

Warszawa, 7 stycznia 2025 r.

**dr hab. inż. Damian Wierzbicki, prof. WAT**

**Katedra Rozpoznania Obrazowego**

**Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji**

**Wojskowa Akademia Techniczna**

**ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2**

**00-908 Warszawa**

## **RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Radosława Szostaka

pt. *„Nowe metody wspomaganie obserwacji hydrologicznych wykorzystujące bezzałogowe statki powietrzne i uczenie maszynowe”*

### **1. Podstawa opracowania**

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Podstawą formalną jest Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t. j. Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.)

Dokumentację merytoryczną do sporządzenia recenzji stanowi egzemplarz rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Przemysław Wachniew, prof. AGH, a promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Mirosław Zimoch, prof. AGH.

### **2. Charakterystyka i opis rozprawy**

#### **2.1 Struktura rozprawy – ocena formalna dysertacji**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została wydana w formie książkowej i liczy 116 stron, z czego 107 stron to właściwa treść. Pozostała część pracy to spis oznaczeń oraz wykaz pozycji literaturowych. Strona redakcyjna rozprawy stoi na bardzo dobrym poziomie (z zastrzeżeniem uwag edycyjnych przedstawionych w końcowej części recenzji). Autor w swojej pracy w poprawny sposób prowadzi narrację.

Rozprawa została podzielona na pięć zasadniczych części. **Część pierwsza** zawiera wprowadzenie oraz identyfikację problemu badawczego wraz ze sformułowaniem trzech hipotez badawczych. **Część druga** zawiera podstawy teoretyczne dotyczące: współczesnych wyzwań i metod pomiarowych stosowanych w hydrologii; zastosowania obrazowania termalnego z niskiego pułapu; przeglądu teledetekcyjnych metod pomiaru ewapotranspiracji;

wybranych aspektów zastosowania uczenia maszynowego w hydrologii. **Część trzecia** zawiera opis zaproponowanej metodyki badawczej z wyszczególnieniem trzech metod opracowanych przez Autora rozprawy. **Część czwarta** zawiera zestawienie oraz bardzo o szczegółową dyskusję wyników. **Część piąta** zawiera podsumowanie prac badawczych zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy oraz weryfikację słuszności sformułowanych hipotez badawczych.

W rozprawie zamieszczono 104 pozycje literaturowe, w tym dwie, których Doktorant jest współautorem. Przytoczone pozycje literaturowe w znacznej większości są zgodne z tematyką niniejszej rozprawy. Zabrakło niestety szerszego przeglądu literatury z zakresu wybranych metod uczenia maszynowego ze szczególnym uwzględnieniem metod przetwarzania obrazów. Cały układ rozprawy jest poprawny i logiczny. Praca napisana jest bardzo dobrym językiem naukowo-technicznym, jest rzeczową narracją naukową. W ujęciu edycyjnym w pracy występują pojedyncze błędy literowe, jednak nie umniejszają one ogólnego, bardzo dobrego odbioru dysertacji.

## **2.2 Znaczenie i oryginalność problemu badawczego podjętego w rozprawie**

We wprowadzeniu rozprawy doktorskiej wzorowo uzasadniono cel podjęcia badań, w tym opisano problematykę opracowania nowych metod monitorowania i modelowania obserwacji hydrologicznych. Doktorant w rozprawie odnosi się do powyższych wyzwań i jako możliwość ich rozwiązania wskazuje zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych (BSP) wyposażonych w sensory optoelektroniczne oraz metod sztucznej inteligencji. Poprawnie definiuje wyzwania technologiczne związane z takim sposobem pozyskania i przetwarzania danych. W swoim wywodzie dostrzega również złożoność i różnorodność danych pozyskiwanych na potrzeby modelowania hydrologicznego. Zauważa możliwość, a wręcz konieczność implementacji zaawansowanych narzędzi analitycznych pozwalających na agregację i detekcję skomplikowanych wzorców w obserwacjach hydrologicznych. W tym celu i zgodnie z aktualnymi trendami badawczymi dostrzega potencjał w opracowaniu i implementacji wybranych metod uczenia maszynowego. Metody te oferują bardzo duże możliwości, jednak wymagają dość szczegółowej wiedzy eksperckiej. Niezbędne są umiejętności w zakresie doboru metod, poprawnego definiowania parametrów uczenia oraz doświadczenie w interpretacji uzyskanych wyników.

