

dr hab. inż. Krzysztof Naus, prof. AMW  
Katedra Nawigacji i Hydrografii Morskiej  
Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego  
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte  
ul. Śmidowicza 69  
81-127 Gdynia

Gdynia, dnia 10 czerwca 2025 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Pani mgr Oktawii Specht

pt. „Metoda monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej na bazie fuzji wielomodalnych danych geoprzestrzennych pozyskanych przy użyciu sensorów pokładowych bezzałogowych platform pomiarowych”

### **1 Formalna podstawa opracowania recenzji**

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała nr 3/2025 Rady Naukowej Wydziału Nawigacyjnego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 20 lutego 2025 r., na mocy której zostałem powołany jako recenzent w postępowaniu o nadanie stopnia doktora Pani mgr Oktawii Specht.

Recenzja została sporządzona z uwzględnieniem wymagań określonych w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.), zgodnie z którymi:

- „Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.”
- „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej, albo oryginalne dokonanie artystyczne.”

W świetle powyższego celem niniejszej recenzji jest ocena, czy przedłożona rozprawa spełnia ustawowe wymagania w zakresie poziomu wiedzy teoretycznej, samodzielności badawczej oraz oryginalności zaproponowanego rozwiązania problemu naukowego.

## 2 Ocena założeń, struktury i znaczenia rozprawy

Rozprawa została przygotowana przez doktorantkę w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Praca podejmuje ważny, aktualny i praktycznie istotny problem badawczy – opracowanie metody monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej z wykorzystaniem danych pozyskiwanych z nowoczesnych sensorów pokładowych bezzałogowych platform pomiarowych oraz ich integracji w spójnym modelu przestrzennym. We wstępie (str. 8–10) autorka wskazuje na ograniczenia klasycznych metod pomiarów hydrograficznych w strefach płytkich oraz podkreśla rosnące wymagania dotyczące jakości danych batymetrycznych. W tej części pracy sformułowana została również teza rozprawy, zakładająca, że zaproponowana metoda umożliwi osiągnięcie dokładności pomiarów zgodnej z wymaganiami kategorii specjalnej Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej IHO (ang. *International Hydrographic Organization*).

Główny cel pracy – opracowanie metody monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej na bazie fuzji wielomodalnych danych geoprzestrzennych pozyskanych przy użyciu sensorów pokładowych bezzałogowych platform pomiarowych – został przez doktorantkę jasno określony i w pełni zrealizowany. We wstępie (str. 9) autorka wyodrębniła także szereg celów częściowych, obejmujących m.in.: charakterystykę danych pozyskiwanych z sensorów hydroakustycznych i optoelektronicznych, przegląd metod modelowania i integracji danych geoprzestrzennych, opracowanie własnej metody fuzji, jej implementację w środowisku GIS, realizację kampanii pomiarowych w różnych warunkach środowiskowych, a także ocenę ilościową jakości uzyskanych modeli batymetrycznych. Cele te zostały systematycznie rozwinięte i zrealizowane, tworząc logiczny fundament dla struktury rozprawy oraz kolejnych etapów przebiegu procesu badawczego.

W pracy zastosowano zestaw zróżnicowanych metod badawczych, odpowiednich do interdyscyplinarnego charakteru rozprawy oraz przyjętych celów. Autorka wykorzystwała analizę i syntezę literatury przedmiotu oraz aktualnych rozwiązań technologicznych stosowanych w geoinformatyce, w tym w hydrografii, a także abstrahowanie i porównanie istniejących metod modelowania powierzchni i integracji danych przestrzennych oraz matematyczne modelowanie fuzji pomiarów z różnych sensorów, z uwzględnieniem wagi poszczególnych źródeł w zależności od ich dokładności.

Istotnym elementem badań było przeprowadzenie eksperymentu terenowego z wykorzystaniem bezzałogowych platform pomiarowych oraz zastosowanie metod statystycznych do oceny jakości modeli batymetrycznych. Przeprowadzona została również analiza logiczna i porównawcza wpływu struktury oraz właściwości danych wejściowych – takich jak dokładność, rozdzielczość czy kompletność – na jakość końcowego modelu. Zastosowanie tych metod pozwoliło nie tylko na opracowanie nowej procedury integracji danych, ale także na jej empiryczną weryfikację i ocenę efektywności w rzeczywistych warunkach pomiarowych. Rozprawa liczy 162 strony, z czego ponad 130 stanowi część merytoryczną. Jej układ jest przejrzysty i logiczny – składa się z trzech głównych rozdziałów. Rozdział pierwszy (str. 11–59) zawiera przegląd nowoczesnych technologii pomiarowych oraz metod integracji danych wykorzystywanych w hydrografii. Rozdział drugi (str. 60–110) prezentuje szczegółowy opis opracowanej przez doktorantkę metody integracji danych batymetrycznych pochodzących z różnych źródeł. Rozdział trzeci (str. 111–140) dotyczy implementacji autorskiego rozwiązania w środowisku GIS oraz analizy wyników uzyskanych na podstawie danych empirycznych. Taka struktura pracy nie tylko zapewnia przejrzystość narracji, lecz także umożliwia czytelnikowi stopniowe zapoznawanie się zarówno z teoretycznymi podstawami, jak i praktycznymi aspektami badań, co pozwala na pełniejsze zrozumienie przyjętych założeń, przebiegu analiz oraz sposobu oceny uzyskanych rezultatów.

Dane empiryczne zostały zebrane podczas pięciu kampanii pomiarowych przeprowadzonych na różnych typach akwenów – w tym jednej kompleksowej kampanii jednodniowej, w trakcie której jednocześnie zastosowano wybrane sensory pomiarowe, takie jak echosonda jednowiązkowa SBES (ang. *Single Beam Echo Sounder*), echosonda wielowiązkowa MBES (ang. *Multi Beam Echo Sounder*), lotniczy i mobilny system LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) oraz kamera fotogrametryczna. Pozwoliło to na pełną weryfikację zaproponowanej metody w warunkach operacyjnych. Autorka nie tylko brała aktywny udział w realizacji i opracowaniu wszystkich pomiarów terenowych, lecz także wykazała się inicjatywą oraz samodzielnością badawczą na każdym etapie tych prac.

Wnioski zawarte w pracy (str. 141–143) stanowią syntetyczne i trafne podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz odnoszą się bezpośrednio do założeń badawczych. Podkreślono skuteczność opracowanej metody, wskazano jej ograniczenia oraz zaproponowano możliwe kierunki dalszych prac.

Bibliografia (str. 144–152) obejmuje blisko 200 pozycji – zarówno uznane źródła krajowe i zagraniczne, jak i najnowsze publikacje z lat 2021–2024 oraz dokumenty normatywne, w tym standardy IHO. Zwraca uwagę obecność publikacji współautorstwa doktorantki, które stanowią bezpośredni wkład w rozwój analizowanej tematyki. Dobór źródeł jest przemyślany i adekwatny do zakresu rozprawy.

Całość została opracowana z dużą starannością merytoryczną i redakcyjną. Styl wypowiedzi jest precyzyjny, język zachowuje formalny charakter, a terminologia stosowana jest poprawnie i konsekwentnie. Praca wyróżnia się przejrzystością struktury, spójnością logiczną i wysokim poziomem realizacji założonych celów. Stanowi przykład rzetelnej i samodzielnej rozprawy doktorskiej o interdyscyplinarnym charakterze i wyraźnym potencjale aplikacyjnym w zakresie współczesnych metod hydrograficznych i geoinformatycznych.

