

Zbigniew POPEK, Leszek HEJDUK, Piotr HŁADKI

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering WULS – SGGW

Możliwości wykorzystania przepływomierza modułowego ISCO 2150 w pomiarach hydrometrycznych w małej rzece nizinnej

The facility of using the Flow Module ISCO 2150 in hydrometric measurements in small lowland river

Słowa kluczowe: mała rzeka nizinna, pomiar parametrów przepływu, przepływomierz modułowy ISCO 2150

Key words: small lowland river, flow parameters measurements, flow module ISCO 2150


Wprowadzenie

Prędkość przepływu wody w korytach rzecznych jest jednym z podstawowych parametrów hydraulicznych, który charakteryzuje się dużą zmiennością, wynikającą zarówno z burzliwego charakteru ruchu (efekt pulsacji prędkości), jak również ze zmian w czasie oporów przepływu związanych między innymi z ruchem rumowiska wleczonego (zmienność wysokości form dennych), zarastaniem dna i brzegów koryta roślinnością, występowaniem zjawisk lodowych itp. W praktyce hydrometrycznej

charakterystykę zmienności prędkości przepływu przy różnych stanach wody określa się na podstawie okresowo wykonywanych pomiarów rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym rzeki. W pomiarach prędkości najczęściej stosuje się różnego typu młynki hydrometryczne lub elektromagnetyczne czujniki prędkości. Zastosowanie nowoczesnych mierników ultradźwiękowych pozwala na prowadzenie ciągłego (z zadaniem krokiem czasowym) pomiaru i rejestracji prędkości przepływu, co daje nowe możliwości w badaniach dynamiki przepływu w korytach otwartych. Modułowy przepływomierz ultradźwiękowy typu ISCO 2150 mierzy poziom cieczy (napętnienie) i średnią prędkość strumienia oraz oblicza chwilowe natężenie przepływu (Walkowiak 2006). Miernik przeznaczony jest w szczególności do

pomiarów wykonywanych w kanałach i kortach otwartych sieci kanalizacyjnych, w oczyszczalniach ścieków oraz w innych obiektach gospodarki wodno-ściekowej, w których koryta posiadają ustalony kształt i wymiary przekroju poprzecznego.

Celem przedstawionych badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania przepływomierza modułowego ISCO do pomiarów hydrometrycznych prowadzonych w innych, mniej korzystnych warunkach, tj. w naturalnym korycie rzeczonym z dnem piaszczystym, po którym odbywa się ruch rumowiska wlezonego o zmiennej intensywności.

 Praca naukowa napisana przy wykorzystaniu wsparcia udzielonego przez Islandię, Liechtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego. Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2011 jako projekt badawczy.

Material i metody

Badania przeprowadzono w korycie rzeki Zagożdżonki, której górna część stanowi zlewnię badawczą Katedry Inżynierii Wodnej SGGW. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów hydrometrycznych wykonanych na stanowisku pomiarowym transportu rumowiska wlezonego, zlokalizowanym powyżej przekroju wodowskazowego Czarna. W analizach wykorzystano dane z pomiarów ciągłych (krok czasowy 5 i 10 minut) wykonanych

w okresie 15–31 lipca 2010 roku, obejmujących następujące parametry:

- napełnienie koryta, średnia prędkość strumienia i natężenie przepływu, parametry zmierzone miernikiem ISCO,
- stany wody, określone na podstawie pomiaru ciśnienia całkowitego i atmosferycznego miernikami typu Mini-Diver i Baro-Diver.

W pracy wykorzystano również wyniki wcześniej wykonanych pomiarów, na podstawie których określono charakterystyki zmienności średniej prędkości i natężenia przepływu w analizowanym przekroju poprzecznym rzeki Zagożdżonki (Popek 2006).

Poziom cieczy (napełnienie) i średnia prędkość strumienia mierzone są w przepływomierzu typu ISCO 2150 za pomocą sondy AV, umieszczonej na dnie koryta (ISCO 2008). W rzece Zagożdżonce sonda AV została zamontowana w osi koryta na poziomym drewnianym dnie, stanowiącym zabezpieczenie łapacza rumowiska wlezonego przed erozją dna (Popek 2006).

