

*Leszek Książek, Maciek Wyrębek, Mateusz Strutyński, Andrzej Strużyński,
Jacek Florek, Wojciech Bartnik*

**ZASTOSOWANIE MODELI JEDNOWYMIAROWYCH
(HEC-RAS, MIKE 11) DO WYZNACZANIA STREF
ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO NA RZECIE LUBCZY
W ZLEWNI WISŁOKA**

***APPLICATION OF 1D MODELS (HEC-RAS, MIKE 11) TO
DESIGNATE FLOOD HAZARD AREAS ON THE LUBCZA
RIVER, THE WISŁOK BASIN***

Streszczenie

Do obliczenia układu zwierciadła wody dla przepływów prawdopodobnych w przypadku wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego stosuje się modele jednowymiarowe, np. HEC-RAS, MIKE 11. Programy hydroinformatyczne HEC-RAS i MIKE 11 służą do modelowania przepływu wody w korycie i dolinie rzecznej wraz z obiektami inżynierskimi o złożonych konstrukcjach (mosty, przepusty, jazy i inne). Etapami powstawania modelu są: schematyzacja sieci rzecznej, pomiary geodezyjne, obejmujące koryto rzeczne i budowle inżynierskie, identyfikacja współczynników szorstkości, obliczenia hydrologiczne przepływów w wybranych przekrojach modelowanego cieką, stanowiące warunki brzegowe, obliczenia numeryczne wraz z kalibracją i weryfikacją modelu oraz wizualizacja wyników obliczeń.

W artykule przedstawiono wyniki modelowania odcinka rzeki Lubcza w zlewni Wisłoka o długości ok. 8,7 km (zlewnia niekontrolowana), na którym zlokalizowanych jest 17 mostów oraz 12 stopni i progów wodnych. Podstawą analiz i porównania uzyskanych wyników modelowania są rzędne zwierciadła wody dla przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia oraz utworzony na ich podstawie Numeryczny Model Powierzchni Wody (NMPW). Strefy zagrożenia powodziowego powstają z przecięcia numerycznego modelu terenu (NMT) i NMPW. Znajomość układu zwierciadła wody umożliwia określenie stref zagrożenia powodziowego.

Słowa kluczowe: model jednowymiarowy, strefa zagrożenia powodziowego, Lubcza

Summary

1-dimensional models, e.g. HEC-RAS, MIKE 11 are used to calculate water surface elevation concerning probable discharges for flood hazard areas designation. Hydro-informatic software programs HEC-RAS and MIKE 11 are used for modeling of water discharge in the river bed and in the river valley, with engineering objects of complicated structure (bridges, culverts, weirs etc.). The following stages of modeling may be distinguished: schematisation of water network, geodetic measurements of the river bed and engineering buildings, identification of roughness coefficients, hydrological calculations of discharges in selected profiles of the modelled watercourse considering the boundary conditions, numeric calculations with calibration and verification of the model as well as visualisation of the calculations' results.

The paper presents the results of modeling of a sector of The Lubcza River in the Wislok basin having length equal 8,7 km (uncontrolled basin), in which 17 bridges and 12 weirs are located. The elevations of the water surface for discharges of the defined probability of exceedances and the Digital Model of the Water Surface (DMWS) are the basis for the analyses and comparison of the obtained results. Flood hazard areas occur on the intersection of the Digital Terrain Model (DTM) and DMWS. The knowledge of water surface permit the destination of the flood hazard areas.

Key words: 1-dimensional model, flood hazard area, The Lubcza River

WSTĘP

Do obliczenia układu zwierciadła wody dla przepływów prawdopodobnych o stosunkowo niewielkich napełnieniach stosuje się modele jednowymiarowe, np. HEC-RAS, MIKE 11. Etapami powstawania modelu są:

- 1) analiza sieci rzecznej wraz z interpretacją numerycznego modelu terenu i ortofotomap,
- 2) pomiary geodezyjne obejmujące koryto rzeczne i budowle inżynierskie,
- 3) identyfikacja współczynników szorstkości,
- 4) obliczenia hydrologiczne przepływów w poszczególnych przekrojach modelowanego ciekę, określające warunki brzegowe,
- 5) przeprowadzenie symulacji i wizualizacja wyników obliczeń,
- 6) kalibracja i weryfikacja modelu.

