

Krzysztof WÓJCIK, Marcin WDOWIKOWSKI\*

## **WSPÓŁCZESNE METODY INSTRUMENTALNEGO POMIARU PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU WODY W KORYTACH OTWARTYCH**

Istotą wykonania pomiarów hydrometrycznych w korytach rzecznych jest wyznaczenie wartości prędkości oraz strumienia objętości przepływu wody dla danego napełnienia. Współcześnie coraz szersze zastosowanie znajdują urządzenia akustyczne wykorzystujące efekt Dopplera. W korytach rzecznych i jeziorach już od lat 90-tych największe zainteresowanie skupiają akustyczne przepływomierze profilujące ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers). W niniejszej pracy zostały przedstawione podstawy teoretyczne pomiarów hydrometrycznych oraz przykładowe wyniki badań IMGW-PIB Oddział we Wrocławiu, który w ramach państwowej służby hydrologiczno-meteorologicznej zobowiązany jest do prowadzenia przedmiotowych pomiarów. Z uwagi na różnorodny sprzęt pomiarowy jakim dysponuje IMGW-PIB zaprezentowano zestawienie klasycznego pomiaru młynkiem hydrometrycznym z współcześnie stosowanymi urządzeniami akustycznymi, dla różnego rodzaju cieków.

### **1. WPROWADZENIE**

Wartość strumienia objętości (natężenia przepływu) jest podstawową charakterystyką hydrauliczną strumienia cieczy, która w korycie rzecznym pozostaje we wzajemnej relacji z ze stanem wody (poziom napełnienia koryta), prędkością przepływu czy spadkiem zwierciadła wody. Pomiar prędkości przepływu wody jest jednym z kluczowych sposobów pozyskania danych w miernictwie hydrologicznym, a metody instrumentalne stanowią jedną z czołowych pozycji w szeregu pośrednich metod pomiarowych typu prędkość - powierzchnia [1, 4, 8, 13, 14, 15]. Ze względu na złożoność zjawiska przepływu wody w korycie rzecznym, państwowe służby hydrologiczno-meteorologiczne oraz jednostki badawczo rozwojowe, zarówno w Polsce jak i na świecie, zmagają się z problemem doboru odpowiedniej aparatury pomiarowej. Głównym założeniem jednostek wykonują-

---

\* Pracownicy Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej - PIB, Oddziału we Wrocławiu

nych pomiary hydrometryczne jest wykorzystanie urządzeń i metod, które posiadają najszersze zastosowanie w praktyce terenowej, obejmują jak najszerszy zakres pomiarowy przy jak najniższych kosztach urządzeń pomiarowych, ekspedycji terenowych oraz niezbędnych instalacji przy zachowaniu relatywnie największej rzetelności i dokładności wyników [14]. W zależności od charakteru przepływu oraz geometrii samego koryta istnieją rozmaite metody pomiaru prędkości przepływu wody, tj.: metody objętościowe; z wykorzystaniem przelewów; metody chemiczne oraz punktowe pomiary młynkiem hydrometrycznym, łatą lub pływakami nazywane również metodami tachymetrycznymi [1, 8, 13, 14]. Najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiarową na całym świecie jest punktowa metoda z wykorzystaniem młynka hydrometrycznego. Urządzenie skonstruowane w 1790 r. przez Woltmana, zachowując zasady działania funkcjonuje w powszechnym użyciu do dnia dzisiejszego, zwłaszcza w wielu nietypowych sytuacjach np. w warunkach wystąpienia powodzi na terenach górskich. Jedyna zmiana dotyczy modernizacji materiałów z jakich wykonano wewnętrzne elementy mechanizmu oraz sposobu sygnalizacji i rejestracji obrotów wirnika w czasie [1, 9, 15]. W Polsce od 1970 roku podejmowane były próby wdrożenia i wykorzystania w pracach służby hydrologicznej metod pomiarów elektromagnetycznych i ultradźwiękowych [9, 15]. Rewolucja elektroniczna lat 90. przyniosła zmiany również w IMGW, kiedy to w ramach modernizacji państwowej służby hydrologiczno-meteorologicznej, koniecznej w świetle katastrofalnej powodzi z lipca 1997 r., w codziennym użyciu pojawiły się mierniki akustyczne ADCP [9, 16, 17]. Możliwości jakie wówczas nowa metoda pomiarowa otworzyła przed IMGW, sprawiła, że z początkowo trzech urządzeń do dnia dzisiejszego zakupiono kilkadziesiąt jednostek. Oprócz cyfryzacji wyników oraz zwielokrotnienia rozdzielczości uzyskiwanych danych wykorzystanie metod akustycznych wpłynęło na znaczną poprawę bezpieczeństwa pracy podczas wykonywania pomiarów na rzekach. Możliwość wykonania dużej liczby pomiarów w trakcie jednej sesji terenowej, poprzez skrócenie czasu oraz uzyskiwanie wyniku w chwili zakończenia prac, sprawiły, że wzrosło zainteresowanie szerokim zastosowaniem mierników akustycznych w hydrometrii na świecie [5, 11, 19]. Obecnie urządzenia wykorzystujące efekt Dopplera i prawo Sneliusa, stosowane są nie tylko w hydrologii ale również w hydraulice i ochronie środowiska, dając możliwość wykonania pomiarów w czasie rzeczywistym oraz ciągłych pomiarów stacjonarnych [3, 6, 7, 16, 20]. W niniejszej pracy zostały przedstawione urządzenia obecnie stosowane przez służbę hydrologiczną IMGW-PIB Oddział we Wrocławiu, podstawowe różnice w metodach pomiarowych prędkości przepływu oraz najczęstsze problemy, wynikające z praktyki hydrometrycznej.

## 2. PRYZRZĄDY POMIAROWE STOSOWANE W HYDROMETRII RZECZNEJ

## 2.1. MŁYNEK HYDROMETRYCZNY

Wśród tradycyjnych metod instrumentalnego pomiaru strumienia objętości przepływu grupy „prędkość-powierzchnia”, młynek hydrometryczny obok łaty hydrometrycznej i pływaków, jako jedyny jest wykorzystywany w praktyce pomiarowej do dnia dzisiejszego i obejmując największy zakres pomiarowy. Pomiar hydrometryczny, z wykorzystaniem młynka, polega na wyznaczeniu pola powierzchni przekroju poprzecznego koryta rzeki (cieku) i określeniu średniej prędkości przepływu wody w tym przekroju, zgodnie z zależnością [1, 4, 8, 10, 15, 18]:

$$Q = F \cdot v \quad (1)$$

$Q$  - strumień objętości przepływu wody w rzece [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$F$  - powierzchnia przekroju poprzecznego rzeki [ $\text{m}^2$ ],

$v$  - średnia prędkość przepływu wody w przekroju poprzecznym rzeki [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Powierzchnia przekroju czynnego obliczana jest na podstawie wyników geodezyjnego pomiaru podstawowych parametrów hydraulicznych koryta otwartego jakimi są: głębokość (średnia, maksymalna oraz cząstkowa dla poszczególnych pionów pomiarowych) oraz szerokość przekroju. Natomiast na średnią prędkość dla cieku składają się punktowe pomiary prędkości wody, charakterystyczne dla danej części przekroju, otrzymywane poprzez określenie liczby obrotów  $n$  wirnika młynka w czasie  $t$ , według formuły [1, 4, 8, 10, 14, 18]:

$$v_i = \alpha + \beta \cdot n \quad (2)$$

$v_i$  - prędkość miejscowa wody [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$\alpha, \beta$  - bezwymiarowe współczynniki tarowania młynka opisujące zależność  $v(n)$ ,

$n$  - liczba obrotów wirnika młynka hydrometrycznego w zadanym czasie  $t$  [s].

Sumowanie iloczynów powierzchni cząstkowych przekroju poprzecznego koryta cieku oraz średnich prędkości reprezentatywnych dla kolejnych pionów pomiarowych prowadzi do określenia całkowitego strumienia objętości w czasie trwania pomiaru. Sumowanie wektorów prędkości  $v$ , po powierzchni elementarnego pola pomiarowego  $dh \cdot db$ , dla szerokości zwierciadła wody  $B$ , oraz maksymalnego napełnienia koryta  $H$ , jest istotą metody rachunkowej i wyrażany jest w postaci ogólnej [1, 10, 13, 15, 18]:

$$Q = \int_0^H \int_0^B v \cdot dh \cdot db \quad (3)$$

Przedstawiona metoda pomiarowa wyznaczania strumienia objętości wody w rzece, jak każdy pomiar, obarczona jest błędami przypadkowymi oraz systematycznymi. Ze względu na znaczną liczbę parametrów opisujących funkcję strumienia-przepływu, wyznaczenie całkowitego błędu pomiarowego jest konieczne z punktu zapewnienia jak najbardziej wiarygodnego wyniku końcowego [10, 12, 14, 18]. Całkowity błąd pomiarowy instrumentalnego i mechanicznego pomiaru przepływu wody opisuje zależność [10, 12, 14, 18].

$$\Delta Q = \pm[\sigma_Q^2 \cdot \varepsilon_Q^2]^{-2} \quad (4)$$

$\Delta Q$  -całkowity błąd pomiaru strumienia przepływu wody w korycie otwartym,

$\sigma_Q$  -procentowy błąd przypadkowy pomiaru przepływu uwzględniający liczbę pionów hydrometrycznych, pomiar szerokości cieku, pomiar głębokości wody, pulsację prędkości, liczbę pomiarów prędkości wody oraz błędy wynikające z kalibracji instrumentu pomiarowego,

$\varepsilon_Q$  -procentowy błąd systematyczny pomiaru przepływu uwzględniający błędy pomiaru szerokości, głębokości cieku i prędkości wody.

Po uwzględnieniu wszystkich czynników mających wpływ na prawidłowe wykonanie pomiaru hydrometrycznego z wykorzystaniem młynka hydrometrycznego, błąd pomiarowy zamyka się zwykle w przedziale od 3 do 10%. Na wartość błędu w sposób decydujący wpływa szerokość koryta, gdzie wraz ze wzrostem liczby sekcji pomiarowych obniża się wartość błędu.

Pomiary strumienia objętości w korytach otwartych z wykorzystaniem młynka hydrometrycznego w IMGW-PIB wykonuje się na wszystkich ciekach kontrolowanych i niekontrolowanych od głębokości 6 cm. Uwzględniając charakter przepływu oraz parametry hydrauliczne cieku, w praktyce terenowej stosuje się różne metody operacyjne. Metoda „w bród”, dla głębokości rzeki do 1,0 m, wymaga bezpośredniego przepłynięcia się w poprzek rzeki. Metoda „łodzi ruchomej”, zakłada wykorzystanie jednostki pływającej (pontonu na linie lub łodzi) do przepłynięcia przekroju poprzecznego cieków głębszych od 1,0 m. Ostatnia metoda „z mostu” wykorzystuje technikę pomiaru na zawieszeniu, z obciążeniem umożliwiającym pomiar ekstremalnie wysokich przepływów wody np. podczas powodzi [13, 15, 18].

## 2.2. PRĘDKOŚCIOMIERZ ELEKTROMAGNETYCZNY I AKUSTYCZNY

**Prędkościomierz elektromagnetyczny.** Kolejnym ważnym przyrządem pomiarowym w hydrometrii rzecznej, wykorzystującym niemal całą metodykę grupy „prędkość-powierzchnia” przedstawionej w punkcie 2.1, jest elektromagnetyczny miernik przepływu. Prądomierz przepływu działa na zasadzie generatora magnetohydrodynamicznego, który wokół czujnika wytwarza pole magnetyczne, a następnie dokonuje rejestracji SEM (siły elektromotorycznej) indukowanej w płynącej wodzie. Instru-

ment mierzy wielkość i kierunek przepływu prądu w płaszczyźnie poziomej prostopadłej do wytworzonego pola magnetycznego. Wynikiem pomiaru jest punktowa prędkość w danym pionie pomiarowym. Wykorzystując analogicznie znane już metody wyznaczania powierzchni, wyliczana jest wartość przepływu wody. Prędkość w metodzie elektromagnetycznej określa zależność [15]:

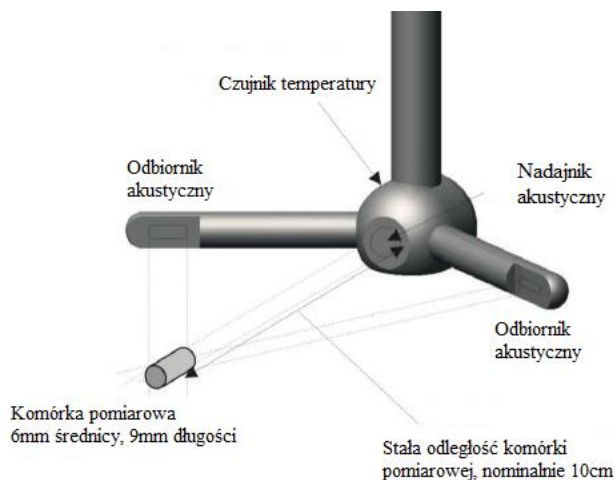
$$v = \frac{e}{B \cdot L} \quad (5)$$

$e$  – siła elektromotoryczna (SEM) [V],  
 $B$  – indukcja magnetyczna [ $T = V \cdot s \cdot m^{-2}$ ],  
 $L$  – długość przewodnika [m].

Czujniki elektromagnetyczne w praktyce pomiarowej wykorzystywane są z powodzeniem dla warunków terenowych i hydraulicznych, które dla młynka hydrometrycznego były źródłem znaczących błędów. Specyficzna budowa samego czujnika umożliwiła wykonanie pomiarów dla płytszych niż 6 cm cieków (nawet do 3 cm), dla cieków charakteryzujących się wysokim zarastaniem roślinnością wodną, oraz pomiarów pod pokrywą lodową. Nie zaleca się stosowania prędkościomierzy elektromagnetycznych dla prędkości wody powyżej  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oraz w profilach zlokalizowanych blisko urządzeń czy konstrukcji mających wpływ na indukcję pola magnetycznego wytwarzanego przez czujnik np. stalowych mostów czy energetycznych linii przesyłowych o wysokim napięciu. Błąd pomiarowy dla tych urządzeń ocenia się na 5% [9, 15].

**Prędkościomierz akustyczny.** Niewątpliwym odkryciem współczesnej hydrometrii, na całym świecie, już od lat 90-tych jest grupa przyrządów wykorzystujących efekt Dopplera. Pomiar prędkości wody realizowany jest poprzez analizę przesunięcia częstotliwości dźwięku odbitego od zawieszin w roztworze wodnym, przy założeniu, że prędkość takiej cząsteczki odpowiada prędkości strugi w danym momencie. W prezentowanym w niniejszej pracy urządzeniu FlowTracker firmy SONTEK/YSI (wg rys. 1), pomiar prędkości wody wykonywany poprzez emisję krótkiego impulsu dźwiękowego o znanej częstotliwości przez nadajnik; następnie sygnał dźwiękowy osiąga komórkę pomiarową zlokalizowaną 10 cm przed nadajnikiem i tam odbija się od napotkanych stałych cząstek zawieszonych w wodzie. Dwa zogniskowane i zorientowane na komórkę pomiarową odbiorniki, rejestrują zmianę częstotliwości, tworząc bistatyczny obraz prędkości wody. Wartość chwilowej prędkości otrzymywana jest poprzez transformację otrzymanego obrazu na układ kartezjański poprzez znajomość geometrii układu nadajnik-odbiornik-komórka pomiarowa. Całkowity przepływ podobnie jak przy poprzednio przedstawianych instrumentach wyznaczany jest poprzez sumowanie iloczynów prędkości w komórkach pomiarowych – zależności (1), (3) i (5). Różnica dotyczy sposobu uzyskania wartości prędkości. Zaletą tej metody jest

stała wartość powierzchni dla każdego pomiaru prędkości, co znacznie obniża całkowity błąd pomiarowy [21].



Rys. 1. Dwu osiowa sonda akustycznego prędkościomierza dopplerowskiego ADV - Flowtracker

Prędkościomierze akustyczne, przy zachowaniu kilku niezbędnych warunków, jak 10 cm wolnej przestrzeni przed nadajnikiem czy odpowiednia stabilizacja czujnika podczas wykonywania pomiaru, pozwalają na pomiar prędkości w zakresie od 0,001 do nawet  $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wartość prędkości w danym punkcie pomiarowym jest uśredniona ze zbioru prędkości rejestrowanych co jedną sekundę w czasie przyjętym przez użytkownika. Zatem w stosunku do młynka hydrometrycznego dla tego samego czasu ekspozycji pomiaru czujniki ADV rejestrują nieporównywalnie większą liczbę danych. Dodatkowo cyfrowy zapis każdego pomiaru prędkości umożliwia wykorzystanie szeregu parametrów kontrolujących poprawność warunków w jakich wykonywany jest pomiar oraz samych wyników. W ocenie jakości i dokładności uzyskiwanych danych do dyspozycji są takie wskaźniki jak standardowy błąd prędkości, stosunek sygnału do szumu (SNR), filtracja pików (liczba nieprawidłowo wykonanych pomiarów prędkości), kąt przepływu strugi oraz odchylenia instrumentu w płaszczyźnie pionowej i poziomej, jak również korekcja warunków brzegowych środowiska pomiaru (temperatura oraz zasolenie wody), które mają bezpośredni wpływ na prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej. Wszelkie wyniki są dostępne w trakcie wykonywania pomiaru co pozwala na bieżąco ocenę wyników. Błąd pomiarowy dla instrumentów akustycznych nie przekracza 1%. IMGW-PIB wykorzystuje prędkościomierze akustyczne w praktyce pomiarowej od roku 2010 [20, 21].

## 2.3. AKUSTYCZNE DOPPLEROWSKIE PRZEPLYWOMIERZE PROFILUJĄCE - ADCP

Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem służb hydrologicznych na cyfryzację pomiarów hydrometrycznych w latach 90-tych, do warunków śródlądowych zaadaptowano oceanograficzne głowice akustyczne wykorzystujące techniki wąsko i szerokopasmowe właściwe dla echosondy. W praktyce pomiarowej zaczęły funkcjonować akustyczne profilujące przepływomierze dopplerowskie ADCP. W Polsce pierwsze jednostki pojawiły się na początku lat 2000. W ogólnej zasadzie pomiar prędkości odbywa się jak przy prędkościomierzach akustycznych z tą różnicą, że dla ADCP pomiar jest ciągły i kończy się wyznaczeniem całkowitego przepływu w przekroju pomiarowym [5, 6, 7, 9, 11, 16, 17, 19, 20]. Czujnik montowany jest równoległe do płaszczyzny zwierciadła wody i transportowany w poprzek cieku - prostopadle do linii brzegu. Korzystając z czterech nadajników zorientowanych pod kątem  $15^\circ$  od pionu w ramach emisji jednego pasma fali dźwiękowej, urządzenie dokonuje profilowania głębokości, wyznaczenia "komórek głębokości" w charakterystycznych stożkach. Jednocześnie wykonywane jest wektorowy opis prędkości w każdej komórce pomiarowej, który odniesiony do prędkości urządzenia względem zlokalizowanego dna cieku (poprzez kąt  $\theta$  daje bezwzględną wartość prędkości chwilowej strugi w poszczególnych komórkach (rys 2). Prędkość przesuwania czujnika po przekroju pomiarowym umożliwia określenie odległości pomiędzy kolejnymi stożkami, a tym samym zdefiniowanie "komórek elementarnych" i poszczególnych powierzchni w pionach pomiarowych. Suma iloczynów pól "elementarnych komórek" oraz przypisanych im wartościom prędkości pozwala wyznaczyć wartość przepływu, zgodnie z zależnością [5, 19]:

$$Q = \int_0^T \int_0^H \bar{v}_w \cdot \bar{v}_b \cdot \sin \theta \cdot dh \cdot dt \quad (6)$$

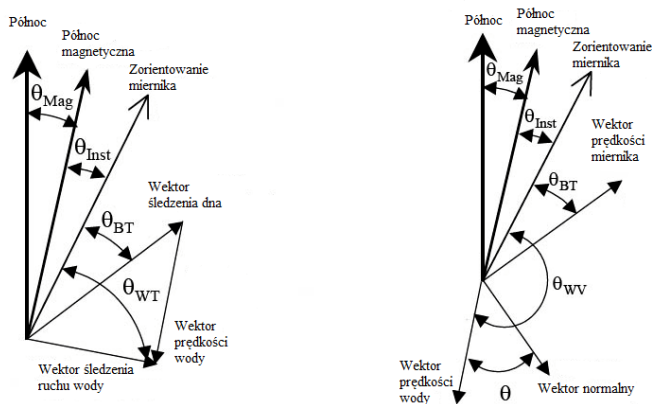
$T$  - całkowity czas gromadzenia danych (czas pojedynczego pomiaru),

$H$  - całkowita głębokość cieku,

$v_w$  - wektor prędkości wody,

$v_b$  - wektor prędkości urządzenia (łodzi),

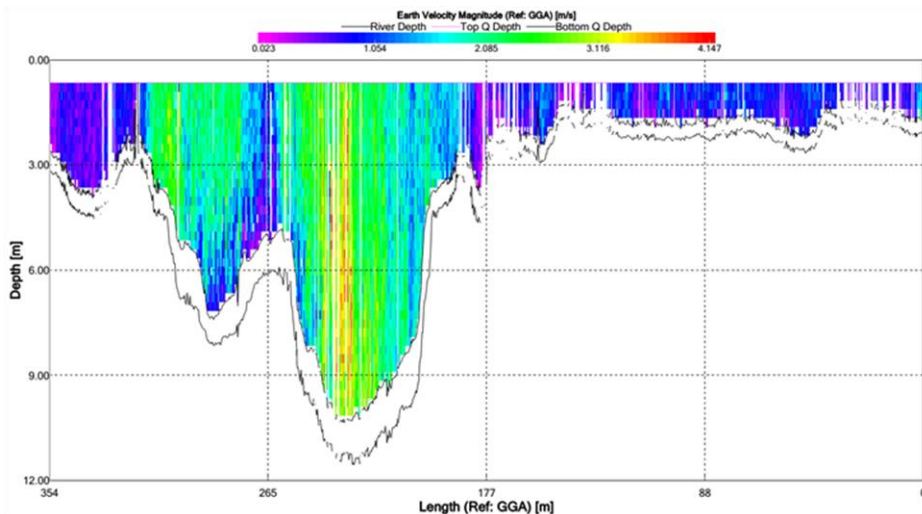
$\theta$  - kąt pomiędzy wektorem prędkości wody, a wektorem normalnym do wektora prędkości łodzi (rys. 2).



Rys. 2. Wektorowy obraz prędkości wody w „elementarnej komórce pomiarowej” [19]

Ze względu na wykorzystanie kompasu oraz opcjonalnie nawigacji GPS, każdy pion pomiarowy jest zorientowany w układzie współrzędnych, co daje pełną informację o położeniu i kierunku poszczególnych wektorów prędkości w całym przekroju pomiarowym (rys. 3). Utworzenie stożka nakładających się na siebie fal dźwiękowych mieści się w dziesiątych częściach sekundy, natomiast wykonanie pojedynczego pomiaru w zależności od szerokości cieku zajmuje od kilku do kilkunastu minut. Wykorzystana technologia oprócz do tej pory wyznaczanych wartości prędkości punktowych umożliwia precyzyjne zdjęcie przekroju poprzecznego w zakresie rejestracji czujnika. Krótki czas pozyskania profilu prędkości w danych pionie pomiarowym pozwala uzyskać o wiele większy zbiór prędkości w całym przekroju pomiarowym. Z poziomu użytkownika istnieje możliwość zdefiniowania wielkości „elementarnej komórki” pomiarowej poprzez zmianę częstości emisji fal dźwiękowych. Wartość przepływu w korycie obliczana jest w oparciu o całkowity przepływ zarejestrowany przez urządzenie oraz estymację obszarów brzegowych, tj. pewnej definiowalnej powierzchni pomiędzy urządzeniem a brzegami rzeki oraz w strefach wygaszania fali dźwiękowej przy dnie cieku oraz w warstwie, w której zanurzony jest czujnik. Estymacja wykonywana jest w oparciu o funkcje stałą, wykładniczą lub trój-stopniową, wszystkie dostępne z poziomu użytkownika. Dla obszarów ściśle zdefiniowanych istnieje możliwość zastosowania liczbowego współczynnika korygującego przepływ w estymowanym obszarze [5, 11, 17].





Rys. 3. Diagram rozkładu prędkości w przekroju pomiarowym z aplikacji TRDI Teledyne-WinRiver. Pomiar wykonany w Brzegu Dolny w maju 2010 r. [2]

W zależności od rodzaju wykorzystywanego urządzenia, w zakresie częstotliwości emisji fal dźwiękowych pomiar ADCP jest możliwy dla głębokości od 0,2 m dla urządzeń 2000 kHz, od 0,7 m dla urządzeń 1200 kHz i od 1,2 m dla urządzeń 600 kHz. Wykorzystanie nawigacji GPS umożliwia lokalizowanie czujnika pomiarowego, co pozwala wyznaczyć wartość prędkości, w sytuacjach kiedy urządzenie nie może odnieść się do profilowanego dna cieków (przypadek "ruchomego dna" dla cieków o dnie piaszczystym i żwirowym podczas wystąpienia dużych prędkości przepływu) [5, 11, 17].

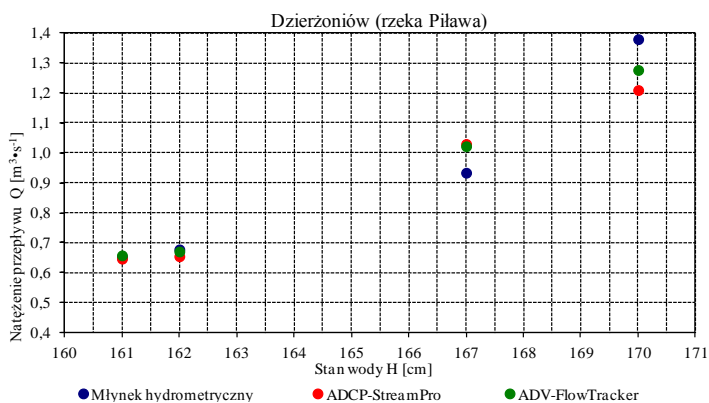
Obecnie stosowane urządzenia ADCP zakładają jak największy zakres pomiarowy, tak aby jednym urządzeniem możliwy był pomiar zarówno cieków płytkich od 0,2 m jak i głębokich, nawet do 40 m. Jest to możliwe dzięki jednoczesnemu zastosowaniu emisji wąskopasmowej, szerokopasmowej i echosondy pionowej. Dodatkowo wykorzystanie technologii RTK DGPS, powoduje zwiększenie precyzji pozycjonowania urządzenia, uniezależniając proces lokalizacji od ilości dostępnych satelitów. Szczegółowe informacje odnośnie chwilowej lokalizacji wektorów prędkości umożliwiają wizualizację wyników pomiarów na cyfrowych podkładach mapowych (rys. 4) [20].



Rys. 4. Lokalizacja przekroju pomiarowego Brzeg Dolny, maj 2010 na podkładzie mapowym [2]

### 3. WYNIKI POMIARÓW RÓŻNYCH PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH

Autorzy niniejszej pracy, w ramach codziennych obowiązków służbowych wykonali znaczną ilość pomiarów hydrometrycznych, na wszystkich ciekach kontrolowanych, na obszarze województwa dolnośląskiego, opolskiego, wielkopolskiego i lubuskiego. W praktyce zawodowej wykorzystywali wszystkie prezentowane urządzenia, techniki i metody pomiarowe. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów pochodzące różnorodnej aparatury pomiarowej, z różnych rzek i okresów, jako odniesienie przytoczonej charakterystyki ogólnej urządzeń (p. 2) do warunków terenowych. Na rysunku 5 zestawiono wartości strumienia objętości otrzymane dla rzeki Piława w Dzierżoniowie.

