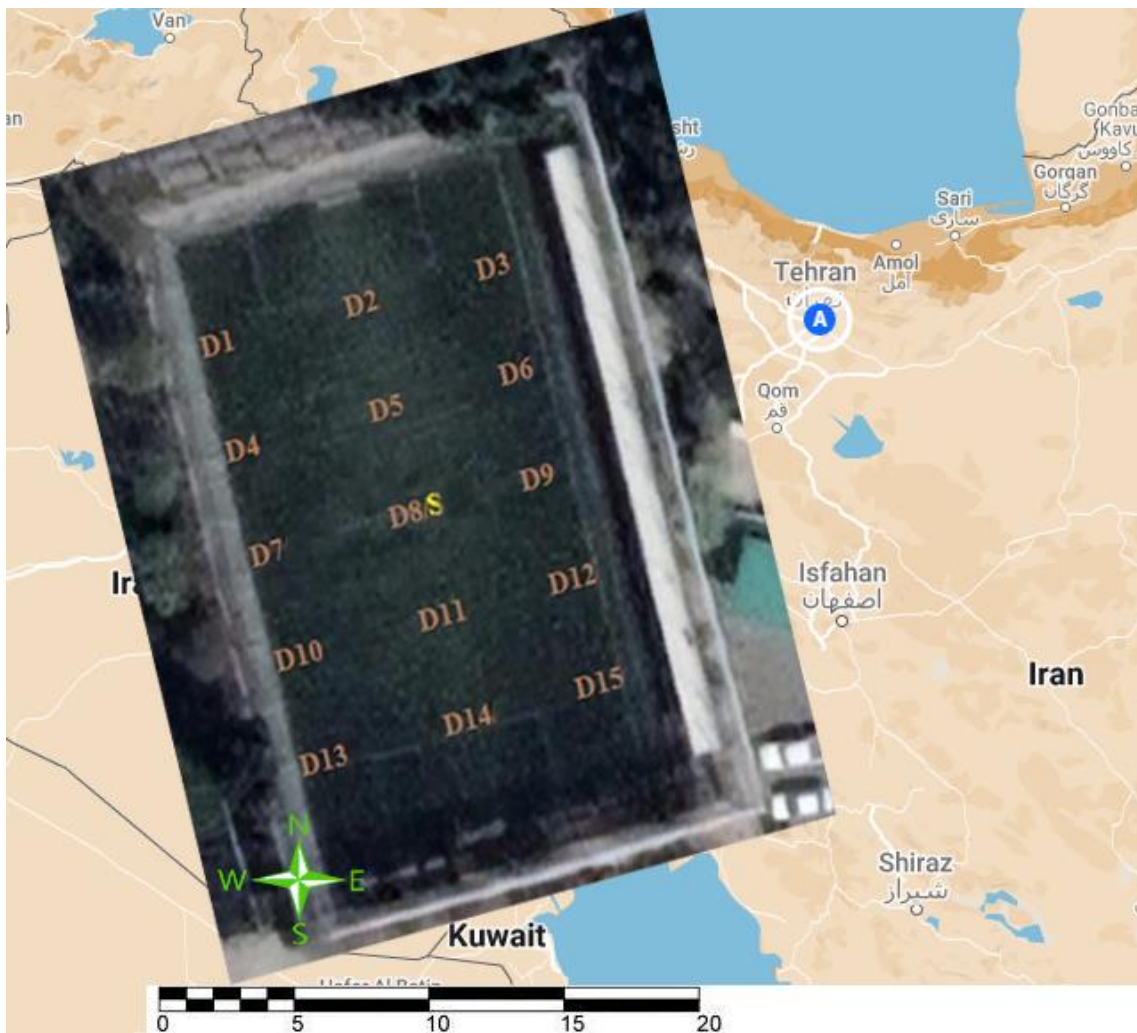
جدول ۲: مقایسه بین پهباد بال ثابت و چند روتوره.

