

Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
e-mail: tomasz.dysarz@up.poznan.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pani Khansy Gulshad

Od dynamiki powodzi do rozwiązań opartych na przyrodzie: geoprzestrzenne ramy sztucznej inteligencji dla odporności miast

*From Flood Dynamics to Nature-Based Solutions:
A Geospatial AI Framework for Urban Resilience*

1. Podstawa formalna i prawna

Podstawą formalną przygotowanej recenzji jest pismo przewodnie prof. dr hab. inż. Ewy Wojciechowskiej, Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej (l.dz. 605/WILiŚ/2026). Ocena została przeprowadzona na podstawie rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku angielskim przez doktorantkę, panią Khanę Gulshad. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Michał Szydlowski, z Katedry Geotechniki i Inżynierii Wodnej Politechniki Gdańskiej. Rozprawa została złożona w formie papierowej oraz cyfrowej do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej. Recenzję przeprowadzono zgodnie z wymogami określonymi w art. 187 ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (POL-2018-R-109017), znowelizowanej przez późniejsze rozporządzenia (POL-2018-R-109019).

2. Przegląd prowadzonych badań

Głównym przedmiotem badań jest modelowanie zagrożenia powodziowego ze szczególnym uwzględnieniem powodzi miejskich. Badania koncentrują się na wdrażaniu nowoczesnych technologii, takich jak geoprzetwarzanie, modelowanie hydrologiczne, a zwłaszcza metody uczenia maszynowego i głębokiego uczenia (ang. *machine learning/deep learning*, ML/DL). Doktorantka, w swojej pracy, trafnie wskazała największą lukę do wypełnienia w tej dziedzinie, tzn. wdrażanie metod ML/DL do generowania map podatności na zalewy powodziowe bez odpowiedniego uwzględnienia zasad fizycznych rządzących przepływem wody w środowisku naturalnym. Drugim obszarem zainteresowań jest rozwój rozwiązań opartych na naturze (NbS) oraz

planowanie zielonej infrastruktury (GI) w miastach. W tym obszarze badania koncentrują się na połączeniu istniejących metod cyfrowego przetwarzania obrazów ze skutecznymi strategiami nasadzeń drzew, co stanowi również jedno z aktualnych wyzwań. Główną koncepcją pracy doktorskiej jest integracja metod obecnie stosowanych w analizach zagrożenia powodziowego i gospodarki wodnej miast i utworzenie spójnej metodyki umożliwiającej sprawne zarządzanie infrastrukturą miast. Koncepcja ta wykracza poza samodzielne zastosowanie metod ML/DL, które obecnie jest najczęstszą praktyką, ale próbuje je wdrażać z odpowiednim uwzględnieniem procesów hydrologicznych oraz powiązań hydraulicznych w badanym systemie.

Aby zilustrować znaczenie zintegrowanego podejścia jako studium przypadku, w pracy wykorzystano miasto Gdańsk. Biorąc pod uwagę historyczne doświadczenia Gdańska związane z powodzią, wybór ten jest uzasadniony. Jak wskazano w pracy, zagrożenie powodziowe w mieście wynika z trzech różnych czynników: (1) spływu powierzchniowego z polodowcowych wzgórz morenowych, (2) wezbrań rzek podczas intensywnych opadów oraz (3) podnoszenia się poziomu morza w Zatoce Gdańskiej. Doktorantka zauważyła również, że *„[...] żadne badanie dotyczące miasta nadmorskiego nie uwzględniło dotychczas w sposób zintegrowany tych [wspomnianych wcześniej] elementów [...]”*.

W związku z tym znaczenie przedstawionych badań nie budzi wątpliwości. Cele zostały właściwie określone, a nowatorski charakter pracy został jasno wykazany. Zastosowane metody są zaawansowane i zgodne z aktualnymi praktykami oraz stanem badań. Procedura gwarantuje, że wyniki będą miarodajne, a wyznaczone cele będą właściwie osiągnięte.

3. Analiza rozprawy doktorskiej

Przedłożona rozprawa składa się z 9 rozdziałów, 3 załączników, wykazu skrótów (82 pozycje), streszczenia oraz bibliografii. Na początku rozprawy znajdują się również: streszczenie graficzne oraz podziękowania, wraz z oświadczeniem o braku znaczącego finansowania ze źródeł zewnętrznych. Oświadczenia formalne umieszczono przed stroną tytułową. Praca zawiera 51 rysunków, 30 tabel i 57 równań, z których większość pojawia się w rozdziałach głównych. Dodanie spisu rysunków i spisu tabel poprawiłoby czytelność tekstu. Liczba pozycji bibliograficznych wynosi 288, w tym 218 artykułów opublikowanych w czasopiśmie naukowych. Wykryto pewne powtórzenia w spisie bibliograficznym. Problem ten został opisany w szczegółowych uwagach.