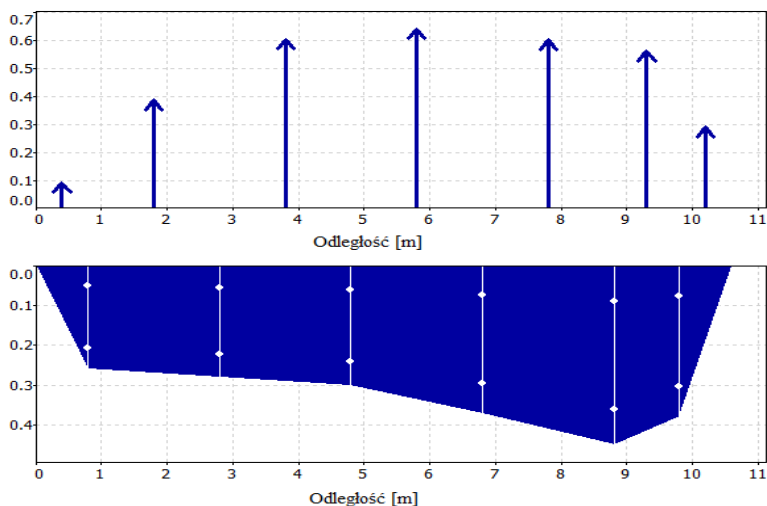


Rys. 5 . Strumień objętości wody odniesiony do stanu wody w Dzierżoniowie otrzymany różnymi miernikami prędkości

Pomiar prędkości wody oraz kalkulacji przepływu wykonano przy pomocy mechanicznego młynka hydrometrycznego firmy OTT, miernika ADCP StreamPro firmy TRDI, rekomendowanego na płytkie cieki, oraz ADV FlowTracker firmy YSI Sontek. Głębokość cieku nie przekraczała 1 m, a pomiary zostały wykonane w różnych terminach i przy zróżnicowanym napełnieniu koryta.

Dla analizowanych wyników pomiarów prędkości i wyznaczenia przepływu wody dla zadanego napełnienia koryta rzeki, różnice pomiędzy poszczególnymi urządzeniami wahają się od 0,7-12,3%. Mimo wystąpienia odchyień powyżej 10% są to wyniki zadawalające i świadczące o złożoności zjawiska przepływu wody w rzece. Z codziennej praktyki pomiarowej wynika, że największe zróżnicowanie otrzymanych wyników przepływu przypada na strefę niskich stanów wody. Powyższy przykład jednoznacznie wskazuje, iż wartości uzyskane metodami akustycznymi odstają od młynka hydrometrycznego, natomiast są wyrównane pomiędzy sobą. Ze względu na warunki terenowe różnice są zarówno wyższe +12,32% jak i niższe -10,28%. Na rysunku 6. pokazano rozkłady prędkości w kolejnych pionach przekroju pomiarowego oraz średnie głębokości kolejnych segmentów punktowego pomiaru prędkości. Jest to typowy układ rozplanowania sesji pomiarowej metodą dwupunktową stosowaną dla mierników mechanicznych, elektromagnetycznych i akustycznych ADV.

Kolejnym porównaniem objęto pomiary ekstremalnych stanów wody na Odrze, które wystąpiły podczas powodzi w roku 2010. Przykład dotyczy profilu Krzyżanowice na Odrze, gdzie do strumienia przepływu wykorzystano równoległe młynki hydrometryczne metodą z mostu na zawieszeniu oraz miernik akustyczny ADCP, prowadzony łodzią pomiarową w poprzek wezbranej rzeki.

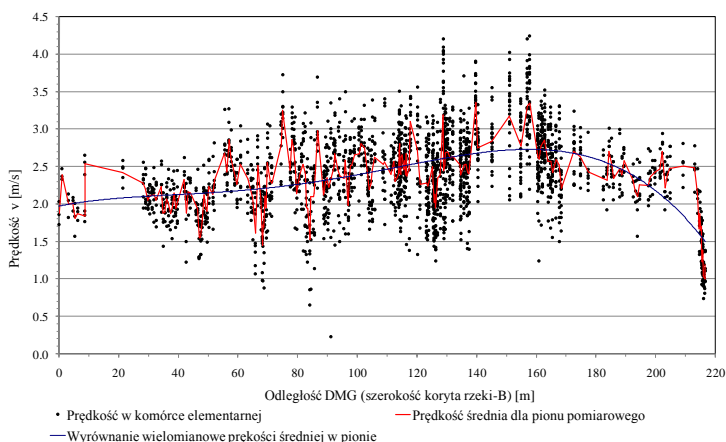


Rys. 6. Rozkład prędkości w poszczególnych pionach przekroju pomiarowego dla punktowych pomiarów prędkości wody z wykorzystaniem ADV - Flowtracker

W tabeli 1 zestawiono wyniki obu tych pomiarów. W tym miejscu należy podkreślić, że z uwagi na różne lokalizacje profili pomiarowych, nie można porównać wszystkich wartości pomiędzy sobą. Ze względów bezpieczeństwa pomiar z łodzi pomiarowej wykonano około 200 m poniżej mostu, z którego realizowany był pomiar młynkiem hydrometrycznym. Odmiennie profile pomiarowe potwierdzają wyznaczone charakterystyki wynikające z geometrii koryta, a są to szerokość B oraz pole powierzchni czynnej F. Głębokości średnia  $H_{\text{sr}}$  (przyjmowane też jako  $T_{\text{sr}}$ ) i maksymalna ( $H_{\text{max}}$ ) są do siebie zbliżone. Na szczególną uwagę zasługuje różnica w prędkości średniej, która zdaniem autorów wynika z wielkości zbioru, z którego wartość jest wyznaczana. Dla pomiaru mechanicznego zbior prędkości otrzymanych metodą dwupunktową - właściwą dla pomiar wód ekstremalnych - wynosi 30. Pomiar ADCP zawiera 2344 wartości prędkości we wszystkich komórkach pomiarowych zebranych w jednym „przejździe”, tj. przepłynięcie w jedną stronę od brzegu do brzegu. Jest to zatem 78 razy większa liczba danych do analizy. Jak przedstawia rysunek 7. prędkości w przekroju oscylują w granicach 1,5 - 3,5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pomiarzy były wykonywane równolegle, jednak czas trwania zbierania danych dla obu urządzeń znacząco się różnił - dla pomiaru z mostu wyniósł 1godzinę, a dla pomiaru ADCP – 24 minuty (dla 4 prawidłowych „przejazdów”).

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów podstawowych parametrów hydraulicznych uzyskanych młynkiem hydrometrycznym i ADCP dla profilu Krzyżanowice na Odrze w maju 2010 r.

