



## **Modelowanie układu zwierciadła wody programem HEC-RAS w przepławce stopnia wodnego Skórka na rzece Głomii**

*Mateusz Hämmerring, Natalia Walczak, Piotr Stachowski*  
*Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań*

### **1. Wprowadzenie**

Budowa poprzecznego przegrodzenia rzeki powoduje wiele pozytywnych jak i negatywnych skutków, dzieląc obszar przed budowlą na górne stanowisko, a poniżej budowli na dolne stanowisko. Taki podział umożliwia wykorzystanie gromadzonej wody w górnym stanowisku do np.: nawodnień lub w wyniku powstania różnicy wysokości zwierciadła wody (spadu) do produkcji energii elektrycznej (Walczak i in. 2016). Z drugiej strony ogranicza możliwości migracji organizmów wodnych w górę rzeki. W związku z tym buduje się przepławki dla ryb, które umożliwiają pokonanie piętrzenia (Pelicice i in. 2015).

W kontekście możliwości wykorzystania przez ryby urządzeń ułatwiających ich migrację ważne jest sprawdzenie warunków hydraulicznych jakie w nich panują. Badaniom można poddać różne parametry takie jak głębokość wody w komorach przepławki, prędkości przepływu wody w szczelinach i komorach, rozproszenie energii wody i inne. Kasperek i Wiatkowski (2010) ocenili funkcjonowanie przepławki na zbiorniku Michalice na podstawie parametrów hydraulicznych i konstrukcyjnych. Uzyskane w czasie pomiarów terenowych wyniki posłużyły do analizy porównawczej z wytycznymi, jakim powinny odpowiadać prawidłowo i skutecznie działające przejścia dla ryb. Badacze uznali, że głównymi przyczynami wpływającymi na złe funkcjonowanie przepławki są m.in. za małe głębokości wody na wejściu do przepławki od dolnej wody

oraz w komorach, a także za niskie jej zasilanie lub jej brak. Jest to bardzo ważne w okresie wędrówek oraz tarła ryb.

Tymiński i Kałuża (2013) przeprowadzili badania laboratoryjne przepławki, która swoją konstrukcją zbliżona jest do kanału obejściowego, który wyglądem przypominająca potok górski lub porośnięty roślinnością mały ciek nizinny. Wykorzystana do budowy roślinność oraz żwir, kamienie i głazy oprócz redukcji prędkości przepływu, daje możliwość harmonijnego wkomponowania w naturalne otoczenie. Na podstawie badania modelowego dla 3 wariantów przepławki o różnej kombinacji rozmieszczenia w niej roślin (trzciny) i kamieni, Tyimiński i Kałuża uznali, że lepszym rozwiązaniem okazało się seminaturalne przejście dla ryb. Badaniami terenowymi przepławki seminaturalnej zlokalizowanej w obrębie stopnia wodnego Skórka na rzece Głómii zajmowali się Hämmerling i in. (2017). Badacze stwierdzili, że na jej optymalną pracę wpływ ma wiele czynników m.in.: okres wegetacyjny roślinność oraz rozwój makrofitów w dnie komór przepławki.

Radecki-Pawlik i in. (2017) przedstawili wyniki badań rozkładów prędkości i sił w postaci naprężeń stycznych działających w wielokomorowej przepławce dla ryb na potoku Wierchomlanka (prawy dopływ Popradu) zlokalizowanego w polskich Karpatach. Jest to potok o wysokoenergetycznych i nagłych wezbraniach, często w jego korycie transportujący materiał denny. Badania wskazały, że centralne położenie przepławki w stosunku do korpusu budowli hydrotechnicznej jest najlepsze.

Ważną kwestią są próby wykorzystania modeli numerycznych do analiz warunków hydraulicznych panujących w przepławkach dla ryb i ich wpływu na migrujące gatunki (Daneshvar i in. 2017). Książek i in. (2011) przedstawili wyniki modelowania numerycznego przepławki (w formie obejścia budowli naśladującej naturalny strumień oraz z funkcją kanału tarłowego), którą przebadali w warunkach laboratoryjnych dla różnych wariantów obliczeniowych (przy przepływie spokojnym, normalnym i rwącym). Na tej podstawie stwierdzili, że obecność elementów habitatowych sprzyja zróżnicowaniu warunków siedliskowych ze względu na zmienne prędkości przepływu, napełnienia oraz naprężenia styczne na dnie przepławki.

Duguay i in. (2017) porównali wyniki obliczeń warunków przepływu wody pomiędzy dwoma modelami inter-Foam i FLOW-3D w przepławce typu komorowego i stwierdzili, że wyniki maksymalnych

prędkości oraz układu zwierciadła wody są do siebie bardzo zbliżone. Fuentes-Pérez i in. (2016) przeprowadzili symulacje układów zwierciadła wody w przepławce typu komorowego.

Fuentes-Pérez i in. (2017) przedstawili w swojej publikacji zastosowanie modeli 1D i 3D do modelowania parametrów hydraulicznych przepływu wody w przepławce szczelinowej. Na podstawie przedstawionych analiz wyników dla wielu konfiguracji przepławki szczelinowej Bombač i in. (2014) stwierdzili, że wprowadzenie nawet niewielkich zmian w jej geometrii może spowodować, że będzie ona miała bardziej przyjazną charakterystykę przepływu w komorach dla ryb. Generalnie za przyjazny rybom przepływ uznać można taki, jaki jest bezpieczny dla nich.