### **3 Ocena treści merytorycznej rozprawy**

#### **3.1 Rozdział pierwszy – „Analiza metod integracji danych hydroakustycznych i optoelektronicznych stosowanych w hydrografii”**

##### **3.1.1 Merytoryczna charakterystyka i ocena**

Rozdział pierwszy pt. „Analiza metod integracji danych hydroakustycznych i optoelektronicznych stosowanych w hydrografii” stanowi merytorycznie rozbudowany i technicznie precyzyjny przegląd współczesnych metod pozyskiwania oraz integracji danych batymetrycznych, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki strefy brzegowej. Układ treści jest logiczny, a zakres tematyczny – szeroki i aktualny. Szczególnie korzystnym rozwiązaniem jest konsekwentne zestawienie technik hydroakustycznych i optoelektronicznych, realizowanych z wykorzystaniem bezzałogowych platform pomiarowych – nawodnych USV (ang. *Unmanned Surface Vehicle*) oraz powietrznych UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*). W części poświęconej systemom hydroakustycznym autorka w sposób syntetyczny przedstawiła budowę oraz zasadę działania echosond jednowiązkowej SBES i wielowiązkowej MBES, wskazując kluczowe elementy ich konstrukcji, mechanizm pomiaru głębokości oraz znaczenie czynników środowiskowych dla jakości danych, w odniesieniu do wytycznych IHO. Zakres ten – choć ogólny – jest adekwatny do charakteru i celów pracy, zapewniając wystarczające podstawy do dalszych analiz związanych z integracją danych pomiarowych. Druga część rozdziału została poświęcona technikom optoelektronicznym, obejmującym trzy podstawowe odmiany skaningu laserowego: lotniczy ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*), mobilny MLS (ang. *Mobile Laser Scanning*) oraz batymetryczny ALB (ang. *Airborne Laser*

*Bathymetry*). Zaprezentowano również kamerę fotogrametryczną oraz metody określania głębokości na podstawie obrazów wizyjnych, takie jak Depth Inversion, cBathy (ang. *celerity-based Bathymetry*), uBathy (rozwijana w pakiecie Ulises-ICM-UPC), UDB (ang. *UAV-Derived Bathymetry*), radiometryczną RDE (ang. *Radiometric Depth Estimation*). Zestaw ten uzupełnia regresja wektorów nośnych SVR (ang. *Support Vector Regression*), która łączy gęstą chmurę punktów utworzoną metodą SfM (ang. *Structure from Motion*) ze zdjęć wykonanych podczas nalotu UAV z punktowymi, precyzyjnymi pomiarami głębokości pozyskanymi odbiornikiem RTK GNSS (ang. *Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System*). Umożliwia to opracowanie modelu predykcyjnego korygującego optycznie wyznaczone współrzędne i tym samym szacującego głębokości w obszarach pozbawionych pomiarów bezpośrednich, zapewniając spójny, „wygładzony” model batymetryczny.

Autorka nie ograniczyła się do prezentacji metod. Poddała je także porównaniu pod kątem dokładności estymacji głębokości oraz jasno definiując warunki, w których poszczególne podejścia do analizy obrazów osiągają najwyższą wiarygodność.

Tego typu zestawienie pozwala czytelnikowi na szybką ocenę potencjału praktycznego każdej z metod w zależności od specyfiki badanego akwenu, głębokości i przejrzystości wody. W tej części trafnie uwydatniono także znaczenie ekstrakcji linii brzegowej z danych LiDAR jako istotnego elementu integrującego pomiary hydroakustyczne i optoelektroniczne oraz umożliwiającego precyzyjne przestrzenne powiązanie różnych zbiorów danych.

W części dotyczącej modelowania numerycznego modelu terenu (NMT) omówiono dwie podstawowe struktury danych: regularną siatkę kwadratów (ang. *GRID*) oraz nieregularną siatkę trójkątów TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*). Zaprezentowano zarówno zalety, jak i ograniczenia każdej struktury danych, ilustrując je przykładami popularnych algorytmów interpolacyjnych.

Końcowa część rozdziału skupia się na klasyfikacji metod integracji danych, przedstawiając architektury scentralizowane oraz zdecentralizowane. Autorka porównuje przy tym algorytmy i techniki integracyjne, w tym estymację Bayesowską, podejścia oparte na średniej ważonej oraz sztuczne sieci neuronowe ANN (ang. *Artificial Neural Networks*). Szczególną zaletą tej części jest jasne wskazanie, w jakich warunkach – takich jak różnorodność (heterogeniczność) dostępnych danych czy wymagana dokładność końcowych wyników – określone metody integracji danych znajdują praktyczne zastosowanie.

### 3.1.2 Uwagi szczegółowe

- ❖ Skrót ADC (ang. *Analog-to-Digital Converter*) został wprowadzony w tekście bez wcześniejszego rozwinięcia – ani w tekście głównym, ani w wykazie skrótów.
- ❖ W opisie błędów systematycznych kamery (str. 27) trzecia kategoria określona jako „rozdzielczość ekranu” powinna odnosić się do rozdzielczości (liczby pikseli) i fizycznych wymiarów matrycy światłoczułej kamery, które – w połączeniu z ogniskową oraz wysokością nalotu – determinują terenowy rozmiar piksela GSD (ang. *Ground Sampling Distance*), a tym samym potencjalną dokładność opracowania fotogrametrycznego.
- ❖ Definicja numerycznego modelu terenu (NMT) zamieszczona na str. 35 może sugerować, że utożsamia się go wyłącznie z regularną siatką kwadratów (GRID), podczas gdy w dalszej części rozdziału słusznie wskazano również nieregularną siatkę trójkątów (TIN) jako równorzędną strukturę danych przestrzennych.
- ❖ W tekście występują błędy fleksyjne polegające na użyciu formy „tą” zamiast poprawnej „tę” w bierniku rodzaju żeńskiego, np. „tą metodę” (str. 9), „tą powierzchnię” (str. 23).
- ❖ Szkoda, że w opisie wyników z tab. 1.2 (str. 28–29) pominięto dane wejściowe (typ sensora, parametry nalotu, format plików) oraz nazwę i wersję oprogramowania użytego

do przetwarzania danych, co uniemożliwia ocenę porównywalności i powtarzalności rezultatów. W samej tab. 1.2 występują także niezdefiniowane parametry: w metodzie uBath brak wyjaśnienia znaczenia „ $t_f$ ”, a przy UDB przytoczono nazwy „Lyzenga” i „Stumpf’a” bez doprecyzowania, że odnoszą się do modeli regresyjnych służących do estymacji głębokości na podstawie danych optycznych, oraz bez wskazania zastosowanych współczynników (konkretnych wartości, przyporządkowanych kanałów spektralnych i metody ich wyznaczenia).

