

Krzysztof WÓJCIK, Marcin WDOWIKOWSKI*

ZASTOSOWANIE MIERNIKÓW ADCP DO OCENY ZMIAN PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH W KORYCIE RZECZNYM

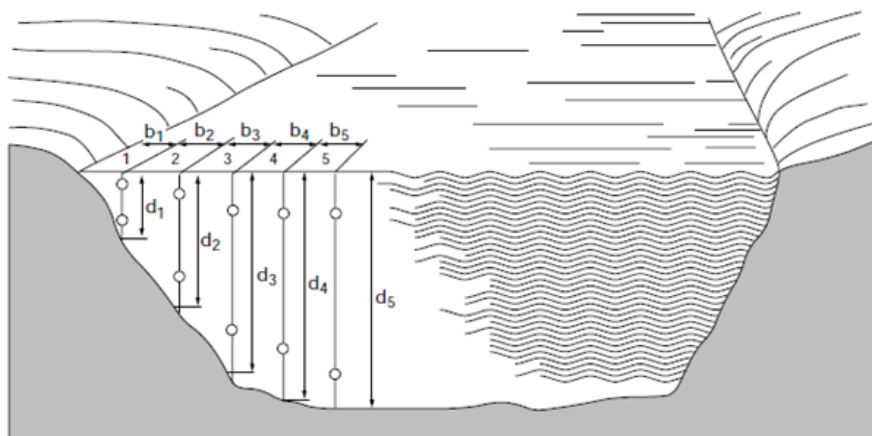
Warunki hydrauliczne w korytach rzecznych ulegają ciągłym zmianom na skutek działania różnorodnych czynników zarówno naturalnych jak i tych pochodzenia antropogenicznego. Dotyczy to zarówno największych rzek dorzeczy Odry i Wisły, ale również cieków niższego rzędu. W wyniku wieloletniej eksploatacji oraz ciągłego dostosowywania do potrzeb energetycznych i żeglugowych kraju, naturalne koryta zostały poddane licznym pracom regulacyjnym i modernizacyjnym. Ingerencja w dotychczasowy bieg cieków, ściśle związana z rozwojem gospodarczym naszego państwa, wymaga prowadzenia stałego monitoringu zarówno parametrów geometrycznych koryt rzecznych jak i podstawowych elementów hydrologicznych składających się na przepływ wody. Dodatkowo informacja o rozkładzie prędkości w przekroju rzeki jest niesłychanie istotna podczas planowania robót budowlanych w obrębie koryta. Właściwe jednostki Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego, w ramach Państwowej Służby Hydrologicznej – Meteorologicznej realizują stały program pomiarowy, umożliwiający prowadzenie przedmiotowych analiz. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań podjętych na wybranej stacji wodowskazowej w dorzeczu środkowej Odry (w Korzeńsku) w latach 2008–2014. Szczegółowe pomiary hydrometryczne zostały wykonane z zastosowaniem jednorodnej metodyki, właściwej przy wykorzystaniu współcześnie stosowanych urządzeń akustycznych ADCP. W przyjętych odcinkach pomiarowych zestawiono średnie oraz chwilowe wartości szerokości, głębokości oraz przekroju czynnego analizowanych koryt rzecznych. zilustrowano rozkłady prędkości przepływu wody w profilach pomiarowych oraz scharakteryzowano ich zmienność. Nadrzędnym celem pracy jest przedstawienie charakteru i zasięgu zmian jakie zachodzą w korytach rzecznych oraz możliwości jakie daje zastosowanie współczesnych metod pomiarowych przy monitoringu tego typu zjawisk.

1. WPROWADZENIE

Istotą pomiarów hydrometrycznych w korytach rzecznych jest wyznaczenie chwilowej wartości strumienia objętości przepływu wody przy danym napełnieniu, co z kolei umoż-

* Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy Oddział Wrocław.

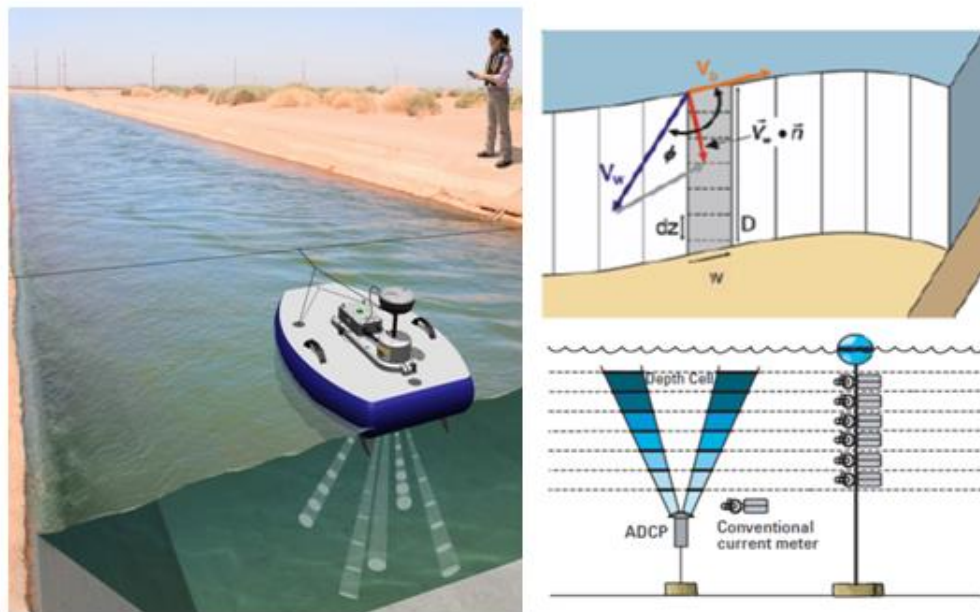
liwia określenie charakterystycznego opisu warunków przepływu w postaci relacji napętnienie-przepływ inaczej nazywanej krzywą natężenia przepływu. Ze względu na złożoność zjawiska przepływu wody w rzece, wyznaczenie tej wartości w zależności od warunków terenowych, odbywa się przy użyciu zróżnicowanej aparatury pomiarowej oraz wielu dostępnych i opisanych do tej pory metod [1, 3, 13, 14, 16, 21]. Najbardziej popularnym sposobem określenia przepływu jest ustalenie średniej prędkości wody jaka w danym czasie przypada na powierzchnię wskazanego przekroju poprzecznego koryta. Metoda ta przedstawiona szeroko w literaturze i normach międzynarodowych nosi nazwę: „metoda prędkość-powierzchnia” [11, 15, 23]. Wielkość prędkości średniej wyliczana jest z prędkości cząstkowych uzyskanych w wyniku pomiarów w kolejnych odległościach profilu rzeki (rys. 1).