ویژگی	بال ثابت	چند روتوره
قدرت مانور		■
قیمت		■
اندازه و قابلیت حمل		■
سادگی در استفاده		■
برد	■	
پایداری	■	
قدرت حمل بار		■
امنیت بهتر در زمان اختلال موتور	■	
منطقه موردنیاز برای پرواز و فرود		■
راندمان برای مناطق ناهموار		■

قابلیت حمل بار اضافه برای پهباد با توجه به وزن تجهیزات آشکارساز، حدود ۲ تا ۴ کیلوگرم در نظر گرفته شد. به جهت قیمت بالای تجهیزات آشکارساز، انتخاب پهباد با قابلیت اطمینان بالا در دستور کار قرار گرفت که در نهایت ماتریس ۶۰۰ محصول شرکت مشهور DJI انتخاب گردید. در طراحی سیستم الکترونیک داده‌برداری آشکارساز، از هسته قدرتمند ARM5 به‌عنوان هسته اصلی پردازش و کنترل آشکارساز استفاده شده است. تغذیه این برد V(DC) ۳۶-۹ می‌باشد که از طریق کابل و توسط پردازنده تأمین می‌شود. این برد قابلیت راه‌اندازی یک آشکارساز دو اینچی را دارد. جهت راه‌اندازی آشکارساز نیاز به ولتاژ ۷۵۰۷ تا ۹۰۰۷ می‌باشد که یک ماژول High Voltage (HV) برای تأمین آن در نظر گرفته شده است. آشکارساز همچنین دارای یک بستر ارتباطی برای انتقال داده به پردازنده می‌باشد. به سبب در دسترس بودن و بازده مناسبی که آشکارساز کریستالی نسبت به سایر آشکارسازها در آشکارسازی تابش‌های گاما دارند از این‌رو آشکارساز مورد استفاده یک آشکارساز کریستال یدور سدیم ۲ اینچ ساخت کشور چین با لامپ تقویت‌کننده نوری نوع PMT CR105 ساخت شرکت Beijing Hamamatsu است. کامپیوتر مرکزی نیز Odroid XU4 است که برای این پروژه از سیستم عامل Ubuntu 18.4 استفاده شده است.

۲. مدل‌سازی

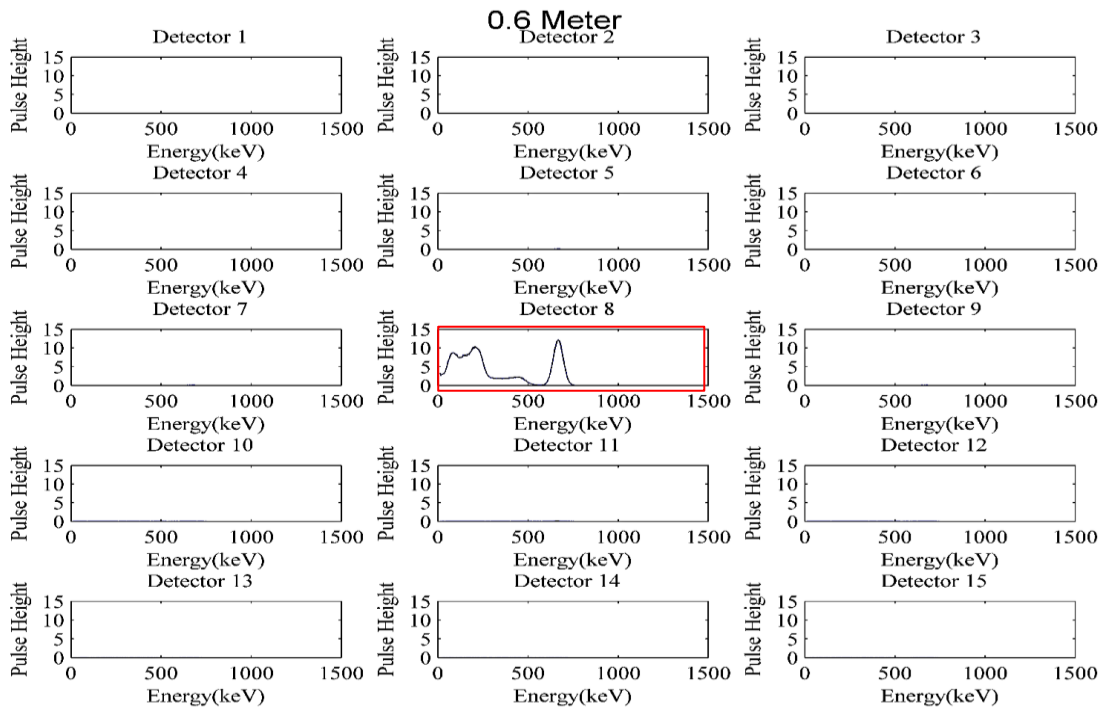
این مطالعه یک مدل مونت‌کارلو برای یک پهنای نظارتی رادیولوژیکی جهت اکتشاف چشمه‌های مفقودشده مدل‌سازی شده است. برای این منظور از کد MCNPX استفاده شد. MCNPX امکان ترابرد ۳۶ نوع ذره و بسیاری از یون‌ها را فراهم می‌کند. منطقه تحت پایش به صورت یک مستطیل بزرگ (معادل یک زمین فوتبال) به ابعاد 25×50 مترمربع شبیه‌سازی شد. در این مدل از چشمه نقطه‌ای Cs-137 با فعالیت ۱۰۰ میکروکوری استفاده شد که این چشمه در مرکز زمین فوتبال در مختصات به عرض جغرافیایی 35.73633 و طول جغرافیایی 51.39004 قرار گرفته است. فعالیت چشمه در فاز مدل‌سازی به صورت درصد احتمال به صورت درصد احتمال پیاده‌سازی شد. در این بخش از تالی F8 استفاده گردید، میزان nps دو میلیارد ذره لحاظ گردید و اثر تابش زمینه نیز در نهایت با عدد به دست آمده از محاسبات جمع گردید.