Na uznanie zasługuje opracowanie przez Doktoranta trzech metod pozwalających na rozwiązanie trzech różnych problemów badawczych dotyczących opracowania nowych narzędzi do modelowania obserwacji hydrologicznych.

Pierwszy problem badawczy dotyczył niedokładności szacowania poziomu wody w małych rzekach na podstawie opracowanych fotogrametrycznie Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (NMPT). W tym miejscu należy zauważyć, że źródłem tych modeli były obrazy pozyskane z niskiego pułapu. Z uwagi na fakt, że takie modele generowane są z zastosowaniem metody gęstego dopasowania wieloobrazowego, przed końcowym produktem wysokościowym generowana jest chmura punktów. Jednak na zobrazowanych powierzchniach o niskiej lub prawie jednolitej teksturze, do których można zaliczyć wodę (strumień małej rzeki) pojawiają się szумы w chmurze punktów. Jedną z przyczyn

występowania tych błędów jest brak możliwości detekcji punktów wspólnych na stereogramach za pomocą deskryptorów obrazu. W dalszej konsekwencji algorytmy dopasowania nie pozwalają na wyznaczenie dokładnej głębokości (wysokości) zbioru punktów tworzących model. W wyniku tego modele wysokościowe generowane na podstawie takich zaszumionych chmur punktów są mniej dokładne. Dlatego też, bardzo dobrym podejściem zaproponowanym przez Autora jest zastosowanie metod uczenia maszynowego do skutecznej filtracji NMPT na potrzeby wiarygodnej poprawy dokładności szacowania poziomu wody.

Drugi problem badawczy dotyczył niskiej dokładności pomiaru temperatury przez niskobudżetowe kamery termowizyjne instalowane na pokładach BSP. W definiowaniu tego problemu Autor zwrócił uwagę, że niskobudżetowe sensory termowizyjne wyposażone są w matryce mikrobolometryczne, które są czułe na zewnętrzne warunki środowiskowe. Ponadto w czasie wykonywania lotów BSP i obrazowania kamerą termalną możliwe jest nagrzewanie się jej komponentów spowodowane czynnikami zewnętrznymi lub przepływem prądu elektrycznego. Powyższe czynniki zwiększają niepewność pomiaru temperatury. Doktorant poprawnie stwierdził, że klasyczne metody redukcji wspomnianych niepewności pomiarowych wymagają wykonania kalibracji sensora w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Problemy związane z niedokładnością szacowania temperatury zostały przedstawione na serii przykładowych termogramów pozyskanych nad jednym z testowych obszarów. Na obrazach można zauważyć niejednorodność w odwzorowaniu temperatury dla tych samych miejsc, podczas gdy wartości DN pikseli powinny być takie same w pokrywającym się obszarze (powinny wskazywać tą samą wartość temperatury). Wobec powyższego Doktorant zaproponował opracowanie metody automatycznej kalibracji termogramów poprzez optymalizację minimalizującą różnice temperatury pomiędzy pokrywającymi się obrazami.

Trzeci problem badawczy dotyczył oceny możliwości zastosowania zmodyfikowanego algorytmu PT-JPL, pierwotnie opracowanego do analizy danych z satelitarnej misji ECOSTRESS, do szacowania ewapotranspiracji na podstawie skalibrowanych termogramów pozyskanych z niskiego pułapu. Skuteczność opracowanej metody została zweryfikowana za pomocą analizy porównawczej z wynikami referencyjnymi uzyskanymi metodą kowariancji wirów.

Wszystkie trzy problemy badawcze zostały poprawnie sformułowane oraz poruszają bardzo ważne i aktualne wyzwania. Dotyczą one nie tylko z zagadnień opracowania nowych, teledetekcyjnych metod wspomagających obserwacje hydrologiczne, ale również podwyższenia dokładności danych rejestrowanych przez niskobudżetowe kamery termowizyjne, które są często stosowane w obrazowaniu termalnym z niskiego pułapu.

### **2.3 Ocena hipotez i metodyki badawczej**

W rozprawie Autor podejmuje problematykę opracowania nowych metod modelowania obserwacji hydrologicznych z zastosowaniem obrazowania z niskiego pułapu oraz wybranych technik uczenia maszynowego.

