

ساخت و بکارگیری یک پهپاد عمود پرواز مجهز شده به یک آشکارساز گاما جهت استخراج سریع نقشه پرتوی محیط و کشف آلودگی های پرتوی ضعیف

هادی اردینی*، امیرمحمد بیگ زاده، حجت اله ماهانی

*پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

پست الکترونیکی: hardini@aeoi.org.ir

چکیده

در این مطالعه، یک پایش گر پرتوی شامل آشکارساز NaI دو اینچ که به یک لامپ تکثیرکننده نوری متصل و بر روی یک پهپاد عمود پرواز نصب شده، به منظور آشکارسازی سریع چشمه‌های پرتوزا طراحی و ساخته شده است. برای ارزیابی عملکرد، مجموعه از آزمون‌های تجربی برای آشکارسازی چشمه‌هایی با فعالیت سطح پایین ^{137}Cs و ^{60}Co در یک زمین فوتبال انجام شد. در ادامه، به کمک روش‌های پردازش تصویر، نقشه پرتوی بر روی نقشه جغرافیایی محیط همجوشی شد. نتایج نشان می‌دهند که در ارتفاع ۵۰cm، تمامی چشمه‌های پرتوزا به طور موفقیت‌آمیزی در مکان واقعی خود شناسایی شدند. با کاهش ارتفاع پروازی، قدرت پرنده پایش گر در تشخیص چشمه‌های پرتوزا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. یافته‌ها مؤید شناسایی دقیق آنومالی پرتوی از طریق پرواز این پهپاد کنترل پذیر از راه دور بر روی محیط آلوده هستند.

کلیدواژگان: نقشه پرتوی، پهپاد پایش گر، پایش پرتوی، آنومالی، پردازش تصویر، آشکارساز NaI.

۱. مقدمه

که مخاطرات تماس مستقیم انسان را تا حدود بسیار زیادی کاهش خواهد داد. گشت زنی و پایش محیطی از جمله اهدافی است که ربات‌ها می‌توانند در اجرای آن کارساز باشند. محیط‌های پرتوی، نظیر راکتورهای اتمی یا حتی مناطق مسکونی بعد از گزارش یک رخداد هسته‌ای نیازمند نظارت و پایش مستمر هستند که ربات‌ها می‌توانند به صورت پیوسته و خودکار این عملیات را انجام دهند. ربات‌ها بسته به نوع محیط عملکردی هوایی، زمینی و یا دریایی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام دارای

حفظ ایمنی مردم و پرتوکاران در استفاده از چشمه‌های پرتوزا در بخش‌های مختلف صنعت هسته‌ای جزء اولویت‌های اصلی به‌شمار می‌رود [۱] مخاطراتی نظیر نشت مواد پرتوزا، ذوب شدن قلب راکتور، آسیب دیدن محل یا تجهیزات نگهدارنده مواد پرتوزا چالش جدی برای انسان است و لذا پژوهشگران همواره در تلاش برای کاهش اثرات مخرب این مواد هستند [۲]. یکی از رهیافت‌های مؤثر در رعایت اصول آلارا^۱ استفاده از ربات و پرنده‌های بدون سرنشین، جهت انجام فعالیت‌های هسته‌ای بوده

¹ As low as reasonable achievable (ALARA)

مزایا و معایب مختص به خود هستند. یک نوع کاربردی ربات‌ها، ربات‌های زمینی بوده که دارای ساختاری ساده‌تر و قابلیت حمل بار، افزودن ماژول‌های مختلف و مدت زمان کارکرد طولانی‌تر در مقایسه با سایر ربات‌ها می‌باشند. اما عدم امکان حرکت در سطوح ناهموار و پله‌ها از مهم‌ترین چالش‌های آن‌ها به‌شمار می‌رود که در ربات‌های پرنده وجود ندارد. در این مطالعه از یک پهپاد پایش‌گر جهت پیمایش و استخراج اطلاعات استفاده شده است. در مقایسه با هلیکوپتر که رزولوشن پایینی را ارائه می‌کند، ربات‌های پرنده با ارتفاع پروازی پایین‌تر و سرعت کمتر می‌توانند محل مواد و نوع آن‌ها را دقیق‌تر شناسایی نمایند. همچنین، نظر به اندازه کوچکتر در مقایسه با هلیکوپتر، مناسب برای جستجو در مکان‌های تنگ و باریک هستند. از نقطه نظر عملکردی، پهپاد در میان پایش با هلیکوپتر و فرد قرار دارد.

امروزه کاربرد پایش‌گرهای مواد پرتوزا که بروی پهپادها سوار شده‌اند مورد توجه واقع شده است که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده با تجهیزات و پرنده‌های مختلف آن‌ها پرداخته خواهد شد. تکنیک هوایی طیف‌سنجی پرتو گاما برای جستجوی چشمه گمشده ^{137}Cs با فعالیت پرتوایی 74 GBq در دلتای نیجر، نیجریه استفاده شده است [۳]. مقایسه با یک چشمه مشابه تأیید کرد که یک چشمه خارج از حفاظ از این نوع به‌راحتی در ارتفاع 100 m متر آشکارسازی می‌شود. عملکرد نمونه‌گیر هوا و آشکارساز گاما در یک هواپیمای کوچک بدون سرنشین توسط روی^۱ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۴]. وسیله نقلیه (پهپاد) قادر به حمل محموله با جرم تا 0.5 kg بود. عملکرد نمونه‌گیر برای دختران گاز رادون که به‌طور معمول در اتمسفر وجود دارند، بررسی شد. اولین نمایش عملی^۲ تصویربرداری هوایی پرتوی گاما با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین برای بررسی سریع پرتوایی در فوکوشیما توسط موجیزوکی^۳ و همکارانش انجام شد [۵]. یک سامانه مانیتورینگ پرتوی از راه دور با استفاده از بالگرد خودران^۴