Puertas i in. (2012), zaproponowali metodologię oceny sprawności działania różnych przepławek szczelinowych z wykorzystaniem analizy prędkości i głębokości wody. Analiza wyników otrzymanych z badań terenowych oraz modelowania numerycznego przeprowadzonych przez Bermúdez i in. (2010) sugeruje, że długość komory jest głównym parametrem geometrycznym wpływającym na charakterystykę przepływu w przepławce. Zarówno szerokość szczeliny oraz szerokość komory mają mniejszy wpływ na charakterystykę przepływu wody (Bermúdez i in. 2010).

Jednym z podstawowych parametrów określających prawidłowe funkcjonowanie przepławki są głębokości w komorach oraz różnice pomiędzy rzędnymi zwierciadła wody w poszczególnych komorach. W pracy przeprowadzono badania związane z próbą kalibracji modelu hydrodynamicznego wykorzystanego w przepławce składającej się z części technicznej i seminaturalnej. Na podstawie symulacji autorzy zauważyli, że przepływ wody w przepławce jest trudnym i wieloaspektowym problemem, którego modelowanie wymaga wnikliwej analizy wielu współczynników wynikających m. in. ze skomplikowanej geometrii budowli.

## **2. Metodyka**

Analizowany obiekt to stopień wodny Skórka. Usytuowany w km 11+132 km rzeki Głomii. Znajduje się on w województwie wielkopolskim, w powiecie złotowskim, w gminie Krajenka, we wsi Skórka (rys. 1).

Stopień składa się z 3 przęsłowego jazu, przepławki dla ryb oraz elektrowni wodnej zlokalizowanej na kanale derywacyjnym. Analizowana przepławka jest połączeniem konstrukcji technicznej (3 komory)

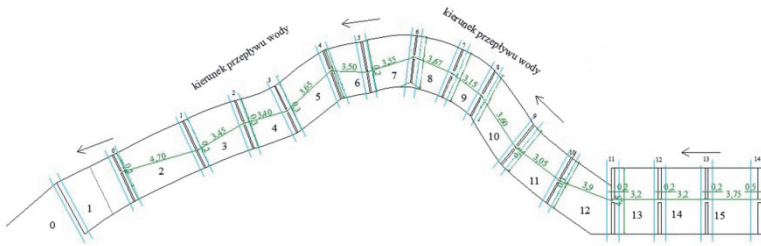
i seminaturalnej (11 komór) (Franczak, 2009). Długość przepławki wynosi 39 m. Każda komora przepławki charakteryzowała się niewielkimi zmianami geometrycznymi stałych elementów, które nie wpływały znacznie na zmiany współczynnika szorstkości. Spadek dna na części seminaturalnej wynosi 0,024, a w części technicznej 0,039.



**Rys. 1.** Stopień wodny Skórka (1 – przepławka, 2 – jaz)

**Fig. 1.** Skórka barrage (1 – fish pass, 2 – weir)

Do badań modelowych przepławki wykorzystano program HEC-RAS (wersja 5.0.3), który umożliwia obliczenia parametrów przepływu wody w ruchu ustalonym i nieustalonym, ruchu rumowiska oraz jakości wody (Brunner, 2016). W pierwszym etapie na podstawie projektu modernizacji stopnia wodnego Skórka oraz badań terenowych przeprowadzonych w latach 2015 i 2016 przygotowano dane geometryczne, które zostały zaimplementowane do modelu matematycznego (rys. 2) przepławki dla ryb. Pomiędzy komorami zlokalizowane są przegrody, które zaimplementowano do programu jako przegrodzenia o grubości 0,1 m. Kolejno wprowadzono przegrody ze szczelinami o szerokościach 0,2 m, 0,3 m, 0,35 m i 0,4 m. Komory przepławki opisano 32 przekrojami poprzecznymi. Pomiędzy komorami zlokalizowane są drewniane przegrody, które zaimplementowano do programu jako przegrodzenia o szerokości 0,1 m, zgodnie z wymiarami terenowymi. W następnej kolejności wprowadzono w przegrodach szczeliny.



**Rys. 2.** Schemat przepławki z przekrojami tworzącymi geometrię przepławki w modelu programu HEC-RAS (Skowrońska, 2017)

**Fig. 2.** Scheme of fish pass with cross sections which is used in HEC-RAS program

Założonymi warunkami brzegowymi do przeprowadzanych symulacji była rzędna zwierciadła wody na wylocie z przepławki równa 77,259 m n.p.m. oraz przepływ równy  $0,081 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Rzędna zwierciadła wody ustalono na podstawie niwelacji układu zwierciadła wody. Natężenie przepływu wody w przepławce określono analitycznie ze wzoru ciągłości  $Q = V \cdot A$ , gdzie  $A$  jest polem powierzchni przekroju szczeliny wypełnionej wodą i wynosi  $0,080 \text{ m}^2$ , zaś  $V$  to prędkość średnia wyznaczona ze wzoru Torricellego:

$$v_{max} = \varphi \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

gdzie:

$\varphi$  – współczynnik prędkości równy 0,8,

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$\Delta h$  – średnia różnica poziomów wody między komorami.

