

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Cupiał**

pt. „*Warunki meteorologiczne nad Morzem Bałtyckim powodujące ekstremalne falowanie wiatrowe w Zatoce Gdańskiej*” przygotowanej pod kierunkiem dr hab. Witolda Cieślakiewicza, w Pracowni Oceanografii Fizycznej Katedry Oceanografii Fizycznej i Badań Klimatu, Uniwersytetu Gdańskiego.

### **1. Struktura techniczna pracy, jej cele badawcze i aspekty nowatorskie.**

Przedstawiona rozprawa napisana jest w j. polskim, ale zawiera także streszczenie w języku angielskim, ponadto spis tabel (27), rysunków (74), symboli i oznaczeń, 4 rozdziały merytoryczne, podsumowanie oraz pokazną listę referencji (191 prac). Całość pracy wypełnia łącznie 213 stron.

Struktura i zawartość merytoryczna opracowania jest poprawna i nie budzi większych zastrzeżeń. Jest kilka problemów natury edytorskiej, które należało by poprawić w pracy przed jej ostatecznym wydrukiem. Na przykład na początku rozdziału 4 widnieją stwierdzenia zapisane w formie niedokonanej jak „w kolejnej części pracy, główny nacisk zostanie położony na zjawiska sztormowe”, czy też „jeden podrozdział zostanie poświęcony charakterystyce trajektorii”, itp. Tego typu forma powoduje u czytelnika niepewność czy te elementy zostały faktycznie zamieszczone w obecnej pracy czy też będą zrealizowane w innym opracowaniu?

### **2. Cele badawcze i aspekty nowatorskie.**

Znaczenie rozważanego problemu badawczego, jego cele i tezy badawcze przedstawione są we wstępnym rozdziale. Reasumując zawarte tam informacje, przedmiotem niniejszej rozprawy jest opisanie klimatu falowego Zatoki Gdańskiej w drugiej połowie XX wieku oraz jego związek z charakterystycznymi cechami parametrów meteorologicznych dla sytuacji sztormowych w akwenie Morza Bałtyckiego. Wyznaczenie charakterystyk zjawisk sztormowych stanowi istotne zagadnienie zarówno od strony czysto poznawczej jak i z uwagi na bezpieczeństwo ludzkiej aktywności na morzu i w strefie brzegowej. Ważną kwestią jest także analiza wpływu obecności Półwyspu Helskiego na rozkład przestrzenny parametrów falowania wiatrowego w tym obszarze.

Postawione zagadnienie rozpatrywane jest przy wykorzystaniu wyników modelowania numerycznego (pole ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatru oraz pola całkowitych parametrów falowania: wysokości fali znacznej, średniego okresu oraz kierunku propagacji) oraz analizy statystycznej - wykonanych dla obszaru Zatoki Gdańskiej.

Jedną z postawionych tez badawczych jest zbadanie możliwości zastosowania metody Ortogonalnych Funkcji Empirycznych (EOF), która w naukach o Ziemi jest wykorzystywana do poszukiwania charakterystycznych czaso-przestrzennych rozkładów parametrów. Autorka postuluje wykorzystanie metody EOF do identyfikacji typowych cech parametrów meteorologicznych związanych z ekstremalnymi sztormami, określenia stopnia ich różnorodności i korelacji z ponadprzeciętną wysokością fali znacznej. W szczególności analizie poddano dwa aspekty istotne dla wybranego podzbioru sztormów w Zatoce Gdańskiej:

- możliwość wyznaczenia charakterystyk wektorów własnych pól anomalii parametrów meteorologicznych wyróżniających je na tle danych z całego analizowanego okresu
- wpływ wielkości obszaru poddanego analizie EOF na różnorodność obserwowanych charakterystyk analizowanych parametrów meteorologicznych

Kluczowe dla powyższej analizy było ustalenie tła środowiskowego czyli klimatologii typowych warunków falowych oraz pól meteorologicznych, przy wykorzystaniu 44-letniego zbioru danych modelowych. Weryfikacje zmienności pól ciśnienia atmosferycznego oraz wektorów własnych anomalii prędkości wiatru dokonano poprzez ich korelację z indeksami wielkoskalowej cyrkulacji atmosferycznej. Aby uchwycić charakterystyczną zmienność całkowych parametrów falowania w rejonie Zatoki Gdańskiej dokonano analizy warunków cyrkulacyjnych podczas wybranych sztormów związanych z ekstremalnym falowaniem. Kolejnym nowatorskim elementem jest zastosowanie analizy trajektorii układów niżowych do zbadania klimatu zjawisk sztormowych związanych z ekstremalnym falowaniem. Do tej pory zależność największego falowania na obszarze Morza Bałtyckiego wyznaczana była przy pomocy pola wiatrowego w kontekście wezbrań sztormowych i ekstremalnych poziomów morza.