### 3.1.3 Podsumowanie

Rozdział pierwszy cechuje się wysokim poziomem merytorycznym oraz wszechstronnym, nowoczesnym ujęciem zagadnień technicznych, oferując kompleksowy i aktualny przegląd metod pomiarowych, analitycznych i integracyjnych stosowanych we współczesnej hydrografii. Na szczególną uwagę zasługują liczne odniesienia do publikacji naukowych i obowiązujących norm, a także ocena dokładności algorytmów estymacji głębokości na podstawie obrazów wizyjnych oraz omówienie praktyki ekstrakcji linii brzegowej z danych LiDAR, które stanowią istotną wartość dodaną w tej części rozprawy. Pomimo drobnych uwag redakcyjnych, rozdział ten stanowi solidną podstawę teoretyczną i koncepcyjną dla dalszych części dysertacji oraz w sposób przystępny przygotowuje czytelnika do zrozumienia autorskiej metody monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej, zaprezentowanej w kolejnych rozdziałach.

## 3.2 Rozdział drugi – „Metoda monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej na bazie fuzji wielomodalnych danych geoprzestrzennych”

### 3.2.1 Merytoryczna charakterystyka i ocena

Rozdział drugi pt. „Metoda monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej na bazie fuzji wielomodalnych danych geoprzestrzennych” stanowi zasadniczy element konstrukcyjny całej pracy, będąc jej najważniejszym komponentem aplikacyjnym. Autorka przedstawia w nim starannie opracowaną koncepcję monitorowania strefy brzegowej, opartą na integracji danych przestrzennych pozyskiwanych z różnych źródeł pomiarowych.

We wprowadzeniu zaprezentowano etapy przygotowania i wstępnej analizy danych pozyskanych z sensorów zainstalowanych na bezzałogowych platformach pomiarowych (USV, UAV), takich jak echosondy jednowiązkowe (SBES) i wielowiązkowe (MBES), kamery fotogrametryczne oraz laserowe skanery lotnicze (ALS) i mobilne (MLS).

Dalsze części rozdziału koncentrują się na opisie procesu przetwarzania danych w logicznie uporządkowanej sekwencji, prowadzącej do uzyskania spójnego modelu batymetrycznego obszaru granicznego pomiędzy środowiskiem lądowym a wodnym.

Proces ten podzielono na cztery zasadnicze moduły funkcjonalne: opracowanie danych głębokowodnych, opracowanie danych płytkowodnych, wyznaczenie linii brzegowej oraz integrację danych pochodzących z różnych sensorów. Taka struktura pozwala na przejrzyste śledzenie przebiegu działań oraz ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań. Rozdział w sposób kompleksowy przedstawia zastosowane rozwiązania techniczne i algorytmiczne w każdym z modułów – począwszy od metod filtracji i interpolacji danych, przez klasyfikację oraz integrację różnych typów informacji przestrzennej, aż po procedury walidacji i oceny dokładności pomiarów.

**Moduł opracowania danych głębokowodnych** odpowiada za przetwarzanie danych batymetrycznych pozyskanych z pomiarów głębokowodnych przy użyciu echosondy wielowiązkowej (MBES). Autorka słusznie podkreśla znaczenie starannego przygotowania

tych danych – począwszy od odniesienia głębokości do właściwego układu wysokościowego, aż po precyzyjną filtrację błędnych pomiarów.

W tym kontekście szczegółowo opisana procedura filtrowania danych MBES obejmuje automatyczne wykrywanie i usuwanie pomiarów odstających z wykorzystaniem m.in. metod statystycznych, klastrowych oraz modelowania powierzchni, a także ręczną weryfikację i ewentualną eliminację pozostałych błędnych pomiarów głębokości.

Tak kompleksowe podejście umożliwia skuteczne wychwycenie różnorodnych anomalii obecnych w „surowych” danych oraz gwarantuje wysoką jakość uzyskanych wyników. W rezultacie do dalszych analiz trafia zweryfikowany zbiór głębokowodnych punktów batymetrycznych, który stanowi solidną podstawę do modelowania kształtu dna.

Potwierdzeniem jakości danych jest osiągnięta dokładność pomiarów głębokości – dla zastosowanej echosondy interferometrycznej (PING 3DSS-DX-450) wyniosła ona 0,15 m ( $p = 0,95$ ) podczas kampanii testowej. Taki poziom dokładności spełnia wymagania stawiane pomiarom kategorii szczególnej IHO i świadczy o prawidłowości przeprowadzonych procesów kalibracji i filtracji.

**Moduł opracowania danych płytkowodnych** integruje informacje z płytkiej strefy przybrzeżnej, wykorzystując dane z trzech typów sensorów: echosondy jednowiązkowej (SBES), kamery fotogrametrycznej oraz odbiornika GNSS RTK. Autorka przewidziała dwa uzupełniające się podejścia do pozyskiwania danych batymetrycznych w obszarach płytkowodnych.

Pierwsze z nich opiera się na bezpośrednich pomiarach SBES z pokładu USV o niewielkim zanurzeniu. Opracowanie takich pomiarów przebiega analogicznie jak w przypadku danych z echosondy wielowiązkowej, co szczegółowo opisano w części dotyczącej modułu głębokowodnego. Skuteczność tego podejścia potwierdzają wyniki – dokładność pomiarów głębokości SBES wyniosła 0,07 m ( $p = 0,95$ ) w zakresie głębokości 0,4–0,99 m oraz 0,06 m ( $p = 0,95$ ) w zakresie głębokości 1–7 m. To bardzo dobre rezultaty, porównywalne, a niekiedy nawet przewyższające dokładność danych MBES w analogicznym zakresie głębokości. Potwierdza to skuteczność kalibracji oraz wysoką jakość danych pozyskanych z echosondy jednowiązkowej podczas badań na akwenu testowym.

Drugie podejście polega na zastosowaniu zdjęć wykonanych z UAV w połączeniu z pomiarami geodezyjnymi GNSS RTK oraz algorytmem SVR do predykcji głębokości. Zdjęcia obejmujące strefę brzegową zostały przetworzone do postaci gęstej chmury punktów z wykorzystaniem techniki rekonstrukcji 3D (SfM). Uzyskaną chmurę punktów precyzyjnie odwzorowano w docelowym układzie odniesienia za pomocą siedmioparametrowej transformacji Bursa-Wolf.

Dane uczące do modelu SVR zostały opracowane na podstawie bezpośrednich pomiarów GNSS RTK wykonanych w wybranych punktach kontrolnych. Każdemu z tych punktów przyporządkowano wartość głębokości, wyznaczoną na podstawie chmury SfM jako średnią z punktów znajdujących się w promieniu  $\pm 10$  cm, co pozwoliło ograniczyć wpływ lokalnych anomalii pomiarowych. Tak przygotowany zbiór danych został oczyszczony z obserwacji odstających (w tym wartości przekraczających dwukrotnie odchylenie standardowe) oraz poddany normalizacji metodą Z-score, co przyczyniło się do zwiększenia skuteczności działania algorytmu SVR.

Uzyskany w ten sposób wysokiej jakości zbiór danych posłużył do trenowania modelu SVR, którego optymalizację przeprowadzono z wykorzystaniem metody TRON (ang. Trust Region Newton Method). Wynikowy model SVR został następnie zastosowany do korekcji pomiarów fotogrametrycznych, umożliwiając kompensację systematycznych błędów lokalizacji punktów powierzchni dna, wynikających z refrakcji promieni świetlnych na granicy ośrodków woda–powietrze.