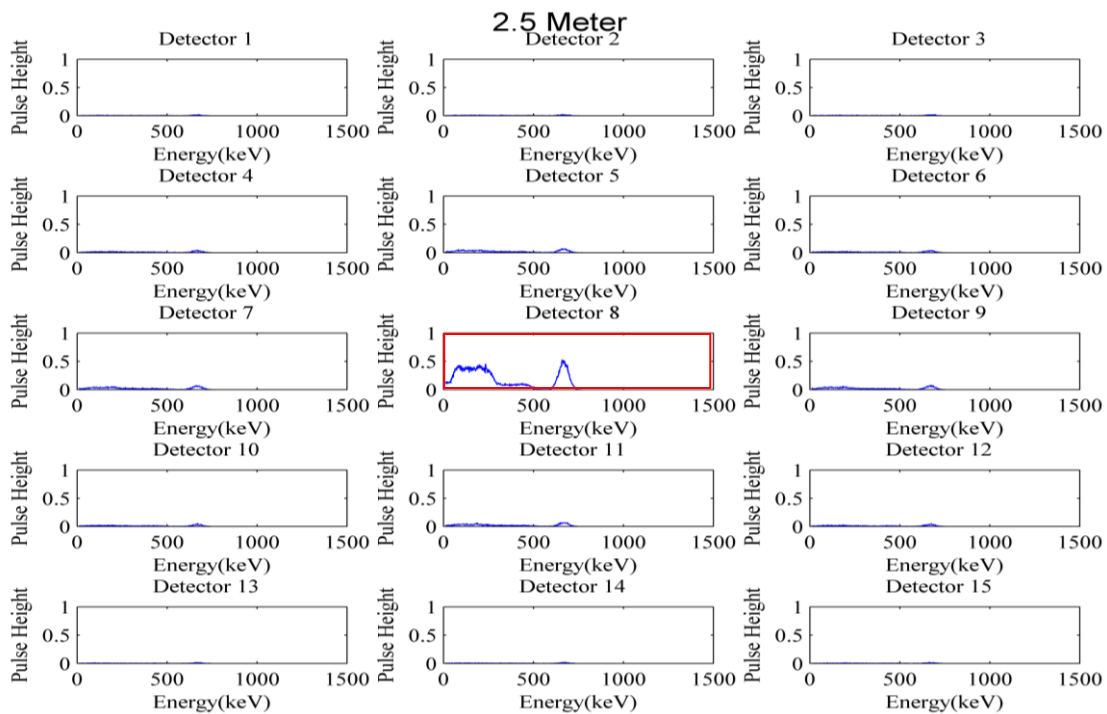
شکل ۲. تصویری از زمین فوتبال (محل آزمایش تجربی)، همراه با محل جایگذاری چشمه رادیواکتیو که حرف اول آن با S مشخص شده است و آشکارسازهای شبیه‌سازی که حرف اول آن‌ها با D ثابت شده است.

