

## MODELOWANIE CHWILOWEJ PŁASZCZYZNY ZWIERCIADŁA WODY W TRAKCIE POMIARÓW BATYMETRYCZNYCH

Dawid Kudas, Tomasz Czempas

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Badania opisane w poniższym artykule obejmują analizę dokładności wyznaczenia chwilowej płaszczyzny zwierciadła wody zbiornika na podstawie pomiarów batymetrycznych. Dane pochodziły z pomiaru echosondą Hi-Target HD380 zintegrowaną z odbiornikiem satelitarnym Hi-Target V30. Obszar badawczy stanowił zalew Chechło w gminie Trzebinia. Płaszczyznę zwierciadła wody wyznaczono, stosując aproksymację metodą najmniejszych kwadratów. Poddano analizie także wpływ interwału rejestracji pomiaru na poprawność wyznaczenia płaszczyzny. Płaszczyzny porównano z płaszczyzną kontrolną, którą otrzymano na podstawie niezależnego pomiaru obwodnicy zbiornika odbiornikiem satelitarnym. Otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić, iż płaszczyzna kontrolna pozwala korygować pochylenie płaszczyzny lustra wody, a jej stosowanie może być fakultatywne, a nie obligatoryjne.

**Słowa kluczowe:** batymetria, aproksymacja, płaszczyzna, lustro wody, echosonda, RTN

### WSTĘP

Pomiary batymetryczne stały się jednym z podstawowych źródeł informacji o zbiornikach wodnych oraz rzekach. Ponieważ sporządzenie mapy do celów projektowych obejmuje coraz częściej obszary akwenów wodnych oraz rzek, należy rozważyć stopień trudności wykonania takiego opracowania oraz ewentualne zagrożenia i możliwości, jakie daje pomiar batymetryczny. O ile pozyskanie wiarygodnej informacji w postaci mapy do celów projektowych na stałym lądzie nie stwarza problemów, o tyle wiarygodna informacja o przebiegu dna nie jest tak łatwo dostępna [Owerko i in. 2011]. Opracowania geodezyjne odgrywają kluczową rolę w planowaniu gospodarowania wodami powierzchniowymi. Dzięki nim inżynieria wodna pozyskuje informacje na temat ukształtowania danego

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: mgr inż. Dawid Kudas, Katedra Geodezji, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 253A, 30-198 Kraków, e-mail: [dawid.kudas@ur.krakow.pl](mailto:dawid.kudas@ur.krakow.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

terenu, pojemności koryta rzecznego, jak również ilości wody płynącej nim w trakcie wykonywania pomiarów [Gradka i Kotlarz 2013]. Jak jednak zauważają Popielarczyk i Templin [2012] zdecydowana większość śródlądowych zbiorników wodnych w Polsce ma nieaktualne mapy batymetryczne. Batymetria dostarczająca informacji o dnie akwenów może także wspomagać obliczenia zmian dna związanych z procesami erozji i sedymentacji. Obserwacje z odbiornika satelitarnego zintegrowanego z sondą pozyskane w toku pomiaru batymetrycznego da się wykorzystać do innych celów niż modelowanie dna zbiornika. Dane te dostarczać mogą kompleksowej informacji o zbiorniku w chwili pomiaru. Informację taką może stanowić model dna i poziom zwierciadła wody.

Powszechnie funkcjonujące pojęcie batymetrii sprowadza zbiór danych uzyskanych tą metodą głównie do informacji o dnie akwenów. Jednakże sondaż hydroakustyczny polega na pozyskaniu informacji o pozycji poziomej jednostki pływającej i głębokości zbiornika w danym punkcie pomiaru [Popielarczyk i in. 2012b]. Funkcjonują poglądy, że jednym z najważniejszych elementów w momencie wykonywania sondażu hydroakustycznego jest wartość wysokości lustra wody, stanowiąca powierzchnię referencyjną, która ze względu na dynamikę środowiska wodnego cechować się może znacznymi zmianami [Popielarczyk i in. 2012b]. Problematyka cykliczności wahań zwierciadła wody jezior jest niezbyt często poruszana w literaturze, część jezior zaś nawet przy obniżeniu obszaru tolerancji analiz spektralnych Fouriera do 90% nie wykazuje żadnych cech cykliczności wahań zwierciadła wody [Dąbrowski i Weglarczyk 2005]. Wąhanie zwierciadła wody ma związek z czynnikami naturalnymi i antropogenicznymi – chodzi o elementy takie jak zmiany wielkości opadu atmosferycznego, odpływ powierzchniowy i odpływ gruntowy z jeziora, ewapotranspiracja terenowa wywołana zalesieniem terenów rolniczych oraz eksploatacja wód podziemnych, zmiana przepływu wód powierzchniowych i podziemnych spowodowana funkcjonowaniem obiektów hydrotechnicznych [Konatowska i Rutkowski 2008]. Potwierdza to konieczność modelowania zwierciadła wody w chwili wykonywania pomiaru.

Istotnym zagadnieniem pomiarów batymetrycznych jest synchroniczne wykonywanie pomiaru satelitarnego i hydroakustycznego [Gołuch i in. 2010, Popielarczyk i in. 2012b]. Ponieważ wyniki pomiarów technikami satelitarnymi bywają obciążone dużym błędem, który może przełożyć się na dokładność otrzymanego modelu dna, dlatego zaleca się wykonywanie pomiarów kontrolnych. Dokładność metod satelitarnych pozwala na ich zastosowanie w różnych dziedzinach nauki bez wykonywania pomiarów kontrolnych, tam gdzie wymagana jest dokładność rzędu centymetrów. Istnieje wiele opracowań dotyczących dokładności pomiaru batymetrycznego z udziałem pomiarów satelitarnych oraz traktujących o powodach błędów [Gołuch i in. 2010, Popielarczyk i in. 2012a, Popielarczyk i in. 2012b, Lisowski 2015, McHugh i in. 2015]. Jednym z czynników mogących mieć wpływ na dokładność pomiaru głębokości jest odległość pomiędzy przetwornikiem sondy a dnem związana ze stopniem zanurzenia łodzi [Gołuch i in. 2010]. Zdaniem Popielarczyka, Kaźmierczaka i Grunwalda [2012b] sondaż hydroakustyczny na obiektach śródlądowych, gdzie poziom lustra wody znacznie zmienia się w czasie, jest trudny, a sam proces pomiarowy pozostaje podatny na wpływ błędów systematycznych oraz przypadkowych.

Rzetelnie określona płaszczyzna lustra wody w połączeniu z tradycyjnie otrzymanym modelem dna służyć może określaniu objętości akwenu dla celów zarówno

naukowych, jak i praktycznych. Ponieważ sprawdzenie poprawności wyznaczenia płaszczyzny zwierciadła wody jest łatwiejsze niż weryfikacja poprawności pomiaru dna zbiornika, jej wyznaczenie, ewaluacja oraz ewentualna korekta bezpośrednio wiąże się z wiarygodnością modelu dna wykonanego przez sondę. Analizie poddano najprostszą zdaniem autorów metodę kontroli samego pomiaru batymetrycznego w przypadku braku wodowskazów rozmieszczonych równomiernie w obszarze badań, które mogłyby służyć do określenia wysokości zwierciadła wody. Metoda ta nie wymaga także wykonywania stosowanej w celu powiązania stanu lustra wody z układem współrzędnych wysokościowych niwelacji w nawiązaniu do reperów wysokościowych [Lisowski 2015]. Praca dotyczy rozwiązania jednego z problemów, jakie mogą wystąpić podczas pomiarów batymetrycznych. Obecny stan techniczny wielu zbiorników pozostawia wiele do życzenia – często zniszczone lub zdemontowane są wodowskazy oraz pobliskie repery wysokościowe, a zachowane mogą być obciążone błędami. W niniejszej pracy skupiono się na analizach i opracowaniu algorytmu pozwalającego na ocenę oraz selekcję danych pochodzących z sondażu hydroakustycznego w celu modelowania płaszczyzny zwierciadła wody w chwili pomiaru. Procedurę opracowania danych przygotowano w dwóch wariantach, z udziałem niezależnej płaszczyzny kontrolnej oraz wyłącznie danych z sondy.

## **MATERIAŁ I METODY**

W celu przeprowadzenia analiz pozyskano dane z pomiaru batymetrycznego na zalewie Chechło w gminie Trzebinia wykonanego dnia 3 czerwca 2015 roku. Zbiornik ten, zwany także Jeziorem Chechelskim, położony jest w południowej części Polski, w powiecie chrzanowskim, w województwie małopolskim [Krauze-Tomeczyk i Ostrowski 2006]. Zbiornik ten jest stosunkowo młodym sztucznym zbiornikiem, powstał bowiem w latach 60. XX wieku [www.trzebinia.pl]. Ma regularny kształt i powierzchnię ok. 54 ha. Długość zbiornika wynosi ponad 1,5 km. Aktualizacja Programu Ochrony Środowiska dla Gminy Trzebinia wspomina, że sąsiaduje on z Puszczą Dulowską. Stały dopływ wody zapewniają potoki Młoszówka i Chechło [Tadeusz i Piwowar 2005].

W pracy posługiwano się odbiornikiem Trimble GNSS R8 Model 3 oraz sondą batymetryczną HD390 firmy Hi-Target zintegrowaną z odbiornikiem GNSS V30 Hi-Target. Odbiornik umieszczony na łódce pracował w trybie RTN w oparciu o polską państwową aktywną sieć geodezyjną ASG-EUPOS w interwale rejestracji pozycji co 1 s, co pokrywa się z rejestracją obserwacji batymetrycznych. Użyta konfiguracja odbiornika ruchomego powieliała zastosowaną w przypadku badań skupiających się na dokładności pozycjonowania GNSS z wykorzystaniem serwisów czasu rzeczywistego ASG-EUPOS dla potrzeb sondażu hydroakustycznego [Popielarczyk i in. 2012a]. Łódka poruszała się z prędkością nieprzekraczającą  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , w celu uniknięcia konieczności korekty rejestrowanych danych ze względu na zmiany stopnia zanurzenia łodzi [Gołuch i in. 2010]. Część pomiarowa doświadczenia polegała także na wykonaniu pomiaru obwodnicy zalewu Chechło w trakcie rejestracji obserwacji batymetrycznych na obszarze zbiornika. Odbiornik ruchomy poruszający się po obwodnicy pracował w trybie Real Time Network (RTN) w oparciu o Małopolski System Pozycjonowania Precyzyjnego (MSPP) z wykorzysta-

niem korekt powierzchniowych GPS (serwis NAWGEO\_VRS\_CMV). Pozycję punktu z metody RTN wyznaczano jako średnią z trzech zarejestrowanych na punkcie epok pomiarowych w trakcie 5 s. Przez zasięg zbiornika rozumie się przecięcie powierzchniowego zwierciadła wody z gruntem w chwili pomiaru. W przypadku pomiaru punktów obwodnicy zdecydowano się na wyznaczenie pozycji z uśrednienia 3 obserwacji w celu podniesienia dokładności otrzymanej płaszczyzny, która dla całego postępowania jest płaszczyzną kontrolną. Natomiast w przypadku pomiaru batymetrycznego zastosowano wymieniony interwał rejestracji ze względu na konieczność uzyskania kompleksowej informacji o dnie oraz fakt poruszania się odbiornika na łodzi z prędkością większą niż prędkość odbiornika rejestrującego obwodnice. Dobrane parametry pomiarów pozwalają uniknąć ewentualnych błędów, jakie mogłyby spowodować uśrednianie pozycji odbiornika poruszającego się na łodzi.

Tabela 1. Wybrane parametry sprzętu pomiarowego [www.trimble.com, www.hi-target.pl]

Table 1. Selected parameters of the measuring equipment [www.trimble.com, www.hi-target.pl]

| Opis<br>Description        | Trimble R8 Model 3<br>Odbiornik / antena 220<br>kanałowy | Hi-Target V30<br>Odbiornik / antena 220 kanałowy                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sygnaly                    | GPS: L1/L2C/L5<br>GLONASS: L1/L2                         | GPS: L1C/A, L2E, L2C, L5<br>GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P<br>SBAS: EGNOS, MSAS, WASS<br>Galileo-Giove-A: L1BOC, E5A, E5B, E5Alt-BOC1<br>Galileo-Giove-B: L1CBOC, E5A, E5B,<br>E5AltBOC1<br>Beidou: B1, B2<br>QZSS: L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5 |
| RTK                        | H: 10mm + 1ppm RMS,<br>V: 20mm + 1ppm RMS                | H: 8mm + 1ppm RMS, V: 15mm + 1ppm RMS                                                                                                                                                                                                         |
| GPS/ GLONASS<br>antenna    | wbudowana                                                | wbudowana                                                                                                                                                                                                                                     |
| Komun. Bezprz.             | Bluetooth                                                | GPRS/CDMA, radiomodem UHF, Bluetooth                                                                                                                                                                                                          |
| Porty<br>komunikacyjne     | RS-232, 7-pin Lemo,<br>Dsub 9-pin                        | 2x RS-232, 2DC, UHF, USB, SIM                                                                                                                                                                                                                 |
| Kontroler /<br>rejestrator | zewnętrzny kontroler                                     | zewnętrzny kontroler                                                                                                                                                                                                                          |
| Typ rejestracji<br>danych  | CMR+, CMRx, RTCM<br>2.1, 2.3, 3.0, 3.1                   | CMR, CMR+, RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2                                                                                                                                                                                                  |

W oparciu o zarejestrowane punkty obwodnicy zbiornika, których błąd położenia pionowego (mh) był z przedziału  $<-0,03 \text{ m}; 0,03 \text{ m}>$ , wyaproksymowano płaszczyznę kontrolną zwierciadła wody w chwili pomiaru ( $\pi$ ). Przeprowadzono kontrolę dokładności obliczenia płaszczyzny, uwzględniając dokładność wpasowania powierzchni w punkty obwodnicy. Dokładność tę obliczono metodą najmniejszych kwadratów,

gdzie  $v$  (odchyłką) była odległość pionowa między wysokością praktyczną punktu obwodnicy a wysokością teoretyczną odpowiadającego mu punktu płaszczyzny; użyto wagowania na zasadzie odwrotności kwadratu błędu ( $m_p$ ) pojedynczego spostrzeżenia. Zdecydowano się na tą metodę, przyjmując założenie, że na zbiorniku tej wielkości różnice ciśnień nie powodują znacznych odkształceń zwierciadła wody. Znajduje to także potwierdzenie w analizie krzywizny fragmentu powierzchni elipsoidy ziemskiej odpowiadającemu obszarowi analizowanego zbiornika, czyli takiej elipsoidy obrotowej, której powierzchnia najwierniej odwzorowuje hydrostatyczną powierzchnię Ziemi [Tatarkowski 1974]. Aproksymacja zwierciadła zbiornika nie nastręcza tak wielu problemów jak aproksymacja stosowana w przypadku budowania modeli dna zbiorników, gdzie wykorzystuje się aproksymację schodkową oraz w zależności od pożądanego dokładności odpowiednie kryteria dopasowania [Ogrodniczak 2006]. Ponadto proponowana filtracja pozwala na eliminację wartości odstających, co redukuje wystąpienie anomalii wpływających na kształt krzywej regresji – krzywa będzie prostą, a tym samym nie będzie konieczne szukanie jej wzoru wśród rodziny krzywych płaskich [Korczak 2004].

Odbiornik V30 Hi-Target zamontowany został na specjalnie wykonanej konstrukcji przytwierdzonej do łodzi, która zapewniała stałość położenia centrum fazowego odbiornika satelitarnego w stosunku do przetwornika sondy. Dane uzyskane z odbiornika V30 Hi-Target zostały najpierw skorygowane o pionową odległość centrum fazowego anteny satelitarnej od nadajnika sondy w oparciu o wewnętrzny algorytm producenta po wprowadzeniu danych geometrycznych konstrukcji. Następnie dane poddano korekcie o głębokość zanurzenia przetwornika sondy i usunięto błędy grube. W tym celu posłużono się odległościami punktów od wartości średniej arytmetycznej. Biorąc pod uwagę brak stabilności jednostki pływającej oraz brak czynników naturalnych wzmagających falowanie powierzchni zbiornika, przyjęto jako wartość dozwolonych różnic  $\pm 0,35$  m, co znajduje potwierdzenie w istniejących badaniach [Gołuch i in. 2010]. Przyjęta wartość pozwala na udział w opracowaniu obserwacji, które mogą być w niewielkim stopniu zaburzone przez falowanie spowodowane ruchem łódki. W ten sposób uzyskano punkty wysokościowe teoretycznie znajdujące się na chwilowej płaszczyźnie lustra wody, rozmieszczone na całej powierzchni zbiornika (ryc. 1). Głębokość zanurzenia sondy przyjęto jako wartość stałą ze względu na niezmienność ciężaru łodzi oraz jej środka ciężkości. Pomierzona głębokość zanurzenia sondy wynosiła 0,25 m. W oparciu o zbiór współrzędnych  $Z_1$  otrzymany w tym etapie obliczono płaszczyznę aproksymacyjną ( $\pi_1$ ), wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. W kolejnym etapie zbadano, czy ograniczenie zbioru  $Z_1$  w oparciu o wartość odchylenia standardowego wpłynie istotnie na wyaproksymowanie płaszczyzny. W tym celu zbiór  $Z_1$  zawężono do  $Z_{S1}$ , którego punkty spełniają następujące kryterium:

$$Z_{S1} = \{(x, y, h) : (x_i, y_i, h_i) \in Z_1, |h_i - \bar{h}_1| < \sigma_{Z1}\} \quad (1)$$

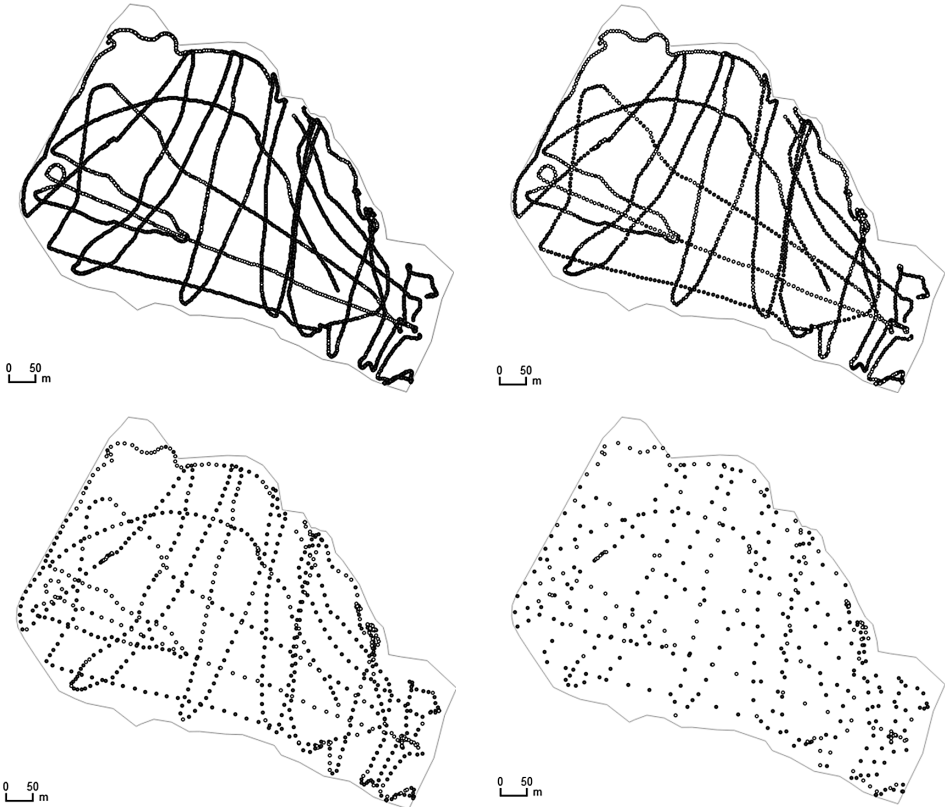
gdzie:

$h_i$  – wysokość punktu ze zbioru  $Z_1$

$\bar{h}_1$  – średnia arytmetyczna wysokość punktów ze zbioru  $Z_1$

$\sigma_{Z1}$  – odchylenie standardowe wysokości punktów ze zbioru  $Z_1$ .

Na podstawie zbioru  $Z_{S1}$  obliczono płaszczyznę  $\pi_{S1}$ . Powyższe etapy powtórzono także dla zbioru  $Z_1$  w przypadku redukcji interwału rejestracji danych do 2 s, 5 s i 10 s, czyli zbiorów  $Z_2$ ,  $Z_5$  i  $Z_{10}$ .



Ryc. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych z uwzględnieniem interwału rejestracji pomiaru: 1 s, 2 s, 5 s i 10 s

Fig. 1. Distribution of measurement points having regard to recording interval measurement: 1 s, 2 s, 5 s and 10 s

W ten sposób zbadano wpływ ilości obserwacji na dokładność określenia płaszczyzny zwierciadła wody.

$$Z_2 = \{(x,y,h): (x_1,y_1,h_1), (x_3,y_3,h_3), (x_5,y_5,h_5), \dots, (x_{n-2},y_{n-2},h_{n-2}), (x_n,y_n,h_n)\} \quad (2)$$

$$Z_5 = \{(x,y,h): (x_1,y_1,h_1), (x_6,y_6,h_6), (x_{11},y_{11},h_{11}), \dots, (x_{n-5},y_{n-5},h_{n-5}), (x_n,y_n,h_n)\} \quad (3)$$

$$Z_{10} = \{(x,y,h): (x_1,y_1,h_1), (x_{11},y_{11},h_{11}), (x_{21},y_{21},h_{21}), \dots, (x_{n-10},y_{n-10},h_{n-10}), (x_n,y_n,h_n)\} \quad (4)$$

Następnie każdy ze zbiorów ograniczono w oparciu o odchylenia standardowe otrzymując:

$$Z_{S2} = \{(x, y, h) : (x_i, y_i, h_i) \in Z_2, |h_i - \bar{h}_2| < \sigma_{Z2}\} \quad (5)$$

$$Z_{S5} = \{(x, y, h) : (x_i, y_i, h_i) \in Z_5, |h_i - \bar{h}_5| < \sigma_{Z5}\} \quad (6)$$

$$Z_{S10} = \{(x, y, h) : (x_i, y_i, h_i) \in Z_{10}, |h_i - \bar{h}_{10}| < \sigma_{Z10}\} \quad (7)$$

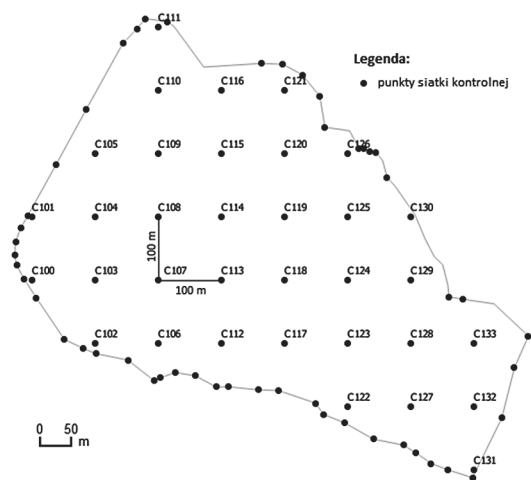
Dla wymienionych zbiorów również obliczono płaszczyzny  $(\pi_2, \pi_5, \pi_{10})$  zgodnie z wyżej przedstawioną procedurą. Wyznaczone płaszczyzny porównano pomiędzy sobą poprzez obliczenie średniego błędu określającego dokładność aproksymacji powierzchni zwierciadła wody. W tym celu obliczono wartości wysokości teoretycznych ( $h_\pi$ ) dla każdej płaszczyzny w punktach kontrolnych pokrywających regularnie powierzchnię zbiornika i jego obwód (ryc. 2) oraz wartości wysokości w oparciu o płaszczyznę kontrolną ( $h_c$ ). Wykorzystano formułę zaproponowaną przez Wysockiego [2008] do oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu:

$$M_h = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta h^2}{n}} \quad (8)$$

$$\Delta h = h_\pi - h_c \quad (9)$$

gdzie:

- $M_h$  – średni błąd dokładności aproksymacji powierzchni,
- $h_\pi$  – wysokość teoretyczna punktu na wyaprosymowanej płaszczyźnie,
- $h_c$  – wysokość punktu na płaszczyźnie kontrolnej.



Ryc. 2. Rozmieszczenie punktów siatki kontrolnej  
 Fig. 2. Distribution of the points of the control grid

Analizy dokładności przeprowadzono na współrzędnych płaskich w układzie 2000 strefa 6 oraz wysokościowych w układzie PL-KRON86-NH.

## WYNIKI

W oparciu o otrzymane zbiory współrzędnych opisujących chwilową płaszczyznę zwierciadła wody ( $Z_1, Z_2, Z_5$  i  $Z_{10}$ ) oraz przefiltrowane zbiory ( $Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S5}$  i  $Z_{S10}$ ) na podstawie odchylenia standardowego każdego ze zbiorów pierwotnych ( $\sigma_{Z1}, \sigma_{Z2}, \sigma_{Z5}$  i  $\sigma_{Z10}$ ) wyaproksymowano płaszczyzny:

$$\pi_1: h_i = 4,926318070 \times 10^{-5}x_i + 3,369875776 \times 10^{-5}y_i - 221,131 \quad (10)$$

$$\pi_2: h_i = 4,967745917 \times 10^{-5}x_i + 3,470917000 \times 10^{-5}y_i - 230,106 \quad (11)$$

$$\pi_5: h_i = 4,497883492 \times 10^{-5}x_i + 3,496014688 \times 10^{-5}y_i - 205,655 \quad (12)$$

$$\pi_{10}: h_i = 4,122575046 \times 10^{-5}x_i + 3,415299580 \times 10^{-5}y_i - 179,470 \quad (13)$$

$$\pi_{s1}: h_i = -0,370616908 \times 10^{-5}x_i + 1,378600427 \times 10^{-5}y_i + 204,692 \quad (14)$$

