

Research Article

## Extraction of Gamma Radiometry Anomaly Map in One of the Radioactive areas of central Iran for Uranium Exploration Using an Autonomous UAV: a field study

Hadi Ardiny<sup>1\*</sup>, Amirmohammad Beigzadeh<sup>1</sup>, Hojjat Mahani<sup>1</sup>

1-Radiation Applications Research School. Nuclear Science and Technology Research Institute. Tehran, Iran

**Keywords:** *Unmanned aerial vehicle (UAV), Scintillation detector, Radiological monitoring, Central Iran region*

### 1-Introduction

The risks associated with occupational exposure of radiation workers are of great concern (Blowers, 1994; Cember et al., 2009). Exploration of radiological and nuclear mines is currently performed by airborne and ground-based monitoring. Airborne monitoring using a helicopter is first conducted, followed by a ground-based examination due to the low-resolution nature of airborne ones. The ground-based monitoring is considered for potential anomalies by a radiation worker with a hand-held detector. Because of some environmental obstacles, ground-based monitoring is either non-practical or imposes increased cost and time. Unmanned aerial vehicles (UAVs) address the abovementioned challenges and facilities for exploring radiological and nuclear mines (Li, 2018; Pöllänen, 2009; Mochizuki, 2017).

### 2- Material and methods

In this study, as the first report in Iran, a UAV was exploited for such an application. The UAV-based monitor is developed at the Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI) and consists of a multi-rotor drone, a scintillation detector, a photomultiplier tube, a positioning system, a central mini-computer, and an online data receiver/transmitter. Then, the influence of speed and altitude of flight was assessed in seven realistic situations. A field study in the central Iran region was conducted to evaluate the performance of the UAV-based radiological monitor. The 5-minute measured background was also subtracted from the acquired count rate. An in-home MATLAB-based software was also developed for data processing and feature-based image fusion.

### 3- Results and discussion

The results show that the UAV-based radiation monitor can fly at a pre-determined route with variable speed and attitude. Furthermore, the impact of flight height is more pronounced when compared with speed. Therefore, low-altitude flights are preferred for such tasks due to the well-known inverse square law principle. By 7.0 m (from 1102 m to 1095 m) decreasing the flight altitude, the count rate performance of the monitor is improved by a factor of 2.3. The higher the count rate, the higher the accuracy of the radiological map. The remotely-controlled drone-based monitors successfully provided the radiological map in the field study in the central Iran region. The developed processing software of the monitoring system automatically fuses the radiological map with the corresponding geographical one.

### 4- Conclusion

It is concluded that the developed UAV-based monitor offers exciting features for exploring radiological and nuclear mines. The future work will benefit from a multi-detector setup enabling measurement of other radiation types, for example, neutron. The utilization of fixed-wing UAVs will also be persuaded.

\* Corresponding author: hardini@aeoi.oeg.ir

## References

- Blowers, A., 1999. Nuclear Waste and Landscapes of Risk. *Landscape Research* 24(3), 241–64. <https://doi.org/10.1080/01426399908706562>.
- Cember, H., Johnson, T.E., 2009. *Introduction to Health Physics*. 4th ed. McGraw-Hill Education. P. 888.
- Li, B., Zhu, Y., Wang, Z., Li, C., Peng, Z.R., Ge, L., 2018. Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search. *Remote Sensing* 10(5), 728. <https://doi.org/10.3390/rs10050728>.
- Mochizuki, S., Kataoka, J., Tagawa, L., Iwamoto, Y., Okochi, H., Katsumi, N., Kinno, S., et al. 2017. First Demonstration of Aerial Gamma-Ray Imaging Using Drone for Prompt Radiation Survey in Fukushima. *Journal of Instrumentation* 12(11), P11014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/P11014>.
- Pöllänen, R., Toivonen, H., Peräjärvi, K., Karhunen, T., Smolander, P., Ilander, T., Rintala, K., 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* 282(2), 433–37. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0284-3>.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ardiny, H., Beigzadeh, A., Mahani, H., 2023. Extraction of Gamma Radiometry Anomaly Map in One of the Radioactive areas of central Iran for Uranium Exploration Using an Autonomous UAV: a field study. *Adv. Appl. Geol.* 13(3), 679 – 688.