Sonda AV mierzy poziom cieczy poprzez różnicowy przetwornik ciśnienia umieszczony w jej wnętrzu (Wąlkowiak 2006, ISCO 2008). Przetwornik stanowi układ piezorezystywny, który mierzy różnicę ciśnień między zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnią membrany przetwornika. Na zewnętrzną powierzchnię membrany, która ma kontakt ze strumieniem poprzez otwory znajdujące się pod sondą AV, działa ciśnienie całkowite. Natomiast na wewnętrzną powierzchnię membrany działa ciśnienie atmosferyczne poprzez rurkę wentylacyjną, biegnącą wzdłuż przewodu sondy AV do modułu pomiarowego. Zmierzona różnica ciśnień

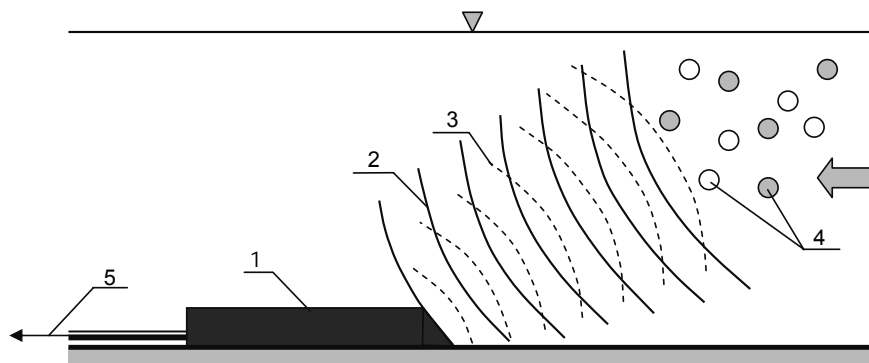
jest więc ciśnieniem hydrostatycznym, proporcjonalnym do napełnienia koryta. Moduł pomiarowy na stanowisku w Czarnej został umieszczony na brzegu w skrzynce aparaturowej, zabezpieczonej przed zalaniem wodą (tj. umieszczonej na bezpiecznej wysokości względem maksymalnych obserwowanych stanów wody), a jednocześnie zapewniającej łatwy dostęp przy sczytywaniu danych pomiarowych.

Przepływomierz ISCO mierzy również średnią prędkość przepływu, wykorzystując fale ultradźwiękowe w efekcie Dopplera (Walkowiak 2006, ISCO 2008). Sonda AV (rys. 1) zawiera dwa przetworniki ultradźwiękowe umieszczone na skośnej powierzchni czołowej. Pierwszy przetwornik nadaje falę ultradźwiękową o częstotliwości 500 kHz, która poruszając się w strumieniu wody, ulega odbiciu od cząsteczek stałych i pęcherzyków powietrza niesionych przez wodę. Drugi z przetworników odbiera falę odbitą, której częstotliwość jest większa od fali wysłanej. Różnica częstotliwości obu fal jest proporcjonalna

do prędkości, z jaką cząsteczki zawieszone w wodzie poruszają się w kierunku sondy AV. Wewnętrzny układ miernika ISCO oblicza prędkość strumienia na podstawie porównania częstotliwości fali wysłanej i odbitej, przyjmując ją jako prędkość średnią w przekroju strumienia.

Mierzone przez sondę AV chwilowe wartości napełnienia i średniej prędkości strumienia są następnie wykorzystywane przez wewnętrzny układ miernika ISCO do obliczenia chwilowego natężenia przepływu (Q_i). W obliczeniach Q_i można zastosować kilka opcjonalnych metod konwersji danych pomiarowych. W badaniach wykonanych w korycie rzeki Zagożdżonki do obliczania natężenia przepływu wykorzystano metodę „prędkość – powierzchnia” w kanale prostokątnym o szerokości dna równej 1,8 m.

Na stanowisku pomiarowym transportu rumowiska wleczonego w Czarnej do pomiaru stanu wody wykorzystuje się czujniki ciśnieniowe typu Mini-Diver i Baro-Diver, które w sposób ciągły mie-



RYSUNEK 1. Schemat działania sondy AV: 1 – sonda AV, 2 – ultradźwiękowa fala wysłana, 3 – fala odbita, 4 – cząstki zawieszony i pęcherzyki powietrza, 5 – kabel do połączenia z modułem AV
 FIGURE 1. Schematic of AV sensor operation: 1 – AV sensor, 2 – ultrasonic transmitted wave, 3 – reflected wave, 4 – suspended particles and air bubbles, 5 – connection cable to AV module

rzę i rejestrują odpowiednio wysokość ciśnienia całkowitego i atmosferycznego. Stan wody oblicza się na etapie opracowania wyników pomiarów na podstawie różnicy zmierzonych ciśnień, uwzględniając przy tym poprawkę wynikającą z położenia Mini-Divera względem poziomu odniesienia wodowskazu łatowego. Obliczone chwilowe stany wody (H_i) wykorzystano następnie do obliczenia wartości napełnień koryta (h_i):

$$h_i = H_i - H_0 \quad (1)$$

gdzie $H_0 = 72,5$ cm jest stanem odpowiadającym poziomowi położenia sondy AV na dnie koryta.