۳. یافته‌ها

نتایج مدل‌سازی مونت‌کارلو برای رویکرد آشکارسازهای گسسته و محدود در شکل ۳ نشان داده شده است. طیف‌های حاصله و نشان داده شده در شکل به ترتیب برای آشکارسازهایی است که موقعیت آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



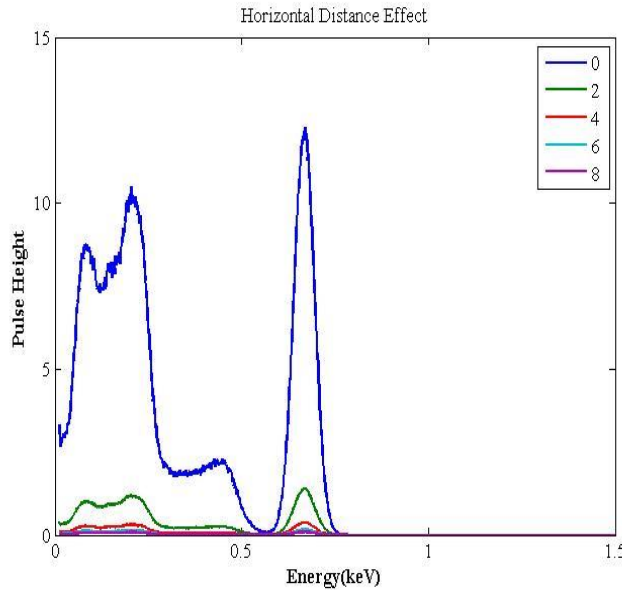
شکل ۳. خروجی مدل طیف تحلیلگر چندکاناله ثبت‌شده بر روی ۱۵ عدد آشکارساز هم‌ارتفاع و در ارتفاع پروازی ۶۰ سانتی‌متر. محور عمودی شمارش‌های ثبت‌شده به ازای انرژی‌های مختلف و محور افقی شماره کانال انرژی.



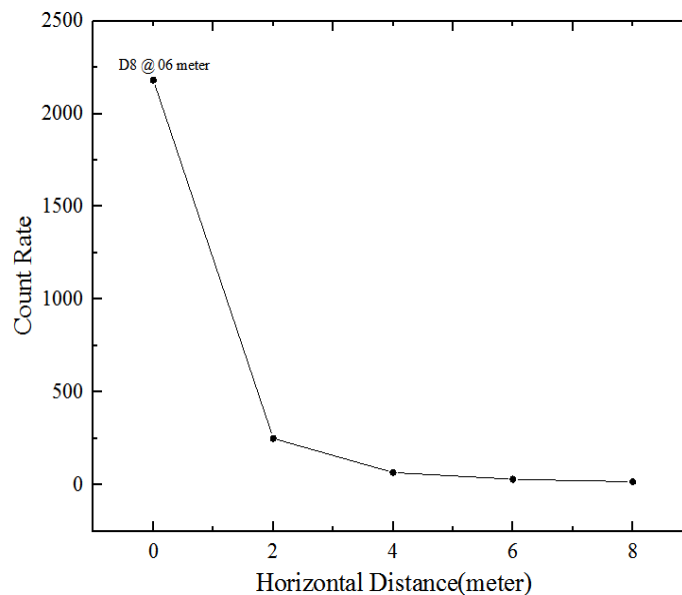
شکل ۴. خروجی مدل طیف تحلیلگر چندکاناله ثبت‌شده بر روی ۱۵ عدد آشکارساز هم‌ارتفاع و در ارتفاع پروازی ۲/۵ متر. محور عمودی شمارش‌های ثبت‌شده به ازای انرژی‌های مختلف و محور افقی شماره کانال انرژی.

در شکل ۳ و ۴ طیف سیستم تحلیلگر چندکاناله ثبت‌شده در هر یک از ۱۵ آشکارساز واقع در ۰٫۶ و ۲٫۵ متر از زمین مشابه بخش قبل محاسبه شد. آشکارساز شماره ۸، در بالای چشمه رادیواکتیو قرار گرفته است. انتگرال سطح زیر منحنی هر طیف به‌دست‌آمده از مدل‌سازی، دسترسی به تعداد ذرات ثبت‌شده در هر یک از ۱۵ آشکارساز را ممکن می‌سازد.

اثر فاصله افقی بر روی شمارش آشکارساز از نقطه استقرار آن بر روی چشمه در فاصله‌های ۰٫۲، ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸ متری در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. خروجی مدل طیف تحلیلگر چندکاناله ثبت‌شده به ازای جابجایی آن از نقطه استقرارش بر روی چشمه در فاصله‌های ۰٫۲، ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸ متری و در ارتفاع پروازی ۰٫۶ متر.