Wartość współczynnika prędkość zależy głównie od kształtu wlotowej krawędzi progu. Dla kształtu prostokątnego przyjmowana jest wartość  $\varphi = 0,85$ , a dla zaokrąglonej krawędzi  $\varphi = 0,92$  (Lewandowski, 2006). W przypadku progu o dużej szorstkości, który występuje w analizowanej przepławce  $\varphi = 0,80$ . W symulacjach, za  $\Delta h$  przyjęto stałą wartość 0,80 m wynikającą z uśrednionych różnic zwierciadeł wody między poszczególnymi komorami części seminaturalnej. Uproszczenie to wynika z większego wpływu szorstkości przepławki seminaturalnej w porównaniu z częścią techniczną.

Wartość współczynnika wydatku dla każdej szczeliny obliczono wykorzystując następujące równanie:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2g\Delta H} \quad (2)$$

gdzie:

$Q$  – natężenie przepływu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$C$  – współczynnik wydatku [-],

$A$  – pole powierzchni przepływu wody w szczelinie [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta H$  – różnica rzędnych linii energii w sąsiednich komorach, w przekrojach powyżej i poniżej przegrody [m]

Program HEC-RAS uwzględnia w obliczeniach równanie Bernoulliego. Określa ono zmiany energii w kolejnych przekrojach badanego modelu. Równanie to przedstawia się następująco:

$$Z_1 + H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_s \quad (3)$$

gdzie:

$Z_1, Z_2$  – wysokość kanału mierzona od poziomu porównawczego [m],

$H_1, H_2$  – głębokość wody w cieku [m],

$\alpha_1, \alpha_2$  – współczynnik Saint – Venanta [-],

$v_1, v_2$  – prędkości średnie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$h_s$  – straty energii [m],

$i$  – spadek dna [-].

Do weryfikacji otrzymanych wyników wykorzystano średnie różnice rzędnych zwierciadeł wody uzyskanych w programie i pomierzonych w terenie. Bezwzględne różnice pomiędzy rzędnymi zwierciadeł wody były wartościami wyjściowymi do określenia tych średnich.

Drugim parametrem weryfikującym otrzymane wyniki rzędnych zwierciadła wody przy wykorzystaniu programu HEC-RAS był współczynnik korelacji liniowej R, który uwzględnia związek rzędnych pomierzonych i obliczonych.

Symulacje układu zwierciadła wody w programie HEC-RAS zostały przeprowadzone dla różnych wariantów, oznaczonych skrótem (S1, S2 itd.). Zmianie podlegały wykorzystane funkcje jak i ich parametry. Na

podstawie znanych różnic zwierciadła wody między komorami, geometrii szczelin oraz natężeniu przepływu wody z równania (2) wyznaczono współczynnik wydatku dla każdej przegrody osobno. Wartości współczynnika wydatku wynosiły  $C = 0,46-0,59$  (część techniczna),  $C = 0,27-0,84$  (część seminaturalna). Określone w ten sposób współczynniki wydatku były wykorzystywane w kolejnych symulacjach sprawdzających wpływ różnych parametrów na uzyskiwane układy zwierciadła wody. W symulacjach S1, S2, S3 sprawdzano wpływ zmiany współczynników szorstkości dna i brzegów. Współczynniki szorstkości wyznaczono na podstawie tabelic Ven Te Chowa (Sobota, 2003). Współczynniki w poszczególnych symulacjach przyjęto w następujący sposób: symulacja S1 w części betonowej  $n = 0,010 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego o czystej powierzchni cementowej – minimalna wartość), dla części seminaturalnej  $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego kamieniem łamanym na zaprawie cementowej – średnia wartość), symulacja S2  $n = 0,015 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  w części technicznej (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego o powierzchni wygładzonej packą – średnia wartość),  $n = 0,030 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego maksymalna wartość dla kamieniem łamanym na zaprawie cementowej – maksymalna wartość), symulacja S3 dla części technicznej  $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego o niewygładzonej powierzchni betonowej – maksymalna wartość) dla części seminaturalnej  $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (jak dla kanału otwartego ubezpieczonego murem z kamienia łamanego bez zaprawy – maksymalna wartość). Funkcja programu *i* nie była włączona, a współczynniki *Contraction* i *Expansion* wynosiły odpowiednio 0.1 i 0.3 (wariant o łagodnej zmianie geometrii przekroju).

W symulacjach oznaczonych S4 i S5 sprawdzono wpływ zastosowanie *Ineffective flow areas* na otrzymane rzędne zwierciadła wody (S4 – włączona funkcja od góry dla wszystkich przegród, S5 – włączona funkcja od góry i od dołu wszystkich przegród). Współczynniki *Contraction* i *Expansion* wynosiły odpowiednio 0.1 i 0.3, a współczynniki wydatku dla każdej przegrody policzone zostały ze wzoru (2). Przeprowadzone analizy porównane zostały z jedną z symulacji S1, S2, S3, wybraną na podstawie najkorzystniejszego współczynnika korelacji.