Autor sformułował trzy hipotezy badawcze:

1. ***Dzięki wykorzystaniu uczenia maszynowego można zwiększyć dokładność odczytu poziomu wody z fotogrametrycznego modelu terenu stworzonego przy pomocy fotogrametrii z BSP.***
2. ***Dzięki wykorzystaniu uczenia maszynowego możliwe jest zwiększenie dokładności pomiaru temperatury terenu wykonanego przy pomocy kamery termowizyjnej zainstalowanej na pokładzie BSP.***
3. ***Możliwe jest zaadaptowanie metody PT-JPL do oszacowania rozkładu ewapotranspiracji na powierzchni terenu przy pomocy pomiarów BSP.***

W celu udowodnienia tak sformułowanych hipotez, za główne etapy badawcze zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy można uznać:

- Zaplanowania i wykonania kampanii pomiarowych na potrzeby pozyskania danych obrazowych (obrazy pozyskano w zakresie widzialnym, termalnym i wielospektralnym) z niskiego pułapu oraz pozyskania danych referencyjnych.
- Zastosowania metody siatki do wyznaczenia najlepszego modelu uczenia maszynowego przewidującego poziom powierzchni wody w małej rzece.
- Wykonanie oceny wytrenowanego modelu uczenia maszynowego.
- Opracowanie algorytmu wykonującego orientację wzajemną obrazów oraz nadanie im georeferencji.
- Opracowanie algorytmu uczenia maszynowego dostrajającego wartości obrazów termowizyjnych w taki sposób, aby poprawić spójność odczytów temperatur między pokrywającymi się obrazami.
- Dokonanie oceny opracowanego rozwiązania poprzez analizę porównawczą uzyskanych wyników z pomiarami referencyjnymi.
- Zaadaptowania algorytmu PT-JPL do analizy danych pozyskanych za pomocą BSP.
- Przeprowadzenie kampanii pomiarowej w celu pozyskania rastrowych danych teledetekcyjnych oraz danych meteorologicznych niezbędnych do obliczenia ewapotranspiracji przy pomocy zaadaptowanego modelu oraz metodą kowariancji wirów.
- Wykonanie analizy porównawczej wyników uzyskanych przy pomocy zaadaptowanego modelu i metody kowariancji wirów.

Sformułowane hipotezy badawcze uważam za poprawne, jednak drobne zastrzeżenia można mieć do niefortunnie stosowanej terminologii np. „algorytm wykonujący georeferencję zdjęć lotniczych”, podczas gdy Doktorant w rzeczywistości zaimplementował metodę orientacji wzajemnej obrazów oraz wykonał ich transformację do terenowego układu odniesienia. Niefortunne jest posługiwanie się terminem „zdjęcia lotnicze” w odniesieniu do obrazów pozyskanych z niskiego pułapu z pokładu bezzałogowych statków powietrznych. Termin ten zarezerwowany jest w fotogrametrii dla zdjęć pozyskanych kamerami średnio- i wielkoformatowymi, które są instalowane na pokładach załogowych statków powietrznych.

Poszczególne etapy badawcze w celu udowodnienia postawionych hipotez zostały zdefiniowane i zaplanowane bardzo poprawnie. Przyjęta metodyka badawcza nie budzi

zastrzeżeń. Zauważalna interdyscyplinarność zaproponowanych prac badawczych uwzględniających m. in. Modelowanie obserwacji hydrologicznych, fotogrametryczne przetwarzanie danych obrazowych oraz szerokie stosowanie narzędzi z zakresu technik uczenia maszynowego zasługuje na uznanie.