Rozdział 1, zatytułowany „Wprowadzenie” (*“Introduction”*), przedstawia problem i naświetla jego różne elementy. Doktorantka rozpoczyna od ogólnego przeglądu współczesnych wyzwań związanych ze zmianami klimatu i rosnącym ryzykiem powodziowym, który jest poparty przykładami powodzi miejskich, jakie miały miejsce w przeszłości w Gdańsku. Następnie opis skupia się na pierwszym głównym zagadnieniu niniejszych badań: zróżnicowaniu metod modelowania zagrożeń hydrologicznych. Doktorantka prowadzi dyskusję od modeli o charakterze bardziej fizycznym, takich jak HEC-HMS, do nowoczesnych metod opartych na danych, w tym algorytmów Sztucznej

Inteligencji. Drugim zagadnieniem jest planowanie przestrzenne rozwiązań opartych na naturze (ang. *Nature-based Solutions*, NbS) oraz zielonej infrastruktury (ang. *Green Infrastructure*, GI) w mieście. Autorka precyzyjnie identyfikuje główne luki do wypełnienia w tych dwóch obszarach i pokrótce wyjaśnia podejście zastosowane w przedstawionych badaniach. W następnym kroku sformułowany jest cel badań:

„[...] wykazanie, że GeoAI, [...], może bezpośrednio wspierać przejrzystą, zrównoważoną i opartą na faktach adaptację miejską”.

Ponadto doktorantka wskazuje, że nie jest to jedynie postęp metodologiczny w hydrologii miejskiej i planowaniu zielonej infrastruktury, a kluczem do sukcesu jest zastosowanie GeoAI w ramach uporządkowanego, zintegrowanego procesu, a nie jako zbioru narzędzi. Zadania naukowe zdefiniowano w następujący sposób:

1. *„Ocena ilościowa historycznego i prognozowanego wpływu dynamiki zmian w użytkowaniu gruntów i pokryciu terenu (LULC) oraz zmian klimatu na spływ powierzchniowy w skali zlewni i miasta, [...]”*
2. *„Opracowanie zrozumiałej, opartej na uczeniu maszynowym pełnej struktury [...], służącej do mapowania podatności obszarów miejskich na powódzie oraz identyfikacji głównych czynników przestrzennych powodujących zalewy.”*
3. *„Zdiagnozowanie nierównomierności w przestrzennym rozmieszczeniu zielonej infrastruktury w Gdańsku [...]”*
4. *„Ocena potencjału wprowadzenia zieleni miejskiej na poziomie dachów i ulic [...], oraz oszacowanie skumulowanych korzyści w zakresie retencji wód opadowych wynikających ze zintegrowanych działań w zakresie zielonej infrastruktury w różnych scenariuszach opadowych.”*

Powyższe punkty wystarczają precyzyjnego zdefiniowania problemu naukowego. Jednakże, aby zachować zgodność z metodologią naukową, można by również sformułować hipotezę badawczą.

W kolejnym rozdziale, zatytułowanym „*Stan wiedzy*” (“*State of the art*”), opisano aktualny stan badań w czterech wydzielonych dziedzinach istotnych dla niniejszej rozprawy. Po omówieniu skutków zmian klimatu, zmian w użytkowaniu oraz pokryciu terenu (ang. *Land Use/Land Cover*, LULC) oraz zastosowań modelowania hydrologicznego następuje omówienie metod oceny podatności na zalewy powodziowe. Przegląd ten zawiera również swoiste refleksje sformułowane przez doktoranta. Chociaż argumenty dotyczące czasochłonności i problemów z kalibracją modeli hydrologicznych i hydraulicznych są powtarzane zgodnie z literaturą naukową, przedstawiono również krytykę dotyczącą charakteru modeli sztucznej inteligencji jako modeli typu „czarna skrzynka” (ang. *black-box*). Ta ostatnia uwaga jest całkowicie słuszna, ale nie jest zbyt często przywoływana w publikacjach dotyczących map podatności na zalewy. Kolejne sekcje ilustrują koncepcję zielonej infrastruktury w miastach oraz czynniki ją determinujące wraz z przykładami. W następnej części omawiane jest wdrażanie rozwiązań opartych na naturze (NbS) oraz narzędzi GeoAI w planowaniu urbanistycznym.