DOI: 10.22055/AAG.2022.41873.2316

[https://aag.scu.ac.ir/article\\_18252.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18252.html)

©2023 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

## استخراج نقشه آنومالی هسته‌ای منطقه ایران مرکزی و اکتشاف مواد پرتوزای طبیعی با پهپاد پایشگر خودکار: مطالعه میدانی

هادی اردینی\*

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

امیرمحمد بیگزاده

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

حجت اله ماهانی

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

hardini@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

### چکیده

اکتشاف معادن پرتوی به دو صورت هوابرد و پایش زمینی صورت می‌پذیرد. در ابتدا پایش‌های هوابرد با کمک بالگرد صورت می‌گیرد، اما اطلاعات به‌دست آمده دارای قدرت تفکیک مکانی پایین می‌باشد؛ به همین سبب در مرحله بعد یک فرد با حضور در نقاط مشکوک به آنومالی، نقاط دقیق را با یک سیستم پایشگر دستی ثبت می‌کند و در انتها نقشه پرتوی استخراج می‌شود. به دلیل وجود موانع طبیعی، در برخی از موارد پایش زمینی متوقف شده یا مستلزم هزینه و زمان زیادی است. پهپادهای پایشگر به‌عنوان یک راه‌حل میانی در حوزه اکتشاف معادن پرتوی می‌توانند عملیات اکتشاف را تسهیل و تکمیل نمایند. از طرفی استفاده از پهپاد باعث کاهش حضور افراد در مناطق پرتوی می‌شود. در این مطالعه، از یک پهپاد برای مقاصد اکتشاف معادن پرتوی ایران مرکزی استفاده شده است. پهپاد پایشگر مشتمل بر ربات پهپاد، آشکارساز سوسوزن، لامپ تکثیرکننده نوری، سیستم موقعیت‌یاب، کامپیوتر مرکزی و سامانه دریافت و ارسال برخط اطلاعات است. نتایج نشان دادند ارتفاع پروازی در مقایسه با سرعت پروازی تأثیر به‌مراتب بیشتری در کیفیت برداشت اطلاعات دارد و از این پرواز در ارتفاع‌های کمتر بیشتر توصیه می‌شود. از نتایج این‌گونه برداشت می‌شود که پهپاد پایشگر توسعه داده‌شده از قابلیت مناسبی برای کاربردهای اکتشافی مناطق پرتوزای طبیعی برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** پایش پرتوی، پهپاد، آشکارسازی، نقشه پرتوی، اکتشاف

### ۱- مقدمه

همچنین سایر رادیونوکلئیدها بخشی از زنجیره چرخه سوخت هسته‌ای می‌باشد که از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (Darabi et al., 2013). در طول زنجیره واپاشی U-238، علاوه بر ذرات آلفا و بتا، پرتوهای گامای متعددی نیز گسیل می‌شوند که از طریق آشکارسازی آن‌ها می‌توان مواد و معادن هسته‌ای را کشف کرد (Parsons-Davis et al., 2018). برای این منظور معمولاً از دو روش (۱) پایش هوایی توسط بالگرد و (۲) پایش زمینی فردی، استفاده می‌شود که در برخی شرایط این دو روش مکمل همدیگر می‌باشند. استفاده از بالگرد علاوه بر تحمیل هزینه بسیار بالا، دقت مکانی مناسبی نیز ندارد و اغلب نیاز است تا پایش زمینی

پرتوهای یون‌ساز علی‌رغم مزایا و کاربردهای متعدد خود، سبب پرتوگیری نیز می‌شوند که این امر به نوبه خود باعث ایجاد آثار قطعی و تصادفی در افراد خواهد شد (Cember and Johnson, 2009). ابتدا به سرطان به‌عنوان مهم‌ترین خطر و اثر تصادفی پرتوهای یون‌ساز قلمداد می‌شود. امروزه پرتوگیری افراد و مردم عادی نگرانی‌های زیادی را متوجه خود ساخته است. بر اساس اصول آلا (ALARA)، مقدار پرتوگیری باید تا حد امکان کاهش یابد (Blowers, 1999; Sanderson and Allyson, 1991). اکتشاف معادن هسته‌ای به‌منظور شناسایی اورانیوم طبیعی، توریم و

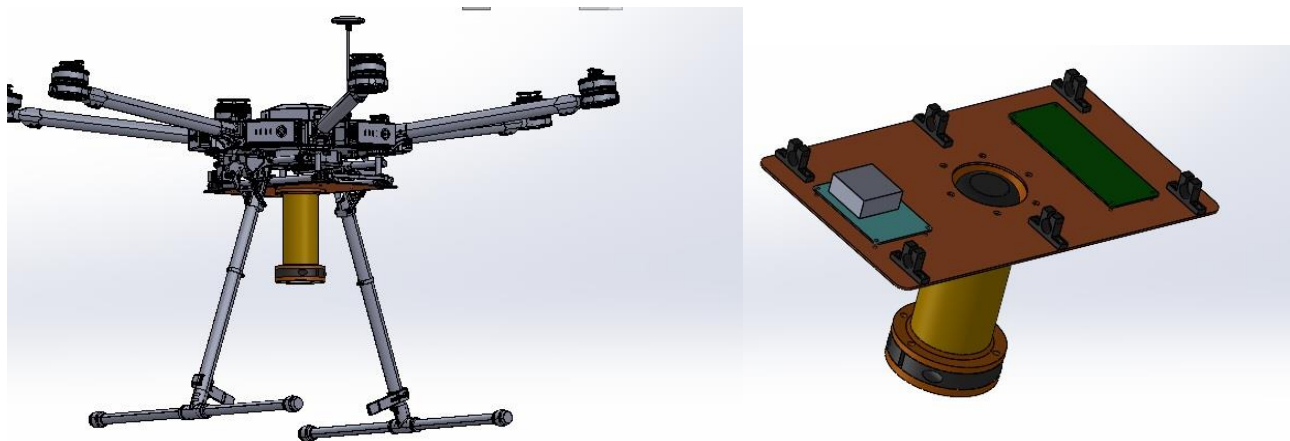
مطالعه برای اولین بار در ایران انجام شده و از این روی بدیع به نظر می‌رسد. هم‌چنین مطالعه اثرات هم‌زمان سرعت و ارتفاع نیز جنبه دیگری از این پژوهش است که به‌تازگی کار افزوده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد این پیشگر، برخی آزمون‌های میدانی در منطقه هسته‌ای ایران مرکزی طراحی شد تا قدرت و توانایی پهپاد در شناسایی معادن مورد سنجش قرار گیرد.