## 2.4 Szczegółowe omówienie przedstawionej rozprawy

Rozprawa została podzielona na pięć zasadniczych części. **Część pierwsza** zawiera wprowadzenie oraz identyfikację problemu badawczego wraz ze sformułowaniem hipotez pracy oraz głównego celu badawczego. **Część druga** zawiera ciekawe wprowadzenie w tematykę rozprawy. Część teoretyczna rozpoczyna się od rozważań na temat postępujących zmian klimatycznych i podkreśleniu roli jaką odgrywa hydrologia w zrozumieniu i modelowaniu procesów wodnych. W dalszych podrozdziałach zostały scharakteryzowane klasyczne metody pomiarowe stosowane w hydrologii z uwzględnieniem najnowszych trendów pomiarowych obejmujących teledetekcję z niskiego pułapu, a konkretnie zastosowania bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w sensory optoelektroniczne, które umożliwiają pozyskanie danych obrazowych w zakresie widzialnym i termalnym na potrzeby realizacji opracowań fotogrametrycznych i teledetekcyjnych. W przeglądzie literatury nie zabrakło również analizy możliwości zastosowania danych (chmur punktów) ze skaningu laserowego na potrzeby opracowania Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu. Dalsza część przeglądu obejmuje charakterystykę podstaw obrazowania termalnego oraz teledetekcyjnych metod szacowania ewapotranspiracji. Spośród różnych przedstawionych modeli bardzo szczegółowo został scharakteryzowany model PT-JPL, który został zaadaptowany przez Doktoranta w części empirycznej dysertacji. Ostatni podrozdział części teoretycznej (2.7.) dotyczył przeglądu wybranych metod uczenia maszynowego ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania w analizie obrazów. Doktorat sygnalizował poruszenie tych zagadnień już we wstępie niniejszej rozprawy (str. 17). Jednak zasadnicza część teoretyczna dotycząca wspomnianej tematyki budzi pewien niedosyt. Wstępna charakterystyka implementacji wybranych metod uczenia maszynowego przedstawiona w podrozdziale 2.7.1 zapowiada wprowadzenie do interesującego przeglądu literatury w tym zakresie, jednak całość jest dosyć krótka i została opisana zaledwie na 2,5 stronach z siedmioma przypisami literatury. W mojej opinii w tym miejscu zabrakło szerzej opisanej problematyki możliwości zastosowania splotowych sieci neuronowych w detekcji i klasyfikacji istotnych cech (lub obiektów) na obrazach. Również charakterystyka architektury typu autoenkoder, z uwagi na fakt jej zastosowania w części empirycznej, mogłaby być przybliżona nieco bardziej szczegółowo. Pomimo tego zastrzeżenia do ostatniego podrozdziału uważam, że część teoretyczna została opracowana w poprawny sposób i zawiera analizę najważniejszych oraz najnowszych publikacji z tematyki badawczej poruszanej w ramach rozprawy. Wartościowe jest podkreślenie innowacyjnych metod, szczególnie w zakresie teledetekcji niskiego pułapu oraz algorytmów sztucznej inteligencji jako narzędzi wspomagających modelowanie obserwacji hydrologicznych.

**Część trzecia** zatytułowana jest jako „Proponowane autorskie metody” i stanowi główny rdzeń badawczy rozprawy. W każdym z trzech podrozdziałów Doktorant podejmuje się rozwiązanie trzech różnych problemów badawczych związanych z głównym celem rozprawy.

Pierwsze zagadnienie badawcze dotyczyło opracowania metody szacowania poziomu wody małych strumieni na podstawie opracowań fotogrametrycznych oraz wybranych metod sztucznej inteligencji. Etap akwizycji danych obejmował pozyskanie danych obrazowych dla trzech obszarów („Grodzisko”, „Rybno”, „Amose” – zestaw danych uzupełniających) w różnych terminach i porach roku. Łącznie możliwe było zebranie pięciu podzbiorów danych. Do etapu opracowania fotogrametrycznego danych nie mam uwag z wyjątkiem błędnie stosowanej terminologii: „punkty dostosowania” zamiast „fotopunkty (ang. *GCP – Ground Control Point*). Dalszy etap prac badawczych obejmował propozycje optymalnej architektury sieci neuronowej typu autoenkoder gdzie danymi wejściowymi były fragmenty próbek rastrowych NMPT i ortoobrazów, gdzie przyjęto rozdzielczość próbki 256 x 256 pikseli. Na uwagę zasługuje przetestowanie dwóch różnych wariantów walidacji krzyżowej, które uwzględniają rozkład danych w podziale na dane treningowe i walidacyjne. Zastosowanie prostej, ale w tym przypadku skutecznej metody *grid search* pozwoliło Autorowi opracować optymalną architekturę autoenkodera. Zaproponowane rozwiązanie umożliwiło uzyskać wyniki dokładności szacowania poziomu wody zbliżone do najdokładniejszej klasycznej metody pomiaru (pomiar radarem z  $RMSE \pm 0.03$  m).

