

R e c e n z j a **rozprawy doktorskiej mgra Patryka Sapiegi**

pt. „Aplikacja systemu modeli do prognozowania falowania i jego skutków w obszarze południowego Bałtyku”, przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Tamary Zalewskiej w Zakładzie Oceanografii i Monitoringu Bałtyku Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej — Państwowego Instytutu Badawczego

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo dra hab. Artura Magnuszewskiego, prof. UW, Przewodniczącej Rady Naukowej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej — Państwowego Instytutu Badawczego z dnia 28.04.2025. Główne części recenzji dotyczą oceny oryginalności pracy, trafności doboru i sposobu rozwiązania postawionego problemu naukowego, możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników, a także ogólnego poziomu wiedzy teoretycznej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Pana magistra Patryka Sapieę.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest implementacja i kalibracja modelu SWAN – numerycznego modelu prognostycznego falowania wiatrowego – dla południowego Bałtyku, wraz z analizą jego możliwości odwzorowania rzeczywistych warunków falowych. Dodatkowo, w ramach pracy opracowano implementacje dwóch narzędzi wykorzystujących wyniki modelu SWAN: modelu SWANOneSed, służącego do modelowania transportu osadu i morfodynamicznej przebudowy dna morskiego, oraz modelu SWAN-Ruggiero, pozwalającego na analizę nabiegania fal i zalewania strefy brzegowej.

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) to spektralny model falowania trzeciej generacji, opracowany na początku lat 90. XX wieku na Uniwersytecie Technicznym w Delft. Opisuje on ewolucję falowania wiatrowego w wodach płytkich i strefie przybrzeżnej na podstawie równania transportu gęstości działania falowego, która stanowi miarę energii fal. Model uwzględnia główne procesy fizyczne wpływające na pole falowe, takie jak generacja przez wiatr, nieliniowe interakcje składowych falowych, refrakcja, dyfrakcja, załamywanie się fal oraz tłumienie energii przez dno. Dalszy rozwój SWAN odbywał się w ramach współpracy międzynarodowej, m.in. w grupie WISE (WAVE modeling group for Intermediate and Shallow water Environments), co przyczyniło się do jego szerokiego zastosowania w badaniach naukowych i inżynierii morskiej.

Model SWAN jest w pełni funkcjonalnym, gotowym do użycia narzędziem numerycznym, które najczęściej wykorzystywane jest bez potrzeby ingerencji w jego kod źródłowy. Implementacja modelu przez użytkownika polega przede wszystkim na przygotowaniu odpowiednich danych wejściowych oraz konfiguracji parametrów obliczeń. Kluczowym elementem jest dobór pól wiatrowych, które stanowią główny czynnik generujący falowanie, oraz danych batymetrycznych opisujących ukształtowanie dna. Użytkownik definiuje układ współrzędnych, siatkę obliczeniową i jej roz-

dzielczość przestrzenną, a także dokonuje dyskretyzacji dziedziny widmowej, tj. zakresu częstotliwości i kierunków propagacji fal. W procesie konfiguracji ustalane są również długości kroków czasowych: wewnętrznego (obliczeniowego) oraz tego, z jaką częstotliwością zapisywane będą wyniki symulacji.

W ramach implementacji użytkownik decyduje, jakie wielkości opisujące pole falowe (np. wysokość fali znacznej, okresy charakterystyczne, kierunki propagacji) będą umieszczane w plikach wyjściowych, a także czy i w jakich punktach domeny mają być zapisywane widmowe gęstości energii falowania. Istotnym etapem przygotowania symulacji jest wybór parametrów i opcji modelu fizycznego — użytkownik może aktywować lub pominąć określone procesy (np. załamywanie fal, dyfrakcję, tłumienie przez dno) oraz wybrać konkretne sparametryzowania procesów źródłowych. Taka elastyczność pozwala na dostosowanie modelu do specyfiki danego obszaru i dostępnych danych, a jednocześnie umożliwia optymalizację kosztów obliczeniowych.

Choć implementacja i kalibracja modelu przy użyciu danych obserwacyjnych może być złożonym, nietrywialnym zadaniem wymagającym doświadczenia i wiedzy merytorycznej, w wielu przypadkach sprowadza się do procedury o charakterze technicznym. Możliwe jest bowiem zastosowanie domyślnych ustawień modelu lub wykorzystanie konfiguracji opracowanych wcześniej przez innych użytkowników czy instytucje.

Szukając tzw. „wartości dodanej” wykraczającej poza samą implementację i weryfikację modelu falowego, można wskazać dwa możliwe kierunki dalszych działań: (i) długoterminowe modelowanie retrospektywne i analiza statystyczna danych falowych w celu określenia klimatu falowego danego akwenu, oraz (ii) opracowanie operacyjnego systemu prognozowania falowania, obejmującego automatyczne zasilanie modelu bieżącymi danymi wiatrowymi, przetwarzanie i wizualizację danych wyjściowych oraz udostępnianie wyników wybranym odbiorcom (np. służbom morskim) lub w domenie publicznej.