W tym miejscu należy stwierdzić, iż postawione przez autorkę tezy badawcze są interesujące z naukowego punktu widzenia, przyjęta metodologia oraz aplikacyjny wymiar zagadnienia w pełni warunkuje przyjęty temat badawczy do przeprowadzenia rozprawy doktorskiej. Istnieje jednakże kilka kwestii wymagających dodatkowego wyjaśnienia.

### **3. Narzędzia modelowe, dane pomiarowe, obszar i metody badawcze.**

Sekcja 2 opisuje dostępne narzędzia modelowe i dane wykorzystywane w dalszej analizie. Pola parametrów meteorologicznych zostały wygenerowane modelem REMO (*REgional Model*) na podstawie reanalizy NCEP. Dane pokrywają Europę oraz północno-wschodni Atlantyk siatką o rozdzielczości  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , natomiast do obecnych analiz wykorzystano podzbiór, nazywany „obszarem REMO”. Pole falowania wiatrowego dla Morza Bałtyckiego wyliczane jest przy pomocy modelu WAM (*WAve Model*). Dane meteorologiczne z obszaru REMO są interpolowane do siatki modelu WAM o rozdzielczości przestrzennej  $5' \times 5'$  (5 Mm) rozłożonej równomiernie w całym obszarze Bałtyku właściwego. Szczegółowej analizie poddano obszar Zatoki Gdańskiej z charakterystycznym wąskim (200–2800 m) Półwyspem Helskim, oraz Zatoką Pucką. Zróżnicowany kształt linii brzegowej Bałtyku wpływa na zmienność szeregu procesów hydrodynamicznych. Półwysep Helski osłania zachodnią część Zatoki Gdańskiej przed działaniem wiatrów z kierunków północnych co ma istotny wpływ na średnie i maksymalne wartości wysokości fali znacznej i jej propagację. Praca nie zawiera zbyt wielu szczegółów dt. zastosowanych modeli, zatem konieczne jest wyjaśnienie kilku kwestii.

Pierwsze pytanie to w jaki sposób kształt linii brzegowej jest uwzględniany w algorytmach modelu WAM. Stosunkowo rzadka siatka modelu przedstawiona na Rys. 2.3 praktycznie w żadnym punkcie nie pokrywa się z obszarem Półwyspu Helskiego. Pewna informacja na temat uwzględnienia kształtu linii brzegowej znajduje się w opisie procesu wyznaczania zmienności przestrzennej całkowych parametrów falowania wiatrowego za pomocą interpolacji danych zapisanych w mokrych punktach siatki z wykorzystaniem funkcji *Spline with Barriers*, Funkcje te korzystając z metody najmniejszej krzywizny do uwzględnienia obszarów nieciągłości takich jak obszar Półwyspu Helskiego. Nie tłumaczy to jednak w jaki sposób ta linia brzegowa jest uwzględniona w samych obliczeniach modelu WAM.

Drugi aspekt, który należało by wyjaśnić to wpływ dokładności wyznaczenia pola falowego przez model WAM na wyniki pracy. Autorka rozprawy wskazuje, iż model ten daje realistyczne wartości pól falowania dla homogenicznych w czasie pól wiatru natomiast raportowane są w literaturze przeszacowania i niedoszacowania dla wartości ekstremalnych, które generalnie związane są sytuacjami sztormowymi będącymi przedmiotem tej pracy. Przedstawione w pracy wnioski zakładają poprawność modelowania całkowych parametrów falowania uzyskanych z modelu WAM, mimo iż w podsumowaniu wskazywana jest możliwość niedostatecznej rozdzielczości, uniemożliwiającej poprawne wyznaczenie ekstremalnych wartości fali znacznej w Zatoce Puckiej. Czy zatem rozdzielczość użytej siatki obliczeniowej jest dostateczna?

