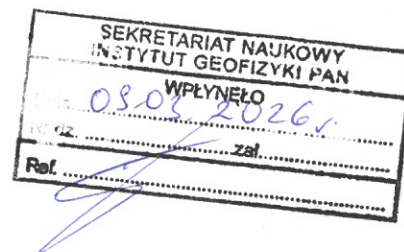


SN.410.4.4.2026



Abstract in Polish

W kontekście coraz częstszych zagrożeń powodziowych wywołanych zmianami klimatu, wiarygodne modelowanie hydrodynamiczne jest niezbędne dla skutecznego zarządzania powodziami. Wśród wszystkich parametrów wejściowych modeli szorstkość, najczęściej reprezentowana przez współczynnik Manninga n , odgrywa kluczową rolę w regulacji oporów przepływu. Jednak większość modeli hydrodynamicznych zakłada stałe wartości szorstkości i pomija dynamikę roślinności, mimo że roślinność zmienia się sezonowo lub nagle w wyniku zdarzeń takich jak powódzie i istotnie wpływa na opory hydrauliczne. Założenie to może zwiększać niepewność modeli, szczególnie na odcinkach rzek z porośniętymi roślinnością łachami rzecznyymi.

W celu przewycięzenia tego ograniczenia niniejsze badanie proponuje ramy metodyczne do estymacji dynamicznej szorstkości roślinności poprzez integrację obserwacji z bezzałogowych statków powietrznych (UAV) oraz teledetekcji satelitarnej. Kampanie UAV przeprowadzone w okresie wzrostu roślinności (maj 2025 r.) na dwóch dużych rzekach europejskich, Wiśle (Polska) i Padzie (Włochy), dostarczyły danych o wysokiej rozdzielczości dotyczących cech roślinności oraz danych wielospektralnych. Wysokość roślinności (h) została powiązana z wielospektralnymi wskaźnikami roślinności (NDVI, GNDVI, LCI, NDRE oraz OSAVI) z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego (Random Forest oraz Extra Trees z trzykrotną walidacją krzyżową). Wskaźniki roślinności obliczone na podstawie zobrażeń Sentinel-2 zostały następnie wykorzystane w wytrenowanym modelu do estymacji satelitarnej wysokości h . Dynamiczna szorstkość roślinności oparta na danych satelitarnych została

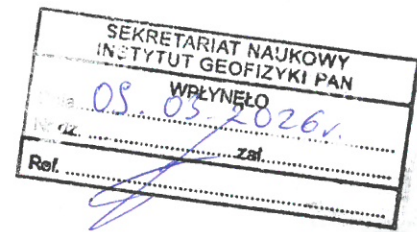
obliczona na podstawie oszacowanej wysokości roślinności przy użyciu wzoru Manninga i zaimplementowana w modelu numerycznym Delft3D Flexible Mesh w celu oceny wpływu satelitarnie oszacowanej szorstkości roślinności na przepływy.

Wyniki wykazały, że modele uczenia maszynowego osiągały lepsze rezultaty dla roślinności o wysokości 0–3 m niż dla roślinności o wysokości 3–20 m, co wskazuje na większą wiarygodność w przypadku traw i krzewów niż drzew. Walidacja względem obserwacji UAV wykazała wysoką zgodność, z wartościami R^2 równymi 0,95 (Wisła) oraz 0,94 (Pad) oraz niskim obciążeniem systematycznym. Kalibracja modelu hydrodynamicznego wykazała, że optymalna stała wartość współczynnika Manninga n wynosi 0,06 zarówno dla odcinka Wisły, jak i Padu. Zarówno podejście ze stałą szorstkością, jak i podejście z dynamiczną szorstkością dobrze odwzorowały przepływ (r_p^2 oraz $NSE > 0,90$), choć zaobserwowano systematyczne niedoszacowanie. Dynamiczna szorstkość zmniejszyła błąd w warunkach zmiennej roślinności, szczególnie na odcinku Wisły.

Podsumowując, zaproponowane podejście umożliwia satelitarną estymację szorstkości roślinności oraz potwierdza jego przydatność w modelowaniu hydrodynamicznym rzeczywistych rzek. Opracowane ramy stanowią rozwiązanie efektywne pod względem czasu i kosztów w zakresie integracji dynamiki roślinności z symulacjami powodziowymi oraz wspierają bardziej fizycznie spójne zarządzanie ryzykiem powodziowym.

Słowa kluczowe: wysokość roślinności, szorstkość roślinności, bezałogowe statki powietrzne, zobrażenia satelitarne, uczenie maszynowe, model Delft3D FM, Wisła, Pad.

SN.410.4.5.2026



Abstract

In the context of increasingly frequent flood hazards driven by climate change, reliable hydrodynamic modelling is essential for effective flood management. Among all model input parameters, roughness, which is commonly represented by Manning's n , plays a critical role in regulating flow resistance. However, most hydrodynamic models assume fixed roughness values and neglect vegetation dynamics, even though vegetation varies seasonally or suddenly due to events such as floods and significantly influences hydraulic resistance. This assumption may increase model uncertainty, particularly in river reaches with vegetated sandbars.

To address this limitation, this study proposes a framework for estimating vegetation dynamic roughness by integrating uncrewed aerial vehicle (UAV) observations and satellite remote sensing. UAV surveys conducted during the vegetation growth period (May 2025) in two large European rivers, the Vistula (Poland) and the Po (Italy), provided high-resolution vegetation characteristics and multispectral data. The Vegetation height (h) was related to multispectral vegetation indices (NDVI, GNDVI, LCI, NDRE, and OSAVI) using machine learning (Random Forest and Extra Trees with three-fold cross-validation). The vegetation indices calculated from Sentinel-2 imagery were applied to the trained model for satellite-based h estimation. Satellite-based dynamic vegetation roughness was calculated from the estimated vegetation height using Manning's formulation and implemented in the numerical model Delft3D Flexible Mesh to evaluate the impact of satellite-based vegetation roughness on flow discharges.

The results showed that the machine learning models performed better for

vegetation heights between 0-3 m than for 3-20 m, indicating higher reliability for grass and shrubs than for trees. Validation against UAV observations showed strong agreement, with R^2 values of 0.95 (Vistula) and 0.94 (Po), and low systematic bias. Hydrodynamic calibration identified optimal fixed Manning's n values of 0.06 for both the Vistula and Po reaches. Both fixed and dynamic roughness approaches reproduced discharge accurately (r_p^2 and $NSE > 0.90$), although systematic underestimation was observed. Dynamic roughness reduced bias under varying vegetation conditions, particularly in the Vistula reach.

Overall, the proposed approach enables satellite-based estimation of vegetation roughness and demonstrates its applicability in real-river hydrodynamic modelling. The framework provides a time- and cost-efficient solution for integrating vegetation dynamics into flood simulations and supports more physically consistent flood management practices.

Keywords: Vegetation Height, Vegetation Roughness, Uncrewed Aerial Vehicle, Satellite Imagery, Machine learning, Delft 3D FM model, Vistula River, Po River.