Drugie zagadnienie badawcze dotyczyło problemu niedostatecznej dokładności wyznaczenia temperatury na podstawie obrazów termalnych pozyskanych z niskiego pułapu. W ramach prac badawczych zostały wykonane eksperymenty laboratoryjne pozwalające wyznaczyć dokładność pomiaru temperatury na podstawie obrazów pozyskanych niechłodzoną kamerą termowizyjną. W ramach zrealizowanych kampanii pomiarowych w różnych terminach i różnych porach dnia pozyskano zestaw obrazów termalnych z niskiego pułapu oraz zestaw danych referencyjnych zawierających dokładną wartość temperatury wody dla obszarów testowych. Drobnym niedopatrzeniem Autora jest w tym miejscu brak informacji jak liczny był to zbiór obrazów (w dalszej części rozprawy dotyczącej dyskusji wyników zawarta jest co prawda informacja, że algorytm został przetestowany na próbce 3037 obrazów, ale czy to był cały zestaw danych? – str. 88). W ramach prac badawczych został również zaadaptowany algorytm orientacji wzajemnej obrazów termalnych bazujący na klasycznym podejściu uwzględniającym zastosowanie deskryptora SIFT do wyszukiwania punktów wspólnych i dopasowania algorytmem FLANN a następnie optymalizacji za pomocą algorytmu RANSAC. Niestandardowym podejściem zaproponowanym w rozprawie jest optymalizacja georeferencji względem terenowego układu współrzędnych przy zastosowaniu metody gradientów z funkcją straty. Zabrakło informacji z jaką dokładnością wykonano ostateczną georeferencję. Dalsze eksperymenty w tej części obejmowały prace nad obrazem termalnym w kontekście korekcji efektu winietowania oraz doświadczalnego wyznaczenia zależności pomiędzy wpływem zewnętrznych warunków a dokładnością wyznaczenia temperatury na obrazach pozyskanych kamerą termalną. W końcowym etapie tej części została opracowana nowa metoda automatycznej kalibracji obrazów termalnych z uwzględnieniem optymalizacji spójności odczytów temperatury.

Trzecie zagadnienie badawcze dotyczyło dostosowania algorytmu PT-JPL do wyznaczania ewapotranspiracji na podstawie danych pomiarowych pozyskanych z niskiego pułapu. W ramach prac badawczych pozyskano dane obrazowe z niskiego pułapu w zakresie termalnym i wielospektralnym. W dalszej części w bardzo szczegółowy sposób Autor przedstawił metodykę dostosowania algorytmu PT-JPL. W wyczerpujący sposób

zreferował sposób obliczenia tzw. funkcji ograniczeń zastosowanych w adaptacji algorytmu. W tym ujęciu bardzo wartościowa jest zawartość tab. 3.3.3 (wielkości mierzone w terenie) oraz tab. 3.3.4 (wzory wskaźników wegetacyjnych i innych wielkości), które pozwoliły na wyznaczenie ewapotranspiracji metodą PT-JPL zaadaptowaną do danych BSP. **Część czwarta** zawiera bardzo szczegółowe zestawienie wyników z wykonanych eksperymentów numerycznych. Rozdział ten opatrzony jest bardzo licznymi i szczegółowymi wykresami dla trzech głównych wątków badawczych. Skuteczność każdej z opracowanych metod została zweryfikowana na podstawie niezależnych pomiarów referencyjnych. Każdy wątek badawczy opatrzony jest szczegółową dyskusją wyników. Na uznanie zasługuje krytyczne podejście Autora do uzyskanych wyników i skonfrontowanie ich z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy. Również godne pochwały jest zawarcie odnośników do danych i kodów źródłowych z wykonanych badań. Świadczy to o bardzo dojrzałym podejściu do pracy naukowej. **Część piąta** zawiera syntetyczne podsumowanie wyników oraz ocena skuteczności przyjętej metodyki badawczej. Wnioski końcowe są wyczerpujące, kompletne i spójne. Cenną zawartością tego rozdziału jest syntetyczne wskazanie głównych osiągnięć badawczych, które stanowią oryginalny wkład Autora. Nie mam żadnych wątpliwości co do umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i rozwiązywania oryginalnych problemów badawczych przez Pana Radosława Szostaka.