Zastosowanie algorytmu SVR stanowi istotny i oryginalny element metody korekcji danych batymetrycznych zaprezentowanej w rozprawie. Warto podkreślić, że autorka nie ograniczyła się do ogólnego opisu zastosowania tego algorytmu, lecz szczegółowo przedstawiła cały proces przetwarzania danych pomiarowych – od ich starannego przygotowania i wstępnej analizy, przez optymalizację parametrów modelu regresji, aż po estymację głębokości na podstawie wygenerowanej chmury punktów oraz weryfikację uzyskanych rezultatów.

Takie nowatorskie wykorzystanie metody regresji wektorów nośnych pozwoliło skutecznie poprawić jakość danych, szczególnie w najpłytszych obszarach akwenu. Połączenie chmur punktów wygenerowanych na podstawie zdjęć z UAV z pomiarami GNSS RTK umożliwiło estymację głębokości także na obszarach pozbawionych danych z echosondy. Skuteczność podejścia została potwierdzona na akwenu testowym. Dokładność głębokości uzyskanych metodą SVR oszacowano na 0,22–0,24 m ( $p = 0,95$ ) dla głębokości do 1 m. Choć jest to wynik słabszy niż dla SBES ( $\approx 0,07$  m), pozostaje zadowalający jak na metodę pośrednią opartą na obrazowaniu optycznym. Dla głębokości powyżej 2 m błąd przekraczał 0,3 m ( $p = 0,95$ ), co potwierdza naturalne ograniczenia fotogrametrii – związane m.in. ze spadkiem przezroczystości wody i ograniczonym zasięgiem widzenia optycznego (czyli głębokością, na jaką dociera światło). Autorka słusznie ograniczyła więc zastosowanie metody SVR do bardzo płytkiej strefy (0–1 m), w której tradycyjne pomiary są najtrudniejsze, a dane fotogrametryczne wciąż użyteczne.

Podsumowując, moduł płytkowodny został opracowany przez autorkę z dużą starannością, łącząc sprawdzone metody hydroakustyczne z nowoczesnym podejściem „fotogrametryczno-uczającym”. Efektem jest wiarygodny i bogaty zbiór danych dla strefy przybrzeżnej.

**Moduł wyznaczania linii brzegowej** służy do określenia przebiegu granicy woda–ład. Autorka przewidziała wykorzystanie w tym celu kilku komplementarnych źródeł danych: ortofotomapy (dla wizualnej identyfikacji linii brzegowej na zdjęciach), chmur punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS), mobilnego skaningu laserowego (MLS) oraz naziemnych punktów kontrolnych wyznaczonych metodą GNSS RTK. Tak szeroki zestaw danych zapewnia zarówno wysoką szczegółowość, jak i wiarygodność pozyskiwanej linii brzegowej.

Dla obu zbiorów danych LiDAR zastosowano zmodyfikowaną metodę Xu i in. (Xu, S.; Ye, N.; Xu, S., *A New Method for Shoreline Extraction from Airborne LiDAR Point Clouds, Remote Sens. Lett.*, 2019, 10, 496–505), opartą wyłącznie na analizie geometrycznych cech chmury punktów.

Przetwarzanie rozpoczyna się od automatycznej detekcji i usunięcia punktów odstających, a następnie ręcznego odrzucenia pozostałych błędnie zarejestrowanych punktów (m.in. wielokrotnych ech i artefaktów sprzętowych). Oczyszczone dane poddaje się filtracji wysokościowo-gęstościowej, aby zawęzić je do pasa przybrzeżnego, po czym, za pomocą euklidesowej ekstrakcji klastrów, scala się wyselekcjonowane punkty w spójną chmurę. Kandydatów linii brzegowej wyznacza algorytm oparty na otoczce wypukłej, a ich wiarygodność ocenia się na podstawie średniej odległości: w przypadku ALS względem trajektorii UAV, a w MLS względem ciągu naziemnych punktów kontrolnych rozmieszczonych wzdłuż brzegu.

Natomiast w podejściu fotogrametrycznym wykorzystano lotnicze zdjęcia z kamery UAV, przetwarzając je w ortofotomapę z zachowaniem precyzyjnego osadzenia georeferencyjnego przy użyciu sieci naziemnych punktów kontrolnych GNSS RTK.

Przeprowadzone analizy działania modułu, oparte na danych pochodzących z pomiarów terenowych, potwierdziły wysoką skuteczność zaproponowanego rozwiązania w zakresie precyzyjnego odwzorowywania linii brzegowej. W szczególności zweryfikowano dokładność metod bazujących na różnych źródłach i algorytmach przetwarzania danych przestrzennych.

Dla techniki wykorzystującej dane LiDAR z ALS odnotowano średni błąd położenia linii brzegowej na poziomie 3,36 m ( $p = 0,95$ ). W przypadku zastosowania danych LiDAR z MLS

uzyskano dokładność rzędu 2,43 m ( $p = 0,95$ ). Najwyższą dokładność uzyskano przy ekstrakcji linii brzegowej z ortofotomapy, utworzonej na podstawie zdjęć wykonanych podczas nalotu UAV, z georeferencją opartą na systemie GNSS RTK. Średnia odległość pomiędzy linią referencyjną a linią brzegową (z pomostami) wyznaczoną na ortofotomapie wyniosła jedynie 0,04 m, przy średnim błędzie 0,08 m ( $p = 0,95$ ). Tak uzyskane wyniki jednoznacznie przewyższają wymagania dokładnościowe stawiane pomiarom linii brzegowej w kategorii szczególnej według wytycznych IHO (błąd średni współrzędnych pozycji horyzontalnej  $\leq 5$  m ( $p = 0,95$ )), potwierdzając wysoką jakość działania metody oraz trafność zastosowanych rozwiązań.

Opracowany moduł realizuje innowacyjne podejście do wyznaczania linii brzegowej, integrując dane pozyskane z różnych sensorów w ramach jednolitej metody analizy geometrycznej. Zastosowanie zmodyfikowanej metody Xu (2019), wzbogaconej o uproszczoną parametryzację (Halicki, A.; Specht, M.; Stateczny, A.; Specht, C.; Lewicka, O., *Shoreline Extraction Based on LiDAR Data Obtained Using an USV, TransNav – Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, 2023, 17, 445–453), umożliwia efektywne i zautomatyzowane wydzielenie kształtu brzegu wyłącznie na podstawie struktury chmury punktów. Integracja wyników pomiarów z systemów ALS, MLS oraz danych fotogrametrycznych pozyskanych z UAV pozwala na kompleksową walidację i znacząco zwiększa niezawodność pracy modułu.

Uzyskane wyniki, zweryfikowane m.in. analizą odległości względem linii referencyjnej, spełniają wymogi dokładnościowe najbardziej restrykcyjnej kategorii pomiarowej określonej w standardach hydrograficznych.

Podsumowując, opracowany moduł wyróżnia się wysokim stopniem innowacyjności, wynikającym z umiejętnego dostosowania zaawansowanych algorytmów przetwarzania danych przestrzennych do specyficznych warunków oraz ograniczeń pomiarowych strefy przybrzeżnej. Jego wartość naukowa wynika przede wszystkim z empirycznego potwierdzenia skuteczności zastosowanych rozwiązań algorytmicznych, a także z zastosowania podejścia wielosensorowego, które umożliwia precyzyjne i wiarygodne wyznaczanie linii brzegowej.

