

Pomiary ruchu osadu dennego w kanale falowym przy użyciu technik: *Particle Image Velocimetry* oraz *Acoustic Doppler Velocimetry*

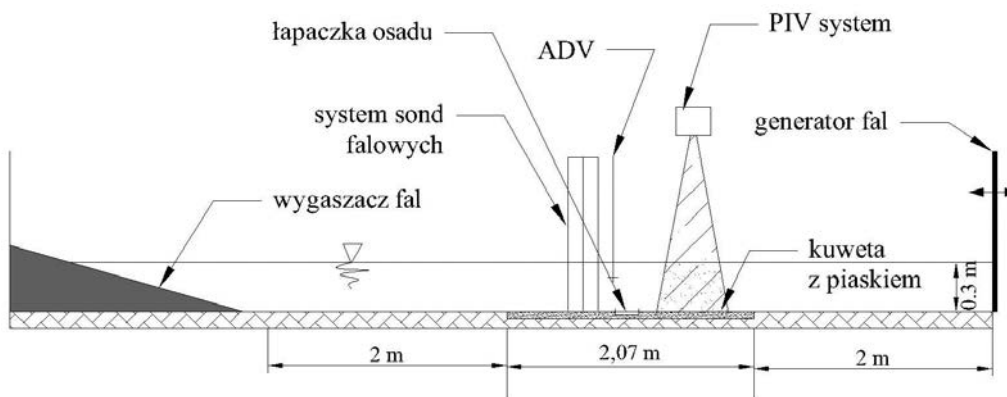
**Mgr Barbara Stachurska
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku**

Konsekwencją oscylacyjnego ruchu elementów wody pod wpływem falowania powierzchniowego jest powstawanie na dnie morskim zmarszczek dennych. Ich formowanie zwiększa szorstkość dna, która jest istotnym czynnikiem w procesie transportu osadów. Mechanizm ruchu osadów dennych wskutek falowania powierzchniowego wody, pomimo wielu badań doświadczalnych i teoretycznych prowadzonych od dziesiątków lat, wciąż nie jest jeszcze do końca rozpoznany oraz zadowalająco opisany analitycznie, i nadal stanowi wyzwanie zarówno dla inżynierów, jak i naukowców. Z pewnością rozwój nowych, bardziej precyzyjnych oraz niezawodnych metod i technik badawczych prowadzi do coraz lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w pobliżu dna morskiego, to jest w obszarze, gdzie transport osadów jest najbardziej intensywny, a jego skutki (to jest przebudowa dna) największe. Jedną z technik pomiarowych, stosowanych od niedawna do analizy ruchu osadów w wodzie, jest metoda PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*). Służy ona do wyznaczania chwilowych prędkości cząstek materialnych ośrodka (najczęściej cieczy) na podstawie analizy serii ich obrazów (zdjęć fotograficznych) wykonywanych w świetle laserowym w trakcie ruchu ośrodka. Technika ta wymaga udziału drobnych cząsteczek rozproszonych w poruszającym się płynie. Dzięki temu, że nie wymaga umieszczania jakichkolwiek instrumentów pomiarowych wewnątrz ośrodka (wody), ma charakter w pełni bezinwazyjny, umożliwiając wyznaczanie pól prędkości cząstek w sposób znacznie dokładniejszy niż w przypadku innych metod.

W niniejszej pracy opisano zastosowanie metody PIV do pomiarów laboratoryjnych ruchu osadu niespoistego w wodzie, wykonanych w kanale falowym Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku. Celem tych badań było wyznaczenie chwilowych pól prędkości cząstek osadu w wodzie, szczególnie w strefie przydennej, dla przepływów wywołanych falowaniem powierzchniowym, oraz analiza wpływu parametrów falowania na ruch osadu i morfologię zmarszczek dennych. Równoległe do pomiarów prędkości cząstek osadu prowadzonych techniką PIV wykonywano również analogiczne pomiary prędkości przy zastosowaniu sondy ADV (ang. *Acoustic Doppler Velocimetry*), to znaczy przy użyciu metody opartej na pomiarze prędkości propagacji fal akustycznych w ośrodku. Pozwoliło to na weryfikację poprawności wyników pomiarów ruchu osadu prowadzonych z wykorzystaniem obu metod. Dodatkowo, poprzez zastosowanie tzw. łapaczki (osadnika piasku), szacowano wielkość transportu osadu wzdłuż dna kanału.

SPRZĘT POMIAROWY I ZAKRES BADAŃ LABORATORYJNYCH

Pomiary wykonano w kanale falowym, wykorzystując urządzenia i sprzęt pomiarowy znajdujący się na wyposażeniu laboratorium hydraulicznego IBW PAN. Kanał, o długości 64 m, szerokości 0,60 m i wysokości 1,40 m jest wyposażony w szklane ściany przepuszczające światło, co umożliwia wykonywanie