W przypadku recenzowanej rozprawy mamy do czynienia z podejściem drugim — autor nie prowadził analiz statystycznych charakteryzujących długoterminowe pola falowe, ani nie badał szczegółowo przebiegu wybranych zdarzeń sztormowych w różnych rejonach południowego Bałtyku. W pracy przedstawiono jedynie wyniki walidacji modelu na podstawie porównań z danymi obserwacyjnymi dla stosunkowo krótkich okresów. Co istotne, autor nie przedstawił żadnych statystyk opisujących same dane modelowe (np. średnich wartości, wartości maksymalnych, odchyłeń standardowych czy rozkładów), ograniczając się wyłącznie do prezentacji statystyk błędów względem obserwacji. Przeprowadzone analizy porównawcze mają charakter podstawowy i obejmują ocenę zgodności danych modelowych z obserwacjami za pomocą standardowych miar statystycznych: średniego błędu systematycznego (BIAS), definiowanego jako różnica między średnią wartością modelowaną a obserwowaną, średniego błędu kwadratowego (RMSE), będącego pierwiastkiem z wartości średniej kwadratu błędów, oraz współczynnika rozrzutu (SI), obliczanego jako stosunek RMSE do średniej wartości obserwowanej. Jakość dopasowania danych modelowanych do obserwacji została również oceniona przy użyciu współczynnika korelacji Pearsona (R), opisującego siłę liniowego związku między danymi, oraz wskaźnika zgodności Wilmotta (I_A), który mierzy ogólną zgodność modelu z danymi obserwacyjnymi, uwzględniając wielkość odchyłeń względem średnich obserwacji. Dodatkowo, autor przedstawił wyniki porównań danych modelowanych z użyciem różnych parametryzacji z obserwacjami na diagramach Taylora, umożliwiającym jednoczesną ocenę zgodności w zakresie korelacji, amplitudy i zmienności.

Krótką charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji dysertacja doktorska ma formę opracowania, którego podstawę stanowi jednotematyczny cykl trzech publikacji naukowych, uzupełniony rozbudowanym wprowadzeniem. Wprowadzenie składa się z następujących części:

- streszczenia w języku polskim i angielskim,
- tezy i celów rozprawy doktorskiej (rozdz. 1),
- opisu i wyników badań stanowiących podstawę dysertacji (rozdz. 2),
- omówienia aspektów aplikacyjnych wyników badań (rozdz. 3),
- wniosków końcowych (rozdz. 4),
- bibliografii,
- opisu dorobku naukowego,
- kopii publikacji naukowych wchodzących w skład rozprawy,
- pisemnych oświadczeń współautorów publikacji naukowych.

Całość poprzedza spis treści. Na 43 stronach tekstu wprowadzającego omówiono w sposób syntetyczny zakres przeprowadzonych badań, choć niektóre fragmenty opisu mogą budzić wątpliwości interpretacyjne. Konstrukcja pracy jest zwarta, przejrzysta i typowa dla rozpraw doktorskich opartych na cyklu tematycznie spójnych publikacji.

We wprowadzeniu w języku polskim autor przedstawia ogólną koncepcję pracy oraz opisuje kolejne etapy jej realizacji. Określa cele rozprawy oraz podejmuje próbę sformułowania tezy. Moim zdaniem cele zostały ujęte w sposób jasny i zrozumiały, natomiast teza nie jest wystarczająco wyrazista, co można częściowo usprawiedliwić faktem, że zasadniczym przedmiotem pracy jest implementacja i walidacja gotowych modeli numerycznych. Wprowadzenie zawiera ogólny opis procesu kalibracji, optymalizacji i walidacji wdrożonych modeli. Autor wskazuje źródła danych wiatrowych, które stanowiły wejście do modeli, oraz danych obserwacyjnych, wykorzystanych do oceny dokładności ich działania. W części tej zawarte są również pewne informacje dotyczące parametryzacji modelowanych procesów fizycznych, które autor opisuje, posługując się żargonowym określeniem „fizyka”, zaczerpniętym z praktyki użytkowników modeli wykorzystanych w rozprawie.

Niestety, wprowadzenie, jako integralna część rozprawy doktorskiej, posiada szereg istotnych mankamentów. Styl językowy oraz klarowność opisów mogłyby być zdecydowanie lepsze. Również pod względem edytorskim tekst pozostawia wiele do życzenia. Skład tekstu, zwłaszcza sposób zapisu wyrażeń matematycznych, miejscami odbiega od standardów edytorskich typowych dla prac naukowych z dziedziny nauk technicznych i przyrodniczych. W licznych fragmentach tekstu autor nie stosuje konsekwentnie subskryptów, superskryptów ani pochyłej czcionki w oznaczeniach wielkości fizycznych i zmiennych, co obniża czytelność i estetykę zapisu. Pojawiają się przy tym rażące przykłady, takie jak oznaczenie jednostki prędkości wiatru jako „m s-1” (w publikacji I), co może świadczyć o braku odpowiedniej korekty autorskiej, tym bardziej zaskakującym, że autor jest jednocześnie pierwszym i korespondencyjnym autorem tej publikacji. We wzorach [1]–[5] występują sumy po indeksie i , który jednak nie pojawia się w wyrażeniach sumowanych. Na stronie 17 autor błędnie podaje częstotliwość procesora Intel jako 2000 mHz, co odpowiada wartości 2 Hz zamiast 2000 MHz, i oznacza błąd o dziewięć rzędów wielkości. Tego rodzaju oczywiste pomyłki powinny zostać wychwycone już na etapie korekty autorskiej. W odniesieniach do zapisach celów rozprawy, raz stosuje cyfry arabskie, a innym razem rzymskie, co utrudnia śledzenie struktury wy-