**Moduł wielosensorycznej fuzji danych** jest ostatnim modułem funkcjonalnym opisanej w rozdziale metody – integruje wyniki uzyskane we wcześniejszych fazach, prowadząc do powstania jednego, spójnego numerycznego modelu ukształtowania strefy brzegowej. Dopiero kompleksowe połączenie danych głębokowodnych, płytkowodnych oraz lądowych umożliwia uzyskanie pełnego i wiarygodnego obrazu sytuacji przestrzennej badanego obszaru. Na etapie fuzji wykorzystywane są następujące zbiory danych: opracowane dane głębokowodne z echosondy MBES (dla głębszych partii akwenu) oraz – w razie potrzeby – dane uzupełniające z SBES (w rejonach pokrywających się pomiarowo); dane płytkowodne z SBES oraz estymowane z wykorzystaniem modelu regresji SVR (dla strefy najpłytszej); dane LiDAR z systemów ALS i MLS (obejmujące obszar brzegu nad i pod lustrem wody); a także dane fotogrametryczne (ortofotomapa i ewentualnie gęste chmury punktów lądowych), które stanowią dodatkowe źródło informacji wizualnej. Tak skonstruowany wielozbiorowy zestaw danych charakteryzuje się bogactwem źródeł i typów informacji, choć jednocześnie wykazuje znaczne zróżnicowanie pod względem rozdzielczości, zakresu przestrzennego i dokładności.

W związku z tym kluczowym zadaniem modułu fuzji jest zapewnienie spójnej i efektywnej integracji danych – tak, by w pełni wykorzystać atuty poszczególnych zbiorów, takie jak wyższa rozdzielczość, większa dokładność czy szerszy zasięg przestrzenny, a jednocześnie zminimalizować wpływ ich ograniczeń, takich jak nieciągłości pomiarowe, błędy lokalne czy niższe gęstości danych.

Autorka rozwiązała to zadanie w sposób logiczny, dzieląc obszar na strefy głębokościowe i stosując stopniowane uśrednianie wazone podczas łączenia danych.

Proces fuzji – zgodnie z opisem i przedstawionym schematem – realizowany jest oddzielnie dla trzech typów obszarów: w strefach głębszych niż 1 m podstawą są wiarygodne dane z echosondy wielowiązkowej (MBES), uzupełnione pomiarami SBES; w strefach płytszych niż 1 m główną rolę odgrywają dane SBES oraz skorygowane dane fotogrametryczne (z zastosowaniem modelu regresji SVR); natomiast w strefie linii brzegowej i jej otoczeniu zasadnicze znaczenie mają dane LiDAR (z systemów ALS i MLS), zapewniające wysoką rozdzielczość i dokładność odwzorowania.

Dane te są dodatkowo powiązane z ortofotomapą, która może być wykorzystywana zarówno do wizualnej walidacji, jak i do wzbogacenia modelu o teksturę.

Takie podejście zapewnia wykorzystanie najlepszego dostępnego źródła informacji w każdej ze stref: echosondy – w wodach głębokich, kamery fotogrametrycznej – na płycznach, oraz skaningu LiDAR-em – na lądzie i w strefie przejściowej.

Dane pochodzące z różnych źródeł zostały zintegrowane poprzez interpolację na siatce GRID, wykorzystując zmodyfikowaną metodę średniej ważonej odległości IDW (ang. *Inverse Distance Weighting*) w tych obszarach, gdzie występowały strefy nakładania się pomiarów. W praktyce oznacza to utworzenie regularnej siatki GRID (modelu batymetryczno-terenowego), w której wartość w każdym oczku obliczano, uwzględniając wszystkie dostępne punkty pomiarowe z różnych źródeł i przypisując im odpowiednie wagi. Autorka zastosowała oryginalną modyfikację klasycznej metody interpolacyjnej IDW, opierając ważenie nie na standardowo używanej odwrotności odległości, lecz na odwrotności dokładności pomiaru głębokości lub pomiaru współrzędnych prostokątnych płaskich punktu.

Takie nowatorskie podejście było podyktowane potrzebą uwzględnienia nie tylko położenia przestrzennego, ale również jakości danych pomiarowych. Przykładowo, w rejonie przybrzeżnym punkty z SBES charakteryzują się wysoką dokładnością pionową, lecz mniejszą gęstością, natomiast dane fotogrametryczne są znacznie liczniejsze, ale cechuje je większy błąd. Odpowiednie zrównoważenie tych parametrów było kluczowe dla uzyskania spójnego i realistycznego modelu.

Zastosowanie uśredniania ważonego dokładnością pomiaru pozwoliło uniknąć powstawania ostrych granic między danymi pochodzącymi z różnych źródeł. W efekcie uzyskano model o płynnych przejściach pomiędzy kolejnymi strefami (np. MBES–SBES lub SBES–SVR), co zapewnia ciągłość geometryczną oraz wysoką szczegółowość w całym obszarze. Model batymetryczno-terenowy strefy brzegowej w sposób spójny integruje dane morskie i lądowe, eliminując nieciągłości i nienaturalne skoki głębokości. Z metodologicznego punktu widzenia moduł fuzji należy ocenić jako rozwiązanie dojrzałe, przemyślane i w pełni zasadne.

Końcowa fuzja danych została przeprowadzona w środowisku GIS z wykorzystaniem opracowanych danych głębokowodnych, płytkowodnych oraz danych obejmujących linię brzegową, reprezentowanych w postaci warstw wektorowych. W ramach tego procesu zrealizowano kolejno: integrację danych z warstw wektorowych, generowanie siatki GRID (z selekcją oczek, dla których dostępne są dane), przypisanie zintegrowanych danych do komórek siatki GRID, obliczenie głębokości dla każdej komórki z zastosowaniem zmodyfikowanej metody IDW oraz wyznaczenie współrzędnych prostokątnych płaskich dla linii brzegowej.

Podsumowując, proces końcowej fuzji danych w środowisku GIS został zrealizowany z dużą starannością i stanowi przykład efektywnego wykorzystania nowoczesnych narzędzi do integracji danych przestrzennych. Pozwoliło to uzyskać spójny, wysokiej jakości model batymetryczno-terenowy, w pełni spełniający aktualne wymagania dokładnościowe IHO.