## 2.5 Ocena osiągnięcia naukowego Doktoranta

Po zapoznaniu się z całokształtem przeprowadzonych badań mogę stwierdzić, że Autor podjął się ciekawych i ambitnych zadań polegających na opracowaniu nowych metod wspomagających obserwacje hydrologiczne. Już na początku dysertacji Pan Szostak przedstawiając motywację podjętej tematyki badawczej zwrócił uwagę na wymagania jakie są stawiane przed nowoczesnymi metodami monitorowania i modelowania procesów hydrologicznych. Zdefiniował wyzwania jakie są stawiane dla potencjalnego zastosowania BSP w hydrologii, zauważył również konieczność stosowania zaawansowanych, współczesnych narzędzi analitycznych, takich jak np. uczenie maszynowe w opracowaniu nowych rozwiązań wspomagających modelowanie obserwacji hydrologicznych. Przy rozwiązywaniu kolejnych problemów badawczych zdefiniowanych w niniejszej rozprawie Autor kierował się interdyscyplinarnym podejściem łączącym techniki obrazowania wielospektralnego z niskiego pułapu (z zastosowaniem BSP), fotogrametrię, teledetekcję oraz współczesne techniki analizy danych oparte na algorytmach sztucznej inteligencji. Jestem pełen uznania dla szerokiego zakresu czasowego i przestrzennego zrealizowanych kampanii pomiarowych oraz opanowania na bardzo dobrym poziomie tak interdyscyplinarnego warsztatu badawczego uwzględniającego zagadnienia z zakresu m.in. hydrologii, fizyki atmosfery, fotogrametrii, teledetekcji, sztucznej inteligencji, a nawet geodezji.

Opracowane rozwiązania mają bez wątpienia charakter użyteczny wynikający bezpośrednio z potrzeb badaczy zajmujących się modelowaniem obserwacji hydrologicznych. Ponadto uwzględniając wyniki badań dotyczących opracowania metody autokalibracji obrazów termalnych można spodziewać się szerszego spektrum zastosowań nie tylko jako nowego narzędzia do wspomagania obserwacji hydrologicznych, ale również w innych zagadnieniach w teledetekcji niskiego pułapu.

Za główne osiągnięcia w zrealizowanej rozprawie uważam:

– **Opracowanie metody szacowania poziomu wody małych strumieni z zastosowaniem fotogrametrii niskiego pułapu i uczenia głębokiego.**

– Opracowanie zbioru danych do treningu modeli uczenia maszynowego na potrzeby szacowania poziomu wody w rzekach.

– Opracowanie różnych wariantów modeli uczenia maszynowego dedykowanych do szacowania poziomu wody w rzece.

– Opracowania optymalnego modelu sieci neuronowej opartej na architekturze autoenkodera dedykowanej do szacowania poziomu wody.

– **Opracowanie metody automatycznej kalibracji obrazów termalnych przy użyciu optymalizacji metodą gradientów**

– Modyfikację algorytmu orientacji wzajemnej obrazów oraz zastosowania metody optymalizacji gradientów do ich orientacji zewnętrznej (orientacji względem terenowego układu odniesienia).

– Opracowanie algorytmu kalibracji poprzez optymalizację spójności odczytów temperatury pomiędzy pokrywającymi się obrazami termalnymi.

– **Opracowanie metody szacowania ewapotranspiracji na podstawie obrazów termalnych pozyskanych z niskiego pułapu (termografii BSP).**

– Zaadaptowanie algorytmu PT-JPL do oszacowania rozkładu ewapotranspiracji na powierzchni terenu z zastosowaniem danych pozyskanych za pomocą BSP.

Podsumowując, uważam, że w przedłożonej rozprawie dostrzegalna jest logika badań oraz umiejętność poprawnego wnioskowania. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną oraz praktyczną. Bezsprzecznie udowodnił, że posiada duże umiejętności do samodzielnego prowadzenia interdyscyplinarnego eksperymentu naukowego i prawidłowego interpretowania wyników. Zaproponowana metodyka badawcza oraz sposób jej zastosowania pozwolił udowodnić postawione hipotezy i zrealizować cel główny rozprawy.

## 2.6 Uwagi

Chciałbym, aby Doktorant podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej ustosunkował się do następujących uwag:

- a) Dlaczego w procesie orientacji obrazów i nadaniu im georeferencji nie zastosowano aerotriangulacji metodą niezależnych wiązek tylko wykonano nadanie georeferencji za pomocą optymalizacji gradientowej? Proszę wskazać wady i zalety powyższych metod orientacji obrazów
- b) Czy stosowanie różnego oprogramowania fotogrametrycznego w opracowaniu Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu mogłoby mieć istotny wpływ na końcową dokładność modeli?
- c) Jakimi kryteriami kierowano się dobierając pułapy nalotów?