Zbiór napełnień koryta (h_i) i ich zmienność w analizowanym okresie lipca 2010 roku wykorzystano do porównania z wartościami zmierzonymi przez miernik ISCO. Pozostałe parametry zmienne w czasie uzyskane z miernika ISCO, tj. średnią prędkość przepływu (V_i) oraz natężenie przepływu (Q_i), porównywano z wartościami określonymi na podstawie wyników okresowo wykonywanych pomiarów hydrometrycznych, które opisano następującymi zależnościami korelacyjnymi (Popek 2006):

– średnia prędkość przepływu, V [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] ($R^2 = 0,961$)

$$V = 0,806h^{0,443} - 0,101 \quad (1)$$

– natężenie przepływu, Q [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$] ($R^2 = 0,974$)

$$Q = 1,82h^{1,77} \quad (2)$$

gdzie h – napełnienie koryta [m].

Do oceny zgodności wartości parametrów przepływu mierzonych mierni-

kiem ISCO z wartościami określonymi na podstawie pomiaru czujnikami Diver oraz z wyznaczonymi na podstawie okresowych pomiarów hydrometrycznych zastosowano następujące statystyki (Moriasi i in. 2007):

– współczynnik Nasha-Sutcliffe (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^m - Y_i^{ISCO})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^m - Y_{sr}^m)^2} \quad (3)$$

– odchylenie procentowe ($PBIAS$):

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^m - Y_i^{ISCO})}{\sum_{i=1}^n Y_i^m} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

Y_i^m – wartość chwilowa zmierzona lub obliczona z zależności korelacyjnych (1) lub (2),

Y_i^{ISCO} – wartość chwilowa zmierzona miernikiem ISCO,

Y_{sr}^m – średnia arytmetyczna chwilowych wartości zmierzonych lub obliczonych z zależności korelacyjnych (1) lub (2),

n – liczebność zbioru danych.

Współczynnik NSE , obliczany według wzoru (3), jest znormalizowaną statystyką, której wartość wyraża stopień odchylenia porównywanych na wykresie parametrów od linii przekątnej (1 : 1). Wartość NSE zmienia się w przedziale od $-\infty$ do 1,0 (włącznie), przy czym im bliższa jest jedności, tym zgodność porównywanych wartości jest lepsza.

Odchylenie procentowe (*PBIAS*), obliczane według wzoru (4), jest miarą statystyczną, która określa, na ile wartości jednego z porównywanych zbiorów danych są średnio większe lub mniejsze od drugiego. Im wartość *PBIAS* jest bliższa wartości 0%, tym zgodność porównywanych parametrów jest większa. Przyjmuje się, że bardzo dobra zgodność parametrów występuje dla wartości *PBIAS* mniejszej niż 10%. W rozpatrywanym przypadku dodatnia wartość *PBIAS* oznacza, że zmierzone miernikiem ISCO wartości parametrów przepływu są mniejsze od określonych inną metodą, tj. na podstawie odczytów z Divera lub wartości obliczonych z zależności korelacyjnych (1) lub (2). Ujemna wartość *PBIAS* oznacza tendencję odwrotną – parametry zmierzone miernikiem ISCO mają przeciętnie większe wartości od określonych innymi metodami.