### 3.2.2 Uwagi szczegółowe

- ❖ W rozdziale brakuje jednoznacznego wskazania oprogramowania i bibliotek użytych na poszczególnych etapach przetwarzania danych. Przykładowo, nie podano, jaki program wykorzystano do generowania ortofotomapy i chmury punktów – czy zastosowano komercyjne oprogramowanie fotogrametryczne (np. Pix4D lub Agisoft Metashape), czy też rozwiązania typu open source, takie jak OpenDroneMap, bądź może narzędzia autorskie. Podobnie, nie wskazano, w jakim środowisku zaimplementowano algorytm SVR – czy wykorzystano bibliotekę scikit-learn w języku Python, MATLAB, czy też stworzono implementację od podstaw, bazując na literaturze. Z wprowadzenia wiadomo, że całość została finalnie zaimplementowana w środowisku GIS (wspomniane są ArcGIS Pro, QGIS oraz oprogramowanie hydroakustyczne HYPACK). W treści rozdziału pojawiają się również pojedyncze odniesienia do narzędzi, jak np. wykorzystanie funkcji „Merge” w ArcGIS/QGIS do integracji danych batymetrycznych. Jednak przy tak złożonym i wieloetapowym procesie przetwarzania danych, zasadne byłoby precyzyjne wyszczególnienie wszystkich zastosowanych narzędzi i bibliotek – dla każdego etapu osobno. Tego typu informacje są szczególnie istotne z perspektywy powtarzalności badań. Przykładowo, wskazanie, że do filtracji chmur punktów wykorzystano pakiet LAStools lub PDAL, a do wizualizacji i edycji – CloudCompare czy moduły GRASS GIS – pozwoliłoby innym badaczom szybciej zreplikować procedurę i ocenić, na ile jest uniwersalna. Równie istotne byłoby doprecyzowanie, w jakim środowisku trenowano i dostrajano model SVR – czy był to Python (i jeśli tak, to jaka biblioteka: scikit-learn, TensorFlow, PyTorch), czy może R (pakiet e1071), bądź inne narzędzie. Choć brak takich informacji nie wpływa bezpośrednio na poprawność naukową rozdziału, należy traktować go jako niedociągnięcie edytorskie. W dobie rosnącego znaczenia replikowalności badań naukowych, szczegółowa dokumentacja środowiska obliczeniowego i stosowanych narzędzi stanowi ważny element rzetelnej prezentacji metody badawczej.
- ❖ Zastosowanie SVR jako narzędzia predykcji głębokości zostało szczegółowo opisane, jednak nie odniesiono się do innych metod regresji opartych na uczeniu maszynowym, które mogłyby stanowić alternatywę lub punkt odniesienia dla zaprezentowanego rozwiązania. Wśród takich metod można wymienić np.: Random Forest Regression (RFR), Gradient Boosting Machines (GBM), Multilayer Perceptron (MLP) czy Radial Basis Function Networks (RBF). Dobrym uzupełnieniem byłaby zwięzła tabela benchmarkowa (np. RMSE (ang. *Root Mean Square Error*), MAE (ang. *Mean Absolute Error*),  $R^2$  (ang. *Coefficient of Determination*)) zestawiająca wyniki SVR z wymienionymi algorytmami, co pozwoliłoby obiektywnie ocenić przewagę wybranej metody.
- ❖ Na str. 65 zapisano, że odpowiedniki dla punktów profili sondażowych, w których pozycję i głębokość wyznaczono metodą geodezyjną przy użyciu odbiornika GNSS RTK, ustalono w chmurze SfM przez uśrednianie głębokości punktów leżących w promieniu  $\pm 10$  cm od tych pozycji. Ponieważ w tekście nie wyjaśniono, skąd wzięto tę konkretną wartość bufora, proszę Autorkę o odniesienie się podczas obrony do dwóch kwestii:
  - 1) Dlaczego przyjęto promień 10 cm, a nie np. 5 cm czy 20 cm?
  - 2) W jaki sposób ta wartość bufora koresponduje z gęstością chmury SfM, deklarowaną dokładnością pomiarów GNSS RTK oraz w jakim stopniu może wpłynąć na dokładność końcowego modelu batymetrycznego?
- ❖ Wzory (2.6–2.8) prezentują klasyczne macierze rotacji względem osi X, Y i Z z użyciem wspólnego oznaczenia kąta  $\theta$ . W rozdziale szczegółowo wyjaśniono sposób obliczenia tego kąta jedynie dla osi Z, natomiast nie odniesiono się do sposobu wyznaczenia rotacji wokół osi X i Y.

- ❖ W oznaczeniach używanych w równaniach – we wzorach (2.6)–(2.12), (2.16)–(2.18), (2.20)–(2.25) – nie zachowano konwencji zapisu typowych dla tekstów naukowych z zakresu matematyki stosowanej: symbole wektorów i macierzy powinny być pogrubione i niepochylone, co jednoznacznie odróżnia je od skalarnych wielkości. Obecne użycie kursywy dla wszystkich zmiennych może wprowadzać niejednoznaczność interpretacyjną.
- ❖ W opisie statystyki gęstości punktów pojawiają się nielogiczne sformułowania, np. „0.69 punkta” lub „1.82 punkta”. Ponieważ punkt jest jednostką niepodzielną, wartości te należy zaokrąglić do liczb całkowitych albo podawać jako liczbę punktów przypadających na określoną powierzchnię.
- ❖ Na rys. 2.21 i 2.25 występuje nieścisłość terminologiczna – zamiast poprawnego określenia „klastery” użyto błędnie „raster”, mimo że ilustracje dotyczą wyników klasteryzacji, a nie danych rastrowych.
- ❖ W tekście występują, tak jak w pierwszym rozdziale, błędy fleksyjne polegające na użyciu formy „tą” zamiast poprawnej „tę”, np. „tą metodę” (str. 50), „tą własność” (str. 64), „tą odległość” (str. 90), „tą samą głębokość” (str. 90).

### 3.2.3 Podsumowanie

Rozdział drugi został przygotowany bardzo starannie i prezentuje całościowe, dobrze przemyślane rozwiązania dotyczące monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej. Przedstawione przez autorkę metody są nowoczesne i w pełni zgodne z aktualnym stanem badań w dziedzinie hydroakustyki, fotogrametrii oraz teledetekcji. Na każdym etapie procesu przetwarzania danych autorka wykazuje się konsekwencją i rzetelnością w uzasadnianiu wyboru zastosowanych rozwiązań – potrzeba filtracji danych z echosond wynika z obecności szumów i wartości odstających, typowych dla pomiarów hydroakustycznych; wybór transformacji Bursa–Wolf dla danych fotogrametrycznych opiera się na jej powszechnym wykorzystaniu i potwierdzonej skuteczności w praktyce geodezyjnej; natomiast wdrożenie algorytmu SVR jest motywowane występowaniem zjawiska refrakcji w optycznych pomiarach batymetrycznych, nieuwzględnianego przez metody tradycyjne, a skutecznie kompensowanego przez zaproponowaną metodę. We wszystkich zaprezentowanych modułach funkcjonalnych widoczna jest spójna, przemyślana logika przetwarzania danych: najpierw maksymalne wykorzystanie potencjału poszczególnych sensorów poprzez oczyszczenie i kalibrację danych źródłowych, a następnie ich integracja – z uwzględnieniem dokładności pomiarowej – w celu zniwelowania ograniczeń charakterystycznych dla każdej z technik pomiarowych z osobna.

Na szczególne uznanie zasługuje fakt, iż autorka nie ogranicza się wyłącznie do jakościowego opisu zastosowanych metod, lecz prezentuje także wyniki liczbowe o charakterze statystycznym, jednoznacznie potwierdzające ich skuteczność. Przedstawione dokładności pomiarów – zarówno batymetrycznych (rzędu kilku do kilkunastu centymetrów), jak i odwzorowania linii brzegowej (około 0,05 m) – należy uznać za bardzo wysokie i w pełni satysfakcjonujące z praktycznego punktu widzenia. Istotne jest również to, że wszędzie tam, gdzie prezentowane są parametry dokładnościowe, autorka podaje także poziom ufności (najczęściej 95%), co stanowi nieodzowny element rzetelnej prezentacji wyników, często pomijany w mniej dopracowanych opracowaniach. Takie podejście znacząco podnosi wartość analizy – czytelnik otrzymuje jasną informację, czy podawana dokładność odnosi się do odchylenia standardowego, błędu maksymalnego, czy też wartości mieszczącej się w przedziale ufności.