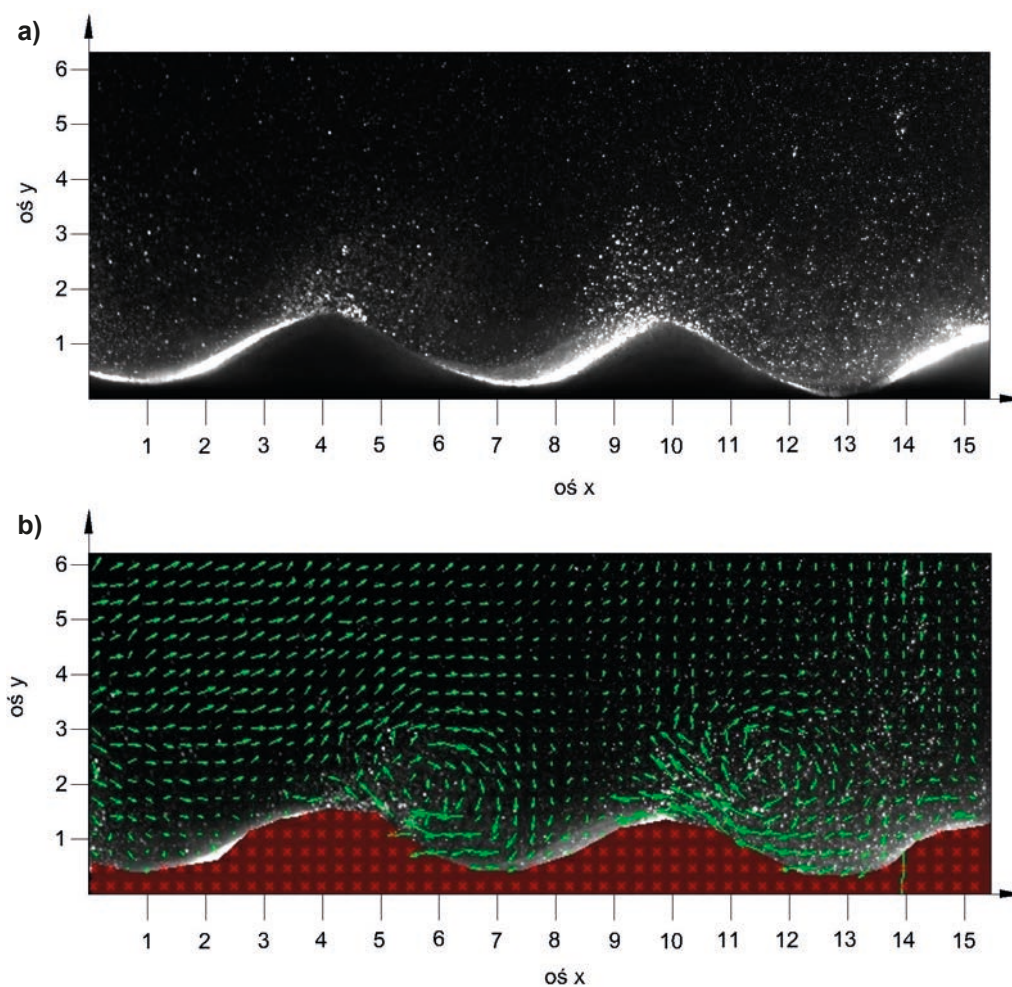


Rys. 1. Schemat obszaru pomiarowego

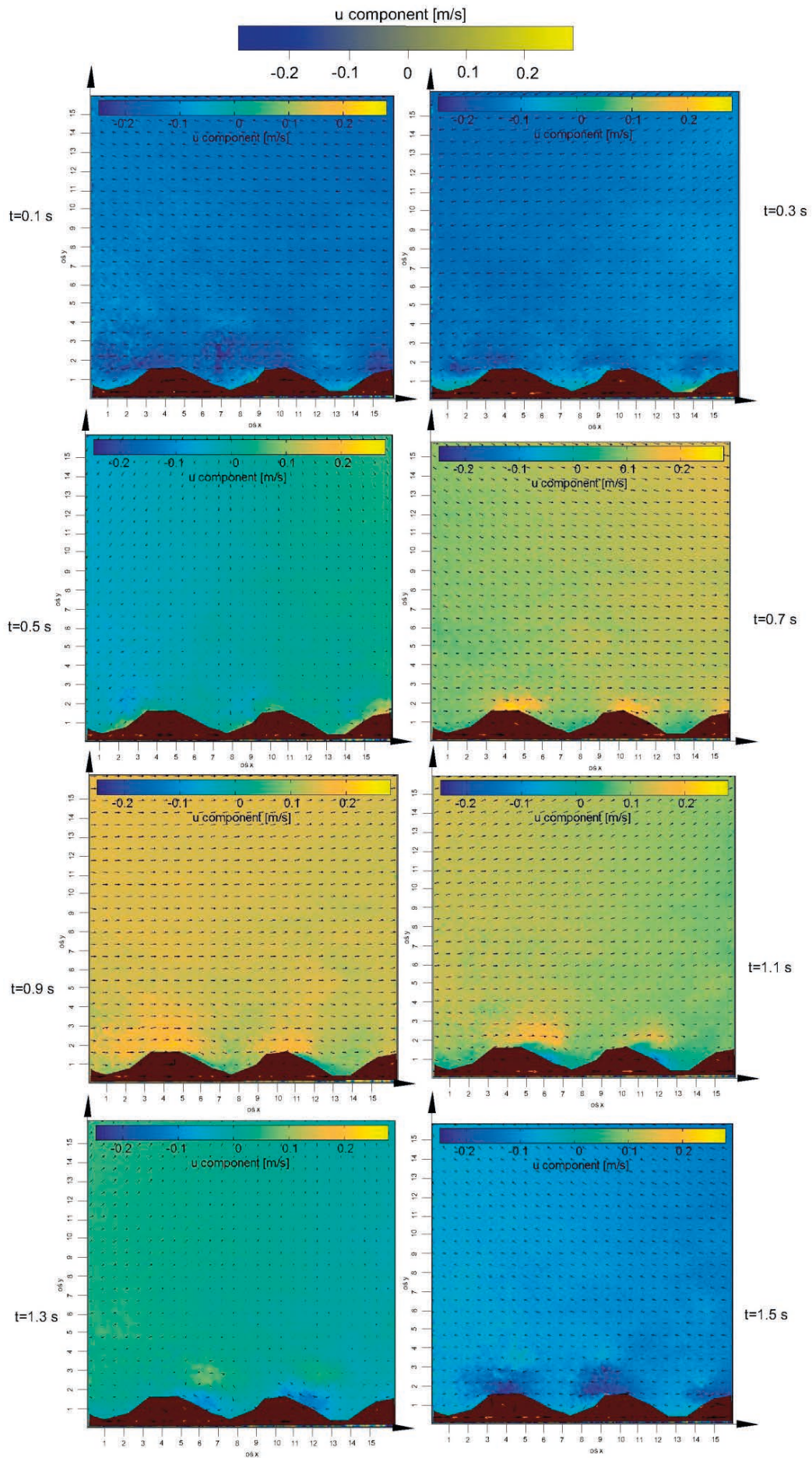
pomiarów techniką PIV. Fale powierzchniowe są generowane w wodzie przy użyciu nowoczesnego generatora typu tłokowego. Dzięki sterowaniu komputerowemu umożliwia on generowanie fal zarówno regularnych, jak i nieregularnych.

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Badania prowadzono w wydzielonej sekcji kanału o długości około 10 m (około 6 m wzdłuż poziomego dna kanału), w bezpośrednim sąsiedztwie generatora falowego. W odległości około 2 m od generatora umieszczono zasobnik z piaskiem naturalnym. Pomiarów prędkości cząstek osadu i wody za pomocą PIV i ADV dokonywano w środkowej części wydzielonego obszaru,

gdzie umieszczono również w dnie kanału łapaczkę osadu (tzw. osadnik) przeznaczoną do pomiaru ilościowego natężenia transportu osadu wleczonego wzdłuż dna. Do pomiaru wychylenia powierzchni swobodnej wody wykorzystano zestaw trzech oporowych sond falowych. Wszystkie eksperymenty wykonano dla wody o głębokości (w stanie spokoju) równej $h = 0,3$ m dla zmiennych parametrów falowania (różnych okresów T i wysokości fal H). W prezentowanej pracy ograniczono się do opisu wyników pomiarów przeprowadzonych dla fali o okresie $T = 1,5$ s i wysokości $H = 0,1$ m.



Rys. 2. Zdjęcie cząstek osadu wykonane kamerą PIV (a), chwilowy rozkład wektorów prędkości cząstek (b)



Rys. 3. Seria wykresów poziomych prędkości chwilowych zmierzonych co 0,2 s w trakcie pełnego okresu fali ($T = 1,5$ s)

Użyty do badań piasek morski, umieszczony na dnie kanału w specjalnym pojemniku (por. rys. 1), pochodził z plaży z rejonu Sobieszewa. Powierzchnia piasku w pojemniku była równa z powierzchnią dna kanału. Na podstawie analizy sitowej określono medianę średnicy jego ziaren na $d_{50} = 0,257$ mm.

Badania rozpoczynano od stanu, w którym dno (górną powierzchnia piasku) było poziome, to jest bez zmarszczek. Następnie generowano fale powierzchniowe przez okres około 30 minut w celu uzyskania stanu równowagi, czyli w pełni wykształconych form dennych. Po tym czasie prowadzono pomiary w sześciu cyklach falowania trwających około 5 minut każdy, podczas których mierzono prędkości cząstek zawiesiny oraz prowadzono badania masy osadu wlezonego.

Do pomiarów pól prędkości cząstek wody i zawieszonego w niej osadu użyto system PIV firmy *Dantec Dynamics*. Ruchy cząstek wody i osadu rejestrowano poprzez szklaną ścianę kanału, w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji falowania, w rejonie środka kuwety z piaskiem. Źródło światła lasera umieszczono z góry kanału. Płaska wiązka światła laserowego tworzyła płaszczyznę pionową, równoległą do osi podłużnej kanału – w płaszczyźnie tej dokonywano pomiarów prędkości cząstek. W celu umożliwienia pomiaru prędkości elementów wody umieszczano w niej tzw. posiew (traser) w postaci kulek ze szkła borokrzemowego o średniej średnicy $d_p = 9 \div 13$ μm i gęstości zbliżonej do gęstości wody. Ruchy tych kulek, jak również ruchy ziaren osadu (które ze względu na inną gęstość i średnicę zachowywały się w sposób odmienny od traseru), rejestrowano przy pomocy kamery o dużej rozdzielczości i prędkości. Przykładowe zdjęcie wykonane kamerą PIV ilustrujące chwilowe rozmieszczenie cząstek osadu w wodzie w obszarze tuż nad zmarszczkami dennymi oraz odpowiadający im wykres wektorowy chwilowego pola prędkości przedstawiono na rys. 2.