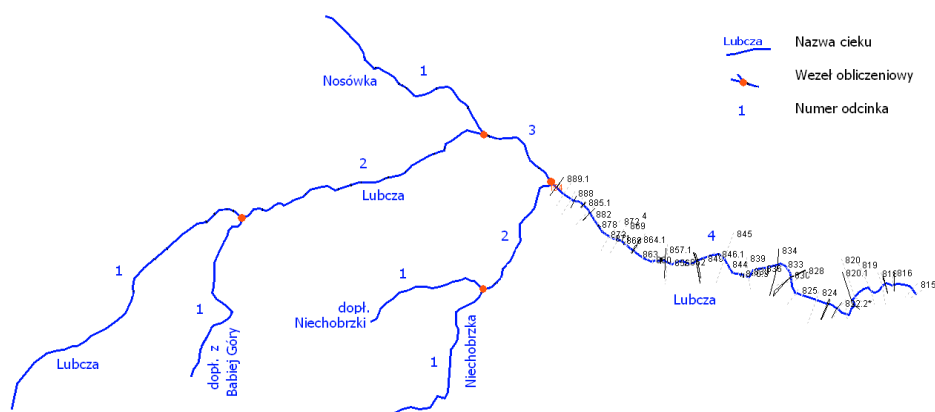
Kalibracja i weryfikacja modelu w przypadku zlewni niekontrolowanych polega na eksperckiej ocenie wyników obliczeń. W przypadku zlewni kontrolowanych porównuje się uzyskane wyniki, między innymi przepływu, układu zwierciadła wody, objętości fali, z falami historycznymi.

Model matematyczny obiektu fizycznego, jakim jest odcinek rzeki, jest to abstrakcja matematyczna wiążąca z sobą zmienne charakteryzujące stan obiektu (warunki początkowe), oddziaływanie zewnętrzne na obiekt (warunki brzegowe) i jego reakcję na to oddziaływanie [Szymkiewicz 2000]. Modele matematyczne

stanowią z reguły uproszczenie w stosunku do obiektów rzeczywistych. W praktyce model jest kompromisem pomiędzy dokładnością wyniku a kosztem uzyskania rozwiązania i pozyskania wystarczającej ilości parametrów charakteryzujących obiekt. W związku z tym sposób implementacji danych i rozbudowany interfejs graficzny są drugorzędowymi czynnikami wpływającymi na wynik analizy. Do głównych czynników zaliczyć należy możliwości modelu matematycznego do odtworzenia układu zwierciadła wody w obrębie złożonych obiektów inżynierskich, sposobu odtworzenia ich pracy w czasie, stabilności prowadzonych obliczeń, ich powtarzalności czy też dostępności oprogramowania. Programy hydroinformatyczne HEC-RAS i MIKE 11 potrafią odtworzyć układ zwierciadła wody w warunkach ruchu ustalonego i nieustalonego. Program HEC-RAS jest aktualnie programem ogólnodostępnym, a MIKE 11 komercyjnym.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Rzeka Lubcza (ciek IV rzędu) jest lewostronnym dopływem Wisłoka. Jej długość wynosi $L = 17,8$ km, a powierzchnia zlewni $A = 64,05$ km². Długość odcinka rzeki Lubczy objętego modelowaniem wynosiła 8,72 km (rys. 1). Zasadniczy typ krajobrazu gminy Boguchwała to ukształtowany historycznie kulturowy krajobraz rolniczy. Charakteryzuje się on barwną mozaiką upraw rolnych, łąk, pastwisk i śródpolnych zadrzewień. Na terenie gminy dominują grunty orne, a lasy zajmują około 10% powierzchni gminy. Najbardziej atrakcyjna, południowa część gminy, przewidziana jest do ochrony krajobrazowej w ramach Strzyżowsko-Sędziszowskiego Obszaru Chronionego Krajobrazu. Wiodącą funkcją gminy jest rolnictwo oraz przemysł, zlokalizowany głównie w miejscowości Boguchwała.