Z kolei, w dyskusji podsumowującej charakterystyki klimatu falowego w zachodniej części Zatoki Gdańskiej oraz Puckiej (Par 5,1) autorka wskazuje, iż modelowanie przeprowadzone na siatce obejmującej cały obszar Bałtyku może wiązać się z pewnymi stratami w dokładności. Nie jest tutaj zrozumiałe w jaki sposób pokrycie siatką obliczeniową całego obszaru Bałtyku może wpływać negatywnie na dokładność prezentowanych rezultatów w obszarze Zatoki Gdańskiej. Wydaje się, że konieczna jest szersza dyskusja, na temat wpływu rozdzielczości i rozmiaru siatki modelu WAM, na poprawność uzyskanych wyników.

Podobnie, w pracy wykorzystano metody empirycznych funkcji ortogonalnych (EOF) nad obszarem Morza Bałtyckiego, otaczającego je lądu i fragmentu północnego Atlantyku. Ponieważ jest to technika wrażliwa na czasowo-przestrzenny zakres wprowadzanych danych, przeprowadzono wielokrotne powtórzenia obliczeń prowadzące do wyboru optymalnego zakresu przestrzennego danych poddanych analizie EOF. Analizowano zmienności modułu i argumentu wektora głównych składowych, co w skrócie jest opisane w paragrafie 3.2. Interesujące jest jednak jakie kryteria przyjęto w analizie zmienności tych kluczowych parametrów umożliwiające wyznaczenie optymalnego zakresu przestrzennego danych? Przedstawione na końcu rozdziału odwołanie do testu osypiska nie jest jasno opisane.

#### **4. Wyniki badań i ich dyskusja.**

Rozdział 4 zawiera bardzo obfite analizy wszystkich rozważanych parametrów meteorologicznych i całkowitych parametrów falowania (wysokości fali znacznej  $H_s$  i średniego okresu  $T_z$  oraz średniego kierunku propagacji  $\theta$ ). dla wybranych sztormów Zatoki Puckiej i Zatoki Gdańskiej. Przedstawiona analiza jest dostateczna i pozwala prawidłowo zanalizować rozpatrywane zjawiska. Nie mniej dwa elementy wymagają dodatkowego wyjaśnienia.

Pierwsza z uwag dotyczy porównania uśrednionych miesięcznych wartości głównych składowych analizy EOF z indeksami wielkoskalowych cyrkulacji atmosferycznej dla obszaru REMO. Uwzględniono tutaj także lokalne indeksy cyrkulacji, takie jak index BSI (opisujący cyrkulację nad zachodnią częścią Bałtyku), które mogą lepiej oddawać cyrkulację danego regionu. Celem tej analizy jest sprawdzenie, czy uzyskane wzorce przestrzenne pola ciśnienia mogą odpowiadać realnie występującym zjawiskom. Pewnym zastrzeżeniem w tej analizie może być duża zmienność sezonowa współczynników korelacji dla czterech pierwszych wzorców anomalii nad obszarem Bałtyku. Nie zostały dostatecznie wyjaśnione możliwe przyczyny wystąpienia tych sezonowych zmienności, czy nie są one spowodowane np. sposobem wyznaczenia danego indeksu, gdyż obserwowany jest nie szczególnie wysoki współczynnik korelacji pomiędzy indeksami NAO-1 oraz NAO-3 wynoszący  $r = 0.61$ . W przypadku indeksu NAO-3, jego wartość obliczana jest na podstawie standaryzowanej różnicy ciśnienia między stacją meteorologiczną w Reykjavíku (Islandia) i Ponta Delgada (na Azorach), oddalonych od siebie o około 3000km.

Drugim elementem są wyniki analizy klimatu falowego Zatoki Gdańskiej i warunków meteorologicznych w czasie sztormów, podsumowane w par 5(4). Wskazane są dwa reżimy generujące sztormy w Zatoce Gdańskiej. Pierwszy z nich związany jest z dominującymi wiatrami zachodnimi oraz południowo-zachodnimi, które wywołują lokalnie ekstremalne falowanie w Zatoce Puckiej. Drugi z reżimów, przynoszący ekstremalne wysokości fali znacznej w otwartej części Zatoki Gdańskiej, związany jest z wiatrami północnymi oraz północno-zachodnimi. Wspomniano przy tym, iż pewnym zaskoczeniem okazał się brak znaczącej obecności sztormów w Zatoce Puckiej wywołanych wiatrem południowo-wschodnim. Opis ten wprowadza trochę niejasności szczególnie w odniesieniu do sytuacji w Zatoce Puckiej. W par. 4.1.1.3 opisującym średni kierunek propagacji falowania w całym okresie badawczym, kilkakrotnie wskazane jest w opisie rysunków i tekście, iż rozkład kierunkowy propagacji falowania (tj. średni kierunek propagacji jest kierunkiem „na”).