W symulacjach oznaczonych S6 i S7 sprawdzano wpływ zwiększenia współczynników *Contraction* i *Expansion* na zmiany obliczonego układu zwierciadła wody w przepławce dla ryb. Dla S6 założono typową

zmianę parametrów geometrycznych przekroju równą 0,3 (*Contraction*) i 0,5 (*Expansion*), zaś dla S7 założono nagłą zmianę parametrów przekroju poprzecznego czyli współczynniki wynosiły 0,6 (*Contraction*) i 0,8 (*Expansion*). Współczynniki wydatku dla każdej przegrody policzone zostały ze wzoru (2). W symulacjach założono najkorzystniejszy pod względem współczynnik korelacji współczynnik szorstkości oraz włączenie lub nie *Ineffective flow areas*.

W symulacjach oznaczonych S8, S9, S10 sprawdzano wpływ zmian współczynników wydatku na otrzymane wyniki. Modyfikacja współczynników polegała na dodaniu lub odjęciu stałych wartości, które wynosiły 0,1 lub 0,12. Pozostały współczynniki i funkcje programu (współczynnik szorstkości, współczynniki *Contraction i Expansion*, *Ineffective flow areas*) zostały przyjęte zgodnie z najlepszym współczynnikiem korelacji liniowej.

W symulacji S11 z uwagi na duży spadek dna przepławki w części technicznej dokonano podziału współczynników wydatku na część seminaturalną i techniczną. Podział ten polegał na tym że dla części seminaturalnej zostawiono współczynnik z najlepszej według współczynnika korelacji S8, S9 lub S10, a dla części technicznej zmniejszono o kolejne 0,08.

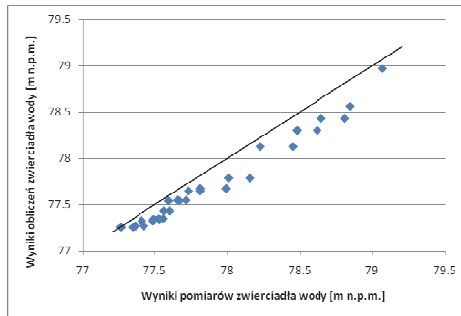
### 3. Wyniki

W pierwszym etapie identyfikacji wykonano obliczenia dla modelu (S1, S2, S3) bez wykorzystania dodatkowych funkcji programu zmieniając jedynie współczynnik szorstkości. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wartości pomierzonych i policzonych układu zwierciadła wody w przepławce dla ryb. Oprócz zbioru punktów na rysunku zaznaczono prostą pełnej zgodności, która jest dwusieczną prezentowanej ćwiartki układu współrzędnych.

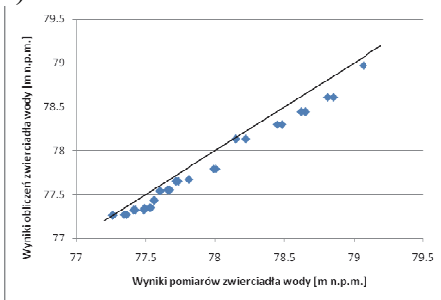
Analiza uśrednionych różnic pomiędzy pomierzonym, a obliczonym układem zwierciadła wody wskazała, że najmniejszą wartość uzyskano dla S2 (0,133 m) a największa dla S1 (0,182 m). Współczynnik korelacji wyniósł dla S1  $R = 0,986$ , S2  $R = 0,994$ , S3  $R = 0,993$ . Dlatego do dalszych obliczeń przyjęto założone wartości współczynnika szorstkości dla symulacji S2.



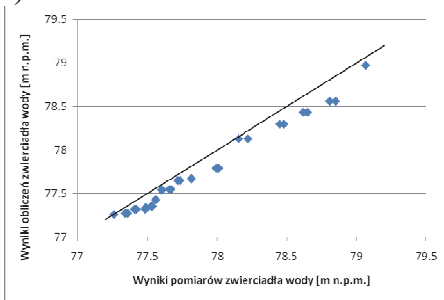
a)



b)



c)



**Rys. 3.** Porównanie wartości rzędnych układu zwierciadła wody pomierzonych i policzonych wraz z prostą pełnej zgodności dla symulacji a) S1, b) S2, c) S3

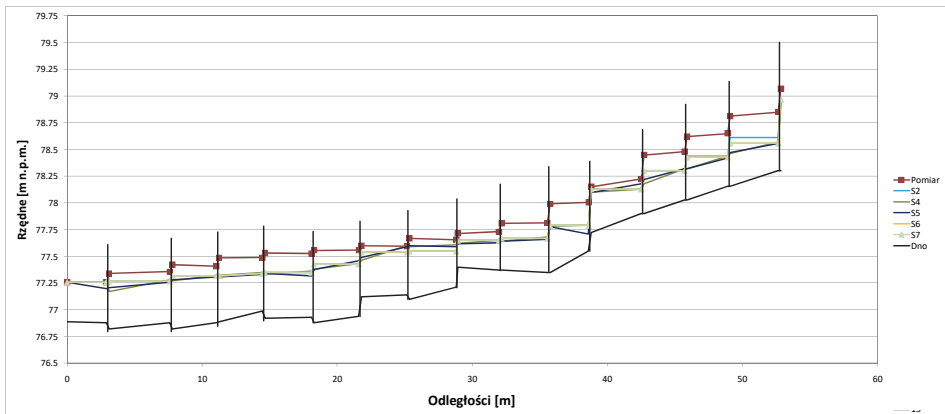
**Fig. 3.** Competitions of water flow elevation measurement and calculation with straight line full compliance for simulation a) S1, b) S2, c) S3