Rysunek 1. Schemat sieci rzecznej rzeki Lubcza, 4 – odcinek objęty porównaniem
Figure 1. Scheme of the river network of the Lubcza River, 4 – the comparison reach

Na odcinku badawczym zlokalizowano 19 przekrojów dolinowych, 16 mostów oraz 12 stopni wodnych (75 przekrojów) [Bartnik i in. 2008]. Średnia odległość pomiędzy przekrojami wynosi 185 m, maksymalnie 490 m. Złożona struktura tego odcinka rzeki Lubczy pozwoliła na porównanie układu zwierciadła wody. Na odcinku km 8+717 - 7+321 przepływ $Q_{1\%}$ miał wartość $42,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a poniżej km 7+321-0 wynosił $59,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (odpowiednio przepływ $Q_{10\%} = 21,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i $30,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{50\%} = 7,32 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i $11,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Warunki przepływu wód katastrofalnych określono z wykorzystaniem modelu HEC – RAS, który został opracowany przez US Corps of Engineers [HEC-RAS]. Model ten odwzorowuje ustalony i nieustalony przepływ wody. Program bazuje na wzorze Chèzy:

$$v = C \cdot R_h^{1/2} \cdot S_f^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

- C – współczynnik prędkości,
- R_h – promień hydrauliczny,
- $R_h = F/Oz$,
- Oz – obwód zwilżony,
- F – pole przekroju poprzecznego, S_f – spadek linii energii (zastępowany z reguły przez spadek zwierciadła wody).

Układ zwierciadła wody wyznaczany jest z zasady zachowania energii. Równanie to dla dwóch kolejnych przekrojów przepływu ma postać:

$$Zd_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Zd_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e \quad (2)$$

$$h_e = \bar{S}_f \cdot L_p + C_d \left[\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right] \quad (3)$$

gdzie: spadek tarcia między dwoma sąsiednimi przekrojami,

- L_p – średnia ważona odległość między przekrojami,
- C_d – współczynnik kontrakcji lub dyfuzji w zależności od kształtu strumienia w planie.

MIKE 11 jest jednowymiarowym modelem, służącym do obliczeń nieustalonego przepływu w ciekach na podstawie układu równań ciągłości i zachowania pędu podanego przez Saint-Venanta [MIKE 11 2009]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha Q^2 A^{-1})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR_h} = 0 \quad (5)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu,
- A – przekrój poprzeczny koryta,
- q – dopływ boczny,
- h – rzędna zwierciadła wody,
- x – współrzędna podłużna mierzona wzdłuż biegu koryta,
- R_h – promień hydrauliczny,
- α – współczynnik Coriolisa,
- t – czas,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Równanie to wprowadzone jest przy założeniu nieściśliwości i jednorodności wody, niewielkich spadkach dna, przepływu równoległego do dna oraz ruchu spokojnego [MIKE 11 2009]. Dla przepływu rwącego stosuje się zredukowane równanie (5) w postaci:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR_h} = 0 \quad (6)$$

Dokładność odtworzenia układu zwierciadła wody w programie MIKE 11 wynika z dokładności iteracyjnego obliczenia przepływu (10^{-4}) i pola powierzchni (10^{-3}), a następnie przeliczenia jej na poziom zwierciadła wody. Błąd bezwzględny określenia poziomu wody przez program HEC-RAS wynosi $\Delta h = 0,003\text{m}$, spadku linii energii $\Delta J = 1 \cdot 10^{-6}$, a powierzchni przekroju przepływu $\Delta F = 0,01\text{ m}^2$ [Michalik, Książek 2009].