Rozdział 3 nosi tytuł „*Obszar badań i ramy danych*” (“*Study area and data framework*”). W pierwszych fragmentach autorka precyzyjnie wyjaśnia powody wyboru Gdańska,

największego portu nad Morzem Bałtyckim jako studium przypadku. Rozdział zawiera szczegółowe informacje na temat tego obszaru oraz interesującą dyskusję na temat wdrażania systemów informacji geograficznej (GIS) w polskich miastach. W tabeli 3.1 wymieniono dane źródłowe wraz z odniesieniami do kolejnych rozdziałów, w których zostały one wykorzystane. Krótka dyskusja połączona z klasyfikacją różnych typów informacji mogłaby uwypuklić różnice między danymi rozłożonymi przestrzennie a danymi punktowymi, a także między danymi statycznymi a danymi opisującymi zmiany zachodzące w pewnym czasie. Pomocne byłoby sprecyzowanie, które dane pochodzą ze źródeł polskich, które z serwisów europejskich, a które mają charakter globalny.

W rozdziałach od 4 do 7 omówiono poszczególne metody zastosowane w badaniach. Struktura wewnętrzna każdego z tych rozdziałów jest podobna. Najpierw w każdym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do zagadnienia, następnie opisano metodologię, zaprezentowano uzyskane wyniki, przedstawiono dyskusję i sformułowano krótkie wnioski. Pierwsze dwa rozdziały (rozdziały 4 i 5) poświęcone są modelowaniu powodzi przy użyciu dwóch podejść: standardowego modelowania hydrologicznego oraz mapowania podatności na zalewy z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Kolejne dwa rozdziały (rozdziały 6 i 7) poświęcone są zielonej infrastrukturze i rozwiązaniom opartym na naturze. W kolejnych akapitach bardziej szczegółowo opisano część poświęconą metodologii.

Rozdział 4, zatytułowany „*Dynamika użytkowania gruntów i reakcje hydrologiczne*” („*Land Use Dynamics and Hydrological Response*”), poświęcony jest zmianom w użytkowaniu i pokryciu terenu w miastach, ze szczególnym uwzględnieniem Gdańska. W badaniach wykorzystano dane satelitarne z satelitów Landsat i Sentinel-2. Serwis internetowy Google Earth Engine (GEE) wykorzystano narzędzie do przetwarzania danych. Następnie za pomocą modelu HEC-HMS przeprowadzono modelowanie wpływu zmian w użytkowaniu i pokryciu terenu (LULC) na hydrologię miejską. Rysunek 4.1 ilustruje ogólną koncepcję, natomiast rysunek 4.2 przedstawia zlewnię. Znajdują się tam również dwa równania omawiające kluczowe elementy metody zastosowanej do obliczenia tzw. „strat opadu” (ang. *abstractions*¹), a mianowicie NRCS-CN (wcześniej znanej jako SCS-CN). Zgodnie z tekstem model hydrogramu jednostkowego typu SCS-CN został użyty do transformacji opadu efektywnego w odpływ ze zlewni, a model Muskingum opisuje propagację fal wezbraniowych w kanałach. Ponieważ metody te nie są domyślnym wyborem w zastosowanym oprogramowaniu, dobrze byłoby uzasadnić ich wybór i krótko przedstawić ich parametry. Nie jest również jasne, jaki model dopływu wody podziemnej (ang. *baseflow*) został wybrany. W tabeli 4.1 podsumowano konfigurację symulacji, natomiast w tabeli 4.2 krótko scharakteryzowano przyjęte scenariusze zmian klimatu. Doktorantka skupiła się na prognozach związanych ze scenariuszami RCP4.5 i RCP8.5 zalecanymi przez IPCC (Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu). Wyniki omówiono przy użyciu 3 tabel i 10 rysunków. Moim zdaniem mapy przedstawiające historyczne zmiany i trendy w użytkowaniu i pokryciu terenu (LULC) mają bardzo duże znaczenie

¹ Ilości wody opadowej, która infiltruje lub jest zatrzymywana jako lokalna retencja

praktyczne. Wyniki części hydrologicznej są głównie poświęcone zmianom współczynnika spływu, co mogłoby pomóc w projektowaniu obiektów infrastruktury wodnej.