wodu. Powyższe przykłady to tylko niektóre spośród wielu uchybień redakcyjnych, które świadczą o braku staranności i precyzji autora.

Istotnym mankamentem rozprawy jest także nieprzemyślane stosowanie nazw roboczych parametrów i zmiennych. Oczywiście, nie ma potrzeby definiowania każdej zmiennej w tekście pracy, zwłaszcza w przypadku wielkości powszechnie znanych w danej dziedzinie. Jednak w recenzowanej pracy autor wprowadza liczne, wieloznakowe oznaczenia techniczne, które, jak można przypuszczać, pochodzą z dokumentacji użytkownika i wywodzą się z konwencji przyjętych w kodzie źródłowym modeli. Oznaczenia te są stosowane bez podania ich definicji, mimo że — w przeciwieństwie do wielkości powszechnie znanych — nie mają one charakteru uniwersalnego i mają wyraźnie roboczy charakter, co dodatkowo utrudnia odbiór treści. Oznaczenia te bywają zapisywane w różnych wariantach (małymi lub wielkimi literami), nie są ze sobą spójne i mogą być zrozumiałe jedynie dla wąskiej grupy specjalistów pracujących z danym modelem. W mojej ocenie zabrakło próby uporządkowania i zdefiniowania stosowanych oznaczeń oraz pojęć. Opracowanie przejrzystego, spójnego i dobrze wyważonego systemu symboli i terminów, obejmującego zarówno dobór oznaczeń, jak i decyzję, które pojęcia należy explicite zdefiniować, a które można pozostawić bez definicji, ze względu na ich powszechność, jest zadaniem wymagającym wiedzy merytorycznej, staranności oraz dobrej orientacji w konwencjach przyjętych w danej dziedzinie. Ta uwaga o oznaczeniach dotyczy zarówno wprowadzenia w języku polskim, jak i publikacji anglojęzycznych, które stanowią zasadniczą część rozprawy.

W tekście wprowadzenia można znaleźć również inne uchybienia świadczące o braku uważnej korekty końcowej. Przykładowo, w drugim wierszu ostatniego akapitu na stronie 7 znajduje się tymczasowa wstawka w nawiasie, mająca przypomnieć o konieczności uzupełnienia odniesienia literaturowego, która jednak nie została usunięta w wersji ostatecznej.

Publikacje wchodzące w skład dysertacji doktorskiej:

1. Sapięga P., Zalewska T., Struzik P., (2023). Application of SWAN model for wave forecasting in the southern Baltic Sea supplemented with measurement and satellite data. *Environmental Modelling and Software*, **163**, 105624.
2. Sapięga P., Zalewska T., Bochenek B., (2023). The applicability of ALARO and AROME wind-fields in multi-scale waves forecasting in open sea and coastal areas of the southern Baltic Sea. *Ocean Engineering*, **287**, 116050.
3. Sapięga P., Zalewska T., (2024). Application of the high-resolution wave model for forecasting 1D sediment transport and beach inundation as a component of a short-term storm warning system. *Environmental Modelling and Software*, **179**, 106089.

Sumaryczna punktacja tych publikacji:

Całkowity Impact Factor (stan na 2024 r.): 14,8 (4,9; 5,0; 4,9)

Suma punktów MEiN: 420 (140; 140; 140)

Publikacja 1

Pierwsza publikacja, oparta na danych meteorologicznych z modelu COSMO, dotyczy implementacji i weryfikacji spektralnego modelu falowania SWAN w południowej części Morza Bałtyckiego. W pracy przeprowadzono testy kilku zestawów parametryzacji procesów fizycznych (Westhuysen, Komen, Janssen, ST6), a następnie, po wyborze najlepiej dopasowanej wersji (ST6), przeprowa-

dzono walidację modelu przy użyciu danych pomiarowych i satelitarnych w punktach reprezentujących strefy głęboką i przybrzeżną. Uzyskane współczynniki korelacji istotnie przekraczały 0,95 w otwartym morzu oraz 0,75 w strefie przybrzeżnej. W artykule opisano także proces wdrożenia modelu w trybie operacyjnym oraz wykonano wielopunktową rekonstrukcję warunków falowych w wybranych lokalizacjach na Bałtyku. Na tej podstawie określono charakterystyki falowania (średnie: wysokość, okres, kierunek propagacji, stromość i długość fali) oraz wskazano ich potencjalne znaczenie dla energetyki morskiej i planowania inwestycji w strefie brzegowej.