W kolejnym etapie badań sprawdzono wpływ zastosowania funkcji *Ineffective flow areas* zgodnie z założeniami S4 i S5. Współczynniki szorstkości i wydatku dla S4 i S5 były takie same jak dla S2. Wyniki układu zwierciadła wody otrzymane w symulacjach porównano z wynikami pomiarów terenowych (rys. 4). W porównaniach uwzględniono również wyniki S2 ponieważ dla tych obliczeń nie uwzględniano funkcji *Ineffective flow areas*.

Analizując, otrzymane wyniki, średnie różnice między uzyskanymi w programie, a pomierzonymi w terenie wartościami zwierciadeł wody wynoszą dla symulacji S2 0,133 m, S4 0,155 m i S5 0,157 m. Określono również współczynnik korelacji dla poszczególnych obliczeń, które wynosiły odpowiednio dla S2  $R = 0.994$ , S4  $R = 0.989$ , S5

$R = 0.988$ . Za najbardziej korzystną i dającą wyniki najbardziej zbliżone do warunków panujących w terenie uznano symulację S2.

Następnie wykonano obliczenia z wykorzystaniem zmiany współczynników *Contractions* i *Expansion*. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie wartości rzędnych układu zwierciadła wody pomierzonych i policzonych dla S4 i S5 przy zmianie parametru *Ineffective flow areas* oraz dla S6 i S7 przy zmianie wartości współczynników *Contractions* i *Expansion*. Pozostałe parametry i współczynniki w modelu hydrodynamicznym zostały przyjęte jak dla S2.



**Rys. 4.** Pomierzone i policzone poziomy zwierciadła wody w przepławce dla ryb  
**Fig. 4.** Measurements and calculations water flow elevation in fish pass

Zwiększenie współczynników *Expansion* i *Contraction* spowodowało pogorszenie uzyskiwanych wyników, a średnie różnice dla symulacji nr 6 i 7 wynosiły odpowiednio 0,137 i 0,137 m. Natomiast analizując współczynnik korelacji stwierdzono, że najbardziej korzystna wartość osiągnięto dla S6 i wynosiła ona  $R = 0,993$ , dla S7 wartość  $R = 0,993$ . Najmniejsza średnia różnica pomiędzy zwierciadłami wody została uzyskana dla wartości współczynników *Contractions* i *Expansion* założonych S2 czyli dla łagodnej zmiany geometrii przekroju.

## 4. Dyskusja

Dokładne określenie współczynników wydatku jest niezbędne dla prawidłowego ustalenia różnic poziomów zwierciadła wody między komorami. Fuentes-Pérez i in. (2017) twierdzą że czynnikami które wpływają na jego wartość są wymiary, kształt i grubość przegrody, a Marriner i in. (2016) dodał do tych czynników głębokość wody, prędkość i natężenie przepływu.

Rajaratnam i in. (1986) twierdzi, że dla przepławek o regularnych, powtarzających się kształtach współczynnik wydatku powinien wynosić od 0,6-0,8. Marriner i in. (2016) uzyskał w zależności od charakterystyki komór wartości współczynnika wydatku 0,87-0,95. Zgodnie z badaniami Rajaratnam i in. (1992), stwierdził, że dla przepławki o zmiennej geometrii współczynnik wydatku  $C$  zmienia się 0,3-1,0 co jest z jednym wyjątkiem zgodne z wartościami uzyskanymi ze wzoru (2).

Z uwagi na skomplikowaną charakterystykę geometryczną przepławki w kolejnym kroku obliczeniowym sprawdzono wpływ zmian współczynnika wydatku na otrzymane wyniki układu zwierciadła wody. Sprawdzano wpływ zwiększenia i zmniejszenia współczynników wydatku. W S8 dodano 0,1 do współczynników wydatku w S9 odjęto 0,1 od  $C$ , a w S10, odjęto 0,12 od  $C$ .