Jednym z wyróżniających się elementów rozdziału jest wysoki stopień innowacyjności, zwłaszcza w zakresie implementacji modelu SVR. W literaturze z zakresu hydrografii rzadko spotyka się wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego do korekcji danych batymetrycznych – tymczasem autorka przekonująco wykazała, że metody te mogą zostać

z powodzeniem zaadaptowane do konkretnych problemów inżynierskich. Takie podejście – łączące wiedzę z obszaru geoinformatyki, hydrografii i nauki o danych (ang. *data science*) – świadczy o wysokim poziomie interdyscyplinarności pracy i może stanowić wartościowy punkt odniesienia dla przyszłych badań w tej dziedzinie.

Styl prezentacji jest rzeczowy, klarowny i spójny. Całość tworzy logiczną narrację, prowadzącą czytelnika od surowych danych do kompletnego modelu batymetrycznego. Rozdział spełnia swoją funkcję – dostarcza pełnego obrazu zaproponowanej metody, zawierając zarówno uzasadnienie poszczególnych kroków, jak i precyzyjne wyniki. Wnioski płynące z tego opracowania są jednoznaczne: integracja danych z wielu źródeł istotnie zwiększa możliwości monitoringu batymetrycznego w strefie brzegowej, a zaproponowana przez autorkę metoda pozwala uzyskać wysoką dokładność odwzorowania ukształtowania dna i linii brzegowej, podnosząc jakość oraz spójność pomiarów zarówno w odniesieniu do każdego źródła z osobna, jak i w ujęciu całościowym.

Zgłoszone uwagi szczegółowe mają charakter redakcyjny lub uzupełniający i w żaden sposób nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę merytoryczną rozdziału.

### **3.3 Rozdział trzeci – „Model transformacji danych geoprzestrzennych w zintegrowanym środowisku GIS”**

#### **3.3.1 Merytoryczna charakterystyka i ocena**

Rozdział trzeci pracy pt. „Model transformacji danych geoprzestrzennych w zintegrowanym środowisku GIS” przedstawia proces wdrażania do praktycznego zastosowania oraz weryfikację zaproponowanej metody modelowania powierzchni terenu w strefie brzegowej w oparciu o fuzję danych batymetrycznych, fotogrametrycznych i lidarowych pozyskanych przy użyciu bezzałogowych platform pomiarowych.

Badania przeprowadzono na dwóch kontrastujących akwenach – w strefie przybrzeżnej Morza Bałtyckiego (plaża miejska w Gdyni) oraz na jeziorze Kłodno – co pozwoliło ocenić skuteczność metody zarówno w warunkach morskich, jak i śródlądowych. Wybór jeziora Kłodno umożliwił wykorzystanie pełnego zestawu dostępnych sensorów podczas jednej kampanii pomiarowej. Zebranie tak szerokiego spektrum danych z użyciem nowoczesnych autonomicznych platform nawodnych i powietrznych znacząco podniosło wartość empiryczną i walidacyjną badań, a także wzmocniło ich wiarygodność i znaczenie naukowe.

Autorka szczegółowo dokumentuje wykorzystywane platformy i urządzenia pomiarowe, w tym jednostki USV („AutoDron”, „HydroDron”), UAV (DJI Phantom 4 RTK, Aurelia X8 Standard LE), zestawy GNSS RTK, systemy inercyjne INS/IMU (ang. *Inertial Navigation System/Inertial Measurement Unit*), echosondy (SBES, MBES), skanery LiDAR oraz kamery cyfrowe, wskazując zarówno ich parametry techniczne, jak i warunki operacyjne zastosowania. Tak kompleksowa charakterystyka aparatury pomiarowej z kolei znacząco zwiększa transparentność prowadzonych badań oraz pozwala czytelnikowi w pełni zrozumieć kontekst zbierania i analizy danych.

Procedura fuzji opiera się na średniej ważonej, w której wagi poszczególnych źródeł danych określono na podstawie deklarowanych przez producenta dokładności urządzeń pomiarowych. W celu oceny wpływu parametrów fuzji na wynikowe modele numeryczne zastosowano funkcję wagową w dwóch wariantach – z wykładnikiem potęgi o wartościach równych 1 i 2.

Analiza wykazała, że zmiana wartości wykładnika nie wpływa znacząco na skrajne głębokości modeli numerycznych, co wskazuje na stabilność i odporność metody na dobór parametrów agregacyjnych. Należy jednak zauważyć, że przyjęta metoda ważenia oparta wyłącznie na danych producentów nie uwzględnia możliwych błędów systematycznych ani wpływu

warunków środowiskowych, co ogranicza jej uniwersalność. Niemniej jednak podejście to jest pragmatyczne i dobrze uzasadnione w kontekście empirycznej walidacji.

Wyniki pięciu kampanii pomiarowych tworzą spójny obraz skuteczności opracowanego modelu fuzji. Bazują one na zestawie miar dokładności, obliczonych jako różnice pomiędzy głębokościami uzyskanymi w wyniku fuzji danych a pomiarami referencyjnymi.

Na jeziorze Kłodno, podczas pierwszej kampanii z 2022 r., uzyskano RMSE rzędu 1 cm i  $R^2 \approx 0,99$ . Pomiary z lat 2023 i 2024 przyniosły dalszą poprawę: RMSE obniżyło się do kilku milimetrów, MAE do około 2,5 cm, a  $R^2$  osiągnęło wartość 1,0. Miary rozrzutu R68 i R95 (promienie błędu obejmujące odpowiednio 68% i 95% obserwacji) mieściły się w przedziale 0,02–0,11 m, co oznacza, że nawet najbardziej oddalone punkty odbiegały od wartości referencyjnych najwyżej o kilkanaście centymetrów. Ponad 90% obserwacji charakteryzowało się bezwzględnym błędem głębokości nieprzekraczającym 0,1 m.

W strefie przybrzeżnej Bałtyku, gdzie zmienność hydrodynamiczna jest większa, model również zachował dokładność zgodną z wymaganiami kategorii szczególnej IHO. W kampanii z czerwca 2022 r. uzyskano RMSE na poziomie około 1–2 cm i  $R^2 \approx 0,7$ , natomiast jesienią 2023 r. RMSE wzrosło do około 4 cm, a  $R^2$  spadło do  $\approx 0,63$ . Jednoczesny wzrost R68 (do 0,232m) i R95 (do 0,356 m) wskazuje, że największe odchylenia koncentrują się na płycznach oraz w strefie falowania, gdzie pomiary SBES i korekcja prędkości dźwięku w wodzie są najbardziej podatne na zmienność środowiskową.

Podsumowując, opracowany model fuzji danych zapewnia bardzo wysoką dokładność na akwenach śródlądowych oraz zadowalającą na akwenach morskich, spełniając wymagania najbardziej restrykcyjnych standardów hydrograficznych. Powtarzalność wyników między kolejnymi kampaniami świadczy o wysokiej wiarygodności i uniwersalności metody, choć jej skuteczność w środowisku morskim może być ograniczana przez czynniki hydrodynamiczne.