Publikacja 2

Druga publikacja dotyczy implementacji dwóch niezależnych operacyjnych systemów prognozowania falowania w południowej części Bałtyku, opartych na modelu SWAN zasilanym polami wiatru o różnej rozdzielczości przestrzennej: 4 km (model ALARO, domena całego Bałtyku) oraz 2 km (model AROME, domena Bałtyku Południowego). W pracy przeprowadzono optymalizację konfiguracji modelu, obejmującą dobór parametrów numerycznych i fizycznych, takich jak krok czasowy, liczba iteracji, współczynnik skalowania wiatru, parametry dyssypacji i formuła rozkołysu. Na podstawie porównań z danymi pomiarowymi oraz wynikami systemu referencyjnego (SWAN-COSMO) wskazano optymalne konfiguracje, które charakteryzują się wysokimi współczynnikami korelacji i niskimi błędami RMSE dla wysokości i okresu fali. Wykazano, że samodzielny model o wysokiej rozdzielczości (AROME) zapewnia podobną dokładność prognoz jak system zagnieżdżony, przy krótszym czasie obliczeń i większej niezależności operacyjnej. Szczególną uwagę zwrócono na lepsze odwzorowanie warunków falowych w rejonach o złożonej linii brzegowej i ograniczonej ekspozycji na fale, takich jak Zalew Wiślany, Zatoka Pucka czy Mierzeja Helska. Ostatecznie zaproponowano dwa niezależne systemy operacyjne dla różnych domen jako rozwiązanie zwiększające niezawodność prognozowania w warunkach operacyjnych.

Publikacja 3

Trzecia publikacja dotyczy opracowania i walidacji narzędzi do prognozowania skutków sztormów na wybrzeżu południowego Bałtyku. Autorzy połączyli wysokorozdzielczy model falowania SWAN zasilany polami wiatru z modelem AROME z modelem transportu rumowiska SWANOneSed oraz z uproszczonym modelem wykorzystującym formułę Ruggiero do prognozy zasięgu zalewu strefy brzegowej. W wyniku połączenia tych modeli uzyskano spójny zestaw narzędzi umożliwiających ciągłe generowanie prognoz skutków sztormów. Wyniki zostały zweryfikowane zarówno jakościowo, jak i ilościowo, m.in. przy użyciu danych z systemu SatBałtyk (model XBeach) oraz satelitarnych danych Pleiades Neo. Uzyskano wysokie współczynniki korelacji ($R = 0.970$ i 0.992), a także wysokie wartości wskaźnika zgodności Wilmotta oraz niskie błędy RMSE i BIAS. W pracy wskazano także zróżnicowanie intensywności zjawisk brzegowych w zależności od lokalizacji i ekspozycji brzegów, a także przedstawiono zalecenia dotyczące konfiguracji modeli do zastosowań operacyjnych, w tym minimalnej rozdzielczości pól wiatru oraz konieczności uwzględnienia danych terenowych.

Wybrane uwagi szczegółowe oraz kwestie wymagające uzupełnienia lub doprecyzowania

- Niestety wiele rysunków zawartych w rozprawie cechuje się niską czytelnością. Dotyczy to m.in. Rysunku 1 z Publikacji I, na którym przedstawiono obszary modelowania oraz siatki obliczeniowe. Siatki te są na rysunku praktycznie niewidoczne, a w przypadku przedstawienia pól wiatru trudno mówić o siatce — mamy raczej do czynienia z przykładową mapą konturową prędkości wiatru. W związku z tym chciałbym zapytać, w jaki sposób generowano siatki obliczeniowe (zakładam, że o strukturze nieregularnej). Czy zostały one utworzone samodzielnie przez autora, czy wygenerowane za pomocą wewnętrznych, automatycznych procedur SWA-

Na? Proszę o przedstawienie tych siatek w formie czytelnych map płaskich (bez deformacji wynikającej z perspektywy, jak w rysunku z Publikacji I).

Zastosowane siatki obliczeniowe, zwłaszcza w strefie przybrzeżnej, mają istotny wpływ na dokładność wyników modelowania. W Tabeli 2 Publikacji II znajdujemy informację, że rozdzielczość siatek zmieniała się od 100 m do 2, 4 i 7 km, w zależności od konfiguracji modelu. Byłoby bardzo cenne, gdyby autor przedstawił przykłady fragmentów tych siatek w strefie brzegowej, dla wybranych rejonów Zatoki Gdańskiej, Puckiej i Pomorskiej.