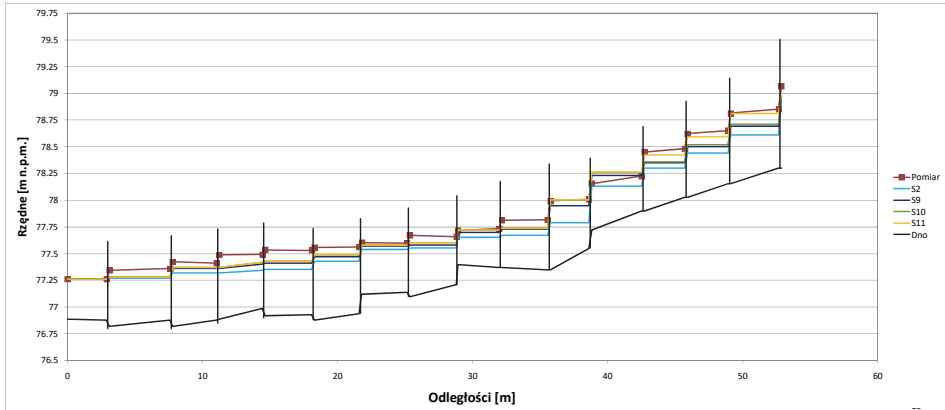
Wartość średniej różnicy pomiędzy pomierzonymi, a policzonymi poziomami zwierciadła wody dla S8 wynosi 0,169 m, a współczynnik korelacji  $R = 0,991$ , dla S9 0,083 m, a  $R = 0,995$ , dla S10 0,070 m, a  $R = 0,995$ .

Według Wang i in. (2010), który przeprowadziła badania w przepławce szczelinowej wraz ze wzrostem spadku dna współczynnik wydatku się zmniejsza. W przeprowadzonych przez tego autora badaniach współczynnik wydatku zmieniał się 0,67-0,9. Również Li i in. (2017) twierdzi, że spadek podłużny dna jest parametrem niezbędnym do określenia poziomu wody w komorach przepławki.

Z uwagi duże różnice w spadkach dna analizowanej przepławki, między częścią techniczną i seminaturalną przeprowadzono dalszą analizę polegającą na sprawdzeniu wpływu zmniejszenia współczynnika wydatku w części technicznej na obliczony układ zwierciadła wody. Zmienne wartości współczynników wydatku zostały policzone jako S11. Średnia wartość różnicy pomiędzy rzędnymi pomierzonymi i policzonymi wynosi 0,054 m, współczynnik korelacji  $R = 0,996$ . Jako najlepiej

odwzorowującą warunki terenowe symulacją można uznać konfigurację parametrów modelu matematycznego zawartego w S11.

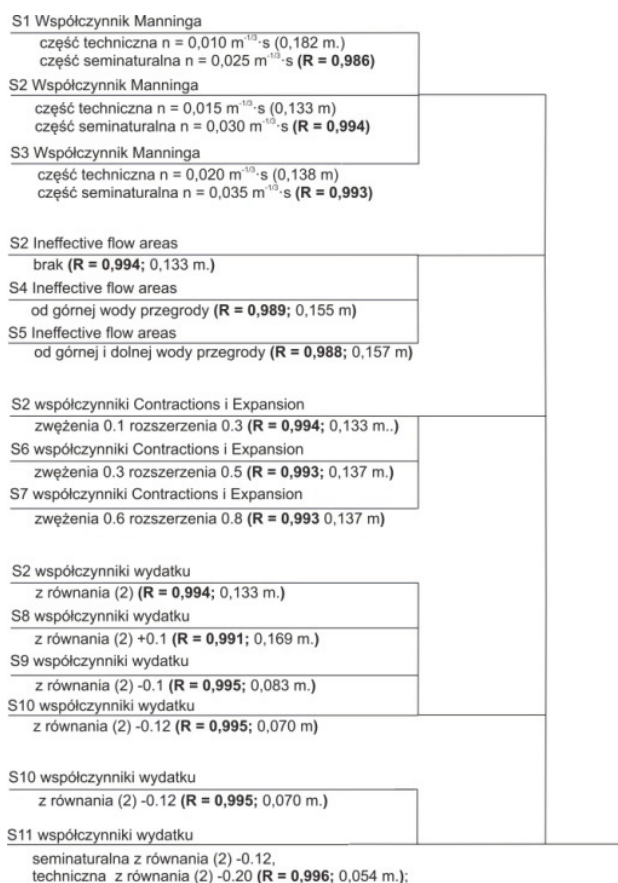
Na rysunku 5 przedstawiono pomierzone w terenie i policzone w symulacjach 2, 9, 10 i 11 układy zwierciadła wody.



**Rys. 5.** Pomierzone i policzone poziomy zwierciadła wody w przepławce dla ryb  
**Fig. 5.** Measurements and calculations water flow elevation in fish pass

Na rysunku 6 przedstawiono drzewo z kolejnymi etapami weryfikacji poszczególnych parametrów modelu matematycznego.

Niedokładności w uzyskiwanych wynikach są spowodowane skomplikowaną oraz niejednorodną geometrią przepławki. Co mogą potwierdzić badania Bombač i in. (2017), który stwierdził, że nawet niewielkie przesunięcie poprzeczne szczeliny o 0,2 m w osi przegrody, może powodować zmiany w natężeniu przepływu rzędu 8% do 16% oraz zmiany w maksymalnej prędkości od 11% do 15%. Na podstawie analizy drzewa przedstawiającego kolejne etapy weryfikacji poszczególnych parametrów modelu matematycznego stwierdzono, że największy wpływ na uzyskiwane wyniki poziomów zwierciadła wody miały zmiany współczynników szorstkości wg Manninga oraz współczynniki wydatku.