W kolejnym rozdziale, „*Tworzenie map podatności na powódzie z wykorzystaniem interpretowalnego uczenia maszynowego*” (“*Flood Susceptibility Mapping with Interpretable ML*”), opisano metody uczenia maszynowego i głębokiego uczenia (ang. *Machine Learning/Deep Learning*, ML/DL) zastosowane do określenia obszarów miasta narażonych na zalewy powodziowe. Rysunek 5.1 przedstawia ogólną koncepcję. Autorka skalibrowała modele trzech różnych typów: maszyny wektorów nośnych (ang. *Support Vector Machine*, SVM), lasu losowego (ang. *Random Forest*, RF) oraz sztucznych sieci neuronowych (ang. *Artificial Neural Networks*, ANN). Podstawą procesu uczenia są dane z interwencji podczas powodzi w okresie 12 lat (2010–2022), uzyskane od Państwowej Straży Pożarnej oraz Gdańskiego Zakładu Wodociągów. Czynniki wywołujące podzielono na fizyczne i antropogeniczne. Do przeprowadzenia szczegółowej analizy wrażliwości zastosowano metodę klasyfikacji danych nazywaną *SHapley Additive exPlanations* (SHAP). W rozdziale znajduje się 21 równań wyjaśniających kluczowe elementy modeli oraz definiujących wskaźniki statystyczne. Tabela 5.1 zawiera podsumowanie parametrów modeli wybranych w niniejszym badaniu. Wyniki przedstawiono w 4 tabelach i na 9 rysunkach. Rysunek 5.9 przedstawia uzyskane mapy podatności na zalewy, natomiast rysunek 5.10 pokazuje obszary narażone wyłącznie na gwałtowne spływy powierzchniowe (ang. *flash floods*).

Omówienie zagadnienia zielonej infrastruktury i rozwiązań opartych na naturze rozpoczyna się w rozdziale 6, zatytułowanym „*Rozmieszczenie przestrzenne i czynniki determinujące zieloną infrastrukturę*” (“*Spatial Distribution and Determinants of Green Infrastructure*”). Rysunek 6.1 ilustruje elementy metodologii, a ich opis jest wsparty 9 kluczowymi równaniami. Ogólnie rzecz biorąc, etapy te obejmują gromadzenie danych, trzy etapy przetwarzania danych oraz analizę wyników przedstawioną na koniec. Trzyetapowe przetwarzanie danych obejmuje przetwarzanie wstępne, w tym wybór rozdzielczości, autokorelację przestrzenną oraz regresję między gęstością zielonej infrastruktury a „*czynniki wyjaśniające*” (ang. *explanatory factors*). Siatka o rozdzielczości 1 km służy do przedstawienia przestrzennego rozkładu gęstości zielonej infrastruktury w całym mieście. Metody obliczania autokorelacji wykorzystano do sprawdzenia czy wartości gęstości zielonej infrastruktury są skupione przestrzennie, rozproszone czy rozmieszczone losowo. Regresję między gęstością zielonej infrastruktury a „*czynniki wyjaśniającymi*” przeprowadzono w środowisku Python Colab. Zastosowana metodologia jest zaawansowana oraz zapewnia uzyskanie poprawnych wyników o znaczeniu praktycznym. Przykłady przedstawiono na 6 rysunkach oraz w 2 tabelach. Pozostałe wyniki zamieszczono w załączniku B. Warto podkreślić, że rozdział 6 zawiera wyniki o szczególnym znaczeniu teoretycznym, np. wykresy przedstawiające korelacje między „*czynniki wyjaśniającymi*” (rysunek 6.4) oraz porównanie skuteczności modeli regresji (tabela 6.2). Znajdują się w nim jednak również wyniki o

dużej przydatności dla praktyków, np. mapa gęstości zielonej (rysunek 6.2) oraz mapa obszarów priorytetowych dla lokalizacji zielonej infrastruktury (rysunek 6.7).

Rozdział 7, „*Ramy GeoAI do oceny przydatności rozwiązań opartych na naturze (NBS) i analizy wód opadowych*” (“*GeoAI Framework for NBS Suitability & Stormwater Analysis*”), opisuje zastosowanie narzędzi GeoAI do sensownego planowania rozwiązań opartych na naturze, takich jak dachy błękitno-zielone (ang. *blue-green roofs*, BGR), zieleń uliczna i drzewa przyuliczne, a następnie przedstawia oszacowanie retencji i przechwytywania wód opadowych w mieście. Zastosowana metodologia łączy procedury geoprzetwarzania, przetwarzanie i rozpoznawanie obrazów oraz metody uczenia maszynowego (ang. *machine learning*, ML) i głębokiego uczenia (ang. *deep learning*, DL). Cała procedura została przedstawiona na schemacie na rysunku 7.1. Na tym etapie badań wdrożono różne rodzaje modeli, np. Mask2Former, XGBoost i RESILO. Opis metodologii uzupełnia 8 równań i jedna tabela (tabela 7.1), zawierająca krótką charakterystykę badanych scenariuszy opadów. Generalnie, metodologię zaimplementowaną w modelach można by opisać bardziej szczegółowo. Wyniki przedstawiono i zilustrowano za pomocą 5 rysunków i 2 tabel. Rysunki zawierają przykłady map i zdjęć miasta (zdjęcia z poziomu gruntu), które ilustrują zaimplementowane koncepcje. Więcej wyników znajduje się w załączniku C. Tabele przedstawiają charakterystyki redukcji retencji oraz wpływ przechwytywania opadu. Efektem analiz są również dwa publicznie dostępne serwisy internetowe o nazwach *GreenRoofs* oraz *GreenStreets*.