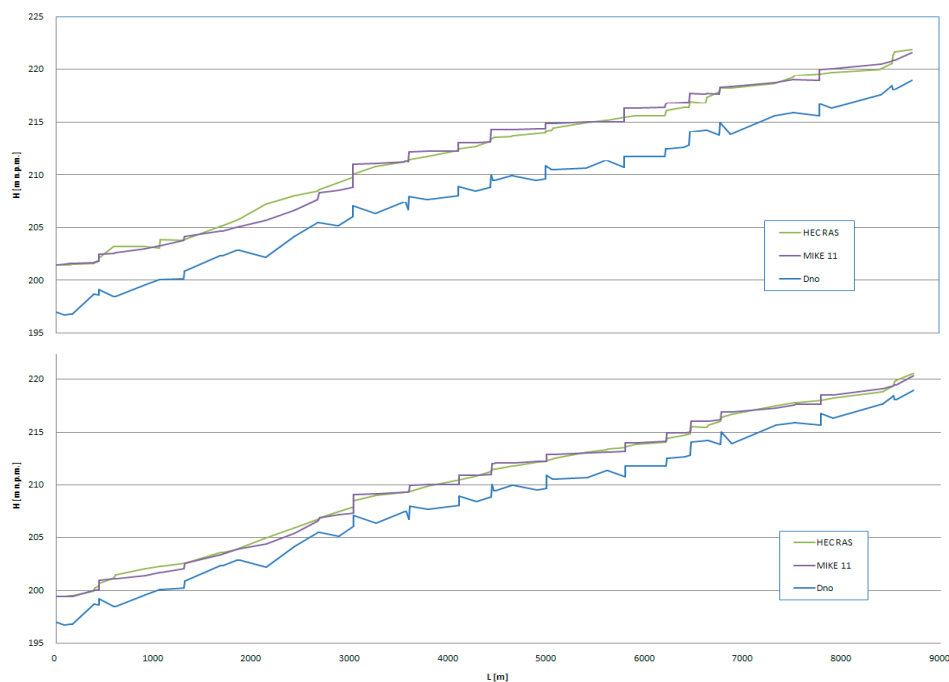
Porównanie układu zwierciadła wody wykonano dla przepływów o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ i $p = 50\%$ (przepływ ustalony), zrealizowanych w warunkach ruchu rwącego i spokojnego. Czas wykonania symulacji komputerowych przez oba programy był zbliżony i wynosił od kilku do kilkunastu sekund.

WYNIKI

W przypadku zlewni niekontrolowanych kalibracja i weryfikacja modelu polega na eksperckiej ocenie warunków przepływu wody w całym zakresie przepływów.

Porównanie układu zwierciadła wody obliczonego dwoma programami przedstawiają rysunki 2a i 2b. Na rysunku 2a zestawiono wyniki obliczeń dla przepływu $Q_{1\%}$, a na rysunku 2b dla $Q_{50\%}$. Na znacznych odcinkach Lubczy

układ zwierciadła wody jest zbliżony. Różnice poziomu zwierciadła wody są szczególnie zauważalne w rejonie występowania budowli hydrotechnicznych, tj. mostów i stopni wodnych na stanowisku górnym. Poziom zwierciadła wody na dolnym stanowisku budowli hydrotechnicznych w przeważającej części przypadków jest odwzorowany jednakowo przez oba programy.

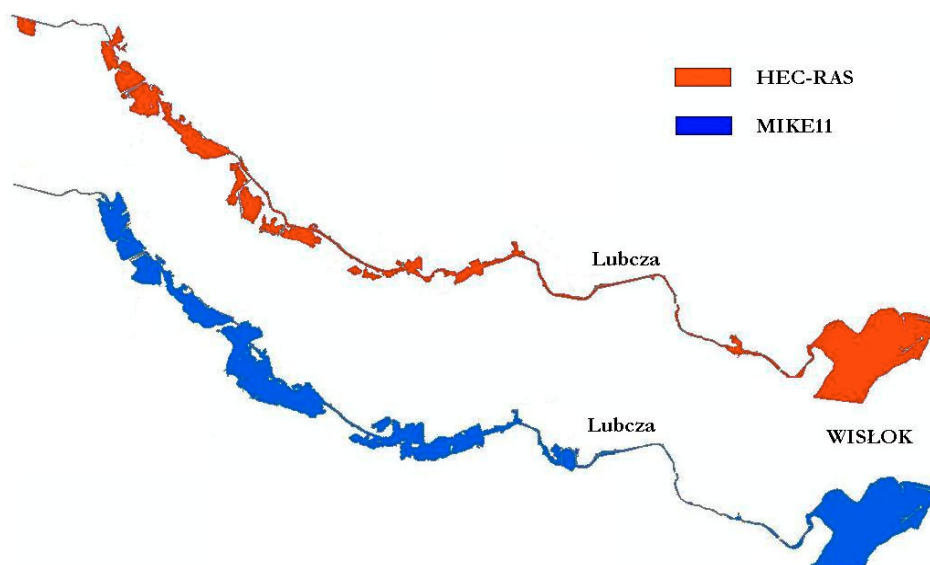


Rysunek 2. Porównanie układu zwierciadła wody, rzeka Lubcza: a) przepływ $Q_{1\%}$,
b) przepływ $Q_{50\%}$