### 3.3.2 Uwagi szczegółowe

- ❖ W rozdziale, w tym również w tytule podrozdziału 3.1, wielokrotnie użyto określenia „batymetryczno-fotogrametryczne”, pomijając istotny udział danych LiDAR (ALS i MLS), które nie należą do metod fotogrametrycznych, lecz są przykładem aktywnej teledetekcji. Dla zachowania precyzji terminologicznej oraz lepszego oddania charakteru analizowanych danych zasadne byłoby stosowanie określenia „batymetryczno-fotogrametryczno-lidarowe” lub – bardziej ogólnie – „wielosensorowe”, co odzwierciedlałoby złożony charakter zastosowanych źródeł pomiarowych.

### 3.3.3 Podsumowanie

Rozdział trzeci pełni kluczową rolę aplikacyjną w rozprawie – autorka przedstawia w nim oryginalne badania empiryczne, przeprowadzone z wykorzystaniem nowoczesnych platform i urządzeń pomiarowych oraz dokonuje rzetelnej oceny skuteczności zaproponowanej metody fuzji danych geoprzestrzennych. Niezależne kampanie pomiarowe, zrealizowane przy użyciu różnych urządzeń i w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, w połączeniu z systematyczną walidacją wyników – zarówno statystyczną, jak i przestrzenną – potwierdzają wysoki poziom dokładności, spójności i zgodności referencyjnej uzyskanych modeli batymetrycznych obszaru granicznego pomiędzy środowiskiem lądowym a wodnym. Rozdział ten stanowi dobrze udokumentowany dowód skuteczności implementacyjnej opracowanej metody fuzji danych geoprzestrzennych w środowisku GIS i jest istotnym składnikiem końcowej oceny rozprawy.

Na marginesie – podobnie jak w przypadku rozdziałów pierwszego i drugiego – drobna uwaga redakcyjna dotycząca terminologii nie wpływa w najmniejszym stopniu na ocenę rozdziału.

Można wręcz uznać, że stanowi ona już formalny akcent w recenzji, bez którego ocena nie byłaby kompletna.

### **3.4 Wnioski końcowe rozprawy**

Wnioski końcowe pracy zostały przejrzyście sformułowane i są ściśle powiązane z przeprowadzonymi badaniami. Autorka w przekonujący sposób wykazała zalety opracowanej metody monitoringu strefy brzegowej opartej na fuzji wielomodalnych danych, szczególnie w zakresie redukcji nadmiarowych danych, wysokiej elastyczności rozwiązania oraz skuteczności zastosowania zarówno na obszarach morskich, jak i śródlądowych. Podkreślono parametryczny charakter metody oraz znaczenie odpowiedniego doboru parametrów w procesie budowy modelu fuzji.

Na uwagę zasługuje trafna identyfikacja ograniczeń – zwłaszcza w odniesieniu do dokładności głębokości pozyskiwanych z wykorzystaniem metody SVR – oraz podkreślenie roli mechanizmu ważenia w minimalizowaniu wpływu danych obciążonych większymi błędami. Słusznie zaakcentowano, że ekstrakcja linii brzegowej powinna opierać się przede wszystkim na ortofotomapach, a skaniny mobilny umożliwi dokładniejsze odwzorowanie przebiegu granicy ląd–woda niż skaniny lotniczy. Wnioski wskazują również na wysoką dokładność modelu fuzji (błąd określenia głębokości wynosi 0,111 m przy poziomie ufności 95%), co potwierdza zgodność z wymaganiami kategorii specjalnej IHO S-44. Właściwie uzasadniono także wybór zdecentralizowanego podejścia do fuzji, wynikający z konieczności stałego nadzoru nad procesem integracji danych.

Ważnym elementem podsumowania jest wskazanie kierunków dalszych badań – takich jak wprowadzenie nowych sensorów (np. batymetrycznego LiDAR-u), rozwój algorytmów głębokiego uczenia, automatyzacja przetwarzania danych czy testowanie metody w różnych warunkach środowiskowych i na różnych typach akwenów. Słusznie podkreślono również potrzebę rozwoju fotogrametrycznych metod wyznaczania głębokości na bardzo płytkich akwenach oraz prowadzenia długoterminowej analizy zmian ukształtowania strefy brzegowej i przebiegu linii brzegowej.

Podsumowując, wnioski końcowe zostały przygotowane w sposób rzetelny, kompleksowy i wyczerpujący. Stanowią solidną podstawę do dalszych badań i rozwoju przedstawionej metody, przyczyniając się do poszerzenia możliwości monitoringu i zarządzania strefą brzegową w różnych warunkach hydrometeorologicznych oraz na zróżnicowanych akwenach.

## **4 Wnioski końcowe recenzji**

Rozprawa została przygotowana z dużą starannością i cechuje się wysokim poziomem merytorycznym. Autorka posługuje się klarownym i precyzyjnym językiem naukowym, zachowując przy tym komunikatywność i przejrzystość wyводу. Przedstawiona praca zawiera liczne elementy nowatorskie, w szczególności w zakresie opracowanej metody fuzji danych geoprzestrzennych uwzględniającej ich dokładność oraz integracji danych hydroakustycznych i optoelektronicznych w ramach złożonego, wieloetapowego procesu.

Nowa metoda monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej wyróżnia się na tle dotychczasowych rozwiązań zarówno zakresem analiz, jak i zastosowaniem nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, w tym elementów uczenia maszynowego. Autorka wykazała się doskonałą znajomością zagadnień z zakresu hydrografii, teledetekcji, geodezji oraz systemów informacji przestrzennej. Szeroki zakres przeprowadzonych analiz, trafny dobór metod przetwarzania danych, umiętność ich integracji oraz krytyczne podejście do interpretacji wyników modelowania powierzchni terenu świadczą o wysokich kompetencjach badawczych i naukowej dojrzałości.

Rozprawa nosi znamiona samodzielnej i oryginalnej pracy naukowej. Autorka samodzielnie opracowała innowacyjną metodę monitoringu batymetrycznego strefy brzegowej, aktywnie uczestnicząc zarówno w projektowaniu, jak i realizacji kampanii pomiarowych oraz w analizie uzyskanych wyników. Opracowane przez nią rozwiązanie zostało skutecznie zaimplementowane i kompleksowo zwalidowane w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, co potwierdza rzetelność oraz profesjonalizm wykonanych prac badawczych. Uwzględniając znaczący wkład rozprawy w rozwój metod pozyskiwania, przetwarzania i integracji danych geoprzestrzennych na potrzeby hydrografii oraz jej wysoki potencjał aplikacyjny, należy uznać ją za istotne osiągnięcie w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w ramach dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzam, że rozprawa doktorska **spełnia wymagania** określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.). W związku z tym **kieruję do Wysokiej Rady Naukowej Wydziału Nawigacyjnego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni wniosek o dopuszczenie Pani mgr Oktawii Specht do publicznej obrony rozprawy doktorskiej**, a także – uznając szczególną wartość naukową i aplikacyjną pracy – **wnoszę o przyznanie jej wyróżnienia.**

Gdynia, dnia 10 czerwca 2025 r.

Recenzent

*Krzysztof Naus*

dr hab. inż. Krzysztof Naus, prof. AMW  
Katedra Nawigacji i Hydrografii Morskiej  
Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego  
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte  
ul. Śmidowicza 69  
81-127 Gdynia