Omówienie powyższych koncepcji znajduje się w rozdziale 8, zatytułowanym „*Synteza, implikacje i możliwość przeniesienia*” (“*Synthesis, Implications & Transferability*”). Rozpoczyna się ono graficznym podsumowaniem omówionych wcześniej koncepcji (rysunek 8.1). Rozdział ma charakter szerokiej dyskusji, jednak wnioski przedstawiono w następnym rozdziale 9. Doktorantka prowadzi tę dyskusję wychodząc od syntezy rozdziałów poświęconych metodologii, poprzez refleksje na temat wkładu metodologicznego wniesionego przez narzędzia GeoAI, aż po rozważania dotyczące ich niepewności i stosowalności. Rekomendacje dla miasta Gdańska przedstawiono w trzech tabelach, obejmujących zalecenia dotyczące zasad postępowania, procesu wdrażania oraz zarządzania konfliktami przestrzennymi.

W rozdziale 9, zatytułowanym „*Wnioski i dalsze badania*” (“*Conclusion and Future Research*”), w pierwszej kolejności wykazano, że cel badań został osiągnięty, oraz wyjaśniono w jaki sposób. Następnie skupiono się na zadaniach naukowych określonych we Wstępie (“*Introduction*”). Rozdział 4 przedstawia pierwsze ilościowe ujęcie dynamiki zmian w użytkowaniu i pokryciu terenu (LULC) oraz wpływu zmian klimatu na spływ powierzchniowy, co jest głównym celem zadania nr 1. Kolejny rozdział ilustruje ocenę podatności na zalewy powodziowe w środowisku miejskim, co stanowi zadanie nr 2. Rozdział 6 poświęcony jest zadaniu nr 3, tj. rozmieszczeniu zielonej infrastruktury w Gdańsku i jej powiązaniom z charakterystykami hydrologicznymi. Wreszcie w rozdziale 7 określono potencjał na wprowadzenie zieleni miejskiej, uwzględniając korzyści wynikające ze skumulowanego zatrzymywania wód opadowych, co stanowi zadanie nr 4. Ponadto autorka podkreśla szczególne innowacje osiągnięte podczas badań, np.

zastosowanie „opartego na scenariuszach modelu oceny potencjału dla wprowadzenie zieleni miejskiej (ang. *greening potential score, GPS*), który łączy techniczną wykonalność zielonych dachów z ograniczeniami planistycznymi”. Następnie podsumowano i w skrócie omówiono ograniczenia badań. Autorka przedstawia spostrzeżenia i sugestie wykraczające poza obecną praktykę i stan wiedzy, np. sugeruje, że w mapowaniu podatności na zalewy powodziowe nie uwzględnia się rodzaju powodzi, podczas gdy uzyskane wyniki wskazują na znaczenie tego czynnika. Na koniec autorka przedstawia wnioski i podkreśla „najważniejszy wynik badań”: połączenie czterech, mniej lub bardziej odrębnych metod w jedną procedurę. Zgodnie z wiedzą recenzenta jest to jak najbardziej aktualny przedmiot badań i cel wielu naukowców pracujących w dziedzinie zarządzania ryzykiem powodziowym. Dlatego innowacyjność proponowanej metodyki jest oczywista.

Warto podkreślić, że przedstawienie metodologii w czterech odrębnych rozdziałach daje zdecydowanie lepszy efekt niż zastosowanie typowego schematu: *materiały – metody – wyniki – dyskusja*. Przedstawiony opis jest jasny i zrozumiały. Powiązania między poszczególnymi elementami są dobrze zdefiniowane i podsumowane w rozdziale 8.