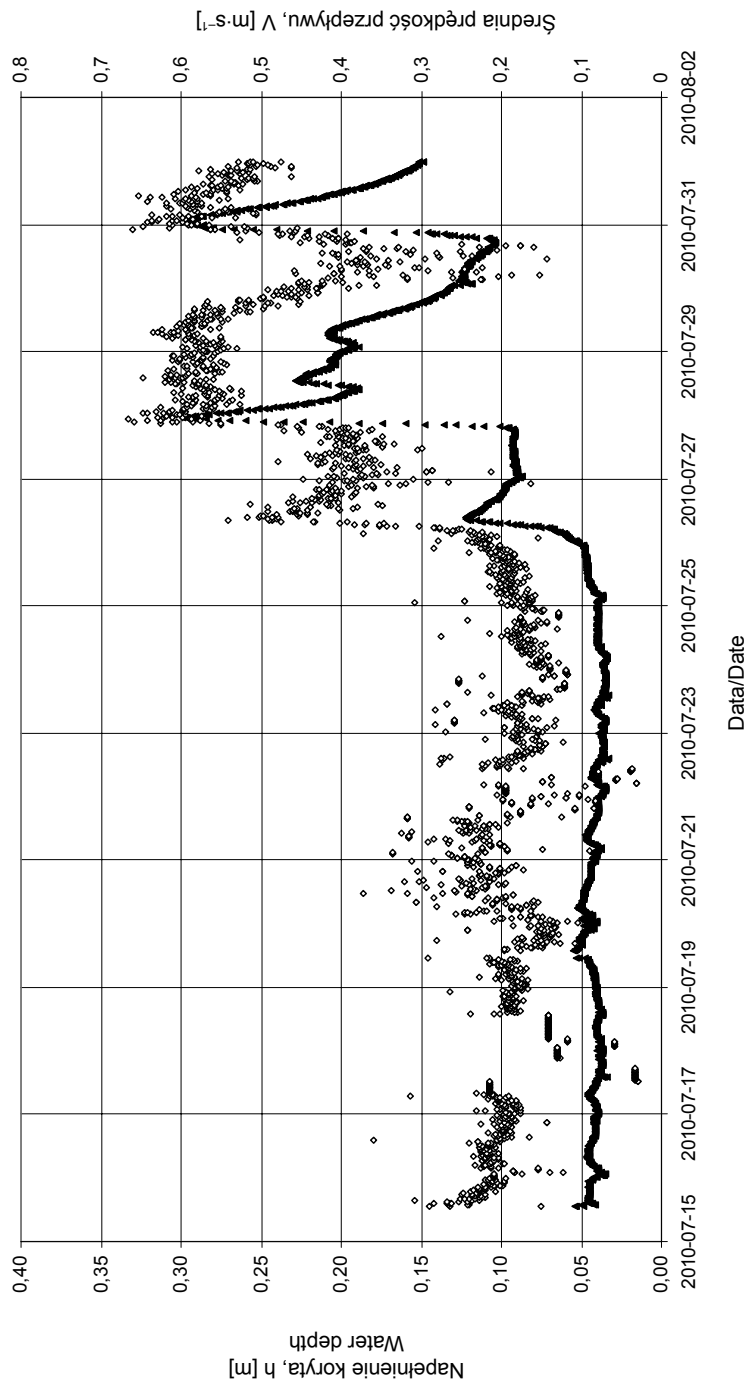
Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów wykonanych miernikiem ISCO w okresie od 15 do 31 lipca 2010 roku przedstawiono na wykresie (rys. 2) w postaci hydrogramu napełnień koryta (h_i) i średniej w przekroju prędkości przepływu (V_i). W okresie od 15 do 26 lipca napełnienia koryta były niewielkie i wykazywały nieznaczne wahania, nieprzekraczające 2 cm. Pomimo że warunki przepływu w tym okresie można uznać za ustalone, jednak średnia prędkość przepływu w kolejnych krokach czasowych charakteryzowała się dużą zmiennością – maksymalne wartości prędkości były ponad 10-krotnie większe od wartości minimalnych. W okresie trzech wezbrań, jakie wy-

stały pod koniec lipca 2010 roku, zarówno dynamika, jak i amplituda zmian prędkości przepływu były jeszcze bardziej wyraźne (rys. 2).