- Brak uwzględnienia pokrywy lodowej w opracowanych implementacjach modelu SWAN należy uznać za istotne ograniczenie, szczególnie w kontekście ich zastosowania w trybie operacyjnym. W pracy autor komentuje, że w ostatnich latach oblodzenie nie występowało w południowym Bałtyku, jednak to stwierdzenie wydaje się nie w pełni uzasadnione. Nawet jeśli w rejonach otwartego morza lód pojawia się sporadycznie, to w strefach przybrzeżnych, zwłaszcza w Zatoce Puckiej, Gdańskiej czy Pomorskiej, obecność lodu w okresie zimowym jest zjawiskiem powtarzalnym.

Warto zauważyć, że na portalu IMGW, prognozy falowe, generowane z wykorzystaniem implementacji modelu opracowanej w ramach rozprawy, są prezentowane osobno dla poszczególnych zatok. Jeżeli, jak podano w Tabeli 2 publikacji II, w niektórych rejonach modelowania zastosowano siatkę o rozdzielczości rzędu 100 m, to najprawdopodobniej dotyczy to właśnie obszarów bliskich brzegu, w których oblodzenie może mieć istotny wpływ na warunki falowe. Możliwa jest więc sytuacja, w której np. Zatoka Pucka jest niemal całkowicie skuta lodem, a jednocześnie model operacyjny IMGW, nie uwzględniający pokrywy lodowej, wskazuje istotny poziom falowania w tym rejonie.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, że w innym serwisie IMGW, dostępnym na tej samej stronie internetowej, prezentowane są codzienne mapy oblodzenia, obejmujące także wyrażenie zatoki południowego Bałtyku. Powstaje zatem pytanie, jak należy rozumieć komentarz doktoranta o braku oblodzenia w analizowanym obszarze, skoro jednocześnie IMGW publikuje mapy pokazujące obecność lodu w tych samych regionach. Aspekt ten ma istotne znaczenie praktyczne — czy możliwa i akceptowalna jest sytuacja, w której dwa operacyjne serwisy IMGW, dostępne obok siebie, przedstawiają sprzeczne informacje: jeden wskazuje obecność pokrywy lodowej, drugi natomiast, istotne falowanie?

W tym kontekście proszę doktoranta o odniesienie się do następujących kwestii:

- dlaczego w implementacjach modelu SWAN opracowanych w ramach pracy zrezygnowano z uwzględniania pokrywy lodowej,
 - czy decyzja ta była podyktowana ograniczeniami technicznymi, czy też innymi przesłankami,
 - oraz jak autor ocenia wpływ pominięcia tego zjawiska na wiarygodność prognoz generowanych w trybie operacyjnym, szczególnie w rejonach płytkowodnych, okresowo ulegających zlodzeniu.
- Podobnie, jak dyskretyzacja obszaru modelowania, również wybór siatki w przestrzeni wektorów falowych, a więc dobór częstości i kierunków, ma istotny wpływ na dokładność wyników symulacji falowania. Informacje zawarte w rozprawie na ten temat są zbyt lakoniczne i budzą wątpliwości co do ich poprawności. Autor podaje w Publikacji I, na początku Sekcji 2.2, następujące stwierdzenie: „Frequency discretisation is constant at 36 frequencies between 0.05 and 1 Hz, and for the directional discretisation, 36 directions were considered in all runs. The directional discretisation is equal to 36 directions considered in all runs.” Po pierwsze,

warto zauważyć niezręczne powtórzenie fragmentu dotyczącego kierunków. Po drugie, cytowane zdanie jest niemal dosłownym powtórzeniem fragmentu artykułu:

Aydoğan, B., Ayat, B., (2021), Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin. *Ocean Engineering*, **240**, 109936, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109936>,

W tej publikacji, odnoszącej się do modelowania falowania wiatrowego na Morzu Czarnym, z użyciem SWANa (również z wykorzystaniem parametryzacji ST6), autorzy podają: „Frequency discretization was kept constant at 36 frequencies between 0.05 and 1 Hz and for the directional discretization 36 directions were considered in all runs.”

Jeśli w obu przypadkach słowo „constant” odnosi się do stałego kroku częstotliwości, to mamy do czynienia z nieporozumieniem lub błędem. W modelu SWAN, podobnie jak w innych modelach trzeciej generacji, rekomendowana i powszechnie stosowana jest logarytmiczna (geometryczna) dyskretyzacja częstości, opisana wzorem:

$$f_{n+1} = qf_n$$

gdzie f_n to częstość, a $q > 1$ to iloraz ciągu geometrycznego. Takie podejście umożliwia lepsze odwzorowanie zmienności widma falowego, szczególnie w rejonie piku i w wyższych częstościach.

W prostym obliczeniu pomocniczym sprawdziłem, że rozmieszczenie 36 punktów częstotliwości w przedziale od 0.05 do 1 Hz odpowiadałoby wartości ilorazu

$$q = (1/0.05)^{1/35} \approx 1.0893622.$$

To sugeruje, że autor mógł skorzystać z typowej, logarytmicznej siatki częstości (np. domyślnej w SWAN-ie), choć sposób jej opisu w tekście jest nieprecyzyjny i może prowadzić do błędnych interpretacji. Proszę o doprecyzowanie, czy w pracy zastosowano logarytmiczną dyskretyzację częstości i jakie dokładnie były jej parametry. Wyjaśnienie tej kwestii ma istotne znaczenie dla interpretacji wyników symulacji i ich porównywalności z innymi wdrożeniami modelu SWAN.