Natomiast opis sytuacji dla Zatoki Puckiej (na podstawie rys 4.7), zawiera informację, o tym, iż dominujące mody propagacji pochodzą „z kierunków” południowo-zachodniego i południowo-wschodniego, przy czym występuje także wyraźny pik kierunku propagacji „na WNW” (ok. 6%). Czy nie doszło tutaj do pomyłki i nie powinna to być propagacja „na kierunek” SW/SE a nie „z” tego kierunku? Może to być potwierdzone wynikami z par 4.4.1.2 (Rys 4.45) gdzie przedstawiona jest zmienność całkowych parametrów falowania w czasie sztormów w Zatoce Gdańskiej, przy czym w rozkładzie częstości falowania w Zatoce Puckiej dominuje kierunek propagacji „na północny-wschód” w czasie sztormów właściwych oraz w kierunku wschodnim/południowo-wschodnim dla wszystkich analizowanych sztormów. W par 4.4.2.2, na Rys. 4.49. przedstawiającym rozkład częstotliwości prędkości wiatru w czasie sztormów, w punkcie W2 zdecydowanie dominują wiatry zachodnie dla wszystkich analizowanych sztormów. Czy to w tym kontekście „zaskakujący” jest brak obecności sztormów wywołanych wiatrem południowo-wschodnim, gdyż nie ma fizycznego mechanizmu który tłumaczył by występowanie piku propagacji fali na W-NW” (Rys 4.7)?

Czy pewną wskazówką umożliwiającą odpowiedź na powyższe pytanie mogą być tutaj informacje zawarte we wnioskach sugerujące, iż poprawność modelowania całkowych parametrów falowania uzyskanych z modelu WAM może nie być zadowalająca? W szczególności „ze względu na rozdzielczość modelu, nie wszystkie subtelności zmienności parametrów falowania zachodzące w niewielkiej Zatoce Puckiej udało się uchwycić”, oraz „istnieje możliwość, że obserwowane przy wiatrach zachodnich ekstremalne wysokości fali znacznej w punkcie W2, w rzeczywistości nie występują”. Czy zatem nie było by słuszne aby symulacje modelu WAM dla obszaru Zatoki Gdańskiej, a w szczególności Zatoki Puckiej były prowadzone na siatce o znacznie większej rozdzielczości niż obecnie?

## 5. Podsumowanie.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki potwierdzają, że technika empirycznych funkcji ortogonalnych EOF może być skutecznie wykorzystywana do poszukiwania cech charakterystycznych badanych zjawisk, w tym wypadku ekstremalnych sztormów and obszarem Morza Bałtyckiego. Przedstawione w pracy statystyki zmienności całkowych parametrów falowania wiatrowego w Zatoce Gdańskiej w badanym okresie mogą stanowić użyteczne źródło referencyjne do dalszych analiz środowiskowych.

Zamieszczone powyżej pytania i uwagi nie podważają uzyskanych wyników a jedynie dają możliwość odniesienia się do kwestii, które nie są do końca jasne i być może umożliwią kontynuację badań przy użyciu pogłębionej analizy.

Pewnym zastrzeżeniem może być brak dotychczasowych publikacji z przeprowadzonych badań autorstwa Doktorantki. Jedyna pozycja, na którą powołuje się praca (Cześniakiewicz i Cupiał, 2023) jest na czas składania manuskryptu do recenzji jeszcze nie opublikowana oraz autorka nie jest jej wiodącym autorem. Natomiast praca została opublikowana w wydaniu Oceanografii z April-June, 2024, DOI 10.1016/j.oceano.2023.10.002, zatem referencja ta powinna być koniecznie uzupełniona w tekście manuskryptu.

Nie mniej, przedłożona rozprawa wykazuje, iż Doktorantka posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną w zakresie procesów fizycznych zachodzących w atmosferze oraz w akwenie Morza Bałtyckiego. Wykazała się biegłością w zakresie wykorzystania zaawansowanych technik modelowych oraz metod analiz statystycznych.

Podsumowując, uważam iż recenzowana praca spełnia wymagania formalne i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy **mgr Aleksandry Cupiał** do dalszej części przewodu doktorskiego i publicznej obrony.