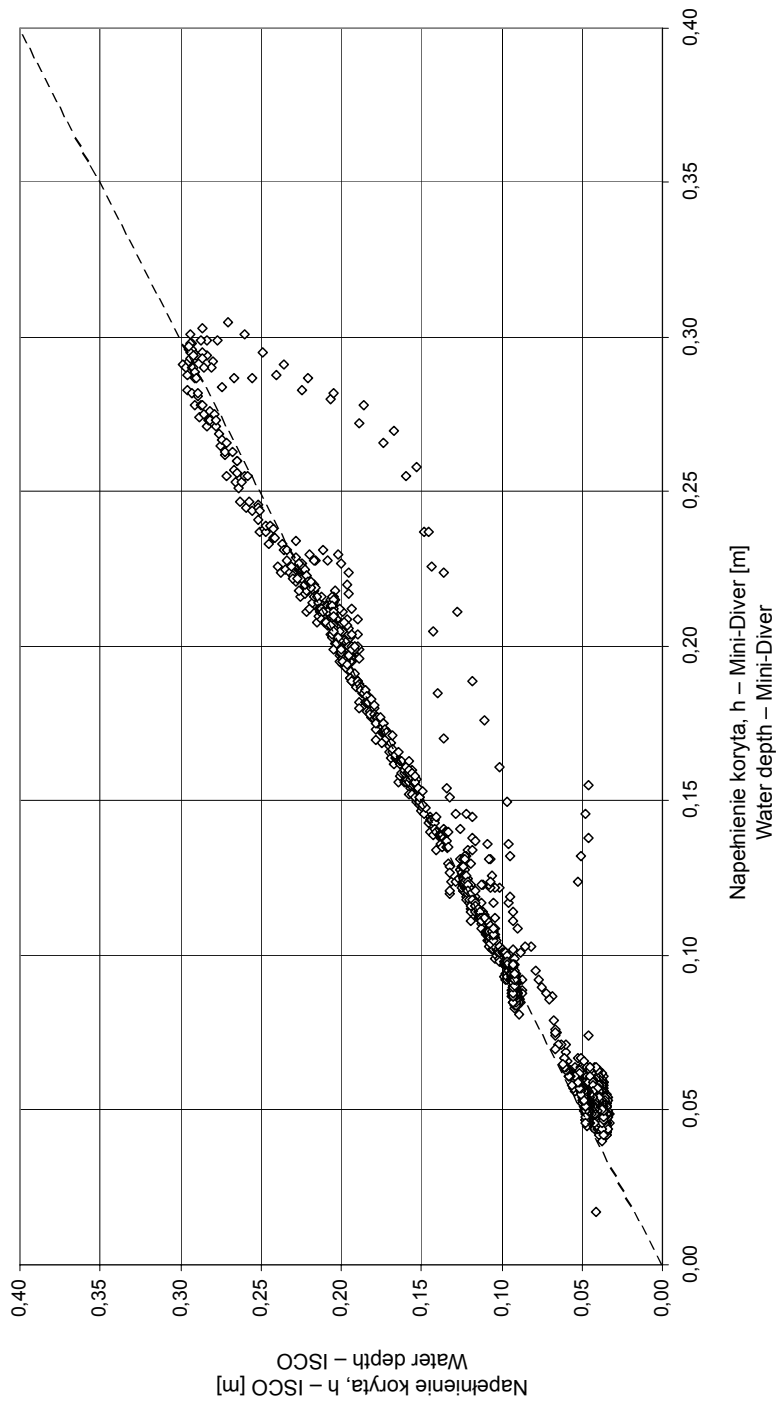
W celu sprawdzenia poprawności pomiaru napełnienia koryta (h_i) porównano na wykresie (rys. 3) dane uzyskane z miernika ISCO z określonymi na podstawie pomiarów ciśnień przy użyciu czujników Mini-Diver. Z wykresu na rysunku 3 wynika, że istnieje bardzo duża zgodność wyników pomiarów wykonanych dwoma niezależnymi przyrządami. Świadczy o tym bliska jedności, obliczona według wzoru (3), wartość współczynnika $NSE = 0,946$. Na bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów napełnienia koryta wskazuje również wartość odchylenia procentowego $PBIAS = 9,7\%$, określona według wzoru (4). Jednocześnie dodatni znak wartości *PBIAS* oznacza, że zmierzone miernikiem ISCO wartości napełnień koryta są średnio o 9,7% mniejsze od określonych na podstawie pomiarów Mini-Diverem.

Ze względu na brak dwóch niezależnych urządzeń do ciągłego pomiaru średnich prędkości przepływu (V_i) w kolejnych krokach czasowych zbior wartości zmierzonych miernikiem ISCO porównano z wynikami pomiarów rozkładu prędkości, które wykonywane były okresowo w tradycyjny sposób, tj. przy użyciu młynka hydrometrycznego (rys. 4). Z wykresu pokazanego na rysunku 4 wynika, że zmierzone miernikiem ISCO prędkości średnie (V_i) są zdecydowanie większe od wartości obliczonych ze wzoru (1). Uzyskana wartość odchylenia procentowego $PBIAS = -71,4\%$ oznacza, że zmierzone miernikiem ISCO wartości średnich w przekroju prędkości V_i są przeciętnie o ponad

