

MATEUSZ JAKUBIAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: jakubiak@agh.edu.pl

WYKORZYSTANIE BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH DO RETARDACJI PRZEKSZTAŁCANIA ZASOBÓW ŚRODOWISKA

Gwałtowny postęp techniczny przyczynia się do powstawania narzędzi, które w coraz szerszym zakresie wspierają retardację przekształcania zasobów przyrodniczych. Wielowirnikowe bezzałogowe statki powietrzne (BSP) ze względu na swoją mobilność znajdują zastosowanie w monitoringu, badaniach i ochronie środowiska przyrodniczego. Potencjał wykorzystania BSP wzrasta wraz z dostępnością czujników oraz kamer multispektralnych i termowizyjnych. W artykule omówiono wybrane przykłady zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w działaniach mających wpływ na retardację przekształcania zasobów środowiska, w szczególności ich zastosowanie w monitoringu jakości powietrza, składowisk odpadów komunalnych, instalacji energetycznych i pożarów.

Słowa kluczowe: monitoring środowiska, kamery multispektralne i termowizyjne, jakość powietrza, składowiska odpadów komunalnych, instalacje fotowoltaiczne, farmy wiatrowe

I. WSTĘP

Wzrost efektywności wykorzystania zasobów naturalnych jest jednym z kluczowych sposobów wpływających na retardację przekształcania zasobów środowiska. Wyższa efektywność sprzyja ograniczeniu korzystania z nowych zasobów. Jednym z czynników, które mają istotny wpływ na podniesienie efektywności jest wprowadzenie kontroli poprzez monitoring z wykorzystaniem nowych technologii. Gwałtowny postęp techniczny ostatnich dekad przyczynia się do rozwoju narzędzi, które w coraz szerszym zakresie wspierają retardację przekształcania zasobów przyrodniczych, również poprzez ułatwienie monitoringu samych zasobów, jak również monitoringu instalacji wykorzystujących zasoby. Wśród nowych technologii stosowanych w inżynierii i ochronie środowiska niewątpliwie należy wymienić wielowirnikowe bezzałogowe statki powietrzne (BSP). Urządzenia te, ze względu na swoją mobilność, znalazły zastosowanie w szeroko rozumianych działaniach z zakresu monitoringu środowiska i instalacji wykorzystujących zasoby środowiskowe jak również w badaniach i ochronie środowiska przyrodniczego. Potencjał wykorzystania BSP wzrasta wraz z dostępnością czujników oraz kamer multispektralnych i termowizyjnych. Dzięki takiemu wyposażeniu BSP umożliwiają obserwacje zmian zachodzących w monitorowanych ekosystemach oraz podejmowanie działań interwencyjnych chroniących zasoby. Poziom precyzji i zakres możliwych do wykonania badań wzrasta wraz z rozwojem technologicznym.

W niniejszym artykule omówiono wybrane przykłady zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w działaniach mających wpływ na retardację przekształcania zasobów środowiska.

II. MATERIAŁ I METODY

W pracy dokonano przeglądu literatury zamieszczonej w dostępnych bazach danych, w tym m.in. Google Scholar i Scopus, uwzględniając zarówno prace oryginalne, jak i przeglądowe. Zwrócono szczególną uwagę na najnowsze piśmiennictwo, tj. opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu.

Analizowano zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w działaniach mających wpływ na retardację przekształcania zasobów środowiska, w szczególności ich zastosowanie w monitoringu jakości powietrza, składowisk odpadów komunalnych, instalacji energetycznych i pożarów

III. WYNIKI

Monitoring powietrza

Monitoring wielu komponentów środowiska coraz częściej jest wspomagany przez BSP. Emisje naturalnych i antropogenicznych zanieczyszczeń do atmosfery, w postaci pyłów, aerozoli i zanieczyszczeń gazowych, wpływają na środowisko przyrodnicze i zdrowie ludzi. Szczegółowe dane ilościowe, jakościowe, oraz rozkład przestrzenny zanieczyszczeń powietrza są niezbędne nie tylko przy określaniu ich wpływu na zdrowie ludzi i środowisko ale również do rozpoznawania i eliminacji źródeł nielegalnych emisji. Najbardziej istotny wpływ na jakość środowiska mają emisje z elektrowni i elektrociepłowni wykorzystujących paliwa kopalne, lokalne systemy ogrzewania budynków, transport i produkcja przemysłowa. BSP umożliwiają szybkie i kompleksowe zbieranie danych o stanie powietrza w pobliżu źródeł zanieczyszczeń. Duża mobilność i precyzyjność BSP umożliwia monitorowanie jakości powietrza in-situ i emisji czy badanie trendów atmosferycznych, związanych ze zmianami klimatu. Monitoring jest niezbędny do zapewnienia zgodnej z normami jakości powietrza w terenach zurbanizowanych i przemysłowych [Villa i in. 2016]. BSP mogą być wyposażone w urządzenia do pobierania próbek [Allen i in. 2015], które później badane są w warunkach laboratoryjnych lub w czujniki i analizatory dokonujące pomiaru bezpośrednio podczas wykonywanej misji [Rohi i in. 2020]. Możliwości wykorzystania BSP w badaniach zanieczyszczeń atmosferycznych rozwinęły się wraz z miniaturyzacją czujników, które muszą być wystarczająco lekkie, aby mogły być unoszone przez drony. Nowoczesne technologie rozwinęły również systemy przechowywania/przesyłania danych oraz umożliwiły zasilanie czujników z efektywnych, lekkich, przenośnych źródeł zasilania wystarczających do wykonania pomiarów [Chiliński i in. 2018]. Dostępne czujniki umożliwiają wykorzystanie BSP do monitoringu między innymi zanieczyszczeń pyłowych (PM_{2.5}, PM₁₀) oraz stężeń tlenków węgla (CO, CO₂), tlenków azotu, dwutlenku siarki, ozonu, lotnych związków organicznych, amoniaku czy pary wodnej [Rohi i in. 2020, Son i in. 2021].

W terenach zabudowanych BSP są coraz częściej wykorzystywane do badania nielegalnych emisji z budynków jednorodzinnych i wykrywania miejsc spalania odpadów w domowych systemach centralnego ogrzewania [Chiliński i in. 2018, Son i in. 2021]. Ze względu na istotny problem smogu w Polsce coraz częściej Straż Miejska, uprawniona do kontroli domowych palenisk, wykorzystuje BSL do identyfikacji budynków, z których emisje mogą wskazywać na spalanie odpadów. Czujniki zainstalowane na BSP mogą wykryć w spalinach unoszących się z komina związki cyjanowodoru i formaldehydu. Ich udział

w emitowanych spalinach może świadczyć o spalaniu odpadów w instalacji ogrzewania budynku. Takie wstępne rozpoznanie, które zgodnie z obowiązującymi przepisami nie może stanowić podstawy do nałożenia kary finansowej, poprzedza szczegółową kontrolę paleniska wykonywaną przez Straż Miejską. BSP wykorzystywane są przez Straż Miejską w wielu miastach w Polsce np. Warszawie, Krakowie, Katowicach. W Krakowie, ze względu na lokalne przepisy zupełnie zakazujące ogrzewania budynków paliwami stałymi, już samo wykrycie wysokiej zawartości pyłu na wylocie komina potwierdza złamanie obowiązujących przepisów.

Monitoring składowisk odpadów komunalnych

BSP są również wykorzystywane do monitoring instalacji i budynków w celu utrzymania ich efektywności, redukcji zużycia zasobów środowiskowych, wczesnego wykrywania zagrożeń. Szerokie wykorzystanie BSP opiera się na różnorodności czujników i kamer, które mogą być unoszone przez drony.

Jednym z przykładów operatorów instalacji coraz szerzej wykorzystujących BSP są zarządzający składowiskami odpadów komunalnych. Ze względu na swoją specyfikę składowiska wymagają nieustannego monitorowania. Materia organiczna deponowanych odpadów podlega procesom rozkładu, które uwalniają ciepło, biogaz składowiskowy i odcieki. Kontrola składowiska umożliwia uniknięcie emisji do środowiska niebezpiecznych substancji. Bezzałogowe statki powietrzne zrewolucjonizowały prowadzenie monitoringu emisji CH₄ umożliwiając identyfikację strumieni emisji ze składowiska. Przy monitoringu składowisk odpadów wykorzystuje się BSP wyposażone w urządzenia do pobierania próbek gazów cieplarnianych, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów emisji metanu [Allen i in. 2015] oraz bezpośredni pomiar in-situ przez BSP wyposażonego w czujniki metanu [Fosco i in. 2024]. Ze względu na bardzo duże rozmiary wielu składowisk przy pomocy dronów wyposażonych w kamery RGB mogą być kontrolowane zdalnie wszystkie główne operacje technologiczne związane z odpadami na składowiskach [umieszczanie, zagęszczanie, izolacja pośrednia], stan obudowy składowiska czy zgodność budowy składowiska i instalacji z wymaganiami projektowymi [Filkin i in. 2021]. BSP wyposażone w czujniki i kamery termiczne są narzędziem, które umożliwia kontrolę temperatury składowisk odpadów. Monitorowanie pozwala na zidentyfikowanie obszarów wysokich temperatur związanych z możliwymi emisjami biogazu, rozkładającą się materią organiczną lub pożarami podziemnymi. Ich identyfikacja i lokalizacja pozwala na podjęcie działań zaradczych [Sedano-Cibrián i in. 2023].

Monitoring pożarów

Drony wyposażone w kamery termowizyjne są pomocne nie tylko w ograniczaniu pożarów składowisk odpadów poprzez wczesne wykrywanie miejsc o podwyższonej temperaturze ale znajdują również zastosowanie przy monitorowaniu samych pożarów jak i pogorzelska. Ułatwiają akcję gaszenia pożaru przez co wpływają na zmniejszenie emisji do atmosfery i ograniczenie zniszczenia środowiska. Zespoły strażackie, dzięki monitoringowi wizyjnemu wykonywanemu przy pomocy dronów, mogą otrzymać dokładniejsze informacje o obszarach i miejscach zlokalizowania ognisk płomienia, kierunkach i prędkości rozprzestrzeniania się pożaru. Zwiększona świadomość sytuacyjna dotycząca rozprzestrzeniania się pożaru pomaga szybko i precyzyjnie planować działania mające na celu zwalczanie pożaru, ograniczanie jego skutków, w tym emisji substancji toksycznych do atmosfery [Oleniacz i in. 2023]. Zarówno w przypadku pożarów lasów, składowisk czy obiektów przemysłowych, BSP wyposażone w kamery termalne bardziej

efektywnie niż naziemne kontrole mogą monitorować miejsce po pożarze w poszukiwaniu żarzących się pozostałości, które mogą doprowadzić do ponownego wybuchu pożaru [Allison i in. 2016]. Monitoring wizyjny z wykorzystaniem dronów pomaga również na oszacowania szkód po pożarze np. w lasach, oraz precyzyjne zaplanowanie działań naprawczych [Ecke i in. 2022].

Monitoring instalacji energetycznych

Ograniczenie zużycia energii elektrycznej, efektywność energetyczna, oraz zwiększanie udziału zielonej energii z odnawialnych źródeł energii są kluczowe dla ograniczenia wykorzystania zasobów naturalnych. Sektor energetyczny wymaga monitorowania zarówno instalacji produkujących jak i przesyłających energię. Aby zapewnić nieprzerwaną dystrybucję energii elektrycznej i ograniczyć jej straty konieczne jest skuteczne monitorowanie i konserwacja linii energetycznych. Monitoring przy użyciu BSP może obejmować zarówno komponenty linii energetycznych jak również monitoring wizyjny roślinności wokół nich [Matikainen i in. 2016]. Przy obecnie dostępnych technologiach monitorowanie może odbywać się przy użyciu automatycznych systemów zbierających i przetwarzających obrazy rejestrowane przez BSP wyposażone w kamery termowizyjna umożliwiają wykrycie problemów z przewodnością i hotspoty na liniach energetycznych, transformatorach i podstacjach elektrycznych [Larrauri i in. 2013].

BSP znalazły zastosowanie również w monitoringu farm fotowoltaicznych i elektrowni wiatrowych. Analiza wydajności i konserwacja farm słonecznych mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia wydajności i trwałości ich ogniw fotowoltaicznych. Kontrola degradacji paneli słonecznych lokalnie jest niezwykle czasochłonna w przypadku dużych farm. BSP, wyposażone w kamery termowizyjne, ułatwiają i przyspieszają zarówno inspekcję degradacji jak i analizę wydajności paneli słonecznych [Akay i in. 2024, Michail i in. 2024]. Monitorowanie farm solarnych z użyciem kamer termowizyjnych zainstalowanych na dronach umożliwia również wykrywanie pyłu pokrywającego panele i podejmowanie działań zaradczych. Warstwa pyłu gromadząca się na powierzchni paneli może odpowiadać za zmniejszenia produkcji energii nawet do 15% w skali roku [Márquez i Ramírez 2019].

BSP okazały się również bardzo przydatne w inspekcjach farm wiatrowych. Tradycyjna, ręcznych metoda monitoringu stanu dużych łopat turbin wiatrowych jest czasochłonna, pracochłonna i kosztowna. Kontrola łopat jest niezbędna w celu zapewnienia ciągłości produkcji energii elektrycznej i wydłużenia czasu funkcjonowania elektrowni wiatrowej. Coraz częściej inspekcje łopat turbiny wiatrowej dokonuje się wykorzystując kamery przenoszone przez drony. Wykorzystanie BSP skraca czas wyłączenia turbiny i zwiększa precyzję kontroli. Ocenę stanu łopat turbiny wiatrowej można też dokonywać przy użyciu zautomatyzowanego algorytmu analizującego obraz z kamery [Li i in. 2022]. Do kontroli jakości turbin wiatrowych opracowano też system monitorowania oparty na analizie akustycznej turbin wiatrowych osadzony w bezzałogowym statku powietrznym. System przechwytyje, wysyła i przetwarza dźwięk emitowany w gondoli do odbiornika akustycznego w stacji naziemnej [Sánchez i in. 2024].

IV. PODSUMOWANIE

Retardacja przekształcania zasobów środowiska jest kluczową dla spełnienia wymagań i osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań technologicznych jakimi są bezzałogowe statki powietrzne wyposażane w zaawansowane czujniki i kamery możliwe jest monitorowanie emisji i instalacji wykorzystujących naturalne

zasoby. Kontrola umożliwia zwiększenie efektywności pracy instalacji oraz sprzyja ograniczeniu ich negatywnego wpływu na środowisko.