بدون سرنشین برای موارد اضطراری هسته‌ای توسط اوکویاما و همکارانش ساخته شد^۵ [۶]. مطالعه امکان‌سنجی یک سامانه پایش پرتوی از راه دور با استفاده از یک بالگرد بدون سرنشین مستقل، مجهز به آشکارساز پرتوی و سه دوربین CCD^۶، برای بررسی توزیع میزان دز تابش محیطی انجام شد [۷]. در تحقیق [۷] از ربات Martice ۶۰۰ به همراه دزیومتر 100 ARD با دو آشکارساز سطح انرژی بالا و پایین استفاده شده است. در این تحقیق، مطالعه بر روی سناریوی حرکت پرنده جهت آشکارسازی بهینه صورت گرفت. در تحقیق [۸] یک پهپاد با کنترل از هپتیک از راه دور و مجهز به آشکارساز CZT^۷ جهت طیف‌سنجی چشمه مفقود شده مورد استفاده قرار گرفت. قبل‌تر کار مشابهی جهت آزمون همین پهپاد با کنترل هپتیک بدون چشمه واقعی صورت پذیرفت [۹]. در کار مشابه دیگری نیز از فناوری واقعیت مجازی استفاده شد [۱۰]. همچنین پژوهش‌های ارزنده‌ای در زمینه تهیه نقشه طیفی و تشخیص عناصر با پهپاد صورت پذیرفته است. در تحقیق [۱۱] یک پهپاد با دو نوع آشکارساز CeBr_3 و آشکارساز دوقلو NaI و CeBr_3 نقشه اورانیم یک منطقه در آسیای مرکزی را فراهم نموده است. در تحقیق دیگری که در منطقه‌ای از کشور چک صورت گرفت یک پهپاد با طیف‌سنج BGO جهت شناسایی اورانیوم طبیعی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. در تحقیق [۱۳] با استفاده روش‌های ریاضی و استخراج کانتور سعی شده است که محل واقعی چشمه با دقت بالا پیدا شود که با شبیه‌سازی و فرض استخراج اطلاعات از پرنده و بدون آزمون عملی پیاده شده است. در تحقیق [۱۴] مؤلفین به بررسی نحوه پیدا کردن چشمه گمشده با پهپاد مجهز به آشکارساز NaI می‌پردازند که چشمه مفقودشده، یک ایزوتوپ ید یک میکرو کوری است. تحقیق [۱۵] به بررسی و مقایسه سه نوع آشکارساز جهت طیف‌نگاری هوایی پرداخته است تا به یک نقطه بهینه برسد. در تحقیق [۱۶] دو عدد آشکارساز LaBr_3 و HPGe بر روی پهپاد در نظر گرفته شده است و نحوه محاسبه حداقل اکتیویته قابل آشکارسازی و

⁶ Charge-coupled device

⁷ Cadmium Zinc Telluride

¹ Roy Pöllänen

² Demonstration

³ Mochizuki

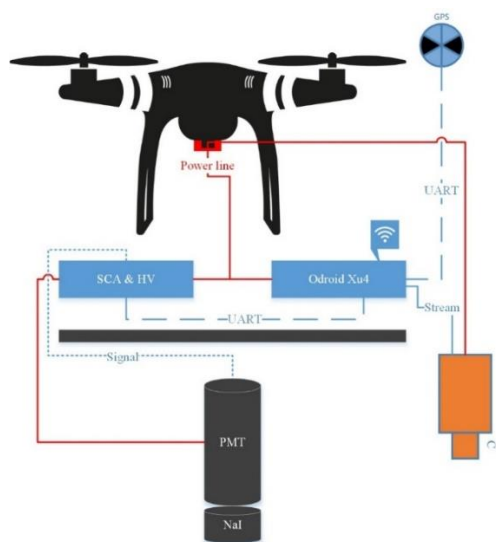
⁴ Autonomous

⁵ Okuyama

۲. پهپاد پایش گر

طرح‌واره پهپاد پایش گر پرتوی مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. ربات پرنده از نوع ماتریس ۶۰۰ با شش روتور ساخت شرکت DJI است. جهت نصب آشکارساز، لامپ تکثیرکننده نوری و سایر مدارات الکترونیکی، یک سازه نگهداره که در زیر ربات نصب می‌شود، طراحی و ساخته شد. همچنین، تغذیه مدارات و آشکارساز با باتری خود پهپاد صورت می‌گیرد. یک دوربین رزولوشن بالا نیز در کنار مجموعه آشکارساز جهت فیلم‌برداری برخط از زمین نصب و بهره‌برداری شد. به‌طور خلاصه، این ربات پایش گر از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

(۱) پهپاد چند-روتور، (۲) آشکارساز NaI، (۳) لامپ تکثیرکننده نوری، (۳) تحلیلگر تک کاناله، (۴) دوربین، (۵) مینی رایانه مرکزی و (۶) سامانه مدیریت تغذیه.