4. Uwagi i pytania

Główne uwagi i pytania

- A. Elementy hydrologiczne są aktualnie obecne w modelach hydrodynamicznych. Oprogramowanie takie jak HEC-RAS czy Iber pozwala symulować przepływ 2D na określonych obszarach, uwzględniając opady deszczu i infiltrację. Czy możliwe jest, że model, którego podstawą są pełne równania bilansu masy i pędu, np. równania płytkiej wody (ang. *shallow water equations*), dałby bardziej interesujące wyniki? W jaki sposób taki model można by zweryfikować na danych wykorzystanych w obecnych badaniach?
- B. Podwójne maksima wykresu przedstawiającego zależność częstotliwości od odległości od koryta rzeki (rysunek 5.2) sugerują, że w zbiorze danych występują zarówno powodzie rzeczne, jak i innego typu. Przypuszczalnie zalania w dużych odległościach od rzeki były spowodowane opadami deszczu i spływem powierzchniowym lub awarią kolektorów. W rozdziale „Wnioski” (*“Conclusions”*) znajduje się uwaga dotycząca roli rodzaju powodzi (w sekcji „9.1. Ograniczenia i przyszłe badania”, tzn. *“9.1. Limitations and future research”*). W jaki sposób ten aspekt mógłby wpłynąć na prezentowane mapy podatności na zalewy powodziowe? Czy możliwe jest, że rozkład obszarów podatnych na zalewy powodziowe w mieście wyglądałby inaczej, gdyby uwzględniono rodzaj powodzi?
- C. Czy możliwe jest wykorzystanie zdjęć satelitarnych historycznych powodzi do kalibracji modeli uczenia maszynowego (ang. *machine learning, ML*) i głębokiego uczenia (ang. *deep learning, DL*)? Czy taki model nadal generowałby mapę podatności na zalewy powodziowe, czy też mógłby symulować przebieg powodzi i stworzyć pełną mapę zagrożenia powodziowego?

- D. W dziedzinie modelowania hydrologicznego pojawia się nowa klasa metod, a mianowicie sieci neuronowe wsparte zależnościami fizycznymi (ang. *physics-informed neural networks*, PINN). Łączą one klasyczne uczenie głębokie (ang. *deep learning*, DL) oparte na sztucznych sieciach neuronowych (ang. *artificial neural networks*, ANN) z modelowaniem wykorzystującym klasyczne zasady zachowania (masy, pędu itp.). Czy możliwe jest wdrożenie takich koncepcji w przedstawionej metodyce?

Dodatkowe uwagi i sugestie

- (1) Byłoby dobrze, gdyby sformułowano hipotezę leżącą u podstaw przeprowadzonych badań, a wnioski odnosiłyby się do niej.
- (2) Dlaczego sieć rzek pobrano z globalnego serwisu OpenStreetMap? Czy nie było możliwości uzyskania takich danych z polskiego MPHP (*Mapa Podziału Hydrograficznego Polski*)? Które ze źródeł jest dokładniejsze?
- (3) Analiza dotyczy miasta, co wymaga danych przestrzennych o większej rozdzielczości lub bardzo dokładnych warstw wektorowych. Jednak niektóre dane rastrowe opisujące użytkowanie terenu (LULC) oraz wskaźniki wegetacji (NDVI, NDWI) mają raczej niską rozdzielczość (30 m, 100 m). Czy miało to wpływ na wyniki?
- (4) Jakie są parametry poszczególnych modeli zastosowanych w programie HEC-HMS, a mianowicie hydrogramu jednostkowego typu SCS-CN oraz modelu Muskingum? Który model wybrano do szacowania zasilania wodami podziemnymi (ang. *baseflow*)? Jaką formułę i definicję przyjęto dla często stosowanego współczynnika spływu (ang. *runoff coefficient*)?
- (5) Wymieniono różne miary służące do oceny dokładności modeli ML/DL (RMSE, MAE, ACC itp.). Które z nich zastosowano podczas uczenia (70% przypadków), a które podczas weryfikacji (30% przypadków)? Jaką metodę uczenia zastosowano, np. metody gradientowe, metody wyszukiwania bezpośredniego, optymalizację globalną, metodę prób i błędów?
- (6) Czy wykorzystanie Google Colab jako środowiska języka Python wynika z dostępności modułów w tym serwisie? Czy możliwe jest przeprowadzenie tej samej analizy w standardowym środowisku Python z wykorzystaniem `pip` lub `conda` do zarządzania pakietami?
- (7) Ogólnie rzecz biorąc, dobrze byłoby, gdyby różne modele wykorzystane w rozdziale 7, tj. Mark2Former, XGBoost i RESILO, zostały dokładniej opisane.