Figure 2. Comparison of water surface elevation, the Lubcza River: a) discharge $Q_{1\%}$,
b) discharge $Q_{50\%}$

Na podstawie uzyskanych wyników modelowania numerycznego opracowano Numeryczny Model Powierzchni Wody (NMPW). Strefy zagrożenia powodziowego są wynikiem przecięcia NMPW z Numerycznym Modelem Terenu, którego dokładność wynosi 0,5 m. Uzyskany w ten sposób obszar poddaje się analizie, która ma na celu odrzucenie obszarów niepołączonych bezpośrednio ze strefą zalewową koryta głównego, wyeliminowanie obszarów bezodpływowych (obszary, których maksymalna głębokość jest mniejsza niż 0,5 m i powierzchni mniejszej niż 3000 m^2) w pasie o szerokości równej dwie szerokości strefy zalewowej wyznaczonej dla $Q_{0,5\%}$.

Na rysunku 3 przedstawiono strefy zagrożenia powodziowego dla przepływu $Q_{1\%}$, wygenerowane na podstawie wyników modelowania programami HEC-RAS oraz MIKE 11. Różnice układu zwierciadła wody przenoszą się na szerokość strefy zalewowej. Na znacznych odcinkach różnice są niezauważalne, lokalnie dochodzą jednak do 25–100 m, przy czym MIKE 11 generuje większą szerokość strefy zalewowej. Przy przepływie $Q_{50\%}$ woda mieści się w korycie głównym na całym odcinku Lubczy.



Rysunek 3. Strefy zagrożenia powodziowego dla przepływu $Q_{1\%}$ wygenerowane na podstawie wyników modelowania numerycznego, rzeka Lubcza
Figure 3. Flood hazard area for discharge $Q_{1\%}$, generated on the base of numerical simulation, the Lubcza River

Na podstawie stref zagrożenia powodziowego wyznacza się granice obszarów bezpośredniego zagrożenia powodziowego. Za granicę obszarów bezpośredniego zagrożenia powodziowego uznaje się linię wyznaczoną na podstawie zasięgu przepływu miarodajnego $Q_{1\%}$. W zależności od lokalnych warunków dopuszcza się wybór innego zasięgu fali: $Q_{2\%}$ lub ewentualnie $Q_{5\%}$ – taka zmiana wymaga uzasadnienia.

DYSKUSJA

Wyniki symulacji wykonane z wykorzystaniem modeli HEC-RAS i MIKE 11 różnią się wartościami poziomemu zwierciadła wody. Podobne rezultaty obli-

czeń uzyskali Podhoranyi i in. [2010], gdzie z modelu HEC-RAS otrzymano wartości wyższe niż MIKE 11 (odcinek 5,98 km, 14 przekrojów, brak budowli hydrotechnicznych, $Q_{1\%} = 150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Różnice poziomów zwierciadła wody wynosiły dla przepływu $Q_{10\%}$ 0,32 m, a dla $Q_{1\%}$ 0,38 m. W przypadku badań prowadzonych przez Markar i in. [2004] (odcinek 600 km, 305 przekrojów, $Q \geq 70\,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), wyniki kalibracji i weryfikacji programu MIKE11 spełniały kryteria zgodności z oceną A (umożliwiającą stosowanie w autoryzowanych prognozach). Badania te nie obejmowały jednak modelowania z wykorzystaniem programu HEC-RAS, między innymi z powodu braku dostępu do pomocy technicznej umożliwiającej zintegrowanie z krajowym systemem ostrzegania przed powodzią. Rodriguez i in. [2003] z powodzeniem zastosowali program HEC-RAS do modelowania wpływu mostu na układ zwierciadła wody w dolinie rzecznej (odcinek 450 km, 30 przekrojów, koryto główne ok. 2 km szerokości, terasa zalewowa ok. 30 km, przepływ $Q_{0,1\%} = 82,700 \text{ m}^3/\text{s}$). Uzyskane wyniki modelowania – spiętrzenie wody w rejonie mostu dochodzące do 0.15 m i zauważalne na długości 6 km – były decydujące o wyborze jego lokalizacji.