- W odniesieniu do wyników modelowania transportu osadów z wykorzystaniem modelu SWANOneSed, autor rozprawy doktorskiej stwierdza, że były one weryfikowane m.in. przy pomocy obserwacji pochodzących z incydentalnych pomiarów terenowych urzędów morskich, prowadzonych w strefie brzegowej polskiego wybrzeża w latach 2010–2022. W rozprawie znajduje się jednak jedynie bardzo ogólne odniesienie do tych danych, bez wskazania, które konkretne pomiary zostały wykorzystane, w jakich lokalizacjach i terminach zostały przeprowadzone, oraz jaka była ich dokładność i forma. Brakuje również szczegółowego opisu sposobu porównania danych obserwacyjnych z wynikami modelowania. Nie wiemy, jaka była procedura oceny zgodności i jakie dokładnie rezultaty uzyskano. Tego rodzaju dane terenowe, jeśli odpowiednio udokumentowane i porównane z wynikami modelu, stanowią niezwykle cenny materiał weryfikacyjny, który może znacząco podnieść wiarygodność analiz.

Proszę zatem o przedstawienie choćby jednego lub dwóch reprezentatywnych przykładów takich porównań, z krótkim opisem wykorzystanych danych, lokalizacji, zakresu czasowego pomiarów oraz sposobu oceny zgodności z wynikami modelowania. Byłoby to istotne uzupełnienie argumentacji zawartej w rozprawie.

- W mojej ocenie w rozprawie przedstawiono zbyt mało map konturowych ukazujących przestrzenne rozkłady podstawowych parametrów opisujących pola falowe dla różnych sytuacji

meteorologicznych nad Bałtykiem. Jedynym wyraźnym przykładem takich wizualizacji wydaje się Rysunek 10 w Publikacji I, prezentujący przestrzenny rozkład wysokości fali znacznej oraz kierunku propagacji fal. Rysunek ten nie został jednak należycie omówiony w treści publikacji, a podpis pod nim jest nieprecyzyjny.

Brakuje w szczególności wyjaśnienia znaczenia strzałek umieszczonych na mapach z polem wysokości fali znacznej — czy są to kierunki propagacji fal, czy może wektory wiatru. Dodatkowo, początkowa data w podpisie (6.03.2021) wydaje się błędna, ponieważ sam rysunek odnosi się do 7.03.2021. Pewne niejasności budzi także środkowa kolumna tego zestawienia, gdzie przedstawiono mapy pochodzące z niemieckiego serwisu ICON-EU. Wzmianki o tych danych nie odnaleziono ani w treści publikacji, ani w opisie zastosowanych danych w rozprawie. Wy maga to doprecyzowania.

Szczególną uwagę zwraca nieintuicyjny rozkład kierunków falowania, z modelu SWAN, na kilku rysunkach. Jeżeli rzeczywiście są to kierunki propagacji fal, to w rejonie Zalewu Kurońskiego oraz u wybrzeży Litwy i Łotwy wskazują one czasem na kierunki przeciwnie zwrócone względem lokalnego wiatru. Proszę zatem o jednoznaczne wyjaśnienie znaczenia tych strzałek oraz interpretację uzyskanych kierunków falowania w tych rejonach. Czy są one realistyczne, czy też mogą wynikać z nieprawidłowego odwzorowania warunków lokalnych przez model.

- W pierwszym zdaniu drugiego akapitu poniżej Tabeli 6 w Publikacji I autor podaje niepoprawną definicję wysokości fali znacznej. Dodatkowo, sposób przedstawienia długości fali oraz średniego okresu fal jest bardzo uproszczony i naiwny, co kontrastuje z obecnością w tej samej publikacji zaawansowanych równań, takich jak równanie transportu działania falowego, uwzględniające widmową gęstość energii fal. Takie podejście może świadczyć o braku refleksji nad złożonością i niejednoznacznością definicji parametrów fal dla przypadków falowania nie-regularnego i dyspersyjnego.

Wartości długości fali przytaczane w rozprawie budzą wątpliwości interpretacyjne, zwłaszcza że kilkakrotnie są one błędnie określane jako „wave crest length”, co wprowadza dodatkowe niejasności terminologiczne. Proszę o komentarz i dodatkowe wyjaśnienia w tej sprawie.