Wykryte nieścisłości i błędy redakcyjne

- (1) W spisie treści mogłyby być umieszczone takie elementy jak:
 - a. streszczenie graficzne (str. 6),
 - b. podziękowania (str. 7),
 - c. bibliografia (str.150),
 - d. załączniki (od str. 172)
- (2) We Wprowadzeniu (str. 17) ta sama koncepcja została sformułowana dwukrotnie w następujący sposób:

“Machine learning and explainable artificial intelligence offer a pathway beyond these modelling limitations, but their transformative potential lies not in applying them individually, but in chaining them with remote sensing and hydrological analysis into a coherent analytical pipeline.”

Oraz w następującym zdaniu:

“Machine learning models offer a pathway beyond these modelling limitations, but their transformative potential lies in chaining them with remote sensing and hydrological analysis into a coherent pipeline rather than applying them individually [...]”

- (3) Rysunek 3.1: Skalę numerycznego modelu terenu (ang. *digital elevation model*, DEM) w górnej części można zaokrąglić, np. od -20 do 180 m n.p.m.
- (4) Nie jest do końca jasne, jaka jednostka [ms] została użyta w zdaniu „*Fale sztormowe, [...], mogą podnieść poziom morza o ponad 1,5 ms, a prognozy wskazują, że potencjalne fale mogą osiągnąć nawet 2.5 ms*” (“*Storm surges, [...], can raise sea levels by over 1.5 ms, with projections indicating potential surges reaching up to 2.5 ms.*”) (str. 32).
- (5) Tabela 3.1: Opis w drugiej kolumnie (Rozdzielczość i Rok, ang. *Resolution & Year*) jest nieco mylący. Skala mapy (np. mapy glebowej, ang. *soil map*) odzwierciedla poziom szczegółowości, a nie rozdzielczość. Ponadto w przypadku numerycznych modeli terenu (ang. *digital elevation models*, DEM) można by podać dokładność pionową.
- (6) Rysunek 4.1: Czcionki użyte w opisach powinny być większe. Nie są one wyraźnie widoczne.
- (7) Rysunek 4.2: Skalę numerycznego modelu terenu (ang. *digital elevation model*, DEM) można by zaokrąglić, np. od 0 do 160 m n.p.m.
- (8) Błędny numer rysunku w rozdziale 4 na stronie 46. Zamiast „*Rysunek 4.3*” (“*Figure 4.3*”) widnieje „*Rysunek 2.3*” (“*Figure 2.3*”).
- (9) Rysunek 5.1: Schemat blokowy jest nieco zbyt skomplikowany. Nie jest do końca jasne, w jakim kierunku przebiega przepływ informacji na tym schemacie.
- (10) Rysunek 5.2: Wykresy gleb (ang. *soil*) oraz użytkowania i pokrycia terenu (abbr. *LULC*) powinny być przedstawione i zinterpretowane w inny sposób niż wykresy pozostałych elementów. Gleby i *LULC* reprezentują cechy nieciągłe i nieuporządkowane. Dodatkowo oś pionowa przedstawiająca częstotliwość powinna mieć tę samą skalę. Być może lepiej byłoby zastosować częstotliwość względną, aby wartości na osi pionowej mieściły się w przedziale od 0 do 1.
- (11) Rysunek 6.4: Nie jest jasne, czym są PR1, PR2, PR3 i PR4 na liście zmiennych zależnych. Czy są to prognozowane opady związane ze scenariuszami RCP4.5 i RCP8.5 określonymi dla okresów 2021–2050 i 2071–2100?
- (12) W sekcji 6.1.4 użyto terminu „czynniki wyjaśniające” (ang. “*explanatory factors*”). Termin ten należy tutaj wyjaśnić. O „czynnikiach” (ang. “*factors*”) wspomniano we *Wprowadzeniu (Introduction)* (str. 26), ale nie nazwano ich „wyjaśniającymi” (ang. “*explanatory*”). Dla czytelnika niezaznajomionego z terminologią stosowaną w metodach regresji stwierdzenie to może być mylące. Moim zdaniem należy to wyjaśnić w tekście.