Przyrząd pomiarowy	F [ $\text{m}^2$ ]	B [m]	$H_{\text{sr}}$ [m]	$H_{\text{max}}$ [m]	$V_{\text{sr}}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	$V_{\text{max}}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Q [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Młynek hydrometryczny	554,00	154,40	3,59	10,90	3,04	4,08	1684,0
ADCP Riogrande TRDI	912,50	217,60	4,20	9,19	1,86	4,29	1690,0



Rys. 7. Rozkład prędkości wody w poszczególnych segmentach przekroju pomiarowego

Ostatnim przykładem jest porównanie wyników pomiarów dwóch urządzeń ADCP firm TRDI i SONTEK wykonanych w Brzegu Dolnym na Odrze, przy wykorzystaniu łodzi pomiarowej oraz systemu pozycjonowania GPS dla TRDI i RTK GPS dla SONTEK, zestawionych w tabeli 2. Pomiary zostały wykonane w jednakowych warunkach dla stabilnego układu stanu wody będącego pod wpływem stopnia wodnego w Brzegu Dolnym. Otrzymane wyniki są bardzo spójne, co wskazuje na gwarancję powtarzalności wyników stosowanej technologii pomimo różnych - konkurencyjnych dostawców sprzętu pomiarowego. Wykorzystana technologia satelitarnego pozycjonowania urządzenia umożliwiła precyzyjną lokalizację profilu pomiarowego, co również umożliwiło zachowanie analogicznych warunków terenowych przy profilowaniu. Dodatkowo, zastosowanie DGPS (rys. 8) pozwoliło na otrzymanie wyników średniej prędkości wody różnych od siebie o 2,5%, strumienia przepływu o 1,3% i średnim skupieniu poszczególnych „przejazdów” w całej sesji pomiarowej na poziomie 1%. Parametry geometryczne szerokość i głębokość maksymalna rzeki nie przekraczają 1%, co dla pomiarów na Odrze stanowi niemal idealne wyniki, w stosunku do wyników otrzymywanych do tej pory metodami rachunków hydraulicznych lub przy użyciu mechanicznych młynków hydrometrycznych. Jeśli dodać to tego czasy trwania sesji pomiarowych, które odpowiednio wyniosły 10 i 12 minut, z całą stanowczością można stwierdzić, że użycie technologii akustycznej w pomiarach chwilowych prędkości w rzekach i kanałach, jest właściwym kierunkiem.

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów ADCP dla profilu Brzeg Dolny na Odrze przy stanie 500 cm, 16 kwiecień 2013 r.

Przyrząd pomiarowy	F [m <sup>2</sup> ]	B [m]	H <sub>sr</sub> [m]	H <sub>max</sub> [m]	V <sub>sr</sub> [m·s <sup>-1</sup> ]	V <sub>max</sub> [m·s <sup>-1</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
ADCP Riogrande TRDI	335,40	72,70	4,62	8,30	1,55	2,49	519,0
ADCP Sontek	320,65	74,15	4,65	8,34	1,59	2,41	512,4



Rys. 8. Miernik ADCP na pływaku podczas pomiaru na rzece oraz zestaw pozycjonujący RTK DGPS

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Złożony charakter przepływu wody w korytach otwartych, jak również specyfika i zróżnicowanie geometryczne samych koryt i dolin rzecznych, wymaga stosowania różnorodnych urządzeń pomiarowych. Współczesna hydrometria rzeczna oparta jest o techniki akustyczne, jednak dla pewnych warunków ekstremalnych (powódzie, susze, zarastanie i zlodzenie) pomiary prędkości i strumienia objętości przepływu wody realizowane są przy użyciu mechanicznych młynków hydrometrycznych. Znaczący wzrost precyzji pomiarów hydrometrycznych przy jednoczesnym wzroście ilości danych pomiarowych, przyczynia się do konieczności nieustannego podnoszenia wiedzy w zakresie eksploatacji urządzeń pomiarowych hydrologicznych oraz geodezyjnych. Możliwości i zakres osiąganých wyników pomiarów akustycznych, wykraczające poza klasyczny punktowy pomiar prędkości wody, powinny skłaniać do podejmowania prac badawczych o charakterze poznawczym. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - PIB Oddział we Wrocławiu prowadzi badania mające na celu ocenę funkcjonalności jakie umożliwia akustyczny pomiar prędkości wody w cieku, jak również rozpoznanie innych niż dotychczasowe zastosowań uzyskiwanych wyników.

Przedstawione w niniejszej pracy urządzenia oraz wyniki badań pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Porównanie wyników pomiarów prędkości wody w rzekach, pochodzących z różnych urządzeń jest utrudnione ze względu na konieczność zachowania co najmniej zbliżonych warunków terenowych; dynamika zmian parametrów koryta może w znacznym stopniu wpłynąć na rozbieżność uzyskiwanych wartości, dlatego ze szczególną uwagą należy planować i realizować pomiary hydrometryczne.
2. Urządzenia pomiarowe należy dobierać oraz dostosowywać ich ustawienia konfiguracyjne adekwatnie do zróżnicowanych warunków i stanów, w jakich znajdują się cieki.
3. Urządzenia akustyczne obejmują coraz większe zakresy pomiarowe wpływając na wzrost uniwersalności stosowania, jednak są jeszcze obszary, w których należy stosować pomiary punktowe.
4. Wyniki pomiarów hydrometrycznych z wykorzystaniem metod akustycznych w znacznym stopniu podnoszą jakość prowadzonych badań.
5. Stosowanie urządzeń akustycznych w znacznej mierze poprawia bezpieczeństwo realizowania pomiarów hydrometrycznych.
6. Wykonywanie regularnych pomiarów hydrometrycznych w stałym profilu kontrolnym umożliwia prowadzenie monitoringu zmian form dennych w korycie rzeki.
7. Przy urządzeniach akustycznych, wielokrotnie większa liczba wartości prędkości wody w profilu pomiarowym umożliwia szczegółową charakterystykę

- współczynników szorstkości w korycie rzecznym oraz wyznaczenie udziału przepływów cząstkowych w przekroju czynnym rzeki.
8. Zastosowanie pozycjonowania satelitarnego wraz z urządzeniami akustycznymi niezależnie od dotychczas wykorzystywanych profili pomiarowych, co umożliwia wykonanie unikatowych pomiarów prędkości przepływu.
  9. Technologia ADCP, oprócz pomiarów prędkości przepływu, znajduje zastosowanie również w batymetrii cieków, zbiorników, oraz w badaniach związanych z transportem aluwii rzecznych.
  10. Szerokie zastosowanie instrumentów i metod akustycznych, w połączeniu z innymi urządzeniami hydrologicznymi i meteorologicznymi, daje możliwość stworzenia sieciowego systemu monitorującego stan fizyczny cieków naturalnych i sztucznych.
  11. Należy prowadzić prace badawcze mające na celu identyfikację nowych zastosowań urządzeń akustycznych w hydrometrii rzecznej oraz hydrologii dynamicznej.

#### LITERATURA

- [1] BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MAGNUSZEWSKI A., MIKULSKI Z., *Hydrometria*, PWN, Warszawa 1993.
- [2] BANASIAK R., KRZYŻANOWSKI M. (2013). *Procesy aluwialne i opory ruchu podczas wezbrań*. Raport IMGW-PIB w ramach zadania DS.-W-2.1.4/2013, Wrocław 2013.
- [3] BIŃKOWSKI K., KUDŁA T., *Przestrzenny rozkład prędkości przepływów w ujściowym odcinku rzeki - analiza wyników pomiarów*, Konferencja Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki w Świnoujściu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2005, 15-21.
- [4] BYCZKOWSKI A., *Hydrologia T.I*, SGGW, Warszawa 1999, 116-155.
- [5] GORDON L.J., *Acoustic Doppler Current Profiler. Principles of Operations. A Practical Primer*, RD Instruments, California 1996.
- [6] HEJDUK L., *Zastosowanie metody ADCP do pomiarów przepływu w małej rzece*, Przegląd naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska I(39), Warszawa 2008, 73-79.
- [7] KUDŁA T., BIŃKOWSKI K., *Analiza warunków hydraulicznych odcinka Odry w rejonie Bielinka*. Konferencja Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki w Świnoujściu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2005, 21-27.
- [8] LAMBOR J., *Hydrologia inżynierska*, Arkady, Warszawa 1971, 202-215.
- [9] MACIĄŻEK A., Historia pomiarów natężenia przepływu w polskiej służbie hydrologicznej. *Gospodarka Wodna* nr 11, SIGMA-NOT, Warszawa 2005, 443-448.
- [10] MICHALCZEWSKI J., *Wtyczne do wykonywania i opracowywania pomiarów przepływu metodą rachunkową*, Instrukcje i Podręczniki PIHM, Warszawa 1970, 20-36.
- [11] MUSTE M., KIM D., MERWADE V., *Modern Digital Instruments and Techniques for Hydrodynamic and Morphologic Characterization of River Channels*, [w:] *Gravel bed rivers*, pod redakcją CHURCH M., BIRON P., ROY A.G. John Wiley & Sons Ltd., UK 2010, 315-342.
- [12] OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., *Hydrologia stosowana*, PWN, Warszawa 1997r., 58-64.
- [13] PASŁAWSKI Z., *Metody hydrometrii rzecznej*, Instrukcje i podręczniki nr 115, IMGW, Warszawa 1973, 1-120.

- [14] PN-EN ISO 748:2009. *Hydrometria. Pomiar natężenia przepływu cieczy w korytach otwartych z wykorzystaniem młynków hydrometrycznych lub pływaków*. PKN, Warszawa 2009, 5-17.
- [15] RÓŹDZYŃSKI K., *Miernictwo Hydrologiczne*, Instrukcje i podręczniki IMGW, Warszawa 1998, 120-138.
- [16] SZCZUCIŃSKI W., *Nowoczesne metody pomiaru przepływów i transportu zawiesin w rzekach i morzach*, LAB Laboratoria, Aparatura, Badania, Robble Sp z o.o., Katowice 2007, 10-15.
- [17] SZYMAŃSKI K., HAŃSKI A., *Pomiary przepływu metodą ADCP*, Gospodarka Wodna nr 11, SIGMA-NOT, Warszawa 2005, 449-452.
- [18] UJDA K., *Pomiary przepływu wody w korytach otwartych*, Instrukcje i Podręczniki IMGW, IMGW, Warszawa 1988, 53-64.
- [19] WAGNER C.R., MUELLER D.S., *Comparison of bottom-track to global positioning system referenced discharges measured using an acoustic Doppler current profiler*, Journal of Hydrology 401, Elsevier 2011, 250–258.
- [20] YSI SONTEK, *RiverSurveyor S5/M9 System Manual*, San Diego 2013..
- [21] YSI SONTEK, *FlowTracker. Handheld ADV. User's Manual*, San Diego 2009.

#### MODERN METHODS OF INSTRUMENTAL RIVER DISCHARGE MEASUREMENTS

The essence of the implementation of hydrometric measurements in river channels is to determine the value of the water velocity and flow rate related to the particular gauging.. Nowadays, more and more use of acoustic devices are using the Doppler effect, which includes both surface water and oceanographic measurements. From the 90s greatest interest was focused on acoustic flow profiling ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) in river channel and lakes measurements. In this paper were presented the theoretical basis of hydrometric measurements and sample results which IMGW - PIB Branch in Wrocław , has under the national hydrological and meteorological service. Due to the various measuring equipment which has IMGW - PIB statement presents the classic grinder hygrometric measurement of contemporary acoustic devices used for different types of field conditions.