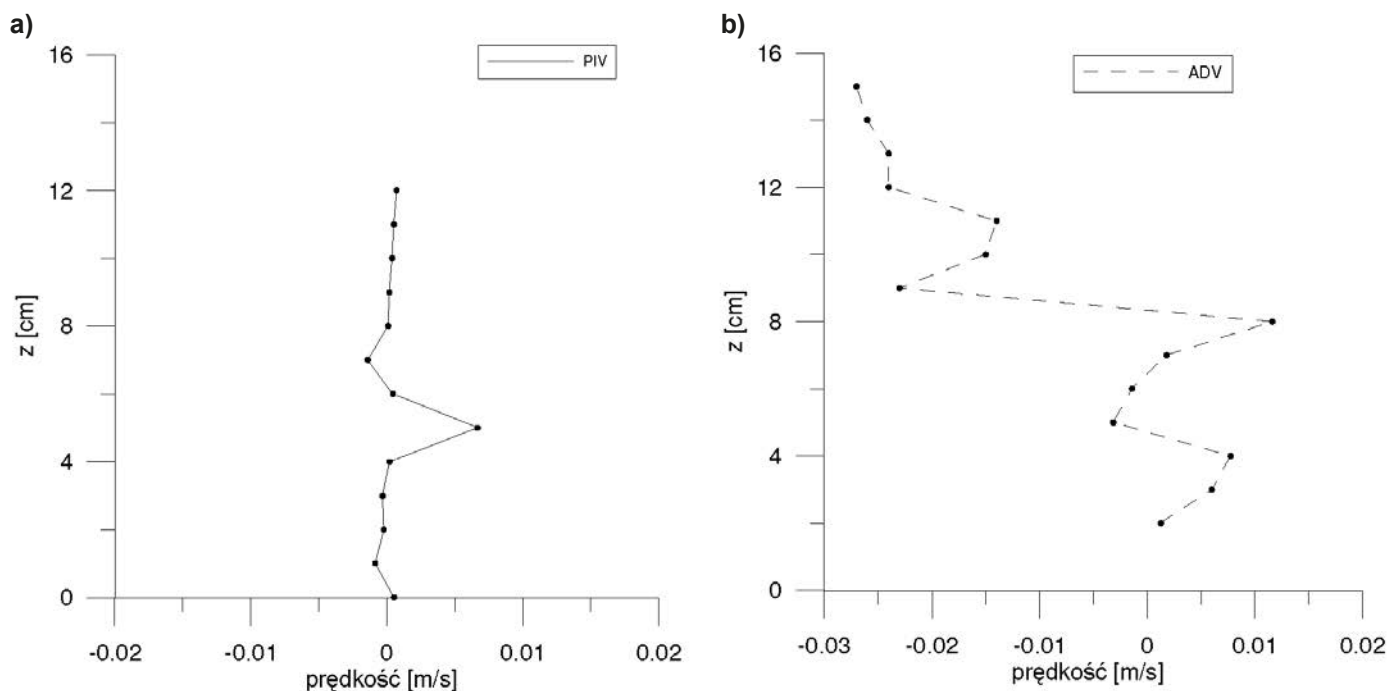
W celu weryfikacji pomiarów PIV wykonywano równocześnie pomiary prędkości przepływu zawiesiny przy użyciu son-

dy ADV Vectrino, 3D Lab, firmy *Nortek*. Instrument ten mierzy odbicie sygnału akustycznego od cząstek stałych materii unoszących się w wodzie z częstotliwością roboczą 10 MHz. Przyrząd ten może także dostarczać informacji o ilości obecnego w wodzie osadu. Informację tę uzyskuje się poprzez pomiar intensywności odbicia wstecznego, często jest więc określana jako siła rozpraszania wstecznego lub amplituda sygnału odbitego [3]. Udowodniono, że ADV z zadowalającą wiarygodnością mierzy prędkości cząstek niespoistych poruszających się w wodzie [3].

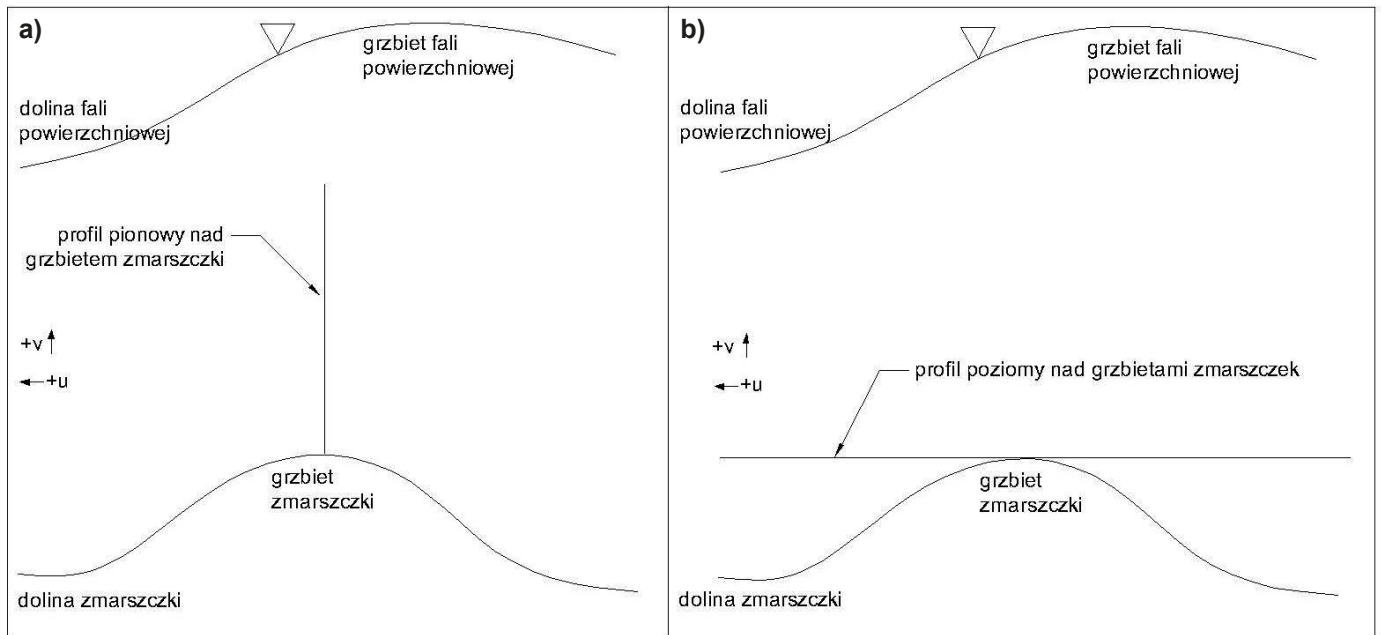
WYNIKI

Pomiary PIV i ADV

Dane uzyskane z pomiarów PIV opracowano przy zastosowaniu programu PIVlab 1.4 [7]. Program ten, poprzez analizę sekwencji zdjęć z kamery PIV, umożliwia generowanie obrazów przedstawiających chwilowe pola prędkości cząstek zawieszonych w wodzie. Na rys. 3 przedstawiono obrazy, ilustrujące chwilowe rozkłady prędkości ruchu zawiesiny woda – osad, w kroku czasowym 0,2 s, w trakcie trwania jednego pełnego okresu fali (1,5 s). Pole na każdym obrazie odpowiada obszarowi o wymiarach $15,3 \times 15,3$ cm. Zmarszczki denne zaznaczono kolorem brązowym. Jest to tzw. maska użyta w celu wyodrębnienia obszaru, którego nie objęto obliczeniami. Z analizy wykorzystanych obrazów wynika, że ruch zawiesiny woda – osad nad dnem jest dobrze rozpoznawany przez system PIV. Stwierdzono występowanie warstwy tzw. WBBL (*wave bottom boundary layer*), czyli warstwy obejmującej region, w którym ruch osadów dennych jest intensywny. Warstwa ta, w której dynamika ruchu osadów jest zdominowana przez tworzenie się wirów na skłonach zmarszczek [8] znajduje się bezpośrednio



Rys. 4. Pionowe profile uśrednionych, w czasie jednego okresu fali, prędkości poziomych cząstek osadu, uzyskane z pomiarów technikami PIV (a) i ADV (b)
Fala o okresie $T = 1,5$ s i wysokości $H = 0,10$ m



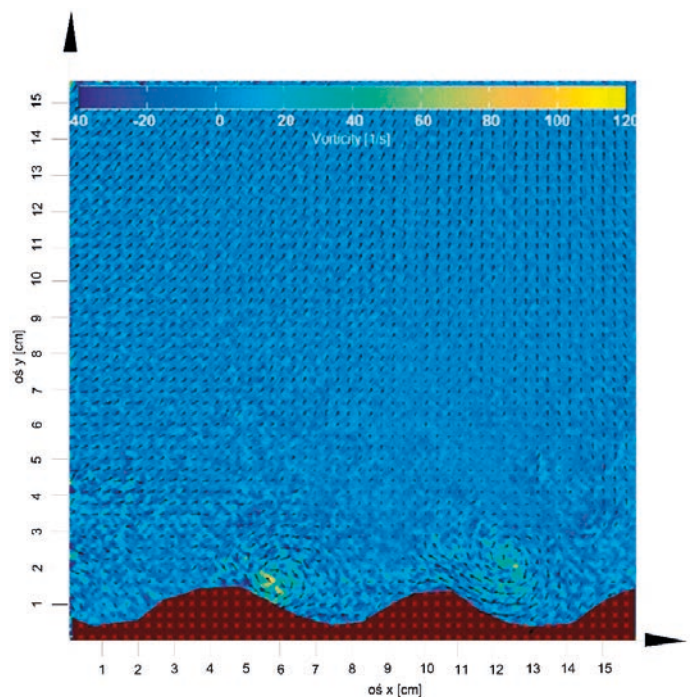
Rys. 5. Pionowy (a) oraz poziomy (b) profil badawczy nad dnem pokrytym zmarszczkami

nad zmarszczkami dennymi. Zmarszczki zwiększają szorstkość denną, zmieniając dynamikę osadów oraz powodując wzrost prędkości ruchu cząstek w rejonie ich występowania [6].

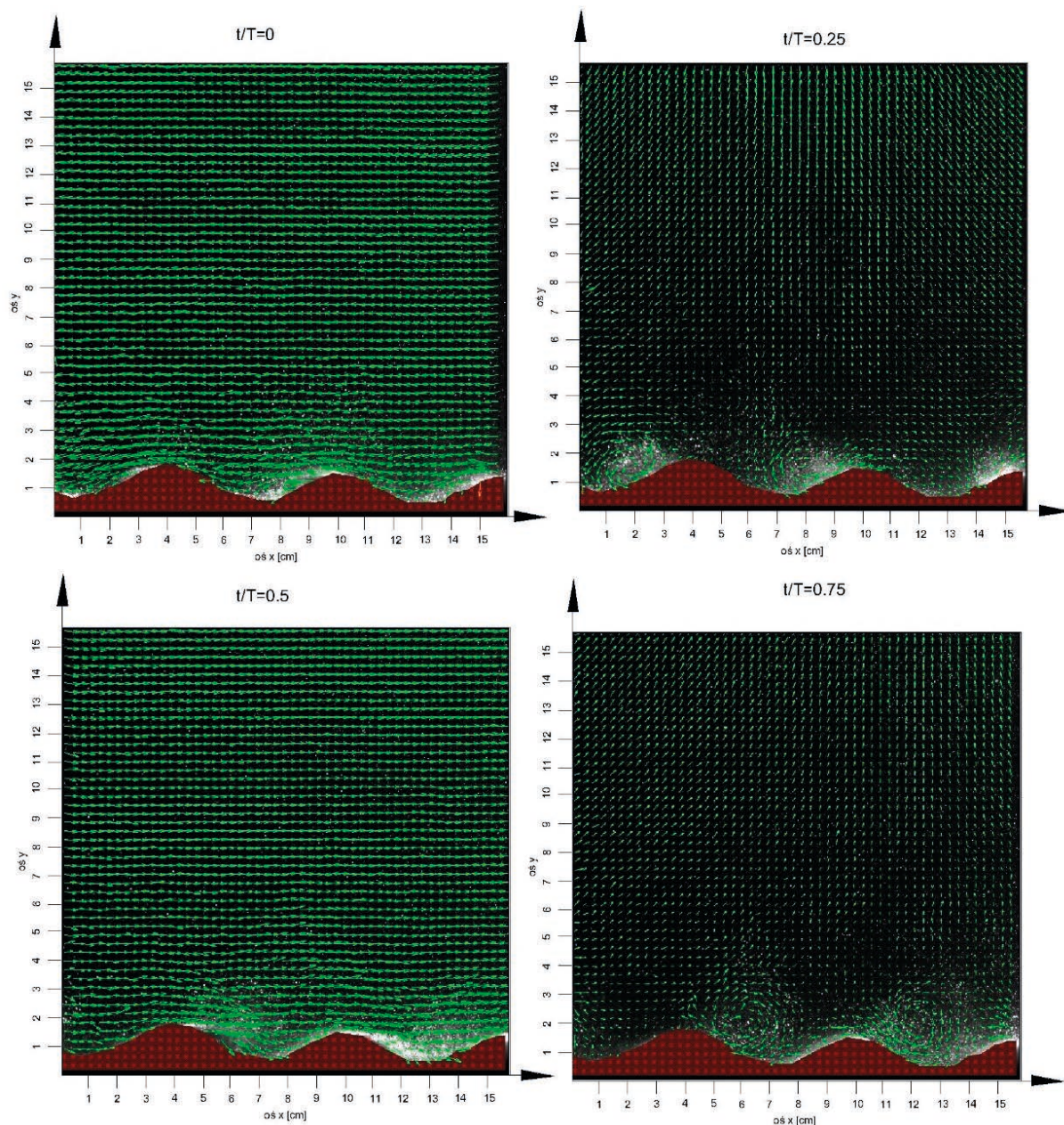
W pierwszym etapie analizy danych pomiarowych wyznaczono profile pionowe uśrednionych, w czasie jednego okresu fali poziomych, prędkości cząstek osadu. Na rys. 4 przedstawiono pionowe profile uśrednionych w czasie prędkości poziomych cząstek osadu, uzyskane z pomiarów PIV (a) oraz ADV (b). Ze względu na oscylacyjny ruch wody i osadu, pomijając możliwy efekt dryfu Stokesa, prędkości te powinny mieć wartości zerowe. Z wykresów na rys. 4 wynika, że prędkości uśrednione wyznaczone z pomiarów różnią się nieznacznie od zera: w przypadku danych z pomiarów PIV prędkości te zmieniają się, w przybliżeniu, w zakresie $0 \pm 0,01$ m/s, a w przypadku ADV – w zakresie $0 \pm 0,02$ m/s. Uzyskane wielkości odchyłek od wartości zerowej można uważać za wskaźnik dokładności obu metod pomiarowych. Ponieważ amplitudy prędkości poziomych dla analizowanej fali, w zależności od głębokości wody, są w przybliżeniu równe od 0,1 do 0,2 m/s, można uznać, że dla badanego zjawiska błąd względny pomiarów prędkości techniką PIV wynosi około $5 \div 10\%$, a w przypadku techniki ADV błąd ten wynosi około $10 \div 20\%$.

W zjawiskach ruchu osadów w wodzie szczególne znaczenie mają procesy zachodzące w obszarze bezpośrednio nad dnem akwenu, w którym to, wskutek nierówności powierzchni dna, generują się turbulencje. Wytwarzają one naprężenia powodujące podrywanie cząstek osadu z dna oraz inicjują ich ruch w wodzie. Z tego względu, w trakcie prowadzonych badań laboratoryjnych w kanale falowym, dużo uwagi poświęcono rejestracji ruchu cząstek osadu w tym właśnie obszarze przy dnie (WBBL), stanowiącym warstwę o grubości kilku centymetrów. Rozkład chwilowych prędkości ruchu zawieszony woda-osad w przekroju pionowym badano przy wykorzystaniu dwóch metod: PIV oraz ADV, natomiast analizę rozkładu prędkości w przekroju poziomym wykonano jedynie przy użyciu PIV. Lokalizację obu przekrojów przedstawiono na rys. 5.

Przykład wyników otrzymanych w badaniach stanowi rys. 6. Łatwo dostrzec wiry spowodowane przepływem turbulentnym w warstwie przydennej (WBBL). Największą intensywność turbulencji obserwuje się w warstwie o grubości około 5 cm, w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni zmarszczek. Podobne jakościowo wyniki uzyskali Doering i Baryla [2]. Według tych autorów, natężenie turbulencji jest największe w pobliżu grzbietów zmarszczek (jednak nie na ich szczycie), dlatego w miejscach tych intensywność porywania cząstek osadu z dna do obszaru cieczy jest największa. W kierunku pionowym turbulencje w wodzie stopniowo maleją wraz z odległością od dna. Miąższość warstwy, w której turbulencje odgrywają znaczącą



Rys. 6. Wiry w wodzie występujące w pobliżu grzbietów zmarszczek



Rys. 7. Chwilowe pola prędkości wyznaczone w czterech charakterystycznych fazach okresu fali powierzchniowej ($T = 1,5$ s i $H = 0,1$ m)
Zdjęcia wykonane techniką PIV

rolę określono, zarówno w pracy Doering i Baryła [2], jak i w niniejszym opracowaniu, na 4 do 6 cm.

Na rys. 7 przedstawiono wektorowe obrazy chwilowych pól prędkości w wybranym obszarze nad dnem, w czterech różnych fazach pojedynczego okresu fali powierzchniowej (o parametrach $T = 1,5$ s, $H = 0,1$ m). Kolejne obrazy ilustrują mechanizm ruchu cząstek zawiesziny woda – osad pod wpływem oscylacyjnego wymuszenia wywołanego falą powierzchniową. Widoczne jest, że maksymalne wartości prędkości poziomej występują w rejonie grzbietu ($t/T = 0$) oraz odpowiednio, w rejonie doliny fali ($t/T = 0,5$) powierzchniowej, czyli w chwilach czasu, w których powierzchnia swobodna wody osiąga swoje maksimum bądź minimum w danym przekroju pionowym. Na obrazach $t/T = 0,25$ i $t/T = 0,75$ (węzły fali) doskonale widać wiry tworzące się nad zmarszczkami, których zasięg osiąga wysokość od 4 do 5 cm nad dnem.

Profil pionowy prędkości cząstek osadu

W kontekście analizy mechanizmu ruchu osadu w wodzie wywołanego propagacją falowania powierzchniowego szczególnie interesujące są pionowe profile chwilowych prędkości osadu. Wykonano je nad grzbietem zmarszczki dla charakterystycznych chwil czasu, to jest w momentach przejścia grzbietu ($t/T = 0$) oraz doliny fali ($t/T = 0,5$). Profil pionowy o wysokości około 15 cm umiejscowiony nad grzbietem zmarszczki dennej pokazano na rys. 8.

Na rys. 9 przedstawiono pionowy rozkład chwilowej prędkości poziomej (u) pomierzony w trakcie przejścia grzbietu (a), jak i doliny (b) fali powierzchniowej. Linia przerywaną oznaczono wyniki pomiarów ADV, natomiast ciągłą wyniki uzyskane metodą PIV. W pomiarach ADV składowe pola prędkości

rejestrowano wzdłuż profilu pionowego w punktach odległych o 1 cm. Wiązało się to z koniecznością zmiany położenia głowicy sondy dla każdego punktu pomiarowego – w odróżnieniu od techniki PIV umożliwiającej wyznaczenie pola prędkości od razu dla całego dwuwymiarowego obszaru pomiarowego.

Jak widać na przedstawionych wykresach, maksymalne prędkości cząstek osadu tuż nad zmarszczką (w warstwie WBBL), zmierzone metodami zarówno PIV, jak i ADV, są w przybliżeniu równe $\pm 0,25$ m/s. W rejonie przepływu niezaburzonego turbulencjami (kilka centymetrów nad dnem), gdzie

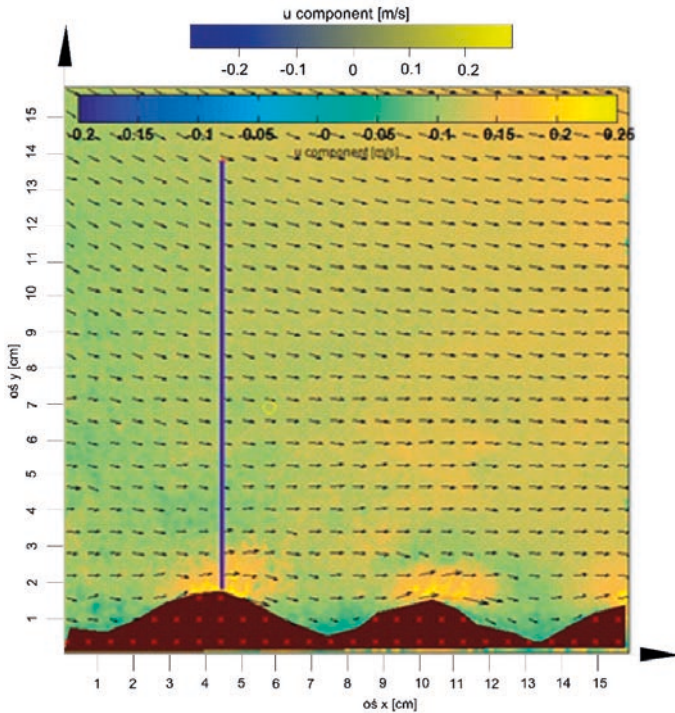
koncentracja osadu zawieszzonego w wodzie jest dużo mniejsza niż bezpośrednio nad dnem, prędkości wyznaczone techniką PIV różnią się wyraźnie od tych zmierzonych sondą ADV.

Z kolei na rys. 10 zilustrowano rozkłady prędkości poziomych u (rys. 10a) i pionowych v (rys. 10b) wzdłuż profilu pionowego nad grzbietem zmarszczki, wyznaczone dla charakterystycznych faz przejścia fali nad danym profilem (tzn. dla różnych chwil t/T , gdzie $t=0$ odpowiada początkowi okresu falowania) przy użyciu PIV. Taki sposób przedstawienia wyników daje ogólny pogląd na kierunek ruchu i prędkości cząstek osadu w wybranej lokalizacji nad dnem.

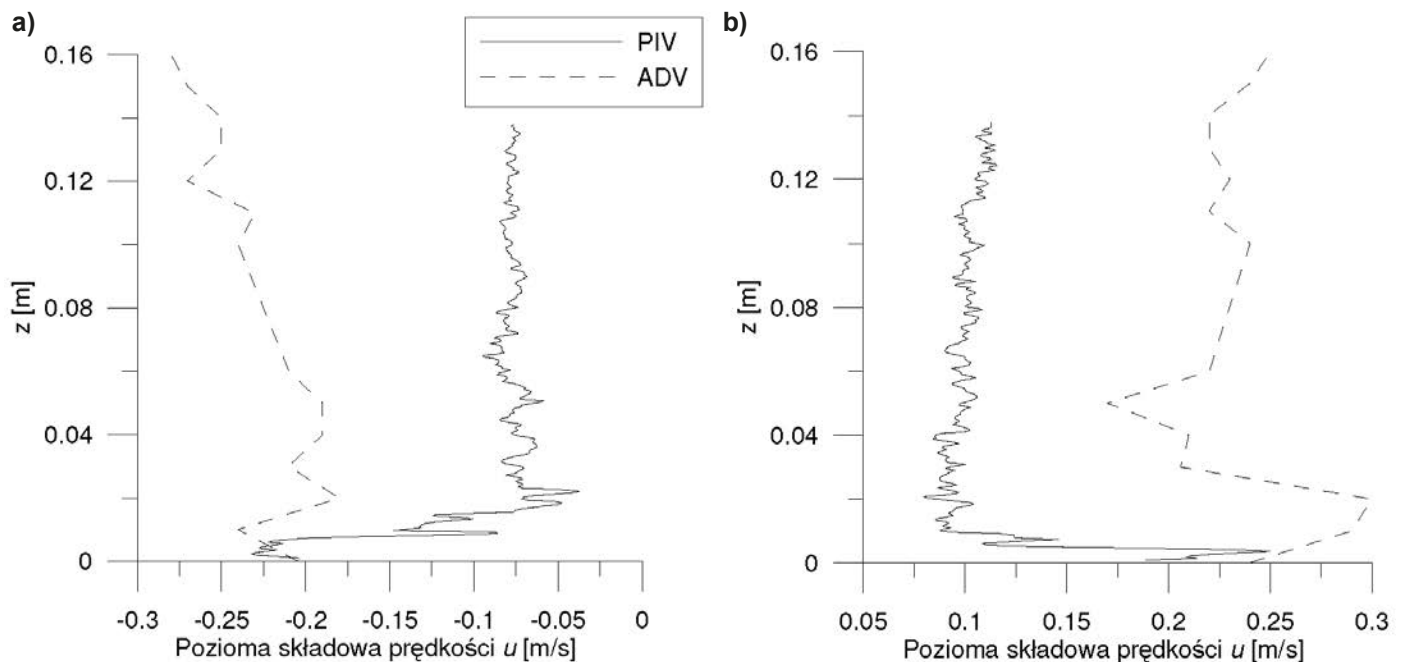
Przydenne profil poziomy prędkości osadu

W uzupełnieniu do rozkładu prędkości cząstek osadu w profilu pionowym, umiejscowionym nad grzbietem zmarszczki dennej oraz wykonanym dla kilku charakterystycznych chwil czasu w trakcie propagacji fali powierzchniowej nad dnem wyznaczono profil poziomy prędkości osadu. Umiejscowiono go bezpośrednio nad grzbietami zmarszczek dennych równoległe do osi x , jak pokazano to na rys. 11. Długość tego profilu była równa szerokości okna pomiarowego PIV, czyli wynosiła 15,3 cm. Poziomy profil prędkości zawiesziny przedstawiono dla dwóch sytuacji charakteryzujących się ekstremalnymi wartościami prędkości: pod doliną i pod grzbietem fali powierzchniowej.

Zmienność poziomej składowej prędkości (u) cząstek zawiesziny ilustrują wykresy na rys. 12a i 12b. Dobrze widoczny na obu rysunkach jest znaczny wzrost prędkości poziomej bezpośrednio nad grzbietami zmarszczek. Przydenne ekstremalne prędkości poziome zawiesziny (mierzone pod doliną i pod grzbietem fali powierzchniowej) są zbliżone i wynoszą około $\pm 0,25$ m/s nad grzbietami zmarszczek oraz około 0,10 m/s nad dolinami zmarszczek.

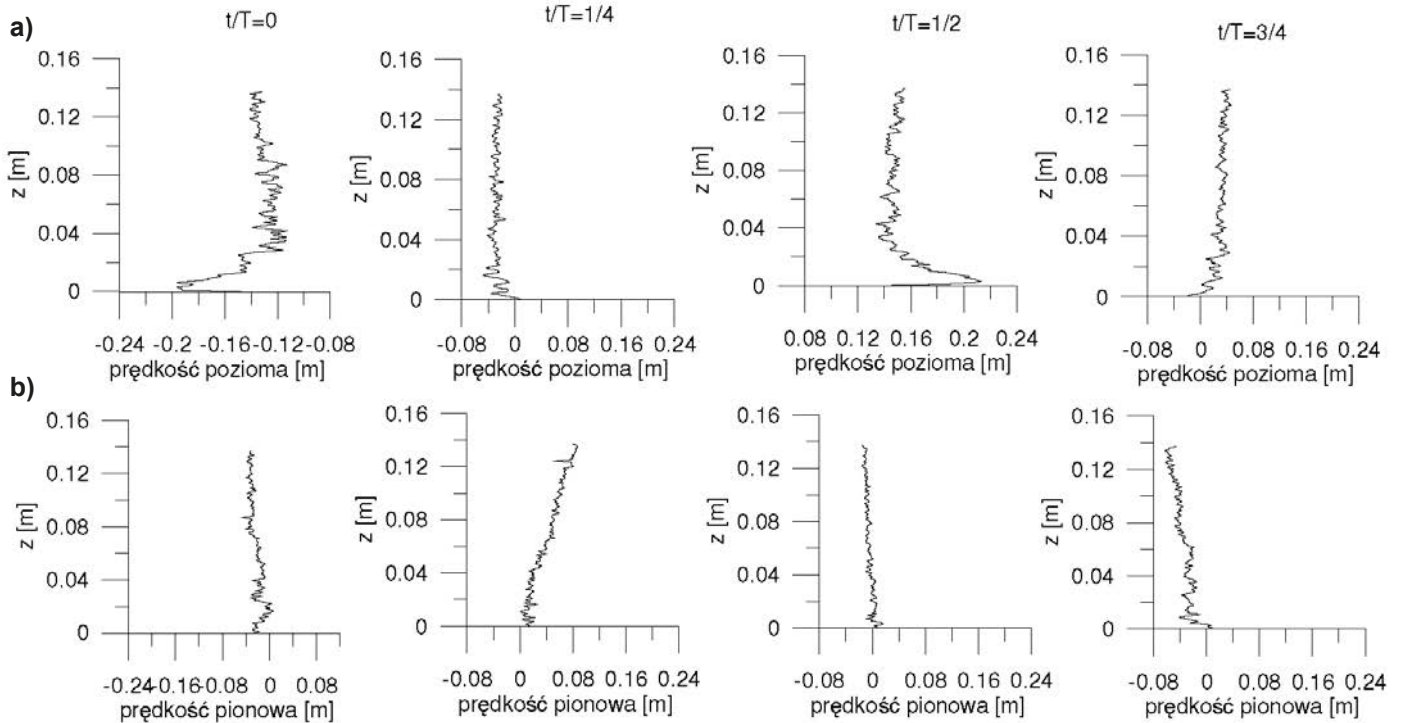


Rys. 8. Lokalizacja profilu pionowego nad grzbietem zmarszczki



Rys. 9. Pionowy profil poziomej składowej prędkości chwilowej, pod grzbietem (a) oraz pod doliną fali (b), zmierzony metodą PIV i ADV

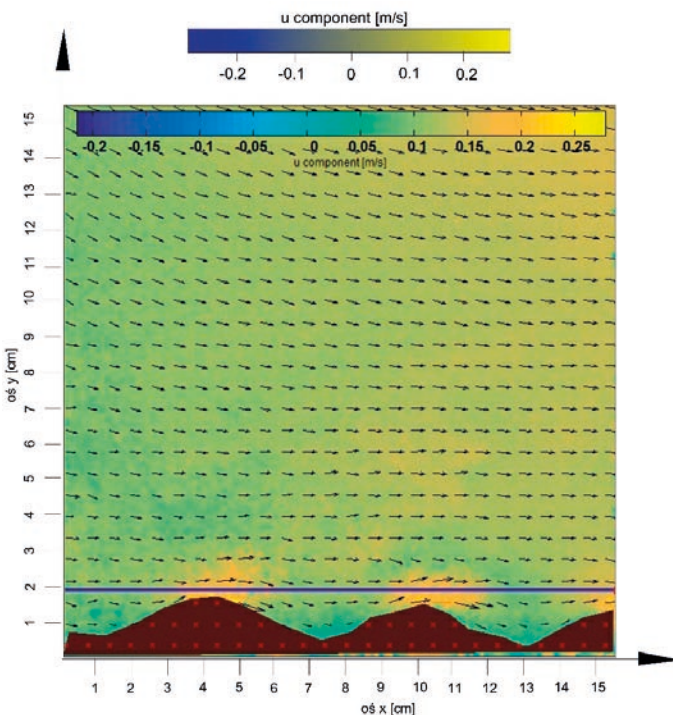
$H = 0.1 \text{ m}$, $T = 1,5 \text{ s}$, $h = 0.3 \text{ m}$



Rys. 10. Pionowe rozkłady składowych chwilowej prędkości ruchu zawiesziny woda – osad wykonane techniką PIV: a) składowa pozioma, b) składowa pionowa

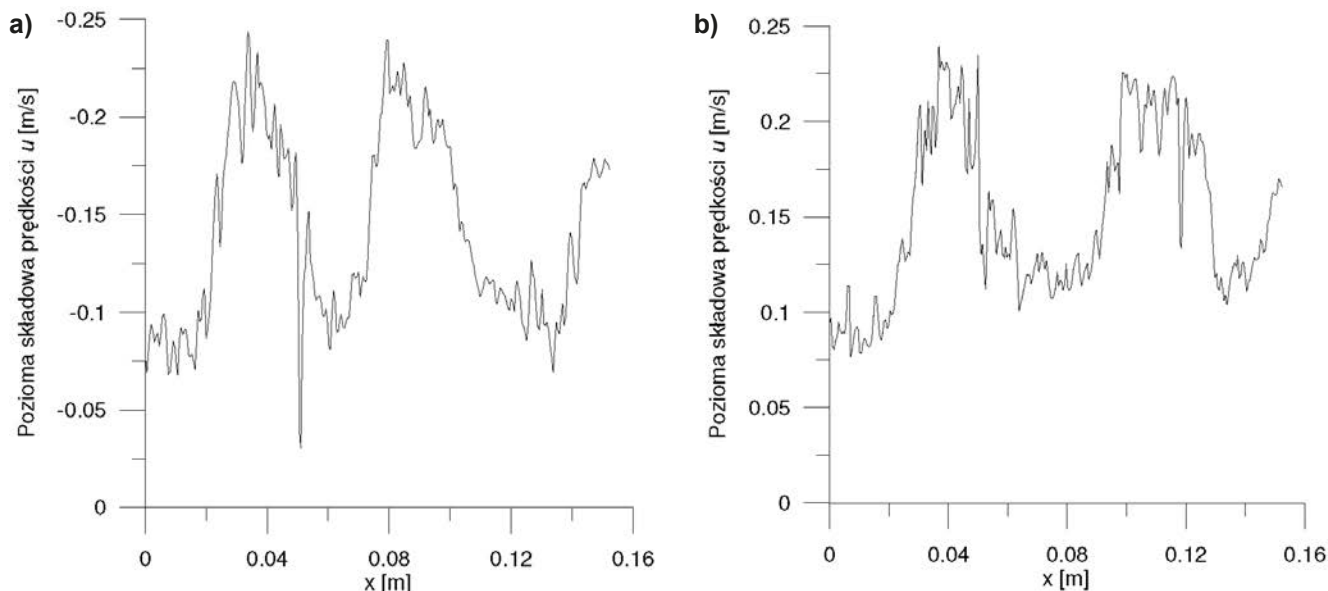
Pomiary natężenia transportu osadu dennego

W trakcie badań laboratoryjnych w kanale falowym przeprowadzono również pomiary natężenia transportu osadu dennego. W tym celu na dnie kanału (por. rys. 1) umieszczono tzw. łapaczkę osadu (osadnik piasku), skonstruowaną w IBW PAN [4]. Składa się ona z dwóch komór, do których, w zależności od kierunku przepływu wody nad dnem, wpadają cząstki osadu. Pomiar masy osadu zgromadzonego w każdej z komór pozwala na wyznaczenie natężenia transportu osadu (tzn. ruchu masy osadu w jednostce czasu na jednostkę szerokości – to jest w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu), $[\text{kg}/\text{m}/\text{s}]$, w zależności od aktualnych warunków przepływu [1, 5]. Łapaczkę umieszczono pośrodku obszaru roboczego prostopadle do kierunku falowania. Po każdym pięciominutowym cyklu badań zebrany w komorach łapaczki osad był ważony wraz z wodą w cylindrze pomiarowym, osobno dla każdej z komór. Wagę sedymentu wyznaczono jako różnicę pomiędzy wagą cylindra wraz z wodą i osadem a wagą cylindra wypełnionego jedynie wodą. Masy osadu zgromadzonego w komorach łapaczki pozwoliły na obliczenie natężenia transportu osadu w obu kierunkach, wyrażonego w jednostkach $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$ i przedstawionego jako wielkość q_b . Uzyskane wyniki pokazano na rys. 14. Jak widać, natężenie transportu osadu w kierunku zgodnym z kierunkiem falowania wynosi średnio $0,022 \text{ kg}/\text{m}/\text{s}$ i jest wyższe niż jego wartość w kierunku przeciwnym do falowania, wynosząca $0,016 \text{ kg}/\text{m}/\text{s}$. Wartość wypadkowego natężenia transportu, w kierunku zgodnym z kierunkiem falowania, wynosi około $0,06 \text{ [kg}/\text{m}/\text{s}]$. Obserwacja ta jest jakościowo zgodna z wynikami pomiarów pola prędkości cząsteczek osadu wykonanych techniką PIV.