شکل (۱). طرح‌واره‌ای از بخش‌های مختلف پهپاد پایش گر پرتوی در این مطالعه.

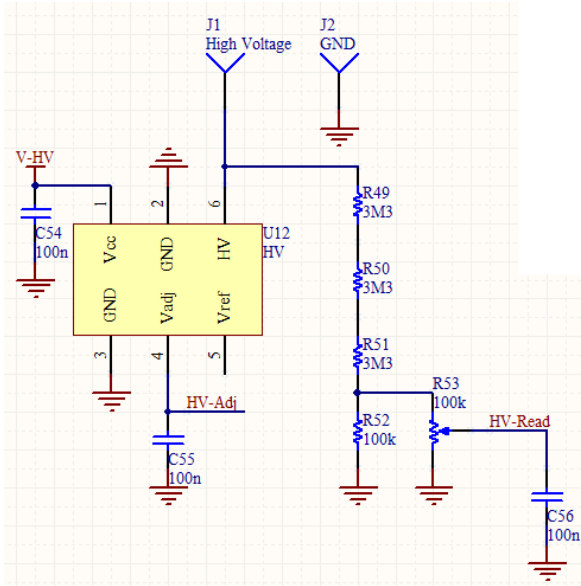
۱.۲. طراحی سامانه آشکارسازی هسته‌ای

در طراحی سامانه الکترونیک آشکارسازی از میکروکنترلر ARM به‌عنوان هسته اصلی پردازش و کنترل آشکارساز استفاده شده است. تغذیه این برد (DC) ۹-۳۶ V می‌باشد که از طریق کابل و توسط پردازنده تأمین می‌شود. این برد قابلیت راه‌اندازی یک

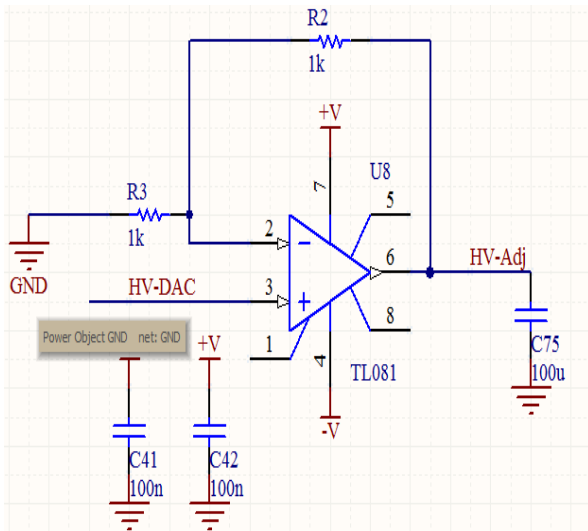
کالیبراسیون به‌صورت زمان واقعی و بهینه در ارتفاع‌ها و فواصل مختلف در شبیه‌سازی مونت کارلو مورد مطالعه قرار گرفته است. تحقیق [۱۷] به مقایسه دو روش زمینی و هوایی می‌پردازد و کارایی دو روش در جهت نقشه عناصر پرتوی مورد بررسی قرار داده است.

نظر به آنچه که اشاره رفت، استفاده از پهپادهای پرنده نه تنها سبب کاهش پرتوگیری افراد در شرایط عادی و اضطرار پرتوی/هسته‌ای خواهد شد، بلکه دقت بالاتری در تشخیص را به‌همراه خواهد داشت. از این‌رو، در این پژوهش حاضر یک سامانه پایش گر پرتوی با استفاده از یک هگزاکوپتر ساخت شرکت DJI به نام ماتریس ۶۰۰ استفاده شد. در ادامه، یک سامانه اندازه کوچک آشکارسازی مجهز به کریستال NaI به‌همراه مدار تغذیه و نیز یک مدار شمارنده تک کاناله بر روی آن نصب شد. تمامی سامانه آشکارسازی به‌صورت یک مجموعه توسط یک قاب نگه‌دارنده به زیر پرنده نصب گردید. ارسال برخط داده‌های ثبت شده توسط ماژول مخابراتی ۲/۴ گیگا هرتز (TL-WN8200ND) انجام شد. هدف از طراحی و ساخت سامانه پهپاد پایش گر جهت عمل پایش و کشف آلودگی‌های ضعیف خارج از کنترل در محیط است. در تحقیقات صورت گرفته، بر روی استخراج سریع نقشه آنومالی پرتوی از محیط و اکتشاف چشمه‌های با سطح فعالیت خیلی پایین و حجم کوچک، کاری صورت نگرفته است. از آن‌جا که سرعت عمل در حوادث هسته‌ای حائز اهمیت است لذا سیستم داده‌برداری طوری در نظر گرفته شده است که شمارش پرتو گاما را در سریعترین زمان ممکن صورت دهد. پهپاد در ارتفاع‌های بالا شروع به پایش می‌کند و ارتفاع خود در هر نوبت پایش کاهش می‌دهد تا به حد از پایش تعریف‌شده در تشخیص آنومالی پرتوی برسد. بعد از تشخیص آنومالی، در صورت نیاز در نقطه‌های داغ می‌توان کار طیف‌سنجی را صورت داد. هم‌چنین سامانه موزی در پهپاد (دوربین، GPS دوم، INS^۱) جهت بهبود موقعیت‌یابی در نظر گرفته شده است تا تشخیص موقعیت چشمه را در زمان‌های ضعیف شدن یا قطع شدن سیگنال‌های GPS بهبود بخشد.