## ۲- ابزار و روش کار

### ۲-۱- پهپاد

ربات پهپاد مورد استفاده در این مطالعه، از نوع MATRICE 600 ساخت شرکت DJI چین می‌باشد. این ربات دارای شش موتور براشلس بوده و قابلیت حمل بار تا ۵ کیلوگرم را دارا می‌باشد. پهپاد پیشگر برای مقاصد اکتشاف دارای قسمت‌های مقابل می‌باشد: (۱) ربات پهپاد، نوری (Photo-multiplier tube, PMT)، (۲) لامپ تکثیرکننده (۳) آشکارساز NaI با قطر دو اینچ، (۴) سیستم موقعیت‌یاب GPS، (۵) مینی رایانه مرکزی، (۶) سیستم الکترونیک هسته‌ای و تحلیل‌گر تک کاناله (Single-channel analyzer, SCA) و (۷) سامانه ارسال و دریافت برخط اطلاعات. شکل ۱ (چپ) طرح‌واره‌ای از این پیشگر و شکل ۱ (راست) سازه نگه‌دارنده آشکارساز را نمایش می‌دهد. مجموعه آشکارساز و خوانش‌گر در زیر ربات نصب می‌شوند. هم‌چنین، این پهپاد مجهز به یک دوربین HD به‌منظور تصویربرداری از محیط در حین داده‌برداری است. سوسوزن NaI بسیار مناسب آشکارسازی گاما بوده و امروزه بیشترین کاربرد را دارد. لامپ تکثیرکننده نوری مدل Beijing Hamamatsu ساخت شرکت PMT CR105 می‌باشد. شکل ۲، نمایی واقعی از مجموعه آشکارساز شامل سوسوزن NaI و لامپ تکثیرکننده نوری را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که طراحی سازه مکانیکی نگه‌دارنده آشکارساز و مدارات تغذیه لامپ‌های PM (تغذیه از طریق باتری خود ربات) در مجموعه پژوهشگاه صورت گرفت.

فردی نیز به‌منظور شناسایی دقیق مکان تجمع مواد پرتوزا مورد استفاده قرار گیرد (Blowers, 1999; Sanderson and Allyson, 1991). پایش زمینی فردی نیز بسیار زمان‌بر بوده و به‌علاوه خطر پرتوگیری فرد را نیز به‌همراه دارد. از سوی دیگر در برخی مناطق صعب‌العبور، استفاده از فرد برای پایش محیط چندان عملیاتی و میسر نیست. از این روی، پهپاد پیشگر کنترل‌پذیر از راه دور و خودکار گزینه مناسب و جالبی به‌نظر می‌رسند که در حد میانی این دو روش قرار دارند. هزینه‌ی به‌مراتب کمتر از بالگرد، دقت مکانی بالا و هم‌چنین عدم پرتوگیری افراد از جمله مزایای کلیدی و رقابتی استفاده از این نوع ابزارها می‌باشد (Blowers, 1999; Sanderson and Allyson, 1991). از نمونه کارهای مشابه صورت گرفته در دنیا می‌توان به کاری اشاره نمود که با استفاده از یک دستگاه نمونه‌گیر هوا و آشکارساز سوسوزن گاما در یک پهپاد بدون سرنشین اقدام به پایش پرتوی دختران گاز رادون محیط کردند (Pöllänen et al., 2009). هم‌چنین به‌منظور پایش پرتوی فوکوشیما، از یک هواپیمای بدون سرنشین مجهز به آشکارساز گاما استفاده شده است (Mochizuki et al., 2017). از ربات MATRICE 600 نیز به‌طور موفقیت‌آمیزی برای پایش پرتوی محیط با استفاده از دو آشکارساز انرژی بالا و پایین استفاده شده است (Li et al., 2018). از یک پهپاد عمود پرواز مجهز به طیف‌نگار گاما برای کاربردهای ژئوفیزیکی استفاده شده است و نشان داده شده است که دقت اندازه‌گیری به سرعت پرواز وابسته است (van der Veeke et al., 2021) و (Kunze, 2022). از یک ربات پهپاد عمود پرواز مجهز به آشکارسازهای  $\text{NaI}$  و  $\text{CeBr}_3$  که در زیر پهپاد نصب شده بودند، برای شناسایی و اکتشاف معادن اورانیوم در آسیای مرکزی بهره بردند (Kunze et al., 2022) در مطالعه حاضر، از یک پهپاد پیشگر که در مجموعه پژوهشگاه توسعه داده شده و نتایج کامل پهپاد و الگوریتم تلفیق/انطباق تصاویر بیشتر منتشر شده است (Ardiny and Beigzadeh, 2022). طبق تحقیقات صورت گرفته، این