شکل ۶. شمارش ثبت شده به ازای جابجایی آشکارساز از نقطه استقرارش بر روی چشمه در فاصله‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ متری و در ارتفاع پروازی ۰٫۶ متر.

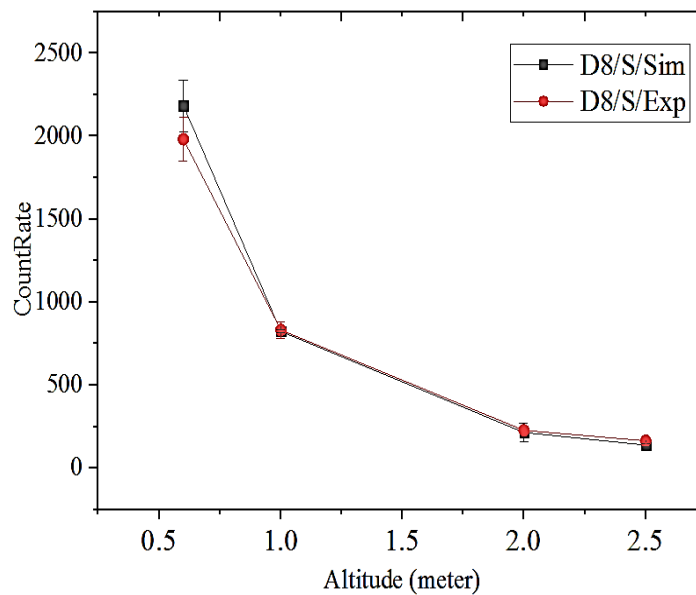
اعتبارسنجی مدل با آزمایش‌های تجربی

در آزمایش تجربی پس از بررسی بخش‌های الکترونیکی و مکانیکی و استحکام و پایداری سیستم آشکارساز نصب شده بر روی ربات پرنده و آزمون‌های قبل از پرواز، سناریوی تجربی در زمین فوتبال نشان داده شده در شکل ۲ انجام شد. قبل از شروع پرواز، مقدار شمارش زمینه اندازه‌گیری شد و حدود ۱۲۵ cpm بود. پهپاد با سرعت متوسط ۱ متر بر ثانیه پیمایش را انجام داده است. پرواز بر بالای زمین در ارتفاع‌های ۰٫۵، ۱، ۲ و ۲٫۵ متر انجام شد. شمارش‌های رسیده به آشکارساز با استفاده از تحلیلگر تک کاناله پس از پردازش در حافظه سامانه آشکارسازی به همراه با اطلاعات GPS ذخیره شدن. پهپاد بر روی چشمه حداقل در هر ارتفاعی یک دقیقه ایستاده است تا اطلاعات بهتر و بیشتری جمع‌آوری گردد (شکل ۷ و جدول ۳).



شکل ۷. پرواز پهپاد پایشگر جهت کشف چشمه Cs-137.

مقایسه مدل‌سازی و نتایج تجربی برای نرخ شمارش ثبت شده در آشکارسازی که موقعیت آن‌ها بالای چشمه رادیواکتیو بود در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین مدل‌سازی و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. این نتایج صحت مدل و قابلیت توسعه آن برای سناریوهای دیگر را نشان می‌دهد.



شکل ۸. خروجی مدل طیف تحلیلگر چندکاناله ثبت شده بر روی ۱۵ عدد آشکارساز در ارتفاع‌های پروازی مختلف ۰٫۶، ۰٫۱، ۲٫۵ و ۲٫۵ متری. محور عمودی شمارش‌های ثبت شده به ازای انرژی‌های مختلف و محور افقی شماره کانال انرژی.

محاسبه MDA وابسته به پارامترهای خود آشکارساز نظیر اندازه آشکارساز و سیستم الکترونیک آن است که بازده آن را مشخص می‌نماید. با توجه آزمایش‌های تجربی صورت گرفته در آزمایشگاه، وقتی به حد زمینه (۲۵ cps) رسیده که ارتفاع برابر ۱۷۵ سانتی‌متر بوده است که اکتیویته معادل ۱/۲۱ میکروکوری برای Co-60 است. هم‌چنین اگر پهپاد در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری پرواز نماید حداقل فعالیت مورد نیاز برای دریافت سیگنال آن برای چشمه Cs-137 برابر ۱/۰۶۱ میکروکوری و برای Co-60 در همین ارتفاع برابر ۰/۵۲۹ میکرو کوری می‌باشد. البته محاسبات دقیق این اعداد نیازمند استخراج اطلاعات دقیق از سیستم آشکارساز است که نیازمند کارهای آزمایشگاهی دقیق می‌باشد اما این نتایج با تقریب خوبی MDA را بیان می‌نماید.

جدول ۳: نمونه‌ای از داده‌های تجربی به دست آمده از نتایج آزمون.

Lat	Long	h (m)	Count (cpm)
35.73633	51.39008	1.5	709
35.73633	51.39007	2	407
35.73633	51.39008	2.4	348
35.73634	51.39008	2.4	325
35.73632	51.39003	2.4	349
35.73634	51.39008	2.4	359
35.73633	51.39004	2.4	384

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه یک سیستم پایشگر هوایی رباتیک را معرفی می‌کند که متشکل از یک آشکارساز سوسوزن NaI کوپل بر روی لامپ تقویت‌کننده نوری (PMT) است که باهدف کشف چشمه پرتوزای رادیواکتیو بر روی یک پهپاد شش روتور نصب شده است. این مطالعه از دو فاز تشکیل شده است. در فاز اول، یک مدل مونت کارلو بر اساس محیط تجربی و چشمه رادیواکتیو موجود برای سامانه هوایی پایشگر پرتوی استفاده شد تا بتوان پس از صحت‌سنجی مدل در فازهای مطالعاتی و تجربی بعدی از آن بهره برد. در گام بعدی سناریوی حضور یک چشمه رادیواکتیو در یک زمین فوتبال به صورت تجربی با استفاده از پایشگر پرنده مورد بررسی قرار گرفت. در سیستم مدل‌سازی به سبب امکان مانور بیشتر در محیط آن از واحد آشکارسازی کوپل با تحلیلگر چندکاناله استفاده شد و در بخش تجربی با توجه به امکانات یک تحلیلگر تک کاناله روی سیستم نصب شد. با انتگرال‌گیری از خروجی به دست آمده از سطح زیر طیف مدل‌سازی شده می‌توان مقادیر ثبت شده در تحلیلگر تک کاناله را محاسبه نمود. نتایج مدل‌سازی با آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک پهپاد مجهز به کریستال سوسوزن NaI برای تشخیص تابش گسیل شده از یک چشمه رادیواکتیو Cs-137 با فعالیت ۱۰۰ μCi که در مرکز زمین فوتبال جایگذاری شده بود، ارزیابی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد و مؤید این موضوع بود که مدل از دقت بالایی در تشخیص ناهنجاری‌های رادیولوژیکی برخوردار است. بنابراین، مدل مونت کارلوی توسعه یافته کاربردهای مختلفی را می‌توان در مواردی از قبیل (۱) پیش‌بینی پاسخ پهپاد پایشگر پرتوی در توپوگرافی‌های غیرمعارف زمین، (۲) شناسایی هسته پرتوزا با استفاده از یک تحلیلگر چند کانالی (MCA) و تحلیلگر تک کانالی (SCA) بکار برد.

۵. منابع

- [1] Cember, H., & Johnson, T. E. (2009). Introduction to health physics. NNRA Library.
- [2] Blowers, A. (1999). Nuclear waste and landscapes of risk. Landscape research, Vol. 24. No 3. 241-264.
- [3] Sanderson, D. C., & Allyson, J. D. (1991). An aerial gamma ray search for a missing 137Cs source in the Niger Delta, May 1991.
- [4] Mochizuki, et al. (2017). First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima. Journal of Instrumentation, Vol. 12. No.11. 11F014.
- [5] Pöllänen et al.. (2009). Performance of an air sampler and a gamma-ray detector in a small unmanned aerial vehicle. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, Vol.282. No.2, 433-437.
- [6] Li, B., Zhu, et al. (2018). Use of multi-rotor unmanned aerial vehicles for radioactive source search. Remote sensing, Vol. 10. No.5. 728.
- [7] Brouwer, Y et al.. (2020). Radioactive hot-spot detection using unmanned aerial vehicle surveillance. In EPJ Web of Conferences Vol. 225 .06005 .
- [8] Moretto, S et al.. (2021). UAV prototype for localization and identification of radioactive contamination and emitters. In EPJ Web of Conferences. Vol. 253. 08001
- [9] Nishizawa, Y et al.. (2016). Distribution of the 134Cs/137Cs ratio around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system. Journal of Nuclear Science and Technology. vol 53. No. 4. 468-474.