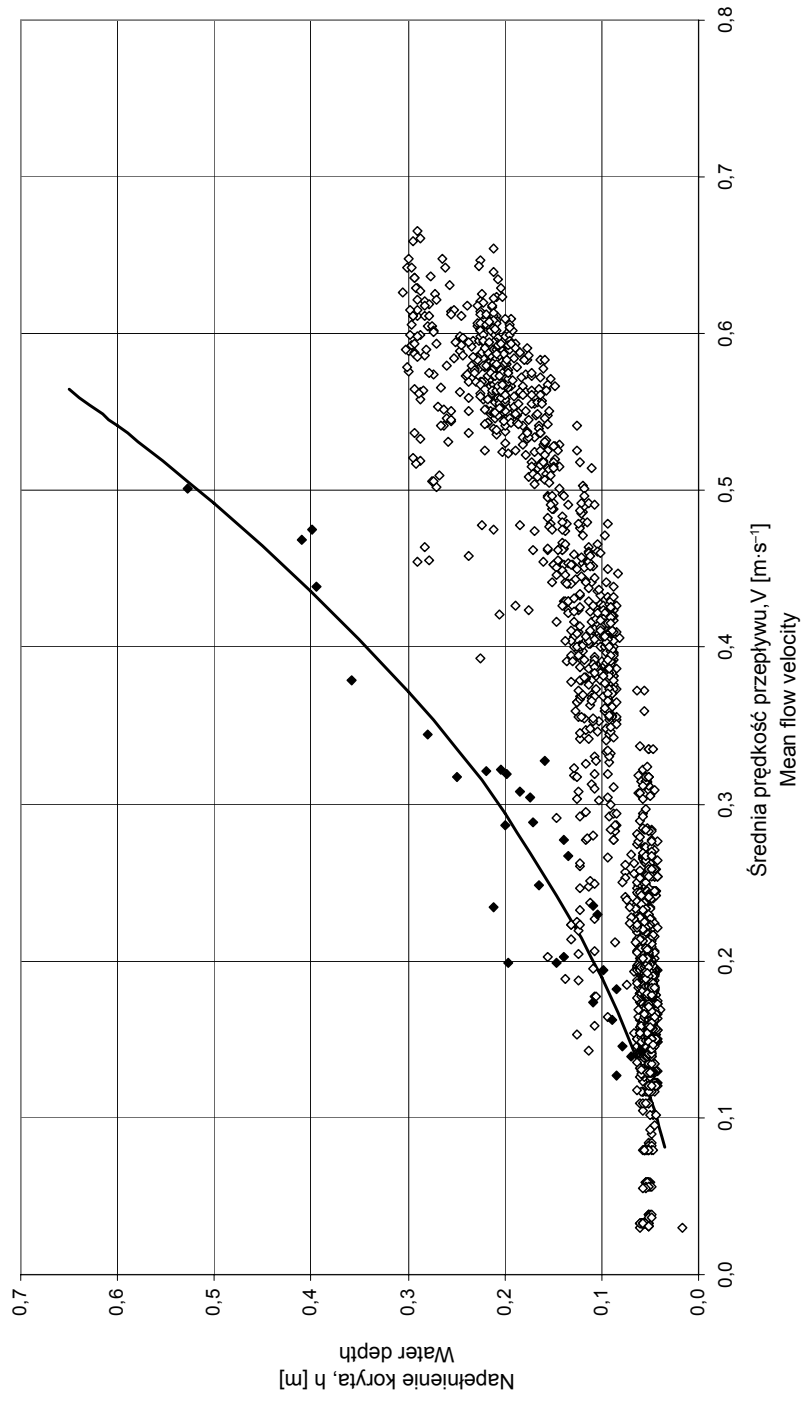


RYSunEK 2. Hydrogram zmierzonych miernikiem ISCO 2150 napowiení koryta (punkty wypelnione) i średniej prędkości przepływu (punkty bez wypelnienia) w korycie rzeki Zagożdżonki

FIGURE 2. Hydrograph of water depth (solid points) and average flow velocity (open points) measured by ISCO 2150 module in the Zagożdżonka riverbed