Rys. 1. Schemat pomiaru punktowego w przekroju poprzecznym rzeki. W wyznaczonych pionach hydrometrycznych wykonywany jest pomiar prędkości chwilowej wody

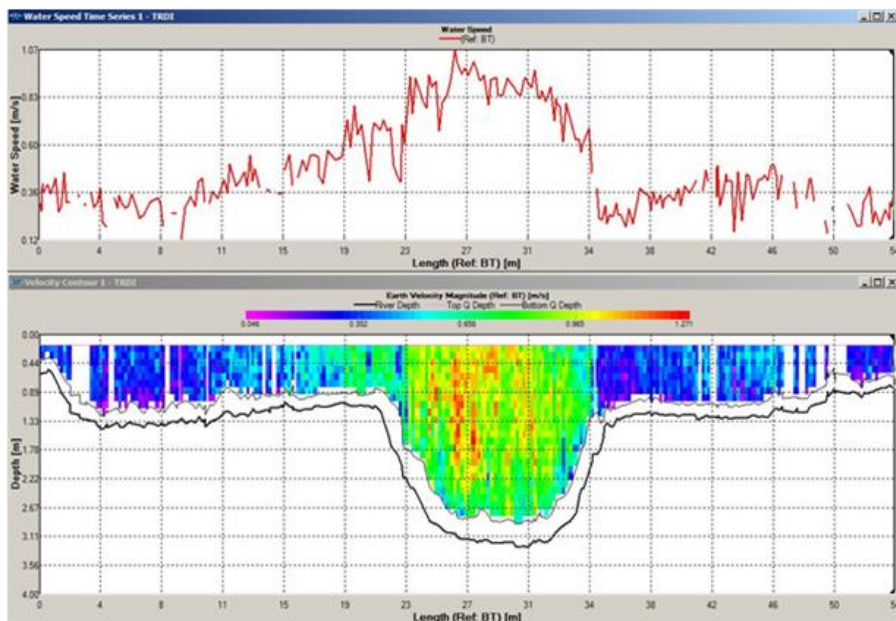
W oparciu o przedstawioną metodę funkcjonują niemal wszystkie do tej pory stosowane urządzenia pomiarowe, bez względu na wykorzystywaną technologię. W warunkach światowych do lat 70 XX wieku, podstawowym miernikiem prędkości wody w rzece pozostawał młynek hydrometryczny, występujący w zależności od kraju, w różnych rozwiązaniach technologicznych. Jednak co do zasady działania urządzenia były jednakowe; wyniki pomiaru stanowiła ilość pełnych obrotów wirnika (który właśnie był przedmiotem modyfikacji i różnicy stosowanych rozwiązań) zanurzonego w strumieniu wody, w określonym czasie. Uzyskanie wartości natężenia przepływu wymagało zatem oprócz wykonania pomiarów prędkości, precyzyjnego zdjęcia parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego, jak szerokość i położenie zwierciadła wody czy rozkład głębokości w korycie (odległości pomiędzy zwierciadłem wody a dnem). Postępujący rozwój technologiczny w zakresie telekomunikacji i cyfryzacji na świecie przyczynił się w hydrometrii

rzecznej do pojawienia się technik akustycznych, wśród których największym powodzeniem cieszą się mierniki dopplerowskie, umożliwiające wykonanie pomiarów mobilnych w trybie ciągłym i punktowym jak również pomiarów stacjonarnych w trybie ciągłym (rys. 2). Od lat 90., największym uznaniem hydrologów na świecie (w Polsce po roku 2000) cieszy się akustyczny dopplerowski przepływomierz profilujący - ADCP, który wykorzystując metodę prędkość-powierzchnia, nie tylko dokonuje pomiaru prędkości, ale również parametrów geometrycznych przekroju [5, 7, 8, 10, 17, 18, 24].



Rys. 2. Wizualizacja urządzenia ADCP na pływaku (po lewej) przeciąganego w poprzek rzeki ze schematycznym opisem pomiaru prędkości w układzie wektorowym oraz porównanie ilości uzyskiwanych danych w czasie jednego pomiaru z młynkiem hydrometrycznym [11, 12]

Procedura pomiarowa kończy się zwróceniem obliczonej wartości objętości przepływu. Jeżeli przyjrzeć się rys. 3, który przedstawia wizualizację wyników sesji pomiarowej w formie rozkładu prędkości chwilowych wody w przekroju badawczym, zainteresowanie i duże uznanie w stosowaniu tego typu urządzeń nie budzi większego zdziwienia.



Rys. 3. Diagramy rozkładu prędkości w profilu pomiarowym Korzeńsko z dnia 18.01.2011 r. dla $H = 382$ cm. Diagram górny przedstawia prędkość średnią, dolny prędkości chwilowe w komórkach elementarnych

Zarówno rozdzielczość mierzonych parametrów jak i wielkość zbioru danych uzyskiwanych w trakcie jednego pomiaru pozostają nieporównywalnie większe. Czy to znaczy, że stosowany dotychczas młynek hydrometryczny traci zastosowanie w hydrologii na korzyść technik akustycznych? Praktyka pomiarowa i warunki terenowe nierzadko pokazują, że mimo wszystko młynek posiada wiele zalet. Pomiar przepływu z wykorzystaniem ADCP wykonywany jest poprzez przeciągnięcie sondy zamontowanej na pływaku lub łodzi pomiarowej w poprzek rzeki. Rejestrator w trakcie jednego cyklu pomiarowego, trwającego ułamki sekundy, wykonuje pomiar głębokości oraz szczegółowy (z rozdzielczością $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) rozkład prędkości i kierunku przepływu wody w stożkowym pionie pomiarowym. Wykorzystanie czterech przetworników emitujących i odbierających fale akustyczne umożliwi dokonanie wektorowego podziału koryta cieku na stałe poziome paski, które odniesione do pionów hydrometrycznych tworzą elementarne komórki pomiarowe ze znaną powierzchnią (rys. 2). Rejestracja pozostałych parametrów (w tym lokalizacji rejestratora względem dna cieku) oraz obliczenie aktualnego przepływu w danym przekroju odbywa się w trybie rzeczywistym. Istotą miernika akustycznego jest odczytanie sygnału odbitego od drobin zawieszonych w strumieniu wody oraz określenie relacji prędkości tej drobin (zakłada się, że prędkość zawiesin jest równa prędkości wody) w odniesieniu do miernika lub dna cieku. Całkowita wartość przepływu zostaje wyliczana w odniesieniu do prostej teoretycznej zawartej pomiędzy punktem rozpoczęcia i zakończenia pomiaru, co z kolei wspomaga mechanizmy ekstrapolacyjne korekcji i uzupełnienia danych pomia-

rowych [4, 11, 12, 18, 24]. Zastosowanie akustycznych urządzeń profilujących, daje możliwość zwiększenia ilości oraz jakości danych tego samego typu zbieranych podczas jednej sesji pomiarowej jednak posiada ograniczenia metodyczne. Pomiar przepływu nie może być realizowany w korytach o napełnieniu mniejszym od 20 cm oraz bez względu na napełnienie urządzenie pozostanie "ślepe" na prędkości wody większe od $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z uwagi na stosowaną technologię mierniki akustyczne nie sprawdzają się w korytach silnie porastających roślinnością wodną, przez którą fala dźwiękowa nie jest w stanie właściwie określić dna cieku. Duży wpływ na wynik pomiaru mają również temperatura i zasolenie wody, co ma związek z właściwościami "rozchodzenia" się fali dźwiękowej w ośrodkach o różnej gęstości (w warunkach polskich poprawki uwzględniające te parametry rzadko są stosowane w regularnych pomiarach na rzekach). Potwierdza to wspomnianą wyżej konieczność ciągłego badania i rozwijania zróżnicowanych urządzeń i metod stosowanych pomiarowych w hydrometrii rzecznej. W Polsce mierniki ADCP stosowane są przez państwową służbę hydrologiczno-meteorologiczną w IMGW-PIB, która realizuje regularny program pomiarowy w wyznaczonych przekrojach wodowskazowych na terenie całego kraju [8, 18, 24].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników pomiarów hydrometrycznych z wykorzystaniem przepływomierza profilującego ADCP StreamPro firmy Teledyne RDI Instruments, na wybranej stacji pomiarowej IMGW-PIB w dorzeczu środkowej Odry. Opracowanie ma przedstawić zastosowanie mierników do oceny zmian podstawowych parametrów hydrologicznych podlegających pomiarowi w korycie rzeki.

2. MATERIAŁ I METODY

2.1. STACJA WODOWSKAZOWA KORZEŃSKO

Podstawowy materiał źródłowy wykorzystany w niniejszym opracowaniu stanowiły wyniki pomiarów przepływu wykonane przez pracowników Działu Służby Pomiarowo-Obszerwacyjnej we Wrocławiu IMGW-PIB Oddział we Wrocławiu, na stacji wodowskazowej Korzeńsko na rzece Orla. Przedmiotowa stacja hydrologiczna jest obecnie jedynym punktem pomiarowym zlewni Orli, która pozostaje największym dopływem Baryczy. Powierzchnia zlewni Orli wynosi 1546 km^2 a główne koryto o długości 88 km, przebiega przez Nizinę Południowowielkopolską i Obniżenie Milicko-Głogowskie. Ciek wypływa ze źródeł na Wysoczyźnie Kaliskiej, koło wsi Budy i Koźminiec na wysokości 155 m n.p.m., płynie przez Kotlinę Żmigrodzką, a do Baryczy uchodzi w 34,6 km biegu, na zachód od Wąsosz na wysokości 85 m n.p.m. Administracyjnie zlewnia Orli przebiega na pograniczu województw wielkopolskiego i dolnośląskiego. Zagospodarowanie zlewni wykazuje charakter rolniczy z przewagą gruntów ornych oraz niewielką ilością terenów zalesionych i zadrzewionych. Główne dopływy Orli to Czarna Woda, Żydowski

Potok, Borownica, Orla Leniwa, Wilczyna, Rdęca, Szpatnica (Stara Orla), Dąbroczna oraz Masłówka. Stacja pomiarowa w Korzeńsku funkcjonuje nieprzerwanie i niezmiennie od roku 1948 [6].

W celu wizualizacji zmian warunków morfologicznych koryta Orli w profilu Korzeńsko przed i po wykonaniu prac regulacyjnych w roku 2013, w pracy wykorzystano fotografie wykonane przez pracowników terenowych Działu Służby Pomiarowo-Obszerwacyjnej we Wrocławiu fot. 1 oraz fot. 2.



Fot. 1. Widok na koryto Orli w przekroju Korzeńsko przed regulacją w lipcu 2013 r. Widok w górę rzeki pomiędzy przekrojem wodowskazowym a mostem drogowym. Fot. V. Dumbur, K. Wójcik



Fot. 2. Widok na koryto Orli w przekroju Korzeńsko po regulacji w listopadzie 2013r. Widok w dół rzeki pomiędzy mostem drogowym a przekrojem wodowskazowym. Fot. V. Dumbur, K. Wójcik

2.2. POMIARY HYDROMETRYCZNE

Wykorzystane w pracy pomiary hydrometryczne obejmują lata 2008–2014, w których urządzenia ADCP StreamPro były implementowane do regularnego programu pomiarowego PSHM. Na potrzeby przedstawionych porównań w pracy zostały również wykorzystane wybrane wyniki pomiarów uzyskane młynkiem hydrometrycznym z lat wcześniejszych, wyniki aktualnie obowiązującej krzywej natężenia przepływu oraz przekroje poprzeczne pochodzące z pomiarów geodezyjnych dla profilu wodowskazowego Korzeńsko. Ocenę zastosowania pomiarów ADCP do monitoringu zmian parametrów hydraulicznych koryta Orli w profilu Korzeńsko oparto na porównaniu wyników prędkości średniej i maksymalnej, szerokości zwierciadła wody, głębokości średniej i maksymalnej oraz wartości przepływu uzyskanych w trakcie pomiarów młynkiem hydrometrycznym jak i ADCP StreamPro przy zróżnicowanym napełnieniu koryta odzwierciedlonym przez stany wody na wodowskazie. Dodatkowo porównano zmierzone rozkłady prędkości cząstkowych oraz przebieg linii przekroju poprzecznego uzyskanego dwoma metodami pomiarowymi. Kształt przekroju „mokrego” reprezentującego przekrój czynny koryta odniesiono do wyników pomiarów geodezyjnych, dla których wyznaczana jest powierzchnia przekroju wykorzystywana do obliczeń hydraulicznych krzywej natężenia przepływu. Wyniki analiz wskazany parametrów pomiarów hydrometrycznych przedstawiono na wykresach, opisując pomiary punktowe wykładniczymi liniami trendu z zaznaczeniem współczynnika determinacji R^2 .

Wartości natężenia przepływu dla młynka hydrometrycznego i ADCP wyznaczone są odpowiednio z zależności (1) i (2) [11, 12, 21, 23]:

$$Q = \int_0^B \int_0^H v \cdot dh \cdot db \quad (1)$$

gdzie:

- B – szerokość zwierciadła wody [m],
- H – napełnienie (głębokość) koryta rzeki [m],
- v – prędkość wody w komórce pomiarowej [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- dh – zmienna całkowania po głębokości koryta rzeki,
- db – zmienna całkowania po szerokości zwierciadła wody.

$$Q = \int_0^T \int_0^H \overline{v_w} \cdot \overline{v_b} \cdot \sin \theta \cdot dh \cdot dt \quad (2)$$

gdzie:

- T – czas gromadzenia danych (czas jednej procedury pomiarowej) [s],
- v_w – wektor prędkości wody,
- v_b – wektor prędkości urządzenia (łodzi),

θ – kąt pomiędzy wektorem prędkości wody a wektorem prędkości łodzi [°],
 dt – zmienna całkowania po czasie.

Dla młynka hydrometrycznego obliczenia wartości przepływu oparto o stosowaną w IMGW-PIB metodę rachunkową, która polega na sumowaniu iloczynów powierzchni cząstkowych przekroju poprzecznego koryta ciekłu oraz średnich prędkości reprezentatywnych dla kolejnych pionów pomiarowych. W efekcie następuje sumowanie wektorów prędkości v , po powierzchni elementarnego pola pomiarowego $dh \cdot db$, dla szerokości zwierciadła wody B , oraz maksymalnego napełnienia koryta H [9, 19].

Wartość przepływu wody uzyskiwana w trakcie procedury pomiarowej ADCP opiera się na analogicznych założeniach, przy czym wektor prędkości v jest dokładnie opisany w przestrzeni dzięki wykorzystaniu czterech nadajników zorientowanych pod kątem 15° od pionu. W trakcie emisji jednego pasma fali dźwiękowej, urządzenie dokonuje profilowania głębokości, wyznaczenia "komórek głębokości" w charakterystycznych stożkach (rys. 2). Jednocześnie wykonywane jest wektorowy opis prędkości w każdej komórce pomiarowej, który odniesiony do prędkości urządzenia względem zlokalizowanego dna ciekłu (poprzez kąt θ daje bezwzględną wartość prędkości chwilowej strugi w poszczególnych komórkach. 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 tych pól oraz przypisanych im wartościom prędkości pozwala wyznaczyć wartość przepływu w dowolnej chwili pomiaru oraz wynik całkowitego przepływu po zakończeniu procedury pomiarowej [2, 18, 24].

Na potrzeby analizy materiału źródłowego, dodatkowo przeprowadzono ocenę jakości wyników wybranego pomiaru ADCP StreamPro w profilu Korzeńsko w oparciu o procentowy wskaźnik RMR (*ang. Relative Maximum Residual*) opisany zależnością [11, 12, 22, 23]:

$$RMR = \Delta Q = \frac{\max|Q_i - Q_{\text{sr}}|}{Q_{\text{sr}}} \quad (3)$$

gdzie:

Q_i – przepływ z i -tego pomiaru [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

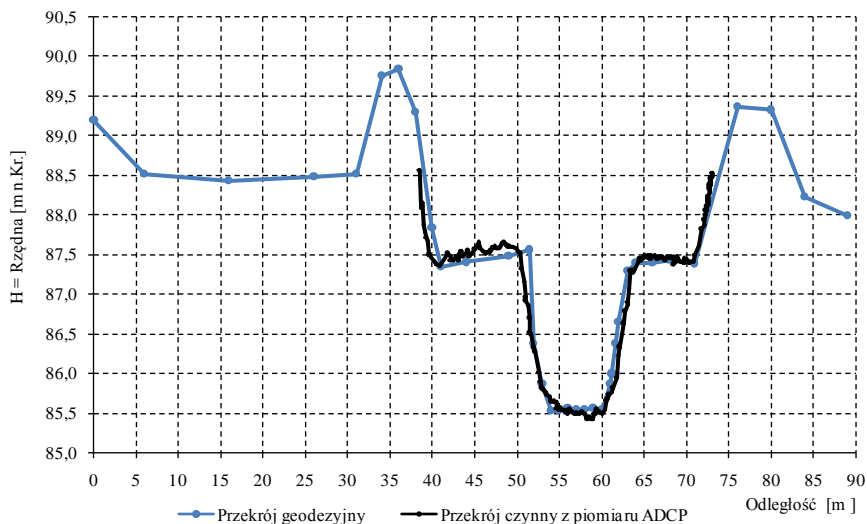
Q_{sr} – średni przepływ ze wszystkich wartości w sesji pomiarowej [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

IMGW-PIB za producentem TRDI Instruments podaje, że wartość wskaźnika względnego maksymalnego odchylenia wartości zmierzonych przepływu od średniej ze wszystkich zebranych w sesji pomiarowej wyników nie może przekraczać 5%, natomiast im mniejsza pozostaje procentowa wartość RMR tym większą uzyskuje się wiarygodność wyników. W pracy pokazano proces wyboru wyników składających się na ostateczną wartość przepływu, opisany w procedurze Systemu Zarządzania Jakością IMGW-PIB [4, 20].

3. ANALIZA WYNIKÓW

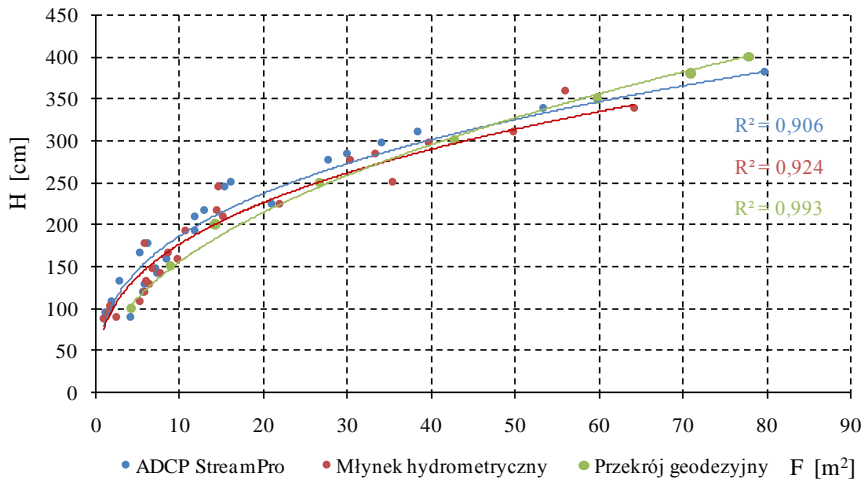
Na stacji wodowskazowej Korzeńsko, nazywanej wcześniej posterunkiem wodowskazowej, pomiary hydrometryczne realizowane są z różną częstotliwością natomiast w regularnym programie państwowej służby hydrologiczno meteorologicznej od roku 1948. Najstarszy pomiar przepływu został wykonany 02 czerwca 1948 r., natomiast do roku 2014 wykonano ich łącznie 357. Do roku 2008 wszystkie pomiary zostały przeprowadzone przy użyciu metod młynkowych, urządzeniami różnego typu i konstrukcji. W ostatnich latach (do maja 2014) przeważa użycie urządzeń akustycznych, przy pomocy których z wyjątkiem powodzi roku 2010 wykonano łącznie 50 pomiarów. Pomiar młynkowy dla najwyższego stanu wody odbył się w dniu 23 maja 2010 r. przy $H = 360$ cm i wyniósł $Q = 30,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast największa wartość przepływu $Q = 43,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ została odnotowana 6 lutego 1967 r. przy stanie $H = 316$ cm. Dla porównania w krótkim okresie 2008–2014 największa wartość przepływu urządzeniem ADCP StreamPro została zarejestrowana jako $Q = 40,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ przy stanie $H = 382$ cm i jest to jednocześnie największe napełnienie koryta przy, którym wykonano pomiar ADCP (Pomiar wykonany podczas wezbrania zimowego w styczniu 2011 r.). Pomiar młynkowy przy najniższym napełnieniu koryta został wykonany w dniu 6 lipca 1983 r. przy stanie $H = 79$ cm i maksymalnej głębokości w cieku 20 cm; przepływ wyniósł wówczas zaledwie $Q = 0,136 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dla pomiarów ADCP StreamPro rekordowo niskim jeśli chodzi o wartość przepływu, do tej pory był pomiar z 2 czerwca 2011 r. przy stanie $H = 89$ cm i maksymalnej głębokości na poziomie 34 cm. Już kilka powyższych wartości pokazuje, że spore zróżnicowanie wyników odzwierciedla złożony charakter zjawiska przepływu wody w korycie otwartym oraz jak problematyczne bywa, wykonanie pomiaru hydrometrycznego w warunkach terenowych właściwie z punktu widzenia teorii i założeń metodycznych.

Dostępny materiał badawczy poddano szczegółowej analizie zgodnie z założeniami przyjętymi w poprzednim rozdziale. W pierwszej kolejności zestawiono wyniki przekroju geodezyjnego z profilem dna uzyskanym miernikiem akustycznym ADCP StreamPro dla najwyższego napełnienia w serii przy stanie $H = 382$ cm. Oba przekroje naniesiono na układ prostokątny rzędna (w m nad Kronsztad) - długość przekroju poprzecznego (rys. 4). Już ocena wizualna wskazuje na znaczną zgodność uzyskanych danych, natomiast różnice pomiędzy poszczególnymi punktami przekrojów wahają od 0,05% do 2,04% co również świadczy o wysokiej komplementarności wyników. Literatura zagraniczna podaje, że w zależności od warunków terenowych różnice pomiędzy wynikami pomiarów niwelacji wysokościowej i tych pozyskanych technikami akustycznymi mogą sięgać 20% lecz na ogół, nie przekraczają 10%. Decydującymi czynnikiem wpływającym na zaburzenia profilowania dna przy ADCP pozostają rodzaj materiału dna, charakter przepływu oraz zachowanie restrykcyjnych warunków procedury pomiarowej [11, 12, 22, 23].



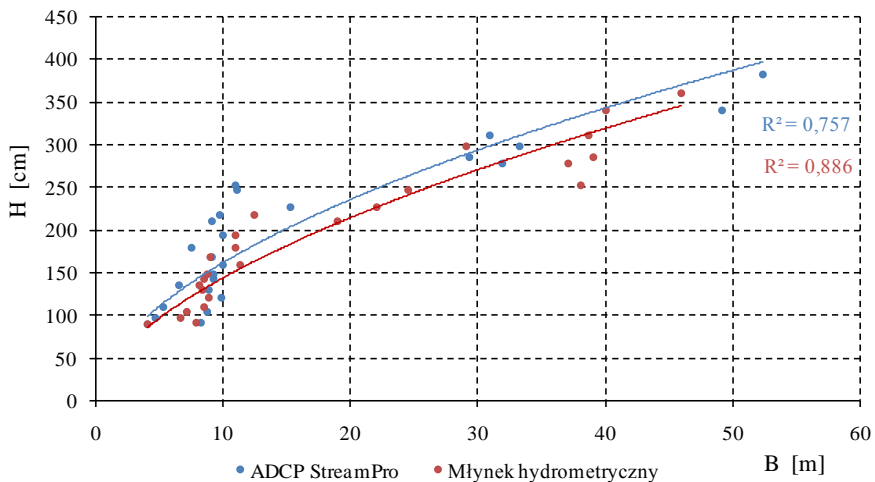
Rys. 4. Przekroje poprzeczne stacji wodowskazowej Korzeńsko rzeka Orla, pochodzące z pomiarów geodezyjnych oraz profilowania ADCP StreamPro

Kolejnym analizowanym elementem ściśle związanym z geometrią koryta rzeki była powierzchnia przekroju czynnego. Na rys. 5. przedstawiono wyniki 25 zestawów pomiarów porównujących pole powierzchni przekroju dla ADCP i młynka hydrometrycznego. Dla części stanów wody, dla których nie były wykonywane pomiary jednoczesne wykorzystano archiwalne pomiary młynkowe, które były wykonane w zbliżonych warunkach terenowych. Dane pomiarowe dodatkowo odniesiono do powierzchni wyliczonej z przekroju geodezyjnego. Linie trendu wykładniczego wyrównujące opisujące przyrost powierzchni wraz z napełnieniem koryta wykazują bardzo dużą analogię, natomiast względne odchylenia poszczególnych wartości na ogół wahają się w przedziale od 0,5% do 20,8%. Kilka różni się pomiędzy sobą od 30–60%, przy czym większe powierzchnie przypisane są zawsze do pomiarów młynkowych i wyliczonych z przekroju geodezyjnego. Pomiary odpowiadają stanom wody strefy średniej, w miejscu przejścia koryta właściwego na terasy zalewowe. Znaczne odchylenia mogą być powodem zaburzeń profilowania związanych z występowaniem roślinności w okresie wegetacyjnym; zarówno pomiary wysokościowe jak i sondowanie młynkowe nie uwzględnia szaty roślinnej koryta (jedynie w opisie) co zwiększa wartość powierzchni przekroju rzeki, lecz nie oddaje faktycznej powierzchni czynnej, która opisuje udział w przepływie wody przez koryto. Co ważne, wartości powierzchni w niesłychanie istotnej strefie wody wysokiej zachowują duże podobieństwo, dla wszystkich źródeł danych. Udział roślinności na terasach zalewowych przy dużych prędkościach przepływu wody w korycie znacznie maleje.

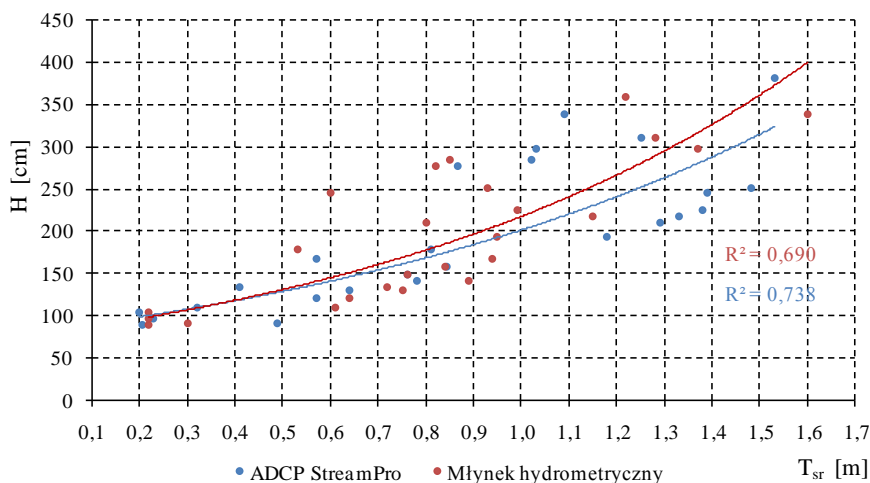


Rys. 5. Zależność napęlenia koryta od powierzchni uzyskanej z pomiarów ADCP StreamPro, młynkiem hydrometrycznym oraz wyliczonych z przekroju geodezyjnego w profilu wodowskazowym Korzeńsko

Parametrami bezpośrednio związanymi z powierzchnią przekroju są szerokość zwierciadła wody B oraz średnia głębokość w korycie T_{sr} (będąca wynikiem uśrednienia zbioru głębokości uzyskanych w wyniku poszczególnych sondowań profilu podczas sesji pomiarowej). Przebiegi obu tych wartości w funkcji napęlenia koryta (przypisanej do stanu wody) przedstawiono odpowiednio na rys. 6 i 7.



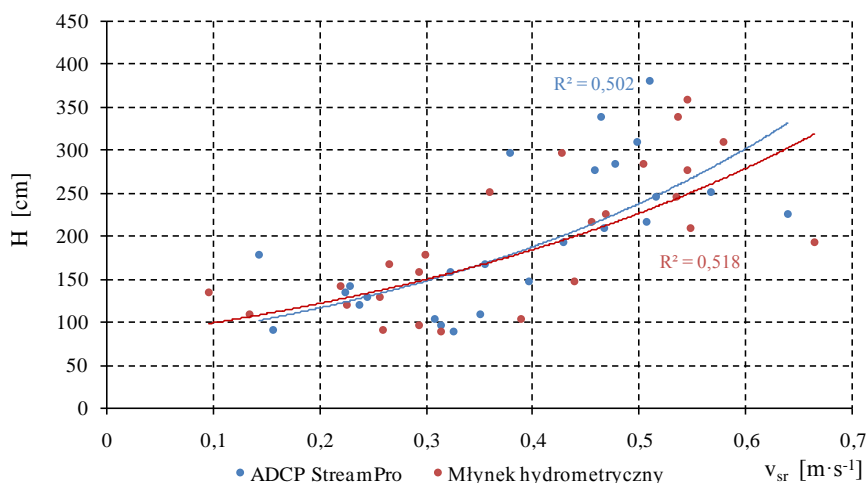
Rys. 6. Zależność napęlenia koryta od szerokości zwierciadła wody z pomiarów ADCP StreamPro, młynkiem hydrometrycznym w przekroju wodowskazowym Korzeńsko



Rys. 7. Zależność napęlenia koryta od średniej głębokości koryta z pomiarów ADCP StreamPro, młynkiem hydrometrycznym w przekroju wodowskazowym Korzeńsko

Oba wykresy (rys. 6 i 7) przedstawiają duże zróżnicowanie w pomiarach szerokości zwierciadła wody oraz średniej głębokości badanego cieku, szczególnie w strefie wody niskiej i średniej, dla której wykonana jest największa ilość pomiarów hydrometrycznych. Podobnie jak w przypadku analizy poprzednich parametrów hydraulicznych zastosowanie linii trendu umożliwia porównanie tendencji przebiegu badanych wartości. Ocena wskaźników determinacji R^2 świadczących o dokładności opisaną punktów pomiarowych przez wykładniczą krzywą modelową wykazuje wystarczającą zgodność. Wartości wskaźnika wahają się od 0,76 do 0,89 dla przyrostu szerokości rzeki wraz z napęleniem oraz od 0,69 do 0,74 dla zależności średniej głębokości od napęlenia koryta. Dla stanów wody do 220 cm, gdzie szerokość rzeki nie przekracza 10m różnica pomiaru ADCP StreamPro i pomiarów związanych z metodą młynkową jest najmniejsza osiągając maksymalnie 10%. Większe i zastanawiające odchylenia notuje się w górnej strefie wody średniej, po przekroczeniu koryta właściwego i na terasach zalewowych. Wartości te, dla badanego zbioru wahają się od 15% do 30%, przy czym szerokość zwierciadła wody w profilu Korzeńsko, w międzywalu sięga 40m. Daje to możliwą różnicę na poziomie 12 m. Warunki techniczne wykonania pomiaru zwierciadła wody zarówno w metodzie młynkowej jak i ADCP tłumaczą w pewien sposób możliwość powstania różnic. Zdjęcie szerokości rzeki na potrzeby pomiaru młynkiem hydrometrycznym odbywa się przy pomocy rozciągnięcia taśmy mierniczej. W zależności od stosowanego materiału (taśma z tworzywa lub taśma stalowa) i sposobu montażu taśmy w korycie rzeki możliwe jest otrzymanie różnych, a nawet znaczących odchyłek. Obserwowane na rys. 6. zwykle mniejsze wartości uzyskane ADCP StreamPro mogą tłumaczyć taką sytuację. Urządzenia akustyczne kon-

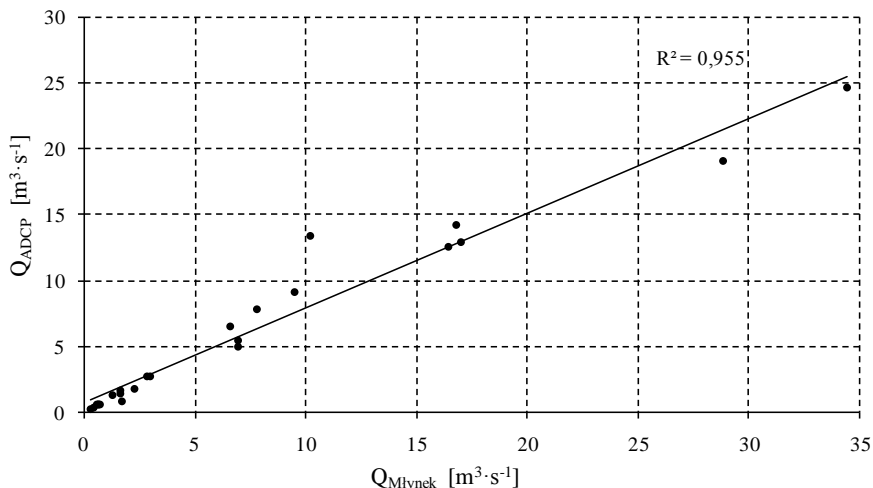
strukcyjnie mają wbudowany kompas, a kalkulacja odległości odbywa się w czasie śledzenia dna i wyliczana jest każdorazowo ze współrzędnych, co przemawia na korzyść tej metody. Różnice w wynikach obu metod, szczególnie podczas porównywania danych zebranych w różnym czasie mogą być również spowodowane lokalizacją przekroju pomiarowego. Zgodnie z metodyką profil pomiarowy powinien być lokalizowany możliwie prostopadle do linii brzegu. Bez względu na zastosowaną metodę odsunięcie punktów początku lub końca profilu pomiarowego od tej osi powoduje zaburzenie wyników szerokości rzeki, co w konsekwencji prowadzi również do niepoprawnego wyliczenia powierzchni. Różnice głębokości średniej przedstawione na rys 7. pomimo zróżnicowania wraz z napełnieniem dla obu stosowanych metod na ogół wahają się od 1 cm do maksymalnie 30 cm. Różnica wzrasta wraz z napełnieniem i przykładowo dla jednego w wyższych pomiarów dla stanu $H = 339$ cm sięga 50 cm. Przyczyna może leżeć po stronie warunków terenowych i zaburzeniom sondowania w obu metodach spowodowanymi brakiem możliwości ustawienia sondy pomiarowej w pionie dla wyższych napełnień (które często odpowiadają pomiarom w czasie wezbrania) przy metodzie młynkowej oraz niedostateczną identyfikacją dna pokrytego roślinnością na terasach zalewowych dla urządzeń akustycznych. Dobrym przykładem na możliwość uzyskania porównywalnych wyników jest pomiar wykonany przy stanie $H = 311$ cm gdzie średnia głębokość Orli w profilu Korzeńsko wynosiła odpowiednio – młynek 1,28 m, ADCP StreamPro 1,25 m.



Rys. 8. Zależność napełnienia koryta od prędkości średniej wody z pomiarów ADCP StreamPro, młynkiem hydrometrycznym w przekroju wodowskazowym Korzeńsko

Jednym z ostatnich porównywanych parametrów opisujących warunki przepływu w korycie otwartym jest prędkość średnia przepływu wody, a więc wartość bezpo-

średnio biorąca udział w wyznaczeniu objętości przepływu z wykorzystaniem pola powierzchni przekroju czynnego. Na rys. 8. pokazano zmianę wartości prędkości wyznaczonej w trakcie pomiarów młynkiem hydrometrycznym i ADCP StreamPro w zależności od stanu wody - analogicznie jak w poprzednich przykładach. Funkcje wykładnicze opisujące zbiory poszczególnych danych pomiarowych są względem siebie wyjątkowo zbieżne. Różnice pomiędzy parami prędkości średnich nie przekraczają $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przeważnie oscylując wokół wartości 0,05. Świadczy to dużej porównywalności uzyskiwanych wyników, co za pewne było jednym z powodów i możliwości implementacji technik akustycznych do pomiarów środowiskowych na rzekach śródlądowych. Również wartości uzyskanych przepływów odpowiednio dla młynka hydrometrycznego i miernika ADCP StreamPro wykazują dużą korelację. Współczynnik determinacji przedstawiony na rys. 9 osiąga wartość 0,955. Incydentalne, słabo skorelowane wartości przepływów, jak w przykładzie dla stanu $H = 226 \text{ cm}$, gdzie przepływy wyniosły $Q_{\text{ADCP}}=13,36 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, a dla młynka $Q_{\text{Mlynek}}=10,2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, spowodowane są przyjęciem różnych wartości geometrycznych koryta i niewielką różnicą prędkości wody. Skąpy materiał pomiarów porównawczych pomiędzy młynkiem hydrometrycznym a miernikami akustycznymi zebrany dla stacji Korzeńsko pozwala w sposób ogólny określić wzajemną relację analizowanych danych, która na podstawie przedstawionych danych jest wystarczająco zgodna. Jednak wskazanie ewidentnych obszarów problemowych z punktu widzenia zapewnienia jakości i porównywalności pozyskiwanych instrumentalnie danych wymaga opracowania większej ilości pomiarów hydrometrycznych.