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از ربات پهپاد مورد استفاده در این مطالعه (چپ) و آشکارساز (راست).

Fig. 1. Schematic of a drone (left) and detection system (right).



شکل ۲- نمایی واقعی از مجموعه آشکارساز (سوسوزن و لامپ تکثیرکننده نوری)

Fig. 2. A real view of detection system (scintillator and photo multiplier tube (PMT))

## ۲-۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

یک مجموعه آزمون‌های میدانی برای ارزیابی عملکرد پایشگر در اکتشاف معادن هسته‌ای در نظر گرفته شد تا اثر سرعت و ارتفاع پروازی پایشگر بر روی عملکرد آن بررسی شود. برای این منظور، تلاش شد تا پایشگر در تمامی حالات بر روی یک مسیر حرکتی یکسان پرواز نماید. سرعت پهپاد از  $0.75 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$  متغیر در نظر گرفته شد. ارتفاع پروازی نیز از ۵ متر تا ۱۲ متر نسبت به سطح زمین و محل شروع پرواز (از سطح دریا ۱۰۹۵ متر تا ۱۱۰۲ متر) متغیر لحاظ شد. مجموعاً ۷ حالت از ترکیب سرعت‌ها و ارتفاع‌های مختلف به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد. شکل ۲ نمایی واقعی از پرواز پهپاد پایشگر در منطقه

اکتشافی را به تصویر کشیده است. در تمامی داده‌برداری‌ها، زمان اندازه‌گیری در هر نقطه، متوسط برابر  $60 \text{ sec}$  در نظر گرفته شد. در ادامه، یک منطقه مستطیل شکل به طور کامل مورد پایش برای پرتوهای گامای گسیلی از مواد پرتوزای طبیعی قرار گرفت و نقشه‌های پرتوی و جغرافیایی محیط بر روی هم‌دیگر به کمک روش‌های پردازش تصویر منطبق شد. از روش ثبت تصویر مبتنی بر ویژگی (Feature-based image registration) برای انطباق تصاویر در محیط برنامه‌نویسی MATLAB استفاده شد. برای انطباق نقشه‌ها، اندازه هر دو نقشه و همچنین قدرت تفکیک مکانی آن‌ها برابر هم‌دیگر قرار داده شد. نقشه جغرافیایی به عنوان تصویر منبع و نقشه پرتوی به عنوان تصویر هدف در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. مشخصات ۷ حالت پروازی بر فراز منطقه اکتشافی

Table 1. Specifications of 7 flight modes over the exploration area

No	Speed (m/s)	height (m)
1	0/75098	1099
2	1/5745	1097
2	1/6739	1095
4	1/7334	1104
5	2/2489	1099
6	4/3027	1102
7	5/081	1102



شکل ۳- تصویری از پرواز پهپاد پیشگر بر روی منطقه اکتشافی

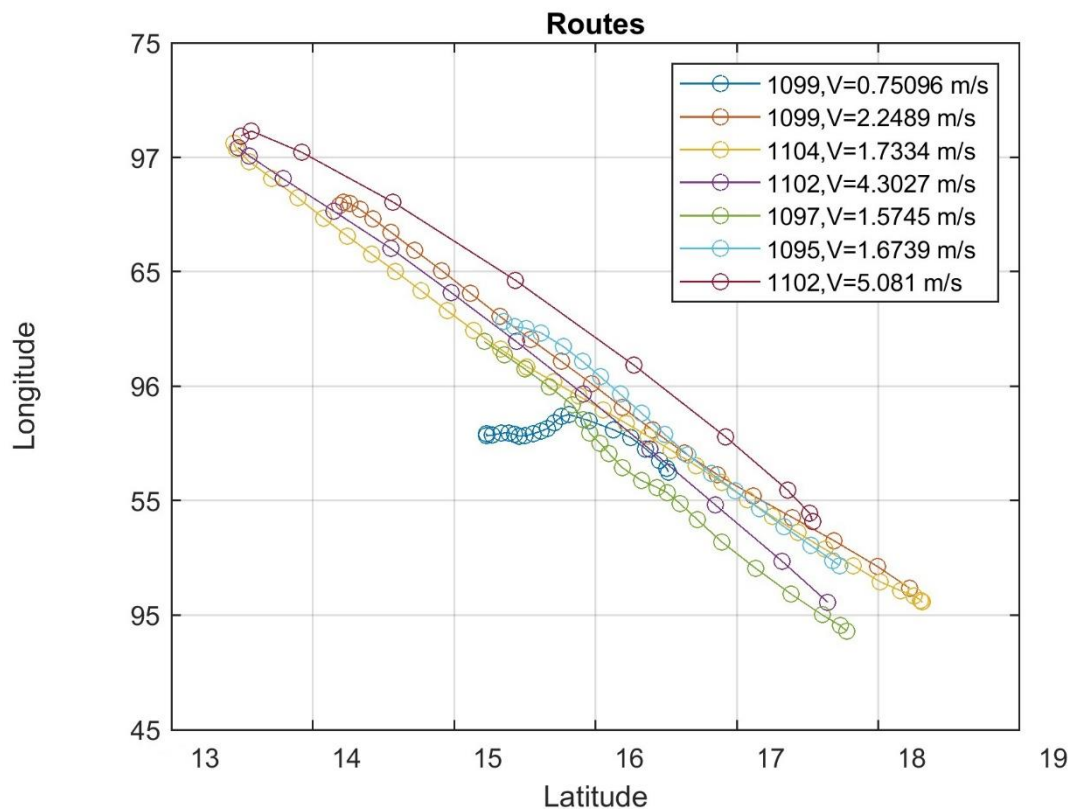
Fig. 3. A photo of unmanned aerial monitoring system (UAMS) flight over the exploration area

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر سرعت و ارتفاع پروازی

شمارش زمينه در اين مطالعه مقدار ۲۲۰ CPS اندازه‌گیری شد که در ادامه برای اصلاح شمارش ثبت شده و تعیین شمارش خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۴، مسیرهای پروازی

پهپاد را در سرعت و ارتفاع‌های پروازی مختلف نمایش می‌دهد. مسیر انتخاب شده تقریباً مسطح است و ارتفاع پهپاد هم در طول هر خط پرواز ثابت است. همان طوری که از شکل ۴ مشخص است، در تمامی ۷ حالت بررسی شده (ترکیب‌های سرعت و ارتفاع پروازی)، مسیر پروازی به نحو قابل قبولی یکسان است.

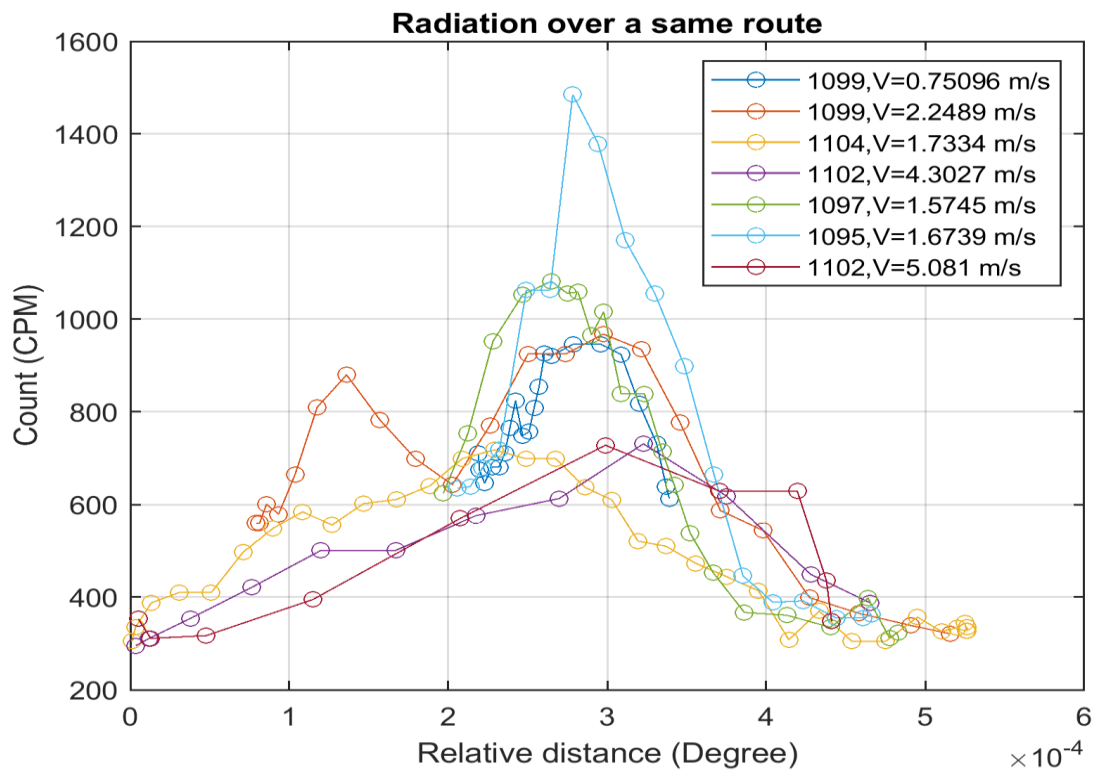


شکل ۴- مسیرهای پروازی در سرعت و ارتفاع‌های مختلف برای ۷ حالت پروازی (به دلیل محرمانه بودن محل پرواز، مختصات واقعی نمایش داده نشده است)

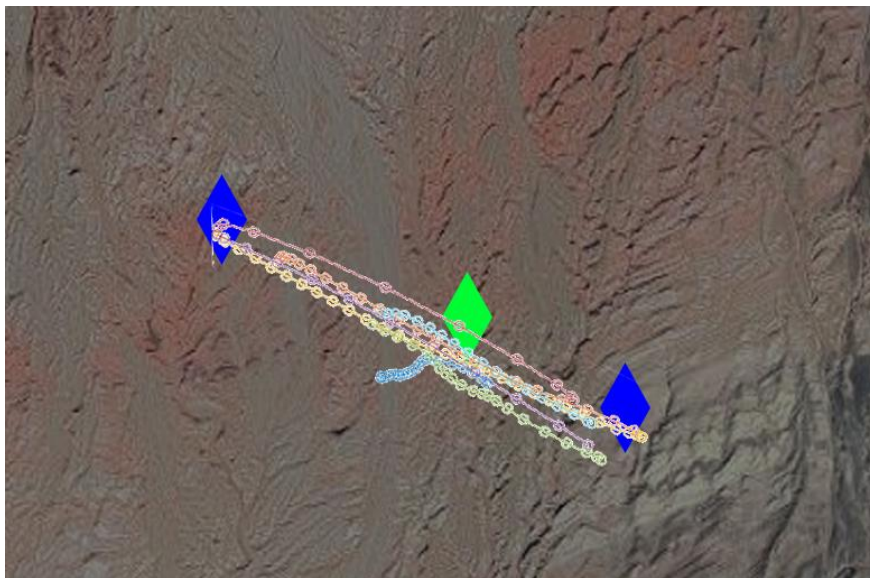
Fig. 4. Flight paths at different speeds and altitudes for 7 flight modes (due to the confidentiality of the flight location, the actual coordinates were not displayed)

نقاط داده برداری کاهش می‌یابد که در شکل ۳ مشخص است. در ارتباط با شکل ۴، شکل ۶ نیز مسیر پروازی در ۷ حالت یادشده را بر روی نقشه جغرافیایی محیط منطبق کرده است. در این شکل، نشانگرهای آبی ابتدا و انتهای مسیر پروازی هستند و نشانگر سبز بیانگر وجود یک نقطه داغ (متناظر با حداکثر شمارش در آشکارساز) در مسیر است. با استناد به نتایج می‌توان این‌گونه بیان کرد که ارتفاع پروازی کمتر در کاربردهای اکتشاف معادن مواد هسته‌ای در مقایسه با ارتفاع‌های بلندتر ارجح بوده و شمارش بالاتر و در نتیجه دقت بالاتری را به همراه خواهد داشت. همچنین افزایش سرعت تغییری در مقدار شمارش ثبت نکرده است و فاصله نمونه برداری‌ها را بیشتر نموده است. همچنین لازم به ذکر است متوسط خطا برای نقاط ثابت کمتر از ۰/۴ درصد میانگین مقدارهای اندازه‌گیری شده می‌باشد.

پروفایل شدت نسبی شمارش آشکارساز پرتو در هر ۷ حالت بررسی شده در یک مسیر مشخص، در شکل ۵ به نمایش گذاشته شده است. با دقت در شکل ۵ مشخص است که کاهش ارتفاع پروازی منجر به افزایش شمارش آشکارساز خواهد شد که مطابق با قانون عکس مجذور فاصله توجیه پذیر است و از این روی ارتفاع پروازی پایین مزیت تلقی می‌شود. همچنین، مشخص است که به طرز قابل قبولی در تمامی ۷ حالت پروازی، مکان نقطه داغ یکسان و در مرکز مسیر پروازی تشخیص داده شده است. در ارتفاع پروازی ۱۰۹۵ متر از سطح دریا که کمترین ارتفاع پروازی است، شمارش ثبت شده برابر با ۱۵۰۰ CPS و با ۴ متر افزایش ارتفاع پروازی (در ارتفاع ۱۰۹۹ متری) این مقدار به ۱۱۰۰ CPS کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع تا ۷ متر (۱۱۰۲)، شمارش به پایین‌ترین مقدار خود و برابر ۶۵۰ CPS می‌رسد. لازم به تذکر است که با افزایش سرعت پروازی، فاصله



شکل ۵- پروفایل شمارش آشکارساز در یک مسیر یکسان در سرعت و ارتفاعهای مختلف برای ۷ حالت پروازی  
Fig. 5. Gamma-ray count profiles on the same track at different speeds and altitudes for 7 flight modes



شکل ۶- انطباق مسیر پروازی پهپاد پایسگر با نقشه جغرافیایی منطقه. نشانگرهای آبی ابتدا و انتهای مسیر حرکت و نشانگر سبز بیانگر مکان نقطه داغ متناظر با حداکثر شمارش آشکارساز است

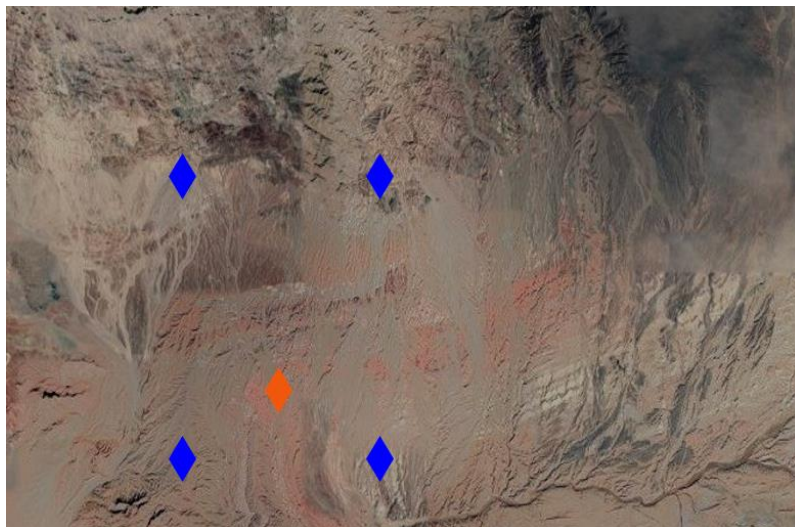
Fig. 6. Matching the flight paths of UAMS with the geographical map of the region. The blue markers indicate the beginning and end of the movement path respectively. The green marker indicates the location of the hotspot corresponding to the maximum count



### ۲-۳- پایش جامع یک منطقه پرتوی

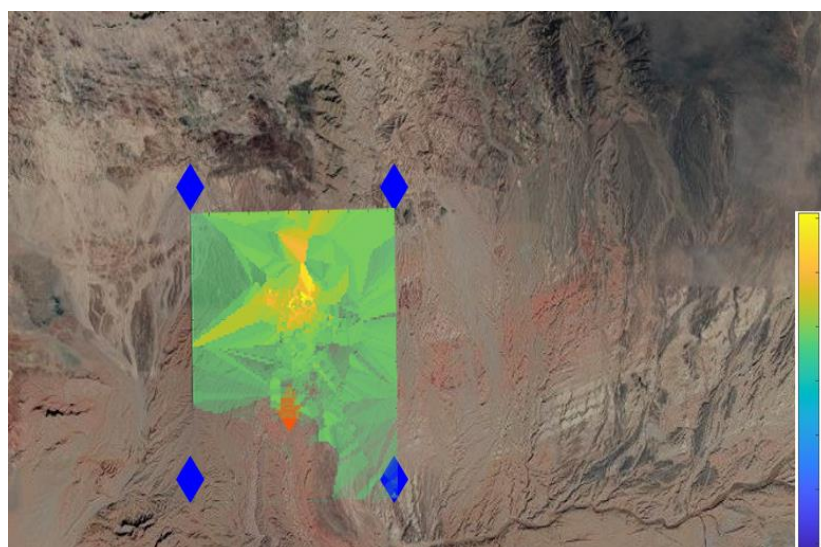
پس از بررسی اثر سرعت و ارتفاع پروازی، پایش منطقه در یک محیط مستطیلی انجام شد. در این پایش تلاش شد تا سرعت و ارتفاع پروازی ثابت بماند. در شکل ۶ نشانگرهای آبی چهارگوشه منطقه پایش، نشانگر نارنجی بیانگر محل تجهیزات لازم و نشانگر سبز محل وقوع حداکثر شمارش را بر روی نقشه جغرافیایی محیط نشان می‌دهد. در ارتباط با شکل ۷، شکل نقشه پرتوی

محیط منطبق شده بر روی نقشه جغرافیایی آن را نشان می‌دهد. به‌منظور نمایش بهتر، شمارش‌ها در مقیاس لگاریتمی رسم شده‌اند و همچنین تابش زمینه کسر شده است. با تعیین مناطق و نقاط داغ می‌توان اقدام به عملیات آتی به‌منظور برداشت و استخراج عناصر پرتوی طبیعی از منطقه نمود. نتایج نشان می‌دهند که ربات پهپاد توسعه داده شده قادر به تولید و استخراج نقشه پرتوی گاما در معادن عناصر پرتوی با دقت و سرعت بالایی می‌باشد.



شکل ۷- نقشه جغرافیایی منطقه و محدوده منطقه پایش. نشانگرهای آبی چهارگوشه منطقه پایش، نشانگر نارنجی محل استقرار تجهیزات را نمایش می‌دهد

Fig. 7. Geographical map of the area and the scope of the monitoring area. The square blue markers of the monitoring area, the orange marker shows the location of the equipment



شکل ۸- انطباق نقشه جغرافیایی منطقه با نقشه پرتوی. شمارش‌ها در مقیاس لگاریتمی نمایش داده شده‌اند و مقادیر نزدیک به زمینه حذف شده‌اند

Fig. 8 Matching the geographical map of the region with the ray map. Counts were displayed in logarithmic scale and values close to the background were omitted

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، برای اولین بار در کشور، از یک ربات پهپاد جهت پایش پرتوی محیط به منظور اکتشاف مواد هسته‌ای استفاده شد. نتایج نشان دادند که این تجهیز از قابلیت و توانایی مناسبی برای انواع شرایط محیطی منطقه برخوردار است. دریافت مسیر پروازی قبل از شروع عملیات و پایش خودکار محیط، کنترل پذیری از راه دور، توانایی پرواز در ارتفاع‌های خیلی پایین، پرواز به مدت طولانی در یک نقطه ثابت جهت داده‌برداری دقیق‌تر، عدم پرتوگیری افراد، قیمت مناسب و همچنین دقت

کافی از جمله مزیت‌های رقابتی این پایشگر است. همچنین، این پهپاد قابلیت نصب انواع آشکارسازهای دیگر (مانند آشکارساز نوترونی) و ماژول‌های طیف‌سنجی را نیز دارا می‌باشد. مسیر آتی این مطالعه، افزایش مساحت منطقه مورد پایش و نصب طیف‌سنج‌های تابش بر روی پهپاد می‌باشد. با بهره‌مندی از سامانه‌های طیف‌سنجی گاما می‌توان نوع رادیونوکلئید را نیز تشخیص داد که گام مهمی در پایش پرتوی معادن هسته‌ای قلمداد می‌شود. استفاده از پهپادهای ترکیبی بال ثابت و عمود پرواز نیز از جمله چشم‌اندازهای استفاده از روش‌های هوشمند بدون سرنشین در اکتشاف معادن هسته‌ای خواهد بود.

#### مراجع

- Ardiny, H., Beigzadeh, A.M., 2022. Pre-Flight Experiments for the Unmanned Aerial Monitoring System (UAMS) Radioactive Detection under Its Limitations. *Journal of Nuclear Research and Applications* 2 (3), 23–28. <https://doi.org/10.24200/jon.2022.1023>.
- Ardiny, H., Beigzadeh, A., Askari, M., 2022. Tracking a Moving Source Based on a Computer Vision System: Improving Detection Using Data Correlation. *Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat)*. <https://doi.org/10.24200/nst.2022.986.1669>.
- Blowers, A., 1999. Nuclear Waste and Landscapes of Risk. *Landscape Research* 24(3), 241–64. <https://doi.org/10.1080/01426399908706562>.
- Cember, H., Johnson, T.E., 2009. *Introduction to Health Physics*. 4th ed. McGraw-Hill Education. P. 888.
- Darabi, F., Hezarkhani, A., Zare, M., 2013. Identification of Anomalous Area for U-235 by Fractal Geometry Method on Kriging Spatial Mapping of Anzali Wetland. *Advanced Applied Geology* 3(4), 64–72.
- Kunze, C., Preugschat, B., Arndt, R., Kandzia, F., Wiens, B., Altfelder, S., 2022. Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing* 14(9), 2147. <https://doi.org/10.3390/rs14092147>.
- Li, B., Zhu, Y., Wang, Z., Li, C., Peng, Z.R., Ge, L., 2018. Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search. *Remote Sensing* 10(5), 728. <https://doi.org/10.3390/rs10050728>.
- Mochizuki, S., Kataoka, J., Tagawa, L., Iwamoto, Y., Okochi, H., Katsumi, N., Kinno, S., et al. 2017. First Demonstration of Aerial Gamma-Ray Imaging Using Drone for Prompt Radiation Survey in Fukushima. *Journal of Instrumentation* 12 (11), P11014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/P11014>.
- Parsons-Davis, T., Wimpenny, J., Brenhin Keller C., Thomas, K., Samperton, K.M., Renne, P.R., Mundil, R., et al. 2018. New Measurement of the <sup>238</sup>U Decay Constant with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 318(1), 711–21. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6148-y>.
- Pöllänen, R., Toivonen, H., Peräjärvi, K., Karhunen, T., Smolander, P., Ilander, T., Rintala, K., 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* 282(2), 433–37. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0284-3>.
- Sanderson, D.C.W., Allyson, S., 1991. An Aerial Gamma Ray Search for a Missing <sup>137</sup>Cs Source in the Niger Delta. *Scottish Universities Research and Reactor Centre*. <http://eprints.gla.ac.uk/58144/http://eprints.gla.ac.uk>.
- Veeke, S. Limburg, R.L., Koomans, M., Söderström, van der Graaf, E.R., 2021. Optimizing Gamma-Ray Spectrometers for UAV-Borne Surveys with Geophysical Applications. *Journal of Environmental Radioactivity* 237, 106717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106717>.