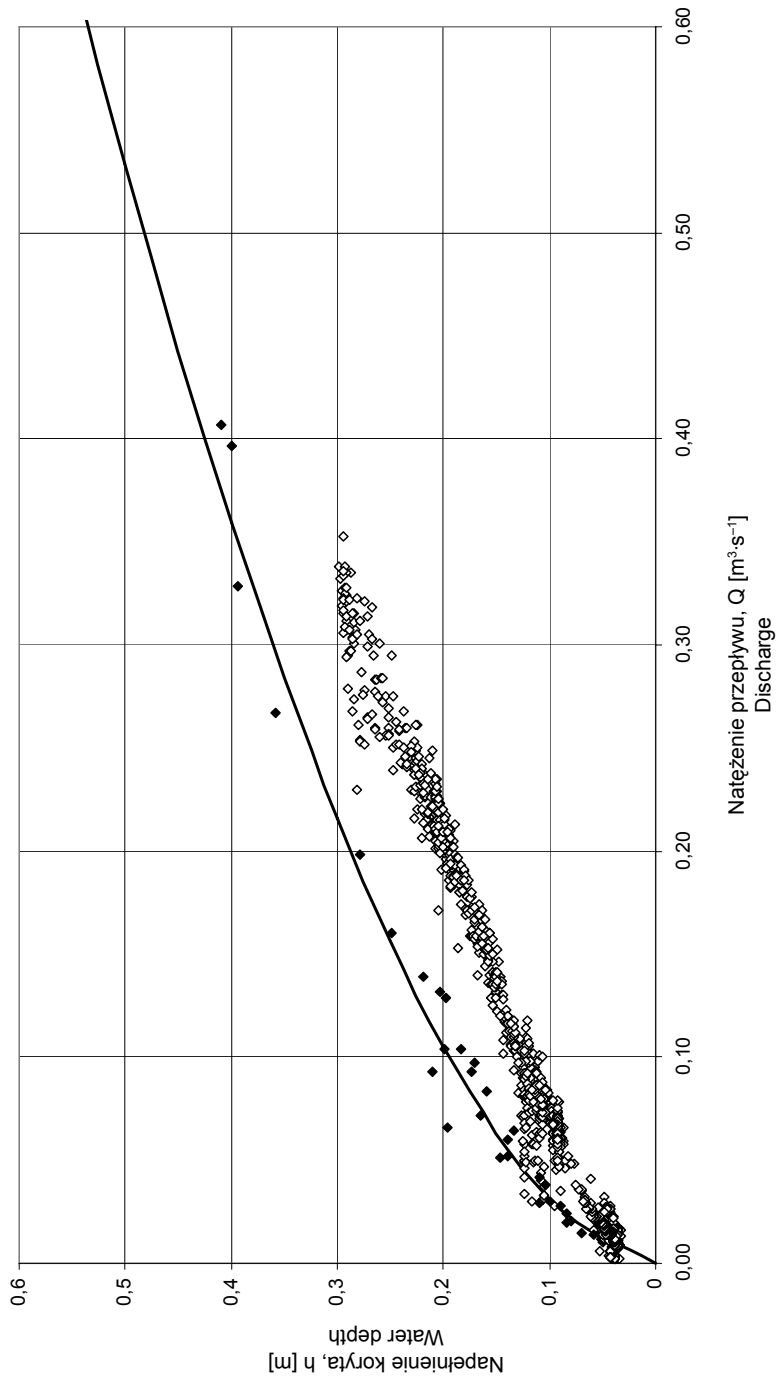


RYSUNEK 3. Porównanie napętnień koryta zmierzonych miernikiem ISCO 2150 i czujnikiem Mini-Diver
 FIGURE 3. Comparison of water depths measured by ISCO 2150 module and Mini-Diver sensor



RYSUNEK 4. Porównanie średniej prędkości przepływu przy różnym napienieniu koryta: punkty bez wypełnienia – dane z miernika ISCO 2150, punkty wypełnione – dane z pomiarów hydrometrycznych, linia – krzywa według równania (1)

FIGURE 4. Comparison of mean flow velocity at different water depth: open points – data from ISCO 2150 module, solid points – data from hydro-metric measurements, line – curve by equation (1)



RYSUNEK 5. Porównanie krzywej natężenia przepływu (linia ciągła opisana równaniem (2), określonym na podstawie wyników pomiarów hydrometrycznych – punkty wypelnione) z natężeniami przepływu uzyskanymi z pomiaru przepływomierzem modułowym ISCO 2150 (punkty bez wypelnienia)

FIGURE 5. Comparison of stage-discharge relation (solid line – described by equation (2), determined on the basis hydrometric measurements – solid points) with discharges obtain from measurements by ISCO 2150 module (open points)

71% większe od wartości określonych ze wzoru (1), w którym za h_i podstawiano wartości chwilowe określone według pomiarów Diverem.

Jak wspomniano wcześniej, miernik ISCO określa również wartości chwilowe natężeń przepływu, które według metody „prędkość – powierzchnia” są iloczynami średniej prędkości przepływu i powierzchni przekroju, określanej na podstawie zmierzonej głębokości wody. Ponieważ z pomiarów miernikiem ISCO uzyskano zawyżone wartości prędkości chwilowych, stąd również uzyskane natężenia przepływu były większe średnio o 75% ($PBIAS = -75,1\%$) od ustalonych na podstawie pomiarów hydrometrycznych. Brak zgodności natężeń przepływu jest wyraźnie widoczny na wykresie pokazanym na rysunku 5, na którym zamieszczono krzywą przepustowości koryta określoną na podstawie okresowych pomiarów hydrometrycznych oraz wyniki pomiarów natężenia przepływu wykonanych miernikiem ISCO.