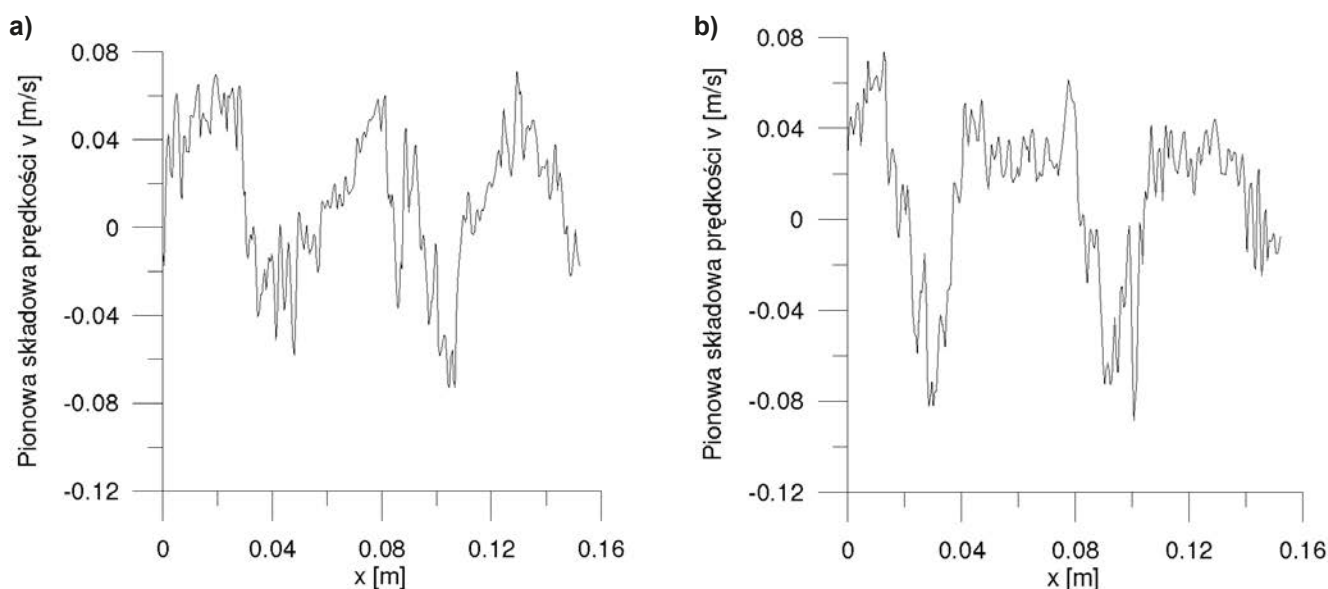


Rys. 11. Lokalizacja profilu poziomego wzdłuż linii zmarszczek

Z kolei na rys. 13a i 13b pokazano analogiczne wykresy zmienności prędkości w profilu poziomym dla jej pionowej składowej v . Jak widać, składowa pionowa wynosi od $0,06$ do $0,08 \text{ m}/\text{s}$, czyli jest około trzy razy mniejsza niż składowa pozioma.



Rys. 12. Składowa pozioma u prędkości chwilowej osadu wzdłuż linii zmarszczek: a) pod doliną fali powierzchniowej, b) pod grzbieciem fali powierzchniowej

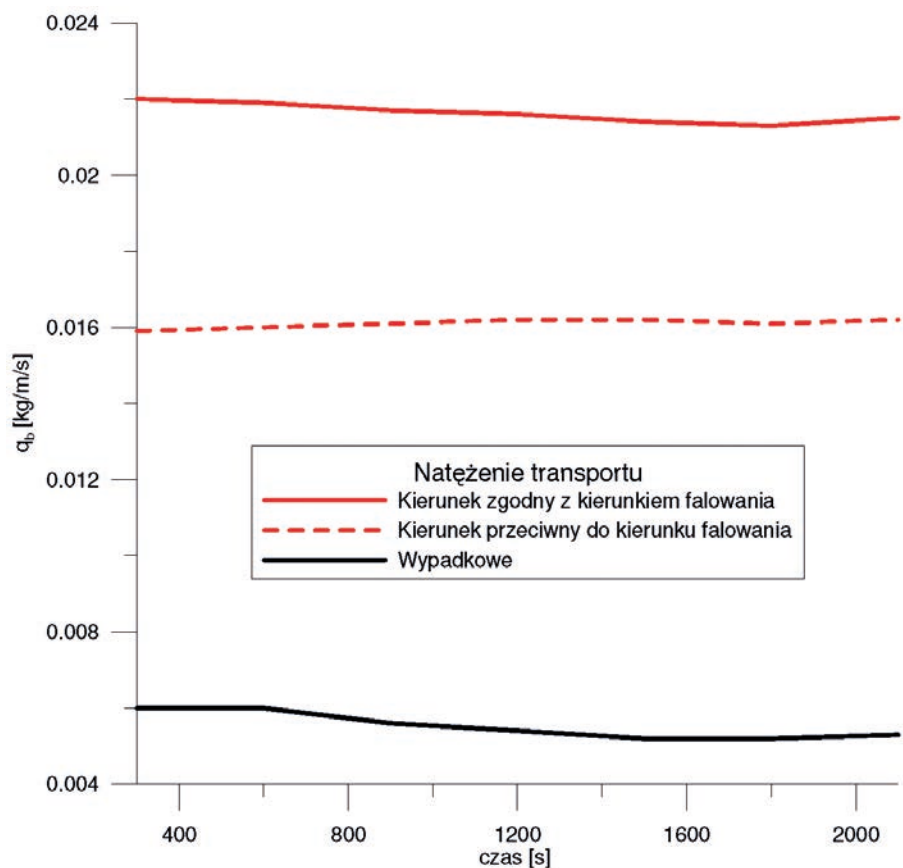


Rys. 13. Składowa pionowa v prędkości chwilowej osadu wzdłuż linii zmarszczek: a) pod doliną fali powierzchniowej, b) pod grzbieciem fali powierzchniowej

PODSUMOWANIE

Wyniki pomiarów ruchu osadu piaszczystego w wodzie, przeprowadzone przy niestandardowym zastosowaniu technik PIV i ADV w kanale falowym IBW PAN, pozwoliły na zgromadzenie obszernego zbioru danych, które mogą być wykorzystane do modelowania teoretycznego i numerycznego badanego zjawiska. Uzyskane na obecnym etapie badań wyniki doświadczalne pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Technika PIV sprawdziła się jako wiarygodna metoda pomiaru ruchu cząstek osadu w wodzie. Chwilowe prędkości cząstek osadu rejestrowane tą metodą charakteryzują się około dwukrotnie większą dokładnością niż wyniki analogicznych pomiarów prowadzonych techniką ADV.
2. W przypadku analizowanych warunków falowych (okres fali $T = 1,5$ s i wysokość $H = 0,1$ m) formowały się zmarszczki denne o długości około 7 cm i wysokości około 2 cm, a zasięg oddziaływania tych form na strukturę przepływu wody z osadem w niej zawieszonym określono w przybliżeniu na około 5 cm ponad linię grzbietów zmarszczek.
3. Zmierzone maksymalne wartości poziomej składowej prędkości cząstek osadu w bezpośredniej bliskości grzbietów zmarszczek wynosiły około $\pm 0,25$ m/s. Typowe wielkości pionowych prędkości osadu nad pomarszczonym dnem piaszczystym były rzędu $\pm 0,08$ m/s.
4. Propagacja fali powierzchniowej o okresie $T = 1,5$ s i wysokości $H = 0,1$ m wywoływała wypadkowy ruch transportu osadu wlezonego w kierunku zgodnym z kierunkiem falowania.



Rys. 14. Natężenie transportu osadu wleczonego q_b [kg/m/s]

LITERATURA

1. Basiński T.: Field studies on sand movement in the coastal zone. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1989.
2. Doering J. C., Baryla A. J.: An investigation of the velocity field under regular and irregular waves over a sand beach. *Coastal Engineering*, 44, 2002, 275-300.
3. Lohrmann A.: Monitoring Sediment Concentration with acoustic back-scattering instruments. Nortek Technical Note, No.: 003, 2001.
4. Pruszek Z.: On-offshore bed-load sediment transport in the coastal zone. *Coastal Engineering*, 13, 1989, 273-292.
5. Pruszek Z.: *Dynamika brzegu i dna morskiego*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 1998.

6. Stachurska B., Staroszczyk R.: An investigation of the velocity field over rippled sand bottom. International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Proceedings of 6th IAHR IJREWHS, 2016.

7. Thielicke W., Stamhuis E. J.: PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2014.

8. Van der Werf J. J., Doucette J. S., O'Donoghue T., Ribberink J. S.: Detailed measurements of velocities and suspended sand concentrations over full-scale ripples in regular oscillatory flow. *J. Geophys. Res.*, 112, F02012, 2007.

PODZIĘKOWANIE: Badania laboratoryjne opisane w tej pracy sfinansowało Narodowe Centrum Nauki w ramach grantu UMO-2013/11/B/ST8/03818 oraz Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku ze środków przeznaczonych na działalność statutową.

Dziękuję Panu dr hab. inż. Ryszardowi Staroszczykowi, prof. nadzw. IBW PAN, za życzliwą pomoc, cenne rady i liczne wskazówki merytoryczne udzielone w trakcie przygotowywania niniejszego artykułu.