**Rys. 6.** Drzewo z kolejnymi etapami weryfikacji poszczególnych parametrów modelu matematycznego i współczynnikami korelacji oraz uśrednionych różnic zwierciadła wody

**Fig. 6.** Tree with successive stages of verification of individual parameters of the mathematical model and correlation coefficients and the average differences in water surface

## 5. Podsumowanie

W artykule przeanalizowano możliwości modelowania przepływu wody w przepławce z wykorzystaniem programu jednowymiarowego HEC-RAS. Obiektem badań był stopień Skórka na rzece Głomii, na którym zlokalizowana jest przepławka seminaturalna połączona z techniczną. W pracy przeanalizowano wpływ zmian różnych parametrów

i współczynników modelu matematycznego na układ zwierciadła wody w poszczególnych komorach. Do weryfikacji założonego celu wykorzystano średnią różnicę pomiędzy pomierzonym i policzonym układem zwierciadła wody oraz współczynnik korelacji  $R$ .

1. Analiza zmian współczynników szorstkości wykazała, że najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla symulacji S2  $R = 0,994$ .
2. Analiza wpływu zastosowania pola *Inneffective flow area* wykazała, że najlepsze wyniki uzyskano w przypadku nie zastosowania omawianej funkcji (S2). Wartość współczynnika korelacji liniowej wynosiła dla symulacji S2  $R = 0,994$ .
3. Zwiększenie współczynników *Expansion i Contraction* nie spowodowało poprawy wartości współczynnika korelacji liniowej.
4. Poprawne określenie współczynników wydatku miało największy wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników. Współczynnik wydatku został policzony dla każdej przegrody osobno. W wyniku szczegółowej analizy literatury zmniejszono współczynniki wydatku o stałą wartość, w symulacjach S9 i S10. Najkorzystniejsze wyniki pod względem współczynnika korelacji uzyskano dla S10 ( $R = 0,995$ ). W dalszych analizach (S11) dla części seminaturalnej pozostawiono współczynnik  $C$  jak dla S10, natomiast dla części technicznej z uwagi na jej duży spadek dna zmniejszono o kolejne 0,08 w stosunku do S10. Uzyskana średnia różnica pomiędzy pomierzonymi i policzonymi poziomami zwierciadła wody dla S11 wyniosła 0,054 m, a współczynnik korelacji wyniósł  $R = 0,996$ . Poprawiło to wyniki w stosunku do S10 o 0,016 m.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że niewielkie zmiany w geometrii przepławki mogą powodować zmiany w warunkach przepływu wody, a zastosowanie modelu jednowymiarowego umożliwia uzyskanie podstawowych danych niezbędnych do analiz warunków pracy przepławki. Przygotowany model można wykorzystać w obliczeniach warunków pracy przepławki dla różnych przepływów wody oraz poziomów zwierciadła wodny na dolnym stanowisku. Analizy takie umożliwią policzenie parametrów określających czy przepławka pracuje poprawnie.

## Literatura

- Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., & Balairón, L. (2010). Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering*, 36(10), 1355-1364.
- Bombač, M., Novak, G., Rodič, P., & Četina, M. (2014). Numerical and physical model study of a vertical slot fishway. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(2), 150-159.
- Bombač, M., Četina, M., & Novak, G. (2017). Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization. *Ecological Engineering*, 107, 126-136.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS river analysis system: User's manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Daneshvar, F., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A., & Herman, M. R. (2017). Applications of computational fluid dynamics in fish and habitat studies. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 17(1), 53-62.
- Duguay, J. M., Lacey, R. W. J., & Gaucher, J. (2017). A case study of a pool and weir fishway modeled with OpenFOAM and FLOW-3D. *Ecological Engineering*, 103, 31-42.
- Fuentes-Pérez, J. F., Sanz-Ronda, F. J., de Azagra, A. M., & García-Vega, A. (2016). Non-uniform hydraulic behavior of pool-weir fishways: a tool to optimize its design and performance. *Ecological Engineering*, 86, 5-12.
- Franczak D. (2009). *Projekt zagospodarowania terenu, Odbudowa jazu Skórka, gm. Krajenka, pow. Złotowski*. Hydro Projekt Sp. z o.o. Poznań,
- Fuentes-Pérez, J. F., García-Vega, A., Sanz-Ronda, F. J., & de Azagra Paredes, A. M. (2017). Villemonte's approach: a general method for modeling uniform and non-uniform performance in stepped fishways. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, (418), 23.
- Hämmerling, M., Kałuża, T., Walczak, N. (2017). Hydraulic conditions of water flow in seminatural fish pass, A case study of the Skórka barrage on the Głomia river. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(2), 85-96.
- Kasprek, R., Wiatkowski, M. (2008). Terenowe badania funkcjonowania przepławki dla ryb na zbiorniku Michalice. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 10, 613-622.
- Książek, L., Strużyński, A., Leja, M., Pilch, E. (2011). Modelowanie fizyczne i numeryczne przepływu wody w przepławce biologicznej. *Acta Scientiarum Polonorum*, 10(4), 17-30.
- Lewandowski, J.B. (2006). *Mechanika płynów*, Wydawnictwo Akademi Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań

- Li, G., Sun, S., Liu, H., Zheng, T., & Zhang, C. (2017). Water profiles in vertical slot fishways without central baffle. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), 191-195.
- Marriner, B. A., Baki, A. B., Zhu, D. Z., Cooke, S. J., & Katopodis, C. (2016). The hydraulics of a vertical slot fishway: a case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada. *Ecological Engineering*, 90, 190-202.
- Pelicice, F. M., Pompeu, P. S., & Agostinho, A. A. (2015). Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. *Fish and Fisheries*, 16(4), 697-715.
- Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, Á., Rabuñal, J. R., ... & Aramburu, E. (2012). Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering*, 48, 51-60.
- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Radecki-Pawlik, B. (2017). Rozkład prędkości oraz naprężeń stycznych w komorach przepławki typu wielkokomorowego. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(1), 149-159.
- Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., Katopodis, C., 1986. Hydraulics of vertical slot fishways. *J. Hydraul. Eng.*, 112, 909-927.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., Paccagnan, R., 1992. Field studies of fishways in Alberta. *Can. J. Civ. Eng.* 19, 627-638.
- Skowrońska, W. (2017). *Analiza warunków hydraulicznych przepływu wody przez przepławkę na stopniu Skórka na rzece Głomii*. praca magisterska, maszynopis, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
- Sobota, j. (2003). *Hydraulika i mechanika płynów*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław
- Tymiński, T., Kałuża, T. (2013). Effect of vegetation on flow conditions in the "nature-like" fishways. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15(1), 348-360.
- Walczak, N., Walczak, Z., Hämmerling, M., Sychala, M., & Niec, J. (2016). Head losses in small hydropower plant trash racks (SHP). *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(4), 369-382.
- Wang, R. W., David, L., & Larinier, M. (2010). Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (396), 02.



## Modeling of the Water Level Elevation Using the HEC-RAS Program in a Fish Pass of the Skórka Barrage on the Głomia River

### Abstract

The analysis of hydraulic parameters of water flow in the fish pass is very important due to the requirements and possibilities of fish migration in the context of overcoming of height difference of levels. The article identifies and verifies the parameters of the HEC - RAS mathematical model using the results of field measurements made in 2015 on the Skórka river on the Głomia river. The analyzes included checking the impact of using the *Ineffective flow area*, the coefficient of *Expansion i Contraction*, and the discharge coefficient on the obtained results of the water flow elevation. In the first step, the effect of changing roughness coefficients on the received water levels was checked. Checking the possibility to use the *Ineffective flow area* function consisted of enabling it from the above (simulation S4) and from the above and bottom (simulation S5). Based on the value of correlation coefficients, it was found that the closest field measurements are values obtained by simulation S2. In the next stage, the effect of changes in the *Expansion i Contraction* factor values was checked. It was found that the sudden change in the cross-section parameters (simulation S7) compared to the standard values of the coefficients allowed to obtain not more closely to 1 values of the correlation coefficient. In the next stage, the influence of the discharge coefficient on the obtained results of the water flow elevation was checked. Based on the analysis, it was found that the greatest impact on the results was obtained using the discharge coefficient.

### Streszczenie

Analiza parametrów hydraulicznych przepływu wody w przepławce jest bardzo ważna z uwagi na wymagania i możliwości migracji ryb w kontekście pokonywania piętrzenia. W artykule przeprowadzono identyfikację i weryfikację parametrów modelu matematycznego HEC-RAS z wykorzystaniem wyników pomiarów terenowych wykonanych w 2015 roku na stopniu wodny Skórka na rzece Głomii. Analizy obejmowały sprawdzenie wpływu wykorzystania *Ineffective flow area*, współczynnika *Expansion i Contraction* oraz współczynnika wydatku przelewu na otrzymywane wyniki układu zwierciadła wody. W pierwszym kroku sprawdzono wpływ zmiany współczynników szorstkości na otrzymywane układy zwierciadła wody. Sprawdzanie możliwości wykorzystania funkcji *Ineffective flow area* polegało na włączeniu jej od góry (symula-

cja S4) oraz od góry i od dołu (symulacja S5). Na podstawie wartości współczynników korelacji stwierdzono, że najbliższa pomiarom terenowym są wartości uzyskane symulacją S2. W kolejnym etapie sprawdzano wpływ zmian wartości współczynnika *Expansion i Contraction*. Stwierdzono, że nagle zmiana parametrów przekroju poprzecznego (symulacja S7) w porównaniu ze standardowymi wartościami współczynników nie pozwoliła uzyskać bardziej zbliżonych do 1 wartości współczynnika korelacji. W kolejnym etapie sprawdzano wpływ współczynnika wydatku na otrzymane wyniki układu zwierciadła wody. Na podstawie analiz stwierdzono, że największy wpływ na wyniki uzyskano z wykorzystaniem współczynnika wydatku.

**Słowa kluczowe:**

przepławka dla ryb, modelowanie matematyczne,  
hydrauliczne warunki przepływu wody

**Keywords:**

fish pass, mathematical modelling, hydraulic condition of water flow