- d) Proszę komentarz w zakresie opracowania zbioru danych do treningu modeli. Jakie znaczenie ma balansowanie zbioru danych? Jakie znaczenie ma pozyskanie obrazów (próbek rastrowych) w różnych porach roku i w różnych warunkach oświetleniowych? Proszę o rozwinięcie tych zagadnień w aspekcie prowadzonych badań.
- e) Proszę o uzasadnienie przyjętej rozdzielczości próbki wejściowej (256 x 256) (str.46).
- f) Jaki układ wysokościowy został przyjęty jako referencyjny w analizach dotyczących dokładności NMPT?
- g) Dlaczego podczas procedury kalibracji różnic temperatury przyjęto próbkę rastra o rozdzielczości 32 x 32 piksele?
- h) Proszę powiedzieć o ewentualnych ograniczeniach co do stosowania opracowanych metod w praktyce.

### 2.6.1 Pozostałe uwagi szczegółowe

W rozprawie dostrzeżono drobne uchybienia, które nie wpływają na ocenę merytoryczną rozprawy, w większości mają one charakter błędów edycyjnych, pisarskich:

- a) Brak konsekwencji w stosowaniu podstawowej jednostki miary. Raz wyniki podawane są w m, a raz cm, a innym razem w mm.
- b) Brak konsekwencji w jednolitym stosowaniu nazewnictwa dla bezzałogowych statków powietrznych. Raz stosowany jest akronim BSP, a raz potoczne określenie – drony.
- c) Brak jednostek na osiach np. rys. 1.2.1.
- d) Stosowanie niewłaściwej terminologii w odniesieniu do zagadnień fotogrametrycznych: np. „naziemne punkty referencyjne”, „punkty dostosowania” – powinno być „fotopunkty” czyli punkty o znanych współrzędnych terenowych jednoznacznie identyfikowalnych na obrazie i w terenie; lub inne przykłady: „zdjęcia lotnicze”; „dostrajanie wartości zdjęć”; „mozaiki lotnicze zdjęć terenu”

### 3. Wniosek końcowy

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** dotyczącego opracowania nowych metod wspomagania obserwacji hydrologicznych. Rozprawa została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Cele badawcze postawione przez Pana mgr. inż. Radosława Szostaka zostały w pełni zrealizowane, a postawione hipotezy badawcze udowodnione. Pomimo drobnych uwag, w rozprawie zaprezentowano bardzo dobry poziom wiedzy teoretycznej mieszczącej się nie tylko w tematyce badań, ale również w dyscyplinie nauki fizyczne oraz nauki o Ziemi i środowisku. Pomimo szerokiej interdyscyplinarności prowadzonych prac badawczych oraz konieczności opanowania zaawansowanego aparatu narzędzi analitycznych, w tym m. in. opartych o metody sztucznej inteligencji, Doktorant z całą pewnością wykazał się bardzo dobrym warształem naukowym oraz umiejętnością samodzielnego rozwiązywania interdyscyplinarnych problemów badawczych. Zaproponowana metodyka, szeroki zakres przeprowadzonych prac eksperymentalnych oraz prawidłowa interpretacja i wnikliwa dyskusja wyników, potwierdziły dojrzałe i kreatywne podejście Pana Radosława Szostka do pracy naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Radosława Szostaka spełnia kryteria stawiane rozprawie doktorskiej określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t. j. Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) – tekst jednolity wg Obwieszczenia Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 roku (Dz. U. 2023, poz. 742). W związku z powyższym wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

#### Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy

Biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres interdyscyplinarnych prac badawczych, które były szczególnie wymagające w realizacji, oraz bardzo rzetelne podejście do rozwiązywania problemów naukowych wnioskuję o wyróżnienie rozprawy. Wniosek uzasadniam opracowaniem oryginalnych metod wspomagających obserwacje hydrologiczne z zastosowaniem interdyscyplinarnych technologii, w tym m. in. metod analitycznych opartych o sztuczną inteligencję, wizję komputerową oraz bezzałogowe statki powietrzne.

*Damian Wierzbicki*

dr hab. inż. Damian Wierzbicki