- Fragment zdania: „...the second and third parts are the propagation across the action of physical space.” zawarty w Publikacji I, poniżej równania [1.1], jest niepoprawny językowo i znaczeniowo. Sformułowanie „propagation across the action of physical space” ma bardzo złe brzmienie i prowadzi do niezrozumienia przekazu. Nie chodzi tu o propagację poprzez „akcję/działanie przestrzeni fizycznej”, lecz o propagację działania falowego (wave action) w przestrzeni fizycznej, tj. w rozumieniu geograficznym (tu konkretnie wzdłuż współrzędnych x , y). Zdanie to należy zatem uznać za nieprecyzyjne i wprowadzające w błąd.
- W rozprawie doktorskiej autor wskazuje na wyjątkowo wysokie wartości współczynnika korelacji pomiędzy wynikami modelowania a danymi obserwacyjnymi dotyczącymi falowania. Przykładowo, współczynniki korelacji pomiędzy obserwacjami AWAC i WaveGuide z platformy Petrobaltic, a wynikami symulacji modelem SWAN, wynoszą odpowiednio 0.973 i 0.960. Dla warunków w strefie płytkowodnej, w Zatoce Pomorskiej, uzyskano współczynnik korelacji równy 0.968. Tak wysokie wartości sugerują również bardzo dobrą jakość pól wiatru zasilających model falowy. Tymczasem, porównania róż wiatrów obserwowanych i modelowanych, zawarte w rozprawie, nie wykazują aż tak wysokiego poziomu zgodności.

W rozprawie brakuje diagramów rozrzutu (scatter plots), które byłyby pomocne w analizie dokładności symulacji zarówno dla falowania, jak i dla pól wiatru. Szczególnie cenne byłyby takie

wykresy wraz z informacją, dla jakich okresów i z jakim krokiem czasowym dokonano porównań. Interesujące byłoby również zestawienie przykładowych szeregów czasowych obserwacji i wyników modelowania dla wybranych epizodów sztormowych.

Szeregi czasowe przedstawione na Rysunku 9 w Publikacji I, obejmujące aż trzyletni okres, są zupełnie nieczytelne, ponieważ cały zakres czasowy przedstawiono na jednym rysunku, co uniemożliwia szczegółową analizę zgodności danych. Dodatkowo, na tym samym rysunku (Rys. 9) widoczne są wysokości fali znacznej w Zatoce Pomorskiej (stacja Nemo WPA, głębokość 7 m) sięgające około 6.5 m. Wartości te oznaczają, że fale indywidualne mogły być znacznie wyższe. Proszę o komentarz, jak to możliwe, skoro zgodnie z klasycznymi kryteriami załamywania fal (np. Miche'a lub Gody), fale wyższe niż około 5.5 m powinny ulec załamaniu na takiej głębokości.

Dodatkowo, na otwartym morzu, na platformie Petrobaltic, wysokości fali znacznej w tym samym trzyletnim okresie nie przekraczały 5.5 m, a więc były niższe niż te zarejestrowane w Zatoce Pomorskiej. Proszę o odniesienie się do tej nieintuicyjnej sytuacji. Cenne byłoby również zaprezentowanie krótkich (2–3-dniowych) fragmentów szeregów czasowych z okresów występowania najwyższych fal, z widocznymi krokami czasowymi symulacji i danych obserwacyjnych. Proszę również o wskazanie, jakim sytuacjom meteorologicznym towarzyszyły te ekstremalne epizody i w jakich konkretnie datach one wystąpiły.

- W Publikacji III znajdujemy informację, że wyniki modelowania zasięgu zalewania plaży były weryfikowane między innymi przy pomocy wyników z modelu XBeach, działającego w ramach systemu SatBałtyk. Z mojej wiedzy wynika, że model XBeach w ramach SatBałtyku pracuje w trybie 1D i zasilany jest wejściowymi danymi falowymi pochodzącymi z modelu WAM, działającego w ICM w Warszawie, dla całego Bałtyku, z rozdzielczością przestrzenną rzędu 9 km. Do modelu XBeach przekazywane są wartości wysokości fali znacznej z najbliższego węzła siatki modelu WAM. Punkty te są zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu i ze względu na dość niską rozdzielczość WAMu, mogą nie odzwierciedlać dokładnie warunków falowych w strefie przybrzeżnej, gdzie działa XBeach.

Powstaje w związku z tym pytanie o wiarygodność takich danych jako danych referencyjnych, do walidacji wyników własnych modeli doktoranta. Proszę o komentarz w tej sprawie. Czy autor rozprawy uważa takie porównanie za w pełni uzasadnione? Bardzo pomocne byłoby zaprezentowanie na jednym lub dwóch konkretnych przykładach procedury porównawczej: jak dokładnie zestawiano wyniki swojego modelu z wynikami z SatBałtyku, w jakich lokalizacjach i dla jakich zdarzeń sztormowych. Proszę o zademonstrowanie i omówienie tej procedury.

- Zastanawiające jest równoleżnikowe cięcie północnej granicy domeny obliczeniowej zagnieżdżonej wersji modelu SWAN o największej rozdzielczości. Taki wybór skutkuje bliskim położeniem granicy obszaru modelowania względem wybrzeży najbardziej wysuniętych na północ. Powstaje zatem pytanie, czy w przypadku wiatrów z kierunków północnych, od NW przez N do NE, modelowanie falowania np. w rejonie Władysławowa i pobliskich odcinków wybrzeża nie jest obciążone istotnym błędem związanym z bliskością otwartej granicy modelu.