W przypadku rzeki Lubcza, z dużą liczbą budowli hydrotechnicznych, różnice zwierciadła wody Δh zawierają się w przedziale od 0 do 1,47 m dla przepływu $Q_{1\%}$ (odchylenie od trendu $-4,3\% \div 21,7\%$, średnie odchylenie od trendu $-0,8\%$), dla przepływu $Q_{50\%}$ $\Delta h_{\max} = 1,07 \text{ m}$ ($-19,1\% \div 17,7\%$, średnie $-0,8\%$). Przekłada to się na szerokość stref, których różnice w określeniu ich zasięgu mogą się zmieniać od 0 do 100 m.

PODSUMOWANIE

Programy hydroinformatyczne HEC-RAS i MIKE 11 są z powodzeniem stosowane do rozwiązywania problemów inżynierskich. Proces przygotowania modelu, przeprowadzenie obliczeń, a następnie ich wizualizacja i interpretacja wyników wymaga od ich użytkowników pełnego rozpoznania modelowanego zjawiska. Podobnie w przypadku wyznaczania stref zagrożenia powodziowego, nie tylko znajomość narzędzi do obróbki danych GIS jest wymagana do ich poprawnego wyznaczenia, ale także umiejętność przestrzennej interpretacji wyników jednowymiarowego modelowania numerycznego.

W przypadku wielkoskalowych problemów, jak w przypadku wyznaczania stref zagrożenia powodziowego wynik jest sumą rozwiązania pojedynczych sytuacji, w tym przypadku układu zwierciadła w rejonie budowli hydrotechnicznej. Wybór narzędzia może mieć wpływ na dokładność zasięgu stref zagrożenia powodziowego.

PODZIĘKOWANIA

Modelowanie programem HEC-RAS było możliwe dzięki realizacji projektu „Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego wraz z koncepcją ochrony przed powodzią terenów położonych w Gminie Boguchwała”. Model w MIKE 11 jest rezultatem udziału w projekcie „Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoka, RPPK.04.02.00-18-001/08, 2009–2010”.

BIBLIOGRAFIA

- Bartnik W., Książek L., Strużyński A., Florek J., Wyrębek M. *Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego wraz z koncepcją ochrony przed powodzią terenów położonych w Gminie Boguchwała*. 2008 (maszynopis).
- HEC-RAS user's manual, www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras
- Książek L., Wałęga A., Bartnik W., Krzanowski S. *Kalibracja i weryfikacja modelu obliczeniowego rzeki Wisłok z wykorzystaniem transformacji fali wezbraniowej*. 2010 (w druku).
- Markar M.S., Clark S.Q., Yaowu M., Jing Z. *Evaluation of hydrologic and hydraulic models for real-time flood forecasting use in the Yangtze River Catchment*. 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia 2004.
- Michalik A., Książek L. *Dynamics of water flow on degraded sectors of mountain stream channels*. Polish J. of Environ. Stud., Vol. 18, No. 4, 2009, s. 665–672.
- MIKE 11. *A Modelling System for Rivers and Channels*. DHI Denmark, 2009.
- Podhoranyi M., Sir B., Duricha M. *Result comparison of simulations of design discharges using energy loss equation and dynamic wave approximation*. GeoScience Engineering, Vol. LVI, No.1, 2010, s. 10–18.
- Rodriguez A., Bread D., Farias D., Bravo H.R., Castelló E., Hillman G., Weber J., Pagot M., Spalletti P. *Hydraulic analyses for a new bridge over the Parana River*. Argentina, Journal of Sediment Research, Vol. 18, No. 2, 2003, s. 166–175.
- Szymkiewicz R. *Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2000.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Bartnik, dr inż. Leszek Książek, mgr inż. Maciek Wyrębek,
dr inż. Andrzej Strużyński, dr inż. Jacek Florek, mgr inż. Mateusz Strużyński
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
tel. (012) 662-40-23
rmksiaze@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka