

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w procesie budowy rurociągów lądowych

Unmanned aerial vehicles application in onshore pipelines construction

Maciej Witek, Paweł Wlazło^{*)}

Słowa kluczowe: bezzałogowe statki powietrzne, rurociągi, fotogrametria, budowa rurociągów lądowych, drony, BSP.

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie opracowań fotogrametrycznych pozyskanych z niskiego pułapu lotniczego przy pomocy bezzałogowych statków powietrznych. Na podstawie lotu testowego przedstawiony został proces planowania nalotu, pozyskania danych obrazowych i generowania opracowań, którymi były: numeryczny model terenu, numeryczny model pokrycia terenu i ortofotomapa. W oparciu o pozyskane materiały źródłowe, przeprowadzone zostały przykładowe analizy pozwalające na określenie postępu i bezpieczeństwa prac budowlanych. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych oraz fotogrametrii niskiego pułapu ma wpływ zarówno na podniesienie jakości budowy obiektu liniowego jak również na bezpieczeństwo jego późniejszej eksploatacji. Monitorowanie postępu prac przy pomocy technologii BSP pozwala na regularną weryfikację poprawności realizowanych przez wykonawcę zadań oraz eliminację zagrożeń w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy na budowie rurociągów lądowych.

Keywords: unmanned aerial vehicle, pipelines, photogrammetry, onshore pipelines construction, drones, UAV.

Abstract

The article presents the applications of photogrammetric products obtained from low-ceiling flights through unmanned aerial vehicles. On the basis of performed test flight, the process of flight planning, image data collecting and products generating (DTM, DSM, orthophotomap) has been presented. Based on the generated source materials, examples of data analysis to evaluate level of progress and safety of construction works, has been proposed. Application of unmanned aerial vehicles and low-ceiling photogrammetric flights has a significant impact on increasing quality of linear infrastructure construction process and safety of future pipeline operation. Implementation of work progress monitoring system based on UAV technology, allows the user to regular verification of performed by constructor tasks correctness and greatly reduces the risk in terms of health and work safety at the pipeline construction sites.

1. Wstęp

Fotogrametria i teledetekcja to specjalizacje techniczne zajmujące się metodami zdalnego pozyskiwania wiarygodnych informacji o obiektach fizycznych drogą rejestracji, pomiaru i interpretacji obrazów oraz zdjęć. Fotogrametria skupia się na metodach pozyskiwania informacji o geometrii obiektów takich jak kształt, rozmiar oraz ich wzajemne położenie w terenie, natomiast teledetekcja zajmuje się metodami przetwarzania i analizowania obrazów w celu określenia charakterystycznych cech i właściwości tych obiektów [5]. Obie specjalizacje w swoich zastosowaniach bazują na wysokiej jakości zdjęciach, pozyskiwanych z pułapu naziemnego, lotniczego lub satelitarne. Zdjęcia podczas nalotu fotogrametrycznego wykonuje się szeregowo, z zachowaniem stałej odległości i wspólnego pokrycia pomiędzy następnymi zdjęciami w szeregu (pokrycie podłużne) oraz następnym szeregiem zdjęć (pokrycie poprzeczne). Szeregi zdjęć o wspólnym pokryciu poprzecznym i podłużnym tworzą blok, z którego po przeprowadzeniu procesów orientacji wewnętrznej, orientacji zewnętrznej i ortorektyfikacji w oprogramowaniu fotogrametrycznym, wygenerować możemy następujące opracowania [2]:

- Numeryczny Model Terenu NMT (ang. DTM – Digital Terrain Model) – cyfrowy model stanowiący informację o ukształto-

waniu i rzeźbie terenu, zbudowany w oparciu o regularną sieć gęsto rozmieszczonych punktów leżących na jego powierzchni oraz algorytmy interpolacyjne pozwalające na jej odtworzenie na określonym obszarze.

- Numeryczny Model Pokrycia Terenu NMPT (ang. DSM – Digital Surface Model) cyfrowy model stanowiący informację o ukształtowaniu i rzeźbie terenu, uzupełniony o elementy naturalne i antropogeniczne takie jak roślinność i zabudowa.
- Ortofotomapę – rastrowy, ortogonalny i kartometryczny obraz terenu, powstały w wyniku przetwarzania obrazów cyfrowych.

Ogólnodostępne dane fotogrametryczne takie jak np. zobrazenia satelitarne udostępniane w serwisie Google Earth są bardzo często niewystarczające dla celów trasowania i posadowienia nowych obiektów budowlanych w terenie, ze względu na niską jakość oraz rozdzielczość danych. Problemem jest również aktualność danych na terenach o wysokim stopniu urbanizacji takich jak duże i małe miasta lub przedmieścia. W wielu przypadkach najszybszym i najtańszym rozwiązaniem powyższych ograniczeń jest wykonanie nalotu fotogrametrycznego przy pomocy bezzałogowych statków powietrznych, która to problematyka jest tematem niniejszej publikacji. Artykuł ma na celu przedstawienie przykładów zastosowania statków bezzałogowych w procesie

^{*)} Maciej Witek, dr hab. Inż., Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, e-mail: maciej.witek@pw.edu.pl, Paweł Wlazło, mgr inż., Absolwent kierunku Geodezja i Kartografia w specjalności Fotogrametria, Teledetekcja i Systemy Informacji Geograficznej, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie.

budowy i eksploatacji rurociągów lądowych oraz możliwości wykorzystania pozyskanych przy ich pomocy wysokorozdzielczych opracowań fotogrametrycznych.

2. Charakterystyka bezzałogowych statków powietrznych

Bezzałogowe statki powietrzne BSP nazywane również dronami (ang. UAV Unmanned Aerial Vehicle) są platformami wykonującymi zdalne lub w pełni sterowane loty, bez obecności pilota na pokładzie, podczas których pozostają pod kontrolą operatora znajdującego się na ziemi [1, 4]. BSP ze względu na budowę klasyfikuje się zazwyczaj na dwie główne kategorie:

- wielowirnikowce – statki unoszące się przy pomocy kilku wirników, które zapewniają im bardzo dużą zdolność manewrowania. Ze względu na liczbę wirników, w które wyposażone została platforma, wyróżniamy bicoptery (2), tricoptery (3), quadcoptery (4), hexacoptery (6) i octocoptery (8). Wielowirnikowce, podobnie jak helikoptery, posiadają możliwość pionowego startu oraz zawiśnięcia i skrętu w miejscu [7].
- pławce – statki typu samolotowego składające się z jednego stałego skrzydła wytwarzającego siłę nośną. Aerodynamiczna budowa pławców zapewnia im dużą stabilność i szybkość lotu nawet przy dużym wietrze, długi czas pracy oraz możliwość osiągnięcia wyższych pułapów niż wirnikowce [3].

Naloty fotogrametryczne wykonywane na niskim pułapie umożliwiają błyskawiczne pozyskanie bardzo wysokiej rozdzielczości danych obrazowych dla małych obszarów terenu o powierzchni do kilkudziesięciu hektarów [10]. Przewagą technologii BSP nad klasycznymi załogowymi lotami fotogrametrycznymi jest zmniejszenie kosztów misji oraz eliminacja wpływu części czynników pogodowych na pozyskane dane jak np. zachmurzenie. Loty załogowe prowadzone są na wysokości dochodzącej do kilku kilometrów, gdzie bardzo często występuje zachmurzenie powodujące zakrycie fragmentów terenu na zdjęciach. Oczekiwanie na odpowiednie warunki pogodowe wpływa na wydłużony czas pozyskania zobrazowań przez obloty załogowe, podczas gdy wykorzystanie BSP wymaga tylko zachowania warunków pogodowych pozwalających na stabilny lot platformy i przekłada się na osiągnięcie częstotliwości lotów nieosiągalnej dla lotów załogowych. Technologia ma również swoje ograniczenia, gdyż ogniwo zasilające statek w zależności od jego rodzaju i warunków pogodowych zapewnia długość lotu w przedziale od 20 do 120 minut. Wpływa to na zdecydowanie na opłacalność załogowych misji fotolotniczych przy dużym obszarze zainteresowania, a także w przypadku wykonywania w czasie jednej misji oblotu kilku oddalonych od siebie zakresów sporządzania opracowań [7]. Porównanie podstawowych czynników pomiędzy lotami załogowymi i bezzałogowymi przedstawiono w Tabeli 1.

Zagrożenia płynące ze swobodnego stosowania w przestrzeni publicznej BSP, spowodowały konieczność uregulowania kwestii prowadzenia i kontroli lotów realizowanych przy zastosowaniu tej technologii. Stosowanie statków bezzałogowych oraz metody prowadzenia nalołów są w polskim prawie regulowane przez ustawę Prawo Lotnicze (Dz. U. 2020.1970) oraz rozporządzenia wydane na jego podstawie. Rozwinięciem prawa krajowego jest szereg rozporządzeń wykonawczych i delegowanych UE w sprawie przepisów i procedur eksploatacji BSP, wymogów obowiązujących operatorów oraz sposobów prowadzenia lotów w państwach trzecich [9]. Powyższe akty prawne wyróżniają następujące metody zdalnego pilotowania:

- VLOS (ang. visual line of sight) – loty w zasięgu wzroku,
- FPV (ang. first person view) – loty z widokiem z perspektywy pierwszej osoby,
- BVLOS (ang. beyond visual line of sight) – loty poza zasięgiem wzroku.

Operator BSP wykorzystywanego w celach komercyjnych musi legitymować się stosownymi uprawnieniami jakim jest świadectwo

kwalifikacji UAWO wydawane przez Urząd Lotnictwa Cywilnego. Licencje zdobywa na określony zakres definiujący metodę zdalnego pilotowania, rodzaj BSP oraz jego masę startową. Każda misja wykonywana przy użyciu statku bezzałogowego powinna odbyć się po poinformowaniu Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (PAŻP) o zamiarze wykonania lotu poprzez Check-In w dedykowanej aplikacji DroneRadar.

Tabela 1: Podstawowe różnice pomiędzy załogowymi i bezzałogowymi nalotami fotogrametrycznymi [2,7].

Table 1: Main differences between manned and unmanned photogrammetric flights.

Czynnik	Loty bezzałogowe		Loty załogowe
	Wielowirnikowce	Pławce	Samoloty
Czas lotu	ograniczony rozmiarem akumulatora, czas trwania lotu ok. 30 minut	ograniczony rozmiarem akumulatora, czas trwania lotu ok. 120 minut	ograniczony ilością paliwa, czas trwania lotu mierzony w godzinach
Wysokość lotu	od kilku do ok. 500 m	od kilkudziesięciu do ok. 1000 m	Od 150 m do kilku km
Koszty wykonania nalotu	niskie/średnie, konieczność dojazdu autem na miejsce wykonania nalotu	niskie/średnie, konieczność dojazdu autem na miejsce wykonania nalotu	średnie/wysokie, konieczność zatankowania samolotu i dolotu na miejsce wykonywania prac fotogrametrycznych, opłaty lotniskowe
Wpływ zachmurzenia	niski, w zależności od wysokości lotu możliwość eliminacji czynnika na pozyskane dane	niski, w zależności od wysokości lotu możliwość eliminacji czynnika na pozyskane dane	wysoki, konieczność prowadzenia nalołów przy jak najmniejszym stopniu zachmurzenia
Wpływ wiatru	średni/wysoki, przeciwdziałanie naporowi wiatru skraca maksymalny czas lotu, obniżenie jakości pozyskanych danych obrazowych	niski/średni, ze względu na aerodynamiczną budowę pławiec słabiej odczuwa wpływ wiatru ale dalej ma on wpływ na stabilność lotu i jakość danych	najniższy, ze względu na aerodynamiczną budowę oraz wysokość prowadzenia nalotu samolot najmniej odczuwa wpływ wiatru

3. Zastosowanie BSP w procesie budowy rurociągów lądowych

W inżynierii lądowej BSP są powszechnie stosowanym narzędziem ze względu na możliwość dotarcia do niedostępnych lub częściowo niedostępnych lokalizacji w celach prowadzenia bieżącej kontroli prac zanikowych lub monitoringu budowy. Wykazują bardzo dużą przydatność na każdym etapie prowadzenia inwestycji budowlanych, a zwłaszcza realizacji obiektów liniowych ze względu na ich rozległy obszar. Wykorzystanie statków bezzałogowych zamiast człowieka przekłada się również na zmniejszenie kosztów nadzoru poniesionych przez wykonawcę lub inwestora.

Poniższe opracowanie skupia się na rozwiązaniach i możliwym wykorzystaniu technologii BSP oraz fotogrametrii niskiego pułapu na przykładzie rurociągów dalekiego zasięgu. W Tabeli 2 zaproponowane zostały przykładowe zastosowania statków bezzałogowych na poszczególnych etapach życia rurociągu [1,3,6,8]. Na potrzeby realizacji niektórych z powyższych zadań takich jak kontrola zadrzewienia lub zabudowy w sąsiedztwie rurociągu, fotografie z oblotu nie wymagają opracowania w specjalistycznych programach fotogrametrycznych. Kontrola ma często charakter wyłącznie wizualny i skupia się na wytypowaniu miejsc, w których występuje możliwość potencjalnego zbliżenia obiektu do podziemnej sieci uzbrojenia terenu.

Tabela 2: Przykładowe zastosowania BSP na etapach projektowania, budowy i eksploatacji rurociągu.

Table 2: UAV application examples at the stages of design, construction and exploitation of pipeline.

Etap projektowy	Etap realizacyjny	Etap eksploatacji
<ul style="list-style-type: none"> - pozyskanie ortofotomapy na potrzeby trasowania obiektu liniowego - inwentaryzacja istniejącego zagospodarowania terenu w oparciu o pozyskane ortofotomapy, - opracowanie wizualizacji i filmów na potrzeby komunikacji z samorządami lokalnymi oraz mieszkańcami terenów objętych trasą planowanego zamierzenia budowlanego - rozpoznanie i wizualizacja warunków terenowych w zakresie projektowanej inwestycji w oparciu o pozyskany Numeryczny Model Terenu i wspomaganie procesu trasowania 	<ul style="list-style-type: none"> - cykliczna kontrola postępu prac budowlanych - kontrola pasa budowlano-montażowego w zakresie wyjścia poza teren objęty pozwoleniami i decyzjami administracyjnymi - monitoring składowania mas ziemnych oraz prowadzenia prac montażowych w sąsiedztwie wykopu - identyfikacja rozbieżności wykonawstwa z projektem budowlanym - kontrola bezpieczeństwa inwestycji w kwestiach BHP - dokumentacja fotograficzna na potrzeby przywrócenia terenu budowy do stanu pierwotnego i protokołów zdawczo-odbiorczych - inwentaryzacja powykonawcza terenu inwestycji 	<ul style="list-style-type: none"> - kontrola zabudowy i zadrzewienia w bezpośrednim sąsiedztwie rurociągu - kontrola terenowa miejsc o utrudnionym lub niemożliwym dostępie - wykrywanie naruszeń strefy kontrolowanej rurociągu - monitoring mas ziemnych oraz wykrywanie osuwisk mogących oddziaływać na rurociągi - okresowe aktualizacje ortofotomap na potrzeby prowadzenia systemów ewidencji i zarządzania rurociągami - kontrola stanu infrastruktury po wystąpieniu intensywnych zjawisk atmosferycznych

Możliwość wykorzystania technologii BSP na potrzeby realizacji określonych zadań, powinna być poprzedzona identyfikacją wymogów dla wynikowych opracowań oraz analizą opłacalności samodzielnego pozyskania, przetworzenia i analizy pozyskanych danych. Na potrzeby prowadzenia prac niezbędne jest pozyskanie statku bezzałogowego, wydajnego sprzętu komputerowego, oprogramowania do opracowania danych oraz specjalisty lub specjalistów w zakresie realizacji zadań związanych z gromadzeniem i opracowaniem danych. Jeżeli koszty uruchomienia i utrzymania systemu będą przekraczały potencjalne zyski z wdrożenia rozwiązania, warto przemyśleć skorzystanie z rozwiązań oferowanych przez firmy prowadzących działalność w sektorze usług fotogrametrii niskiego pułapu. Zakres usług może obejmować realizację części zadań jak np. opracowanie surowych danych obrazowych albo realizację całego procesu, począwszy od oblotu sieci aż po analizę danych wynikowych dostosowaną pod wymogi zamawiającego [10].

W celu wizualizacji rozwiązań i możliwości oferowanych przez technologię BSP przeprowadzony został nalot testowy przy użyciu quadcoptera marki DJI Phantom 4 RTK (rys. 1). Parametry zastosowanego BSP zostały zestawione w Tabeli nr 3. Poligon testowy obejmował czterokilometrowy odcinek budowy rurociągu o średnicy nominalnej 1,0 m. Nalot wykonany został wczesną wiosną podczas bezchmurnego słonecznego dnia. Temperatura w czasie nalotu wynosiła 3°C, prędkość wiatru 3,5 m/s, nie stwierdzono także pozostałości śniegu po okresie zimowym. Lot został zaplanowany poprzez dedykowaną aplikację, pozwalającą na automatyczne wygenerowanie trasy i współrzędnych punktów wykonania zdjęć. Na potrzeby opracowania planu lotu, aplikacja wymaga od operatora zdefiniowania obszaru zainteresowania, wysokości lotu oraz wymaganego pokrycia poprzecznego i podłużnego zdjęć, koniecznego do wygenerowania ortofotomapy z pozyskanych danych. Zakres obszaru pracy został wygenerowany z aplikacji Google Earth w formacie *.KMZ oraz zaimportowany do kontrolera. W celu zachowania bezpieczeństwa w przestrzeni powietrznej, prowadzenie nalotu zostało zgłoszone PAŻP przez operatora statku przy pomocy

aplikacji DroneRadar. Parametry planowanej misji fotolotniczej zostały zestawione w Tabeli 4.

Parametrem określającym szczegółowość pozyskanych obrazów jest terenowy rozmiar piksela obrazu (ang. GSD – Ground Sampling Distance), rozumiana jako terenowa odległość między środkami dwóch sąsiadujących ze sobą pikseli. Rozdzielczość przestrzenna piksela jest zależna od planowanej wysokości nalotu i wyznacza się ją ze wzoru (3.1)[2]:

$$GSD = \frac{Hp}{f} \quad (3.1)$$

gdzie:

GSD – terenowy rozmiar piksela [m],

H – wysokość lotu nad poziomem terenu [m],

p – rozmiar piksela matrycy aparatu [μm],

f – długość ogniskowej obiektywu [mm].

Dla podanych w tabeli 3 i 4 parametrów aparatu, obiektywu oraz parametrów lotu planowana rozdzielczość przestrzenna piksela obrazu wyniosła 0,0163 m (1,63 cm).

Tabela 3: Specyfikacja techniczna DJI Phantom 4 RTK.

Table 3: Technical specification of DJI Phantom 4 RTK.

Masa	1,5 kg	
Wymiary (przekątna)	35 cm	
Maksymalny czas lotu	Do 30 minut	
Maksymalna prędkość lotu	50 km/h	
Model aparatu: DJI FC6310R	Rozdzielczość matrycy	20 Mpx
	Rozmiar matrycy	1"(13,2 x 8,8 mm)
	Rozmiar obrazu	5472x3648 px
	Rozmiar piksela matrycy	2,4 μm
	Długość ogniskowej obiektywu	8,8 mm / 24 mm
Kąt widzenia obiektywu (FOV)	84°	
Stabilizacja aparatu	3-osiowy gimbal	
GNSS	Wbudowany odbiornik GNSS RTK	

Tabela 4: Parametry misji fotolotniczej.

Table 4: Photo mission parameters.

Długość odcinka rurociągu do oblotu	4,0 km
Wysokość lotu	60,0 m nad poziomem terenu
Prędkość lotu	14 km/h
Pokrycie poprzeczne zdjęć	80%
Pokrycie podłużne zdjęć	80%
Ilość wykonanych zdjęć	2214 zdjęć
Całkowity czas misji	2 h 50 min.
Całkowita powierzchnia opracowania	23,7 ha

Podczas przeprowadzonego nalotu wykonane zostało 2214 zdjęć terenu budowy rurociągu o łącznym rozmiarze ok. 19 gigabajtów. Rozmiar materiałów źródłowych wynika z liczby pozyskanych zdjęć, którą definiuje planowana wysokość nalotu, dobrane pokrycie poprzeczne i podłużne oraz wielkość obszaru prowadzenia misji fotolotniczej. Pozyskane dane obrazowe zostały przetworzone przy pomocy oprogramowania przeznaczonego do generowania i analizy opracowań fotogrametrycznych. W efekcie końcowym wygenerowana została ortofotomapa (Rys. 2 i Rys. 3), numeryczny model terenu i numeryczny model pokrycia terenu (Rys. 4). Średnia wartość GSD dla wszystkich zdjęć w bloku wyniosła ok. 1,6 cm, co pokrywa się z założeniami z etapu planowania nalotu.



Rys. 1: DJI Phantom 4 RTK.
Fig. 1: DJI Phantom 4 RTK.

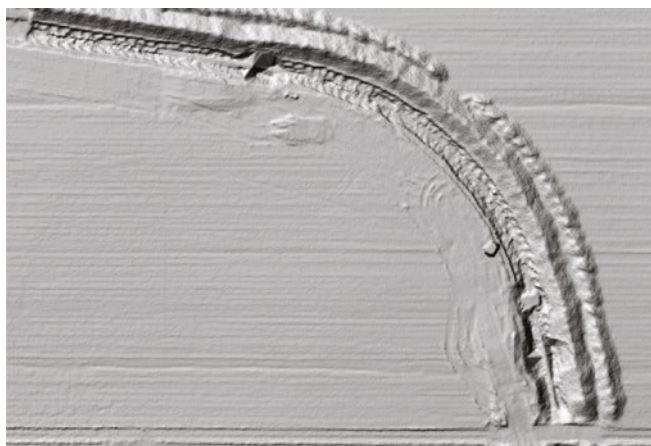


Rys. 2: Jakość wygenerowanej ortofotomapy ze średnim rozmiarem GSD ok. 1,6 cm.

Fig. 2: The quality of generated orthophotomap with average GSD size about 1,6 cm.



Rys. 3: Fragment wygenerowanej ortofotomapy terenu budowy rurociągu.
Fig. 3: Fragment of generated orthophotomap for pipeline construction site.



Rys. 4: Fragment wygenerowanego numerycznego modelu pokrycia terenu po zastosowaniu funkcji cieniowania.

Fig. 4: Fragment of generated digital surface model after the hillshade function application.

4. Analiza pozyskanych danych fotogrametrycznych

Przetworzone dane obrazowe z rejonu poligonu testowego zostały następnie zintegrowane w oprogramowaniu GIS z danymi wektorowymi, pozyskanymi w procesie projektowania inwestycji. Analiza danych przeprowadzona została w oparciu o warstwy tematyczne, w skład których wchodziły dane w zakresie: projektowanej trasy rurociągu, obszaru projektowanego pasa budowlano-montażowego oraz zasięgu pozyskanych decyzji lokalizacyjnych. W oparciu o powyższe dane poniżej zaproponowane zostały przykładowe analizy.

4.1. Wykrywanie naruszeń pasa budowlano-montażowego

Na potrzeby prowadzenia budowy wyznaczany jest pas budowlano-montażowy, wewnątrz którego wykonawca ma prawo do prowadzenia prac realizacyjnych. Przedmiotowy pas jest objęty decyzją lokalizacyjną ograniczającą czasowo prawo właściciela do korzystania z gruntu. W przypadku przekroczenia granic pasa budowlano-montażowego, właściciel nieruchomości może żądać odszkodowania ze względu na wykorzystanie terenu. W interesie inwestora jest więc dążenie do minimalizacji ilości naruszeń lub całkowite wyeliminowanie ich faktycznego wystąpienia. W oparciu o pozyskane dane obrazowe z BSP dostrzec można wszystkie wykroczenia za granicę pasa, które podczas nadzoru z poziomu gruntu są praktycznie nie do wykrycia (Rys. 5).



Rys. 5: Naruszenie pasa budowlano-montażowego (linia zielona) i terenu objętego decyzją lokalizacyjną (linia niebieska) w wyniku przejazdu sprzętem ciężkim.

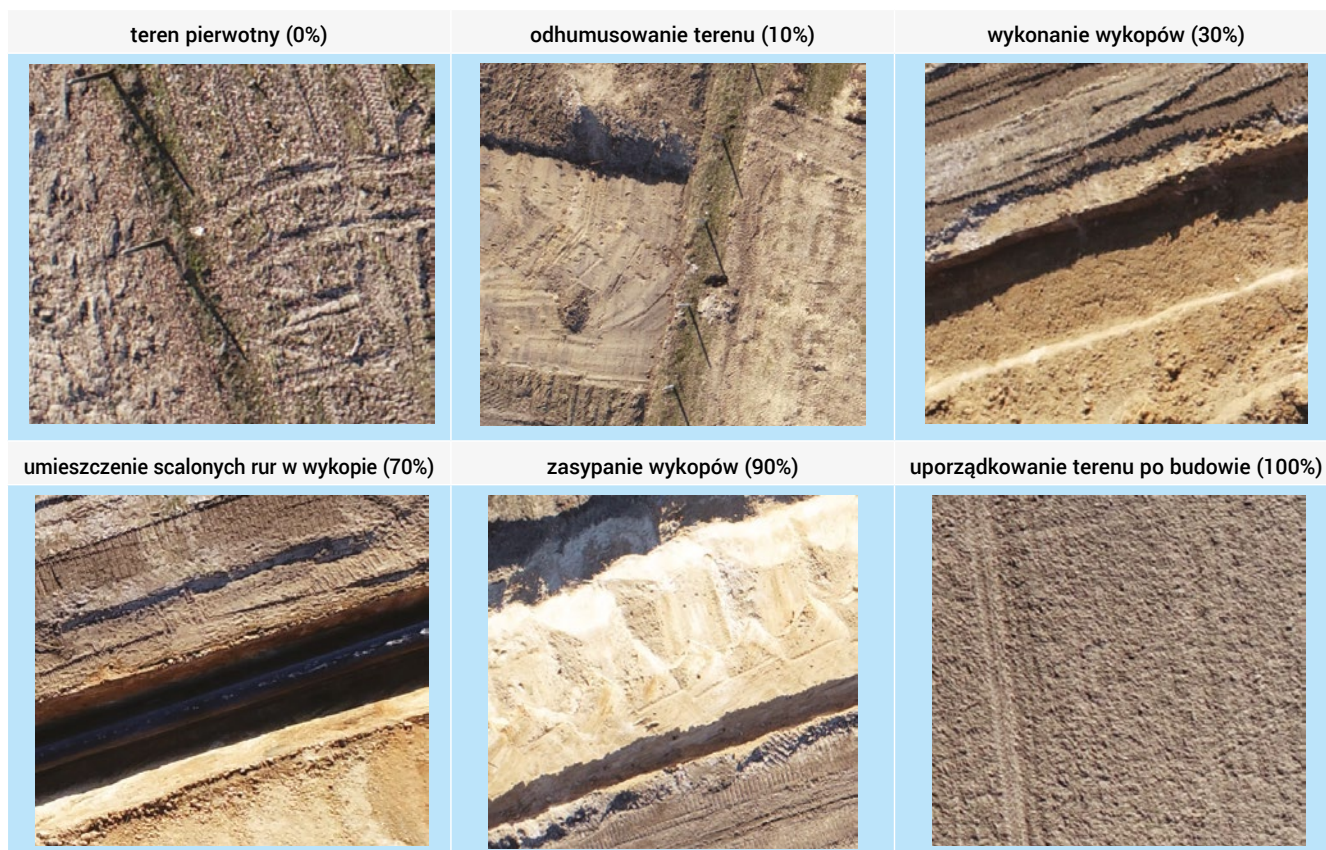
Fig. 5: Violation of construction site range (green line) and location decision range (blue line) due to heavy equipment transport.

4.2. Ocena postępu procesu układki

W oparciu o cykliczne naloty na terenie budowy, można dokonać niezależnej oceny postępu prac budowlanych oraz potwierdzić stopień zaawansowania robót deklarowany przez wykonawcę. Podstawą do oceny postępu inwestycji jest jednoznaczne zdefiniowanie kolejnych etapów robót budowlanych wraz z wartością procentową odpowiadającą ich poziomowi zaawansowania (Rys. 6). Po zdefiniowaniu kryterium etapowania prac, kolejnym krokiem jest segmentacja terenu budowy na kilkudziesięciometrowe odcinki, którym w oparciu o stan utrwalony na ortofotomapie przypisany zostaje konkretny etap robót wraz z ich wartością procentową. Całościowa ocena jest uśrednioną wartością procentową zaawansowania prac w zakresie wszystkich segmentów utworzonych na kontrolowanym odcinku.

4.3. Monitoring składowania mas ziemnych na terenie budowy

W oparciu o pozyskany numeryczny model pokrycia terenu, można przeprowadzić analizę w zakresie bezpieczeństwa składowania mas ziemnych na terenie budowy i zagrożenia osunięciem poprzez wykorzystanie analizy spadków. Analiza spadków (ang. slope) jest algorytmem wbudowanym w oprogramowanie GIS pozwalającym określić szybkość zmian wysokości dla każdej komórki wygenerowanego NMPT. Poprzez określenie granicznych wartości kątowych nachylenia spadku w przedziale 0°-90°, generowana jest mapa barwna pozwalająca na identyfikację miejsc zagrożonych osunięciem. Zastosowanie tego typu analiz daje możliwość prewencyjnego zareagowania na potencjalne zagrożenie i przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa ludzi w rejonie prowadzenia prac. W analizowanym przypadku zastosowano następujące kryterium granicznych wartości nachylenia w przedziałach (Rys. 7):



Rys. 6: Przykładowe kryterium etapowania robót budowlanych.

Fig. 6: Example of construction works staging criterion.

- $0^\circ < 45^\circ$ – brak zagrożenia osunięciem (kolor szary),
- $45^\circ < 68^\circ$ – małe zagrożenie osunięciem (kolor żółty),
- $68^\circ < 90^\circ$ – duże zagrożenie osunięciem (kolor czerwony).



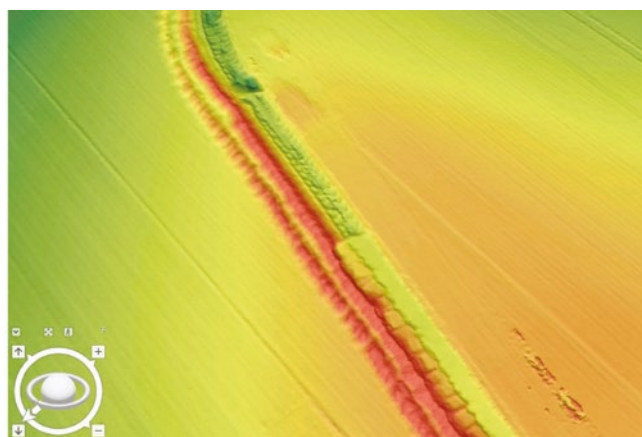
Rys. 7: Zastosowanie analizy spadków do wykrywania terenów zagrożonych osunięciem.

Fig. 7: Slope fuction application to excavation site landslide risk detection.

4.4. Wykrywanie czynnych osuwisk

Osuwiska i ruchy masowe ziemi stanowią bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa budowy oraz eksploatacji infrastruktury technicznej. Na etapie projektowania rurociągów podziemnych, projektant przygotowuje dokumentację geologiczną mającą na celu wyeliminowanie możliwości lokalizacji sieci na terenie zagrożonym ruchami masowymi ziemi. Ruchy te mogą powodować przemieszczenie rurociągu, które w ekstremalnych przypadkach skutkują

jego rozszczelnieniem. W przypadku zaistnienia ryzyka wpływu ruchów mas ziemi w fazie eksploatacji rurociągu, istnieje możliwość wdrożenia systemu monitoringu opartego o wysokorozdzielcze dane obrazowe pozyskane przy pomocy BSP, pozwalające na wygenerowanie bardzo szczegółowego numerycznego modelu terenu [6]. Numeryczny model terenu pozyskany na etapach projektowania i budowy obiektu liniowego może posłużyć jako materiał bazowy do porównania sytuacji terenowej w funkcji czasu. W zestawieniu wyżej wspomnianej analizy spadków, można zidentyfikować ryzyko przemieszczenia rurociągu oraz oszacować kierunek i prędkość ruchu masowego wraz z jego potencjalnym wpływem na odkształcenie ścianki rurociągu (Rys. 8).



Rys. 8: Wizualizacja terenu budowy rurociągu w kompozycji barwnej w oparciu o pozyskany NMPT. Kierunek wzrostu wysokości terenu – od zieleni do czerwieni.

Fig. 8: Visualisation of pipeline construction site in colour composition based on generated DSM. Direction of terrain grow – from green to red.

5. Podsumowanie

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych oraz fotogrametrii niskiego pułapu ma pozytywny wpływ zarówno na podniesienie jakości budowy obiektu liniowego jak również na bezpieczeństwo jego późniejszej eksploatacji. Monitorowanie postępu prac przy pomocy BSP pozwala na regularną weryfikację poprawności realizowanych przez wykonawcę zadań oraz eliminację zagrożeń w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy na budowie rurociągów lądowych. Kontrola fotolotnicza terenu objętego realizacją inwestycji pozwala na szybkie wykrycie i eliminację naruszeń stref określonych przez pozyskane decyzje i zgody, co przekłada się na ograniczenie potencjalnych konfliktów na etapie wykonawczym z właścicielami nieruchomości, na których lokalizowana jest sieć, a co za tym idzie redukcję wydatków odszkodowań.

Zastosowanie BSP pozwala na opracowanie szczegółowej dokumentacji z okresu budowy rurociągu, zwłaszcza w kwestiach prac zanikowych, a także daje możliwość precyzyjnej lokalizacji elementów takich jak pojedyncze spoiny łączące rury lub początek i koniec łuków. W fazie eksploatacji rurociągu statki bezzałogowe dają możliwość kontroli powierzchni terenu wokół sieci, w kwestiach związanych z wykrywaniem naruszeń strefy kontrolowanej bez konieczności pozyskiwania zgód na wejście na teren ogrodzonych nieruchomości, przez które przebiega sieć. Zapewniają także możliwość monitoringu warunków terenowych wzdłuż istniejącej sieci oraz pozwalają na wykrywanie i ocenę szkód powstałych w wyniku wpływu intensywnych czynników atmosferycznych. Patrolowanie terenu z wysokości do kilkudziesięciu metrów, przekłada się na zmniejszenie kosztów wynikających z konieczności dotarcia do miejsc o utrudnionym dostępie, a także zmniejszenie ilości pracowników skierowanych do realizacji kontroli rurociągów z powierzchni ziemi.

Planowana wysokość nalotu i procent wspólnego pokrycia zdjęć, wpływają na całkowitą ilość, a co za tym idzie rozmiar pozyskanych danych. W omawianym przypadku, dla przyjętych parametrów nalotu wykonano 2214 zdjęć, każde o rozmiarze ok. 8,5 MB, co w przy-

bliżeniu daje ok. 19 GB surowych danych. Zwiększenie pułapu lotu przekłada się na rozszerzenie zasięgu obfotografowanego terenu na pojedynczym zdjęciu, zmniejszenie liczby zdjęć w bloku i ograniczenie rozmiaru pozyskanych danych. Jednocześnie wpływa to na zmniejszenie szczegółowości pojedynczego zdjęcia, a co za tym idzie całej ortofotomapy, ze względu na wzrost rozmiaru piksela GSD. Na etapie planowania nalotu należy wziąć pod uwagę wyżej wymienione czynniki, wytypować ten czynnik, który będzie miał największy wpływ na oczekiwaną końcową jakość danych i dostosować do niego pozostałe parametry lotu bezzałogowego statku powietrznego. ■

LITERATURA

- [1] Baryłka A., 2017. *Zagadnienie możliwości wykorzystania dronów w budownictwie*, Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych, Nr 1, s.24-35.
- [2] Butowt J., Kaczyński r., *Fotogrametria*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2010.
- [3] Gómez C., Green D. r., 2017. *Small unmanned airborne systems to suport oil and gas pipeline monitoring and mapping*, Arabian Journal of Geosciences 10:202
- [4] Hausmann D., Wemer Z., Schreier G., 2005. *Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 77(5), s.352-360.
- [5] International Society For Photogrammetry And Remote Sensing ISPRS, 2019. Statutes, (<https://www.isprs.org/documents/statutes19.aspx>).
- [6] Johnson C., Markley C., Derby M., Theriault B., deLaChapelle J., Pipeline Integrity Managment Under Geohazard Conditions, Chapter 11: *An overview of current methods for monitoring landslide ground movement to better understand potential hazards to buried pipelines*, ASME Press, 2020.
- [7] Kacprzak M., Wodziński K., 2016. *Realizacja misji fotolotniczych z wykorzystaniem załogowych i bezzałogowych statków powietrznych*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr 2(243), s. 130-14.
- [8] Pionkowski r., Sobolewski J., *Wykorzystanie dronów w fazie przygotowania inwestycji*, Energia Elektryczna, czerwiec 2015 (www.cire.pl/pliki/2/wykorzystaniedronowwfazieprzygotowaniainwestycji.pdf).
- [9] Urząd Lotnictwa Cywilnego, „Bezzałogowe statki powietrzne – akty prawne.” Data ostatniej modyfikacji Marzec 17, 2022 (<https://www.ulc.gov.pl/drony/akty-prawne>).
- [10] Zespół pod redakcją Juszczak K., Kosieleński S., *Jak kupować drony i usługi dronowe w zamówieniach publicznych*, Warszawa, 2020.