- (13) W opisie równania 7.3 użyto terminu „*proportion*” (pol. „*proporcja*”). Jednak z kontekstu wynika, że bardziej odpowiednie byłoby użycie terminu „*ratio*” (pol. „*stosunek*”).
- (14) Błędny numer rysunku w załączniku A na stronie 174. Zamiast „*Rysunek A.2*” (ang. „*Figure A.2*”) widnieje „*Rysunek 3*” (ang. „*Figure 3*”).
- (15) Błędny numer rysunku w załączniku C na stronie 189. Zamiast „*Rysunek C.2*” (ang. „*Figure C.2*”) widnieje „*Rysunek C4*” (ang. „*Figure C4*”).
- (16) Na liście źródeł występują powtórzenia, np.:
- 44 Cheng, B., Misra, I., Schwing, A.G., Kirillov, A., Girdhar, R., 2022a. Masked-attention mask transformer for universal image segmentation, in: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 1290–1299.
 - 45 Cheng, B., Misra, I., Schwing, A.G., Kirillov, A., Girdhar, R., 2022b. Masked-attention mask transformer for universal image segmentation, in: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 1290–1299.
- (17) W wykazie bibliograficznym występują również pewne problemy z formatowaniem, np.:
- 73 Ewelina, C., Liliana, J., Katarzyna, K., Mateusz, K., Wojciech, Ł., Aleksandra, Ł., Piotr, O., Karolina, P., Paweł, P., Agnieszka, R., Agnieszka, S., Magdalena, Z., 2021a. Raport o stanie polskich miast. Środowisko i adaptacja do zmian klimatu / Report on the State of Polish Cities: Environment and Adaptation to Climate Change. Warszawa – Kraków.

5. Końcowa ocena rozprawy

Problem badawczy został poprawnie zdefiniowany. Jego znaczenie nie budzi żadnych wątpliwości, a zastosowane metody są zaawansowane i zgodne z aktualnym stanem wiedzy. Nie wykryto poważnych błędów ani uchybień. Złożoność poruszonego problemu jest duża a zakres przeprowadzonych analiz bardzo szeroki. Wybór zaawansowanej i zróżnicowanej metodyki jest w pełni uzasadniony. Wszystkie te elementy razem sprawiają, że przedłożona rozprawa doktorska jest oryginalna i cechuje ją duża innowacyjność. Wyniki stanowią cenny wkład w stan wiedzy i niosą ze sobą ogromny potencjał praktyczny. Przedstawiona metodologia może być bezpośrednio zastosowana w Gdańsku i z łatwością przeniesiona na inne lokalizacje. Niektóre wyniki są już dostępne dla potencjalnych interesariuszy i decydentów za pośrednictwem profesjonalnie przygotowanych serwisów internetowych. Jest to też dobry przykład, w jaki sposób należy zorganizować komunikację ze społeczeństwem.

Temat badań jest bardzo ważnym zagadnieniem z zakresu dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Rozprawa podkreśla znaczenie dokładnej oceny hydrologicznej oraz identyfikacji obszarów zagrożonych powodzią w procesie planowania i projektowania infrastruktury miejskiej. W związku z tym ma ona istotny wpływ na inne dziedziny badań naukowych i praktyki, takie jak hydrologia, ochrona przeciwpowodziowa oraz planowanie przestrzenne. Wyraźnie wykazano przydatność zielonej infrastruktury i rozwiązań opartych na naturze. Ponadto badanie ilustruje potencjał narzędzi GeoAI w planowaniu przestrzennym i gospodarowaniu terenami. Przeprowadzone analizy przyczyniają się do lepszego zrozumienia procesów, skutków i praktyk zarządzania w środowisku miejskim. Mogą one również wpłynąć na dalszy rozwój modelowania hydrologicznego i

hydrodynamicznego, a także na zastosowanie metod uczenia maszynowego i głębokiego uczenia w hydrologii.

6. Wnioski

Ogólnie rzecz biorąc, praca doktorska stanowi cenny wkład w badania nad modelowaniem powodzi miejskich, zapobieganiem powodziom oraz planowaniem przestrzennym infrastruktury przeciwpowodziowej. W pracy wykazano również potencjalne zastosowanie uzyskanych wyników. Doktorantka wykazała się rozległą wiedzą i dogłębnym zrozumieniem literatury fachowej przy formułowaniu celów pracy, prowadzeniu badań i analizowaniu wyników. Uważam, że praca doktorska zasługuje na wyróżnienie ze względu na szeroki zakres i zaawansowanie przedstawionych badań, jej znaczenie dla nauki oraz praktyczną użyteczność.

Praca doktorska przedłożona przez panią Khanę Gulshad spełnia wszystkie wymagania dotyczące prac doktorskich określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce. Na podstawie mojej pozytywnej oceny rekomenduję Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport dopuszczenie pani Khansy Gulshad do kolejnych etapów procesu nadawania stopnia doktora, w tym do publicznej obrony pracy.



Tomasz Dysarz