BIBLIOGRAFIA

1. Akay S.S., Özcan O., Özcan O., Yetemen Ö. 2024. Efficiency analysis of solar farms by UAV-based thermal monitoring. *Eng Sci Technol an Int J.* 53. X-Y. doi:10.1016/j.jestch.2024.101688.
2. Allen G., Pitt J., Hollingsworth P. 2015. Measuring landfill methane emissions using unmanned aerial systems: field trial and operational guidance. [Dokument elektr.: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/480568/Measuring_landfill_methane_emissions_report.pdf. data wejścia 20.06.2024].
3. Allison R.S., Johnston J.M., Craig G., Jennings S. 2016. Airborne optical and thermal remote sensing for wildfire detection and monitoring. *Sensors.* 16(8). 1310. doi:10.3390/s16081310.
4. Chiliński M.T., Markowicz K.M., Kubicki M. 2018. UAS as a Support for Atmospheric Aerosols Research: Case Study. *Pure Appl Geophys.* 175(9). 3325-3342. doi:10.1007/s00024-018-1767-3.
5. Ecke S., Dempewolf J., Frey J., Schwaller A., Endres E., Hans-Joachim Klemmt H-J., Tiede D., Seifert T. 2022. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sens.* 14(13). 3205. doi.org/10.3390/rs14133205.
6. Filkin T., Sliusar N., Ritzkowski M., Huber-Humer M. 2021. Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills. *Drones.* 5(4). 125. doi:10.3390/drones5040125.
7. Fosco D., De Molfetta M., Renzulli P., Notarnicola B. 2024. Progress in monitoring methane emissions from landfills using drones: an overview of the last ten years. *Sci Total Environ.* 945. 173981. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.173981.
8. Larrauri J.I., Sorrosal G., Gonzalez M. 2013 Automatic system for overhead power line inspection using an Unmanned Aerial Vehicle - RELIFO project. 2013 Int Conf Unmanned Aircr Syst ICUAS 2013 - Conf Proc. Published online 244-252. doi:10.1109/ICUAS.2013.6564696.
9. Li W., Zhao W., Gu J., Fan B., Du Y. 2022. Dynamic characteristics monitoring of large wind turbine blades based on target - free DSST Vision Algorithm and UAV. *Remote Sens.* 14(13). 3113. doi:10.3390/rs14133113.
11. Márquez F.P.G., Ramírez I.S. 2019. Condition monitoring system for solar power plants with radiometric and thermographic sensors embedded in unmanned aerial vehicles. *Measurement.* 139. 152-162. doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.045.
10. Matikainen L., Lehtomäki M., Ahokas E., et al. 2016. Remote sensing methods for power line corridor surveys. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 119. 10-31. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011.
12. Michail A., Livera A., Tziolis G., et al. 2024. A comprehensive review of unmanned aerial vehicle-based approaches to support photovoltaic plant diagnosis. *Heliyon.* 10(1). e23983. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e23983.
13. Oleniacz R., Drzewiecki W., Gorzelnik T. 2023. Assessment of the impact of waste fires on air quality and atmospheric aerosol optical depth: A case study in Poland. *Energy Reports.* 9. 16-38. doi:10.1016/j.egy.2023.03.087.
14. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. 2020. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon.* 6(1). e03252. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03252.

15. Sánchez P.B., Ramírez I. S, Márquez F.P.G, Marugán A.P. 2024. Acoustic signals analysis from an innovative UAV inspection system for wind turbines. *Struct Heal Monit.* 1-14. doi:10.1177/14759217241262970.
16. Sedano-Cibrián J., de Luis-Ruiz J.M., Pérez-Álvarez R., Pereda-García R., Tapia-Espinoza J.D. 2023. 4D Models Generated with UAV Photogrammetry for Landfill Monitoring Thermal Control of Municipal Solid Waste (MSW) Landfills. *Appl Sci.* 13(24). 13164. doi:10.3390/app132413164.
17. Son S.W., Yu J.J, Kim D.W., Park H.S., Yoon J.H. 2021. Applications of Drones for Environmental Monitoring of Pollutant-Emitting Facilities. *Pnie.* 2(4). 298-304. doi:10.22920/PNIE.2021.2.4.298.
18. Villa T., Gonzalez F., Miljevic B., Ristovski Z.D., Morawska L. 2016. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors* 16(7). 12-20. doi:10.3390/s16071072.

THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO RETARD THE TRANSFORMATION OF ENVIRONMENTAL RESOURCES

Summary

Rapid technological progress contributes to the development of tools that increasingly support the retardation of the transformation of natural resources. Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs), due to their mobility, are used in monitoring, research, and protection of the natural environment. The potential for using UAVs is growing with the availability of sensors and multispectral and thermal cameras. The article focuses on selected examples of the use of UAVs in activities affecting the retardation of the transformation of environmental resources, in particular, their use in monitoring air quality, municipal landfills, energy installations, and wildfires.

Keywords: environmental monitoring, multispectral and thermal cameras, air quality, municipal landfills, photovoltaic installations, wind farms