^۱ Inertial navigation system



شکل (۳). مدار الکترونیکی تأمین ولتاژ بالا.



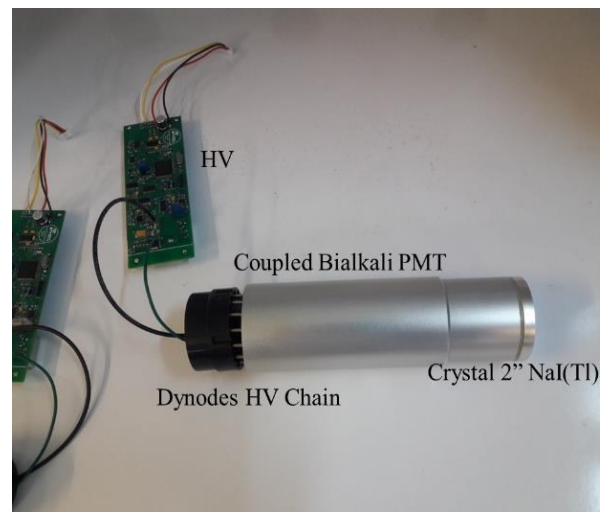
شکل (۴). مدار الکترونیکی کنترل مقدار ولتاژ بالا.

۳.۲. طراحی مکانیکی نگهدارنده آشکارساز و بردها

یک سازه نگهدارنده جهت قرار دادن کریستال و PMT به پهباد موردنیاز بود تا علاوه بر نگهداری آنها به پهباد متصل گردد.

همچنین در طراحی این سازه، الزامات پایداری و آیرودینامیکی پهباد در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که علاوه بر آشکارساز، تمامی مدارات و بردها نیز بر روی این سازه نصب می‌گردند (شکل ۵). در طراحی این نگهدارنده، وزن تا حد امکان سبک در

آشکارساز دو اینچی را دارد. جهت راه‌اندازی آشکارساز نیاز به ولتاژ ۷۵۰ V تا ۹۰۰ V می‌باشد که یک ماژول ولتاژ بالا برای تأمین آن در نظر گرفته شده است. آشکارساز همچنین دارای یک بستر ارتباطی برای انتقال داده به پردازنده می‌باشد. به طور کلی سامانه از دو برد مجزا از هم برد SCA و برد رایانه مرکزی تشکیل شده است. آشکارساز استفاده شده در این تحقیق به همراه مدار HV و لامپ تکثیرکننده نوری آن در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.



شکل (۲). تصویری واقعی از قطعات اصلی سامانه آشکارسازی ربات پهباد در این مطالعه.

۲.۲. مدارات الکترونیکی ولتاژ بالا

بخش ولتاژ بالا (HV) می‌بایست قابلیت تنظیم بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ ولت را داشته باشد. بخش کنترل مقدار HV از یک آپ‌امپ و یک ماژول HV تشکیل شده است. این آپ‌امپ به طور مستقیم به بخش DAC پردازنده متصل شده و توسط آن میزان ولتاژ مورد نیاز تنظیم می‌شود شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مدارهای الکترونیکی برای تأمین و کنترل ولتاژ بالا را نشان می‌دهند.

دوربین، بسیار سبک بوده و می‌تواند فیلم‌های با کیفیت Full HD با سرعت ۶۰ فریم در ثانیه ضبط کند.

۵.۲. آزمون‌های عملکردی

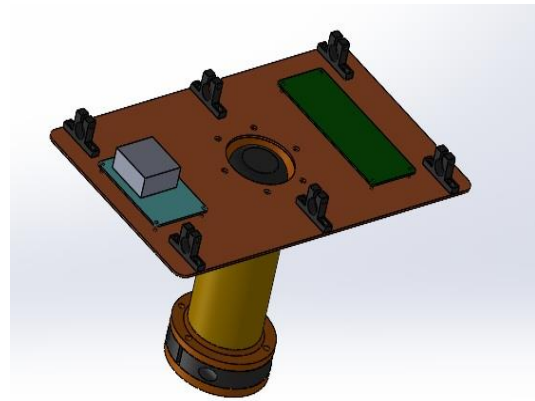
ابتدا مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای تحلیل پهپاد در داخل یک محیط امن انجام شد. از جمله آن‌ها آزمایش پایداری پهپاد بعد نصب سامانه آشکارساز، آزمایش خوانش اطلاعات پرتوی و ضبط آن توسط سامانه و آزمایش موقعیت‌یابی بود [۱۸]. بعد از اطمینان از عملکرد پهپاد، آزمون پایش پرتوی در یک زمین فوتبال به ابعاد ۵۰ متر در ۲۵ متر انجام شد (شکل ۷).



شکل (۷). زمین ورزشی و موقعیت قرارگیری چشمه‌ها برای آزمون عملکردی پهپاد.