Możliwości stosowania przepływomierza modułowego ISCO 2150 były również przedmiotem badań innych autorów (Bajkowski i Pietraszek 2007, Szejba i in. 2009a, b). Pomiar porównawcze wykonano w laboratorium hydraulicznym SGGW w korycie o przekroju prostokątnym oraz w przewodzie beczniennym o przekroju kołowym. W badaniach tych stwierdzono, że przepływomierz modułowy ISCO 2150 mierzy głębokości wody z dużą dokładnością, która nie przekracza podanej przez producenta wartości $\pm 0,003$ m. W przypadku pomiaru prędkości wyniki były na-

wet dwukrotnie większe od zmierzonych laboratoryjnym sprzętem pomiarowym.

Podsumowanie

Z przedstawionych wyników badań terenowych, a także laboratoryjnych wykonanych przez innych autorów wynika, że przepływomierz modułowy ISCO 2150 mierzy dokładnie jedynie napelnienie koryta. Wartości prędkości i natężenia przepływu zmierzonych miernikiem ISCO charakteryzują się dużą zmiennością w kolejnych krokach czasowych i są ponadto znacznie większe od uzyskanych z pomiarów wykonywanych standardowym sprzętem hydrometrycznym. Wartości średnich prędkości, a także natężenia przepływu zmierzone przepływomierzem modułowym ISCO 2150 były przeciętnie większe o 71–75% od uzyskanych na podstawie wyników pomiarów hydrometrycznych, co praktycznie uniemożliwia stosowanie miernika ISCO w badaniach terenowych. Uzyskane wyniki pomiarów porównawczych świadczą o konieczności wykonania dodatkowych badań w celu kalibracji przepływomierza modułowego ISCO 2150. Badania te należy wykonać w warunkach laboratoryjnych, w których z dużą dokładnością i w szerokim zakresie zmienności można określić średnią prędkość i natężenie przepływu. Kalibracja urządzenia dawałaby możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów prędkości i natężenia przepływu w warunkach terenowych, co stanowi istotną zaletę przepływomierza modułowego ISCO 2150.

Literatura

- BAJKOWSKI S., PIETRASZEK Z. 2007: Badania funkcjonalności działania dwóch modułowych przepływomierzy do ścieków dla kanałów grawitacyjnych ISCO 2150. Maszynopis. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- ISCO 2008: 2150 Area velocity flow module and sensor. Installation and Operation Guide. Teledyne Technologist Company, Lincoln USA.
- MORIASI D.N., ARNOLD J.G., Van LIEW M.W., BINGNER R.L., HARMEL R.D., VEITH T.L. 2007: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50 (3): 885–900.
- POPEK Z. 2006: Warunki ruchu rumowiska wlezonego w małej rzece nizinnej. Rozprawy Naukowe i Monografie 300. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- SZEJBA D., BAJKOWSKI S., PIETRASZEK Z. 2009a: Badanie stabilności charakterystyk pomiarowych przepływomierza modułowego ISCO 2150. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 540: 109–116.
- SZEJBA D., BAJKOWSKI S., PIETRASZEK Z. 2009b: Możliwości wykorzystania ultradźwiękowych mierników do pomiaru przepływu w rurociągach drenarskich. W: *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. T. 1. Red. B. Więzik. Kom. Inż. Środowiska PAN, Warszawa: 439–448.

WALKOWIAK D.K. 2006: ISCO open channel flow measurement Handbook. Teledyne ISCO, Lincoln USA.

Summary

The facility of using the Flow Module ISCO 2150 in hydrometric measurements in small lowland river. The paper presents results of investigation of the Flow Module ISCO 2150 which have been used for field continuous measurements of water depth, mean velocity and discharge in the Zagożdżonka River – small lowland river with natural bed. Data obtained by using the Flow Module ISCO have been compared with results of hydrometric measurements by using other devices: Mini-Diver (water depth) and traditional current meter (mean flow velocity and discharge). The results of water depth measurements by using Flow Module ISCO and Mini-Diver have shown a very good compatibility. In case of flow velocity and discharge values measured by Flow Module ISCO have been 71–75% bigger than obtained from traditional hydrometric measurements.

Authors' address:

Zbigniew Popek, Leszek Hejduk, Piotr Hładki
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: zbigniew_popek@sggw.pl
leszek_hejduk@sggw.pl