Autor rozprawy stwierdza, że zagnieżdżony model SWAN nie daje istotnie lepszych wyników niż model samodzielny, niezasilany zewnętrzną energią falową przez otwarte granice. Proszę o komentarz w tej sprawie i wskazanie czy prawdziwość tej obserwacji została zweryfikowana dla przypadków ekstremalnych sztormów przy wiatrach z kierunków, dla których rozciągłość działania wiatru jest największa, tj. z sektora N do NE. To właśnie w takich przypadkach warun-

ki brzegowe mogą mieć szczególnie istotny wpływ na rozkład energii falowej w modelowanym obszarze, w tym w strefie przybrzeżnej.

Wniosek końcowy

Zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, opinia dotycząca rozprawy doktorskiej powinna zawierać następujące elementy:

- 1) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w danej dyscyplinie,
- 2) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- 3) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej, bądź oryginalne dokonanie artystyczne.

W kolejnych częściach recenzji odnoszę się do każdego z powyższych punktów osobno.

Ad 1)

Rozprawa doktorska przedstawia wiedzę teoretyczną autora w zakresie dyscypliny nauk o Ziemi i środowisku, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z modelowaniem procesów morskich z wykorzystaniem danych pochodzących z modeli atmosferycznych. Autor wykazuje znajomość podstawowych pojęć oraz narzędzi stosowanych w numerycznym modelowaniu falowania i zjawisk pokrewnych, a także orientację w podejściach weryfikacyjnych i walidacyjnych.

Do mocnych stron recenzowanej pracy należy zaliczyć zastosowanie nowoczesnego pakietu wyrażeń źródłowych ST6 (ang. *Source Terms 6*), rozwijanego od wczesnych lat 2000. w NOAA/NCEP dla modelu falowego WaveWatch III i wprowadzonego do modelu SWAN w wersji 41.20 w roku 2018. Zastosowanie tego pakietu w implementowanym na potrzeby rozprawy modelu SWAN wymagało od autora specjalistycznej wiedzy oraz znajomości aktualnej literatury z zakresu modelowania falowania wiatrowego.

Choć wiedza teoretyczna z zakresu modelowanych procesów fizycznych nie została przedstawiona w sposób systematyczny i pogłębiony, w ujęciu techniczno-aplikacyjnym można ją uznać za wystarczającą na potrzeby pracy doktorskiej.

Ad 2)

Rozprawa dowodzi również umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, przede wszystkim w zakresie implementacji i adaptacji zaawansowanych narzędzi obliczeniowych oraz analizy uzyskanych wyników w kontekście przyjętych celów badawczych. Opracowanie obejmuje szereg działań o charakterze aplikacyjnym, wykonanych z użyciem złożonych modeli numerycznych, co potwierdza kompetencje doktoranta w planowaniu i realizacji badań opartych na narzędziach modelowania komputerowego. W wielu aspektach doktorant wykazał się samodzielnością i inicjatywą, choć niektóre fragmenty pracy mogłyby zostać pogłębione lub bardziej krytycznie opracowane.

Ad 3)

Rozprawa, jako całość, zawiera oryginalne rozwiązania o charakterze aplikacyjnym w zakresie doboru, kalibracji oraz zastosowania modeli numerycznych do prognozowania zjawisk falowych i ich

skutków w rejonie południowego Bałtyku. W szczególności należy wskazać na wdrożenie i ocenę skuteczności różnych wariantów parametryzacji w modelach falowania, budowę systemów operacyjnych prognoz, a także próbę integracji modeli w celu prognozowania skutków sztormów, takich jak nabieganie fal (run-up) czy transport rumowiska.

Na uwagę zasługuje również podjęcie próby porównania wyników modelowania z danymi satelitarnymi — to istotny i wartościowy element ocenianej rozprawy. Znaczącym osiągnięciem jest uruchomienie modelu falowego w trybie operacyjnym. Prognozy falowania wiatrowego, dostępne publicznie na stronach IMGW, mają duże znaczenie praktyczne i w istotny sposób poszerzają ofertę serwisów świadczonych przez tę instytucję.

Rozprawa nie zawiera oryginalnych rozwiązań teoretycznych, lecz wnosi istotny wkład do zastosowań praktycznych, ważnych z punktu widzenia gospodarki morskiej i bezpieczeństwa wybrzeża.

Wyniki pracy naukowej doktoranta zostały opublikowane w renomowanych czasopismach, charakteryzujących się wysokimi wskaźnikami cytowalności i zajmujących wysokie pozycje w rankingach MNiSW. Doktorant deklaruje swój udział w przygotowaniu tych publikacji na poziomie 60%, co zostało potwierdzone w oświadczeniach współautorów.

Biorąc pod uwagę całościową ocenę rozprawy oraz spełnienie podstawowych wymagań określonych w art. 186 i 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668), wnoszę o dopuszczenie Pana magistra Patryka Sapięgi do dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Gdańsk, 14 lipca 2025

Witold Cieślakiewicz