در آزمون عملکردی از چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co استفاده شد. لازم به ذکر است که یکی از مهم‌ترین رادیونوکلئیدهایی که بر اثر حوادث هسته‌ای در محیط‌زیست منتشر می‌شود ^{137}Cs است. این رادیونوکلئید در لایه‌های بالایی خاک باقی‌مانده و با گذشت زمان به عمق‌های زیرین خاک نفوذ و توسط ریشه گیاهان جذب می‌شود و به زنجیره غذایی انسان راه می‌یابد و روی آن تأثیر می‌گذارد. رادیونوکلئید ^{137}Cs کاربردهای عملیاتی زیادی دارد. در مقادیر کم، برای واسنجی^۱ کردن تجهیزات آشکارسازی تابش استفاده می‌شود. در صنعت، در دبی‌سنج‌ها، ضخامت‌سنج‌ها سنجش‌گرهای چگالی-رطوبت

نظر گرفته شد. در سازه نگهدارنده، صفحه بالایی سازه از جنس فیبر کربن و جنس بدنه استوانه‌ای آلومینیوم و حلقه واسط بین دو رینگ پایینی از جنس تفلون است. مجموع وزن سازه نگهدارنده به همراه همه متعلقاتش ۱۸۰۰ گرم شد. شکل ۶ موقعیت قرارگیری این سازه بر روی پهپاد را نمایش می‌دهد.



شکل (۵). سازه مکانیکی نگهدارنده آشکارساز.



شکل (۶). مدل سازه مونتاژ شده بعد از نصب بر روی ربات پهپاد.

۴.۲. رایانه مرکزی و دوربین

نمونه رایانه مرکزی که بر روی ماژول آشکارسازی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت رایانه Odroid-XU4 است و برای تصویربرداری نیز از دوربین Xiaomi YI استفاده شد. این

^۱ Calibration

مختصات GPS و همچنین شمارش ثبت شده در هر نقطه ذخیره شد. پس از فراخوانی اطلاعات ذخیره شده، درون‌یابی بین نقاط انجام و نتایج در ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور حذف عدم قطعیت‌های آماری در شمارش‌ها، پهنای مدت زمان حداقل یک دقیقه در یک مکان مشخص (بر روی چشمه‌ها) اقدام به داده‌برداری نمود. پهنای در نقاط دیگر و در طول مسیر با سرعت 2 m/s حرکت می‌کند تا نقاط و شمارش گاما جهت تشکیل نقشه پرتوی ثبت گردد. شکل ۸، نقشه پرتوی برای چشمه موجود در مرکز (با بیشترین فعالیت پرتوایی) را در دو مقیاس خطی و لگاریتمی در ارتفاع پروازی 50 cm نمایش می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، پهنای پایش‌گر قادر است نقشه‌های پرتوی را به صورت برخط و هم‌زمان با داده‌برداری برای ایستگاه ارسال نماید.

در ادامه، برای نمایش بهتر مقادیر کمتر از تابش زمینه حذف شد تا نقاط آلوده به صورت شکل ۹ (الف) نمایش داده شود. در مرحله بعدی، با روش‌های پردازش تصویر از قبیل ثبت (متنی بر ویژگی^۱) و همجوشی^۲، تناظر یک به یک مکانی بین نقاط نقشه پرتوی و نقشه ماهواره‌ای (جغرافیایی) برقرار شد. برای این منظور از نرم‌افزار MATLAB و جعبه ابزار پردازش تصویر آن استفاده شد. مراحل ثبت تصاویر به‌طور خلاصه شامل: (۱) هم‌اندازه کردن تصاویر، (۲) نشان‌گذاری^۳ نقاط دارای GPS یکسان و مشخص، (۳) چرخش و تبدیل^۴ تصویر مرجع^۵ (نقشه پرتوی) و (۴) همجوشی تصویر مرجع (پرتوی) و هدف^۶ (ماهواره‌ای) می‌باشد.

نقشه همجوشی‌شده در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. با توجه به اینکه چشمه موجود در مرکز به دلیل برخورداری از مقدار پرتوایی بالاتر در مقایسه با چشمه‌های کناری، شدت بیشتری را به تصویر کشیده است. از شکل ۹ مشخص است که تمامی پنج چشمه پرتوی ضعیف (در مرتبه میکروکوری) به‌طور موفقیت‌آمیزی (مثبت-صحیح^۷) شناسایی شده‌اند.

(برای قرائت چگالی، با آمرسیوم-۲۴۱/بریلیوم که اندازه‌گیری رطوبت را فراهم می‌کند) و در دستگاه‌های چاه‌نگاری پرتو گاما استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد گسترده آن در صنعت و از آنجا که یکی از محصولات شکافت اورانیوم است، احتمال آلوده شدن محیط زیست با این رادیونوکلئید بالا است. همچنین، ^{60}Co یک ایزوتوپ پرتوزا از کبالت با نیمه‌عمر 5.2713 سال است که به‌طور مصنوعی در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این رادیوایزوتوپ نیز همانند چشمه ^{137}Cs کاربرد عملیاتی و صنعتی بسیار گسترده دارد از این‌رو احتمال مفقودی، سرقت و ایجاد آلودگی محیط‌زیستی توسط این ماده پرتوزا بسیار بالاست. بنابراین، در این مطالعه از چشمه‌های پرتوزای ^{137}Cs و ^{60}Co با میزان فعالیت پایین برای تحلیل سامانه پایش‌گر پرتوی پهنای استفاده شد. مشخصات چشمه‌های بکار گرفته شده در کار تجربی در جدول ۱ داده شده است. برای آزمایش قابلیت پایش پهنای از ۵ چشمه استفاده شد که شماره‌گذاری و جانمایی آن‌ها بر اساس شکل شماره ۷ صورت گرفته است.

جدول (۱). مشخصات چشمه‌های مورد استفاده در آزمایش پایش‌گر پهنای.

شماره چشمه	نوع چشمه	میزان فعالیت (μCi)	موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها در زمین
۱	کبالت ۶۰	۴.۹	شمال
۲	سزیوم ۱۳۷	۷.۳	جنوب
۳	کبالت ۶۰	۱.۴	غرب
۴	سزیوم ۱۳۷	۲.۳	شرق
۵	سزیوم ۱۳۷	۱۰۰	مرکز

۳. نتایج و بحث

قبل از شروع پایش، مقدار شمارش زمینه 125 cps اندازه‌گیری شد این مقدار، میانگین شمارش زمینه در کل ناحیه مورد تحلیل و مطالعه بود. سپس، پهنای بر روی نقاط از پیش تعیین‌شده پرواز نمود و در ارتفاع‌های پروازی متفاوت داده‌برداری صورت گرفت.

⁵ Source image

⁶ Target image

⁷ True-positive

¹ Feature-based image registration

² Image fusion

³ Landmarking

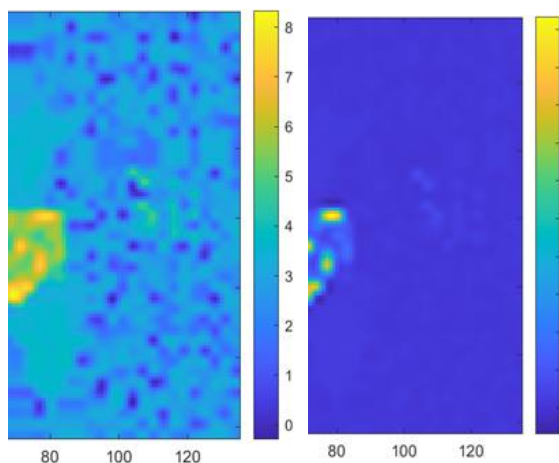
⁴ Transformation

برسد. در ارتفاع ۱۵۰ cm تقریباً اثرات چشمه شماره ۱ و ۳ تا سطح زمینه کاهش می‌یابد و با افزایش ارتفاع به تا ۲۵۰ cm تنها چشمه اول قابل شناسایی می‌باشد (شکل ۱۰). در ارتفاع‌های پروازی بالاتر ۳۰۰ cm هیچکدام از چشمه‌ها قابل شناسایی نبودند.

اگرچه ارتفاع پروازی پهپاد تا ۵۰۰ متر نیز می‌رسد، اما به دلیل این‌که سطح پرتوایی چشمه‌ها پایین بود و اندازه چشمه نیز در حدود یک عدس است، در ارتفاع پایین قابل کشف است. بنابراین ارتفاع مناسب پروازی پهپادهای پایش‌گر برای این سطح آلودگی زیر ۱ m می‌باشد. در شکل ۱۱ تغییرات شمارش پرتو گاما بر حسب ارتفاع برای چهار چشمه شمال، شرق، غرب و جنوب نمایش داده شده است. چشمه وسط به دلیل داشتن رفتار مشابه با سایر چشمه‌ها به دلیل فعالیت بالاتر نمایش داده نشده است تا انحراف معیارها در شکل به درستی نمایش داده شوند. به‌طور میانگین برای هر چشمه انحراف معیار کمتر از ۶ درصد مقدار میانگین بوده است.

یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که پایش‌گر قادر به شناسایی دو رادیونوکلید با انرژی متفاوت (Cs-۱۳۷ و Co-۶۰) نیز می‌باشد و از پاسخ مناسبی در انرژی‌های متفاوت برخوردار است. همچنین، انطباق ناحیه با شدت بالا در نقشه پرتوی با مکان واقعی چشمه‌ها (شکل ۷) قابل قبول و رضایت‌بخش است. نکته قابل ذکر دیگر در این پژوهش شناسایی چشمه‌ها با اندازه بسیار کوچک (که تقریباً چشمه نقطه‌ای قلمداد می‌شوند) بود که در مقایسه با شرایط واقعی پایش که اغلب چشمه‌ها به صورت گسترده و پخش شده هستند، بسیار چالشی‌تر و مشکل‌تر است. همچنین به علت وجود خطای GPS و زاویه فضایی آشکارساز، چشمه‌ها به صورت گسترده نشان داده شده‌اند علیرغم اینکه چشمه‌ها نقطه‌ای هستند. با بهبود موقعیت‌یابی و استفاده از فناوری‌های پردازش تصویر جهت تلفیق با اطلاعات مکانی می‌توان مکان چشمه‌ها را دقیق‌تر شناسایی نمود. امروزه دوربین پهپادها پیشرفتهای زیادی نموده و با استفاده از گیپال و لرزش‌گیرها، کیفیت تصویربرداری افزایش یافته است و از این مکان‌یابی و تشخیصی بر اساس تصویر کمک بسیاری در یافتن چشمه خواهد نمود [۱۹].

نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع شمارش ثبت شده نیز با توجه به دلیل افزایش فاصله از منبع پرتوزا کاهش و در نتیجه مساحت نقاط در نقشه پرتوی نیز کمتر می‌شود تا نهایتاً به صفر

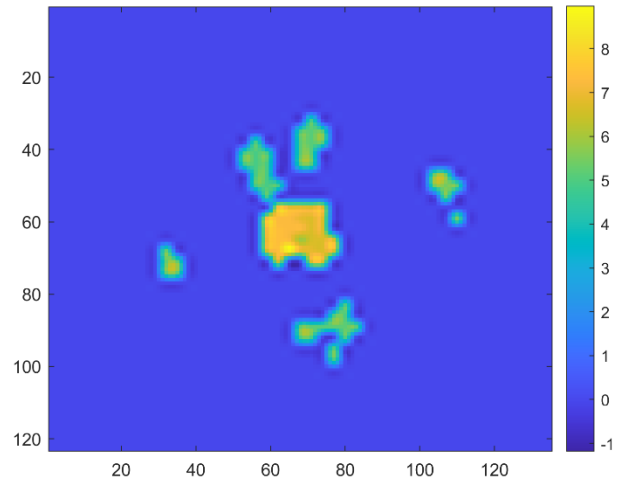
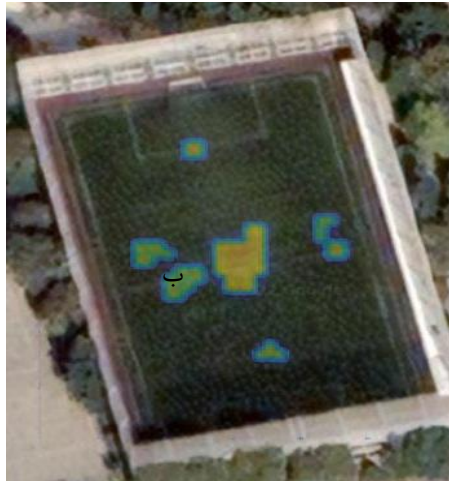


ب

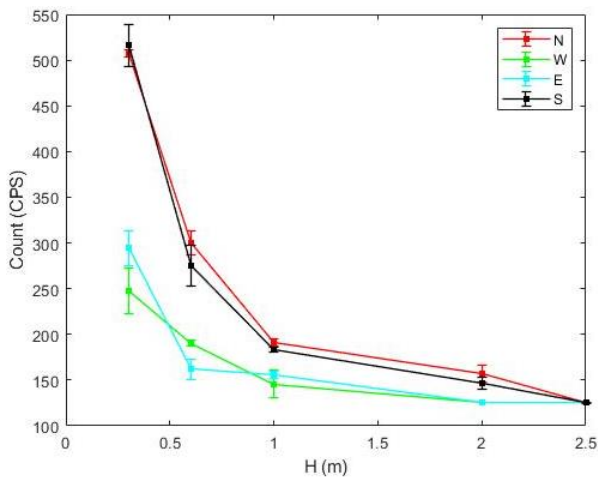
الف

شکل (۸). نقشه پرتوی در مقیاس خطی (الف) و لگاریتمی (ب) در

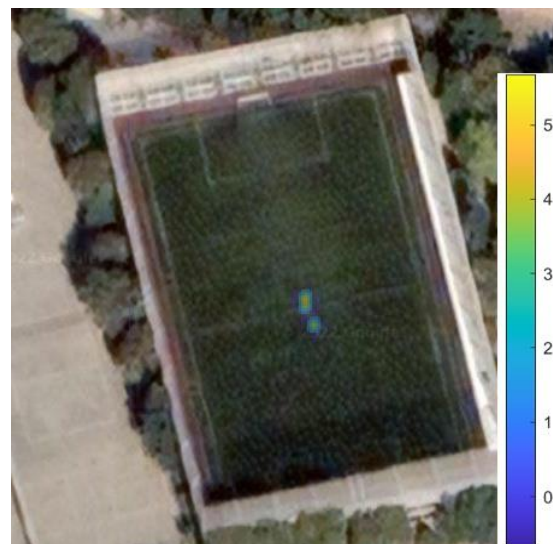
ارتفاع پروازی ۵۰ cm.



شکل ۹: الف) نقشه پرتوی بدست آمده در فاصله ۵۰ cm به صورت لگاریتمی بعد از حذف مقادیر کمتر از تابش زمینه. ب) همجوشی نقشه پرتوی و نقشه ماهواره‌ای در فاصله ۵۰ cm.



شکل (۱۱). تغییرات شمارش پرتو گاما (میانگین و انحراف معیار) بر حسب ارتفاع برای چشمه های شمال، شرق، غرب، جنوب.



شکل (۱۰). همجوشی نقشه پرتوی و نقشه ماهواره‌ای محیط در ارتفاع پروازی ۲۵۰ cm متری در مقیاس لگاریتمی و پس از حذف تابش زمینه.

۴. نتیجه گیری

مزیت‌های رقابتی این پایش‌گر با سایر روش‌های موجود است. به‌علاوه، این پهپاد پایش‌گر قابلیت نصب پمپ‌های نمونه‌برداری هوا برای تخمین پرتوگیری در شرایط عادی و اضطراب پرتوی را نیز دارا است. نصب آشکارسازهای نوترون در کنار آشکارساز فعلی و یا به‌صورت مجزا و انجام آزمون‌های عملکردی و طیف‌نگاری آن از جمله مسیرهای پیش روی این مطالعه است.