Rys. 9. Korelacja wartości przepływów uzyskanych z pomiarów ADCP StreamPro oraz młynkiem hydrometrycznym w przekroju wodowskazowym Korzeńsko

Mierniki akustyczne ADCP, w tym również model zalecany do pomiarów na "małych" ciekach do 50 m szerokości StreamPro, w procedurze pomiarowej posiada mechanizm kontroli uzyskiwanych wyników przepływu w postaci wskaźnika maksymalnego względnego odchylenia wartości zmierzonej od średniej RMR. Tabele 1 i 2 przedstawiają wyniki pomiarów ADCP wykonane w trakcie jednej sesji pomiarowej w dniu 5 marca 2014 r. przy stanie $H = 278$ cm. Jak pokazano na końcową wartość objętości przepływu stanowi średnia wynik obliczeń przepływu pochodzący z kilku pomiarów. Opracowanie danych terenowych również obejmuje analizę poszczególnych wyników cząstkowych składających się na wynik tj. przepływy z warstwy czynnej (Meas. Q), estymowane wartości przepływów warstwy dennej (Bottom Q), strefy wygaszania przy zwierciadle wody (Top Q) oraz przepływów przy brzegach lewy i prawym (Left, Right Q). Dodatkowo analizie podlegają wyliczone wartości szerokości rzeki (Width), powierzchni całkowitej (Total Area) oraz liczba próbek na podstawie, których zostały zebrane w trakcie pomiaru (#Ens). Tabela 1 przedstawia wszystkie wyniki, które zostały zebrane w sesji pomiarowej, natomiast tabela 2. przykładowy wybór wyników, które według wskazówek procedury pomiarowej IMGW-PIB oraz wytycznych producenta zostały pozostawione jako najbardziej wiarygodne. Analiza danych zebranych w tabeli 1. przedstawia zmienność wskaźnika RMR w przedziale od 0,07% do 5,00%, co świadczy o prawidłowo wykonanym pomiarze, bowiem wskazane wyżej dokumenty zalecają przyjmować jako graniczną wartość 5%. W celu zwiększenia jakości ostatecznego wyniku pomiary, po analizie poszczególnych zestawów danych odrzuca się skrajne wartości wyliczonego przepływu, pozostawiając te najbardziej zbliżone do średniej. Jak pokazano na przykładzie, a potwierdza praktyka terenowa, najczęstszym przypadkiem jest odrzucenie pomiaru pierwszego, który zwykle bywa pomiarem adoptującym urządzenie do warunków terenowych tj, temperatura wody, turbulencje przepływu itp. Wartość przepływu uzyskana ze wszystkich pomiarów wynosi $Q = 11,856 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast po odseparowaniu części danych do zbioru, dla którego wyliczana jest średnia końcowa wartość przepływu wyniosła $Q = 11,704 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dla porównania przepływ z obowiązującej krzywej natężenia przepływu wynosi dla stanu $H = 278$ cm $Q = 12,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast analogiczny pomiar młynkowy dał wynik $Q = 16,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przykład ten po raz kolejny pokazuje, że nawet specyfika i charakter przepływu wody w korycie otwartym są złożone i trudne do jednoznacznego opisu. Właściwie wykonany pomiar natężenia przepływu należy poddawać szczegółowym analizom, przy czym działania metodyczne powinny być skierowane na przeprowadzenie większości działań jeszcze podczas sesji terenowej. Umożliwi to redukcję rozbieżności pomiędzy narzędziami analitycznymi, jak krzywa przepływu a wynikami pomiarów hydrometrycznych, z które służą do jej budowy. Niezwykle istotne w tego typu badaniach jest również zachowanie powtarzalnych warunków wykonywania pomiaru zarówno prędkości, jak i poszczególnych parametrów morfologicznych koryta rzeki.

Tabela 1. Wyniki sesji pomiarowej ADCP StreamPro z 5 marca 2014 r. w Korzeńsku przy stanie $H = 278$ (wszystkie zebrane pomiary)

Transect	Start Bank	# Ens.	Total Q	Delta Q	Top Q	Meas. Q	Bottom Q	Left Q	Left Dist.	Right Q	Right Dist.	Width	Total Area	Duration
			$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	%	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	m	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m^2	s
1000	Right	84	12,449	5,00	1,277	8,845	2,013	0,232	5	0,082	3	25,89	24,58	103,85
1001	Left	100	11,527	-2,77	1,210	8,373	1,736	0,133	5	0,075	3	25,52	24,03	124,36
1002	Right	104	11,942	0,73	1,214	8,446	1,799	0,388	5	0,095	3	25,59	24,47	129,47
1003	Left	104	11,501	-2,99	1,171	8,243	1,715	0,305	5	0,066	3	24,66	23,13	129,54
1004	Right	104	12,223	3,10	1,217	8,832	1,785	0,316	5	0,074	3	25,08	24,43	129,05
1005	Left	108	11,847	-0,07	1,170	8,373	1,785	0,473	5	0,046	3	23,94	23,19	134,69
1006	Right	97	11,501	-2,99	1,310	7,974	1,839	0,337	5	0,041	3	25,20	23,77	120,35
Average		100	11,856	0	1,224	8,441	1,810	0,312	5	0,068	3	25,13	23,94	
Std Dev.		8	0,377	3,18	0,052	0,312	0,098	0,109	0	0,019	0	0,66	0,6	

Tabela 2. Wyniki sesji pomiarowej ADCP StreamPro z 5 marca 2014 r. w Korzeńsku przy stanie $H = 278$ (pomiarzy wybrane wg procedury pomiarowej IMGW-PIB)

Transect	Start Bank	# Ens.	Total Q	Delta Q	Top Q	Meas. Q	Bottom Q	Left Q	Left Dist.	Right Q	Right Dist.	Width	Total Area	Duration
			$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	%	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	m	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m^2	s
1001	Left	100	11,527	-1,51	1,210	8,373	1,736	0,133	5	0,075	3	25,52	24,03	124,36
1002	Right	104	11,942	2,03	1,214	8,446	1,799	0,388	5	0,095	3	25,59	24,47	129,47
1005	Left	108	11,847	1,22	1,170	8,373	1,785	0,473	5	0,046	3	23,94	23,19	134,69
1006	Right	97	11,501	-1,74	1,310	7,974	1,839	0,337	5	0,041	3	25,20	23,77	120,35
Average		102	11,704	0	1,226	8,291	1,790	0,333	5	0,064	3	25,06	23,86	
Std Dev.		5	0,223	1,91	0,059	0,214	0,043	0,144	0	0,025	0	0,77	0,54	

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niniejsza praca dotyczyła przedstawienia możliwości wykorzystania współczesnych technik akustycznych w pomiarach hydrometrycznych na rzekach. W pracy analizowano wyniki pomiarów poszczególnych parametrów morfologicznych koryta rzeki jak głębokość, szerokość czy powierzchnia czynna w profilu pomiarowym, uzyskanych dwoma urządzeniami pomiarowymi klasycznym młynkiem hydrometrycznym oraz miernikiem akustycznym ADCP StreamPro. Do ilustracji relacji wyników ze wskazanych urządzeń wykorzystano zależności napełnienia koryta od szerokości zwierciadła wody, głębokości średniej, powierzchni oraz prędkości średniej. Dodatkowo przedstawiono korelację wyników wyliczonych wartości natężenia przepływu. Analiza materiał badawczego pochodzącego z pomiarów hydrometrycznych IMGW-PIB Oddział we Wrocławiu, dla profilu Korzeńsko wykazała dużą zgodność otrzymanych wartości, szczególnie w strefie wody niskiej i dolnej granicy strefy średniej. Rozbieżności zidentyfikowane w strefie średniej i wysokiej są wynikiem ekstremalnych i mało miarodajnych do porównania warunków wykonania pomiaru prędkości przepływu wody. Wartości zmierzone często w pracy odwoływano do modelowych wyników, wykorzystywanych przy obliczeniach hydraulicznych. Przeprowadzone rozważania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. mierniki akustyczne ADCP są właściwe i wystarczające do monitorowania zmian morfologicznych w korytach rzecznych,
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,
4. wyniki pomiarów hydrometrycznych z wykorzystaniem restrykcyjnie stosowanych metod akustycznych w znacznym stopniu podnoszą jakość prowadzonych badań,
5. wykonywanie regularnych pomiarów hydrometrycznych w stałym profilu kontrolnym umożliwia prowadzenie monitoringu zmian form dennych w korycie rzeki,
6. stosowanie współczesnych, precyzyjnych urządzeń pomiarowych pozwoliło na zmniejszenie błędów systematycznych – aby zmniejszyć błędy przypadkowe oraz zwiększyć jakość wyników konieczne są trwałe prace analityczne oraz bieżąca aktualizacja metodyki pomiarowej.

Możliwości i zakres osiąganých wyników pomiarów akustycznych, wykraczają poza klasyczny punktowy pomiar prędkości wody. Wydaje się właściwym aby Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, również we współpracy z uczelniami, prowadził prace mające na celu ocenę funkcjonalności jakie umożliwia akustyczny

pomiar w hydrologii, jak również rozpoznanie innych niż dotychczasowe zastosowań uzyskiwanych wyników.

LITERATURA

- [1] BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MAGNUSZEWSKI A., MIKULSKI Z., *Hydrometria*, PWN, Warszawa, 1993, 159–212.
- [2] BANASIAK R., KRZYŻANOWSKI M., GIERCZAK J., WADOWIKOWSKI M., *Ocena lokalnych parametrów hydraulicznych przepływów maksymalnych w rzece podczas powodzi w 2010 r.* Monografia KGW-PAN, z. XX, tom 1, 2014, 379–388.
- [3] BYCZKOWSKI A., *Hydrologia T.I*, SGGW, Warszawa, 1999, 116–155.
- [4] GORDON L.J., *Acoustic Doppler Current Profiler. Principles of Operations. A Practical Primer*, RD Instruments, California, 1996, 46–52.
- [5] HEJDUK L., *Zastosowanie metody ADCP do pomiarów przepływu w małej rzece*, Przegląd naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska I(39), Warszawa, 2008, 73–79.
- [6] KONDRACKI J., *Geografia Polski, Mezoregiony fizyczno – geograficzne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994, 56–57.
- [7] KUDŁA T., BIŃKOWSKI K., *Analiza warunków hydraulicznych odcinka Odry w rejonie Bielinka*, [w:] Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki w Świnoujściu, Zachodnio-pomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2005, 21–27.
- [8] MACIĄZEK A., *Historia pomiarów natężenia przepływu w polskiej służbie hydrologicznej*. Gospodarka Wodna nr 11, SIGMA-NOT, Warszawa, 2005, 443–448.
- [9] MICHALCZEWSKI J., *Wytyczne do wykonywania i opracowywania pomiarów przepływu metodą rachunkową*, Instrukcje i Podręczniki PIHM, Warszawa, 1970, 20–36.
- [10] MICHALSKI A., *Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004, 8–54.
- [11] MUELLER D.S., WAGNER C.R., REHMEL M.S., OBERG K.A., RAINVILLE F., *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from Moving Boat. Book 3, Applications of Hydraulics. Techniques and Methods 3-A22*, USGS, Virginia, 2013, 15–91.
- [12] 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.
- [13] OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., *Hydrologia stosowana*, PWN, Warszawa, 1997, 58–64.
- [14] PASŁAWSKI Z., *Metody hydrometrii rzecznej*, Instrukcje i podręczniki nr 115, IMGW, Warszawa, 1973, 101–120.
- [15] PN-EN ISO 748:2009. *Hydrometria. Pomiar natężenia przepływu cieczy w korytach otwartych z wykorzystaniem młynków hydrometrycznych lub pływaków*. PKN, Warszawa 2009, s. 5–17.
- [16] RÓŹDŻYŃSKI K., *Miernictwo Hydrologiczne*, Instrukcje i podręczniki IMGW, Warszawa, 1998, 120–138.
- [17] SZCZUCIŃSKI W., *Nowoczesne metody pomiaru przepływów i transportu zawieszin w rzekach i morzach*, LAB Laboratoria, Aparatura, Badania, Robble Sp z o.o., Katowice, 2007, 10–15.
- [18] SZYMAŃSKI K., HAŃSKI A., *Pomiary przepływu metodą ADCP*, Gospodarka Wodna nr 11, SIGMA-NOT, Warszawa, 2005, 449–452.
- [19] SW DO/06/HMOK - *Procedura pomiaru natężenia przepływu za pomocą młynka hydrometrycznego wykonywana w bród*, wydanie 2/2014, Warszawa, s. 9–21.
- [20] SW DO/16/HMOK - *Procedura pomiaru natężenia przepływu za pomocą ADCP STREAM PRO*, wydanie 2/2014, Warszawa, s. 9–26.

- [21] UJDA K., *Pomiary przepływu wody w korytach otwartych*, Instrukcje i Podręczniki IMGW, IMGW, Warszawa, 1988, 53–64.
- [22] 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.
- [23] WMO No. 1044, *Manual on Stream Gauging: Volume II - Fieldwork*, Geneva 2010 I.5-I.6.
- [24] WÓJCIK K., WDOWIKOWSKI M., *Współczesne metody instrumentalnego pomiaru prędkości przepływu wody w korytach otwartych*. *Technologia Wody Rok VII, Zeszyt 1(39)*, 2015, 32–39.

APPLICATION OF ADCP MEASUREMENTS IN EVALUATION OF CHANGES IN RIVER CHANNEL HYDRAULIC PARAMETERS

Hydraulic conditions in open channels are constantly changing due to the action of various factors, both natural and those of anthropogenic origin. This applies to both the largest rivers Oder and Vistula river basins, but also low ordered streams. As a result of many years of exploitation and continuous adaptation to the energy needs of the country and shipping, natural riverbed have been subjected to numerous regulatory and modernization work. Interference in the previous river courses, closely related to the economic development of our country, requires the continuous monitoring of both the geometry of river channels and basic hydrological elements that make up the flow of water. In addition, information about the distribution of velocity in the cross-section of the river is extremely important when planning the construction works within the trough. Competent bodies of the Institute of Meteorology and Water Management - National Research Institute under the National Hydrological - Meteorological Service implement an ongoing program, allowing to conduct these analyzes. This paper presents the results of research undertaken at selected station gauges in the basin of the upper and middle Odra in the years 2008–2014. Detailed hydrometric measurements were made using a uniform methodology, using an appropriate acoustic devices currently used ADCP. In the adopted measurement sections summarizes the average and instantaneous values of the width, depth and cross section of the analyzed riverbeds. The paper also illustrates the water flow velocity distributions measured profiles and characterized their volatility. The ultimate aim of this work is to present the nature and extent of the changes taking place in the river channel and the possibilities offered by the use of modern measurement methods for monitoring of such phenomena.