در این مطالعه یک سامانه پایش‌گر پرتوی پهپادی عمود پرواز و مجهز به آشکارساز گامای NaI طراحی و ساخته شد. این پایش‌گر قابلیت کنترل از راه دور را دارا بوده و قادر بر ارسال اطلاعات به‌صورت برخط می‌باشد. یافته‌های این پژوهش مؤید شناسایی موفق چشمه‌های گاما با سطح پرتوگیری و انرژی متفاوت هستند. قیمت نسبتاً پائین، عدم پرتوگیری فرد، قابلیت پرواز در مناطق صعب‌العبور و اندازه کوچک پهپاد از جمله

۵ مراجع

1. V. F. Kozlov. Handbook on Radiation Safety. The fourth edition. Moscow. Energoatomizdat, 1991 (in Russian).
2. A. Blowers. Nuclear waste and landscapes of risk. *Landsc. Res.* 24 (3) (1999) 241-264.
3. D. C. W. Sanderson, J. D. Allyson. An aerial gamma ray search for a missing ¹³⁷Cs source in the Niger Delta. 1991.
4. R. Pöllänen, H. Toivonen, K. Peräjärvi, T. Karhunen, P. Smolander, T. Ilander, K. Rintala, T. Katajainen, J. Niemelä, M. Juusela. Performance of an air sampler and a gamma-ray detector in a small unmanned aerial vehicle. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 282 (2009) 433-437.
5. S. Mochizuki, J. Kataoka, L. Tagawa, Y. Iwamoto, H. Okochi, N. Katsumi, S. Kinno, M. Arimoto, T. Maruhashi, K. Fujieda, T. Kurihara, S. Ohsuka. First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima. *J. Instrum.* 12 (2017) 11014.
6. S. I. Okuyama, T. Torii, A. Suzuki, M. Shibuya, N. Miyazaki. A remote radiation monitoring system using an autonomous unmanned helicopter for nuclear emergencies. *J. Nucl. Sci. Technol.* 45 (2008) 414-416.
7. B. Li, Y. Zhu, Z. Wang, C. Li, Z. -R. Peng, L. Ge. Use of multi-rotor unmanned aerial vehicles for radioactive source search. *Remote Sens.* 10 (2018) 728.
8. J. Aleotti, G. Micconi, S. Caselli, G. Benassi, N. Zambelli, M. Bettelli, D. Calestani, A. Zappettini. Haptic teleoperation of UAV Equipped with gamma-ray spectrometer for detection and identification of radio-active materials in industrial plants. T. Tolio, G. Copani, W. Terkaj (Eds.), *Factories of the Future: the Italian Flagship Initiative*, Springer International Publishing, Cham (2019) 197-214.
9. G. Micconi, J. Aleotti, S. Caselli. Evaluation of a haptic interface for UAV teleoperation in detection of radiation sources. In 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) (2016).
10. J. Aleotti, G. Micconi, S. Caselli, G. Benassi, N. Zambelli, M. Bettelli, A. Zappettini. Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface. *Sensors* 17 (2017) 2234.
11. C. Kunze, B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, S. Altfelder. Development of a UAV-based gamma spectrometry system for natural radionuclides and field tests at central Asian Uranium legacy sites. *Remote Sens.* 14 (2022) 2147.
12. O. Šálek, M. Matolín, L. Gryc. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry. *J. Environ. Radioact.* 182 (2018) 101-107.
13. A. A. R. Newaz, S. Jeong, H. Lee, H. Ryu, N. Y. Chong. UAV-based multiple source localization and contour mapping of radiation fields. *Rob. Auton. Syst.* 85 (2016) 12-25.
14. P. Gong, X. -B. Tang, X. Huang, P. Wang, L. -S. Wen, X. -X. Zhu, C. Zhou. Locating lost radioactive sources using a UAV radiation monitoring system. *Appl. Radiat. Isot.* 150 (2019) 1-13.
15. S. van der Veeke, J. Limburg, R. L. Koomans, M. Söderström, E. R. van der Graa. Optimizing gamma-ray spectrometers for UAV-borne surveys with geophysical applications. *J. Environ. Radioact.* 237 (2021) 106717.
16. X. -B. Tang, J. Meng, P. Wang, Y. Cao, X. Huang, L. -S. Wen, D. Chen. Efficiency calibration and minimum detectable activity concentration of a real-time UAV airborne sensor system with two gamma spectrometers. *Appl. Radiat. Isot.* 110 (2016) 100-108.
17. F. M. Van Egmond, S. Van Der Veeke, M. Knotters, R. L. Koomans, J. Limburg. Mapping soil texture with a gamma-ray spectrometer: comparison between UAV and proximal measurements and traditional sampling: validation study. No. 137. *Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment* (2018).
18. H. Ardiny, A. Beigzadeh. Pre-flight experiments for the unmanned aerial monitoring system (UAMS) radioactive detection under its limitations. *J. Nucl. Res. Appl.* (online access 2022).
19. H. Ardiny, M. Askari, A. M. Beigzadeh. Detection and localization of mobile and weak radioactive sources by data-fusion of a surveillance camera and a NaI detector in the continuous and discontinuous modes. *J. Nucl. Sci. Technol.* 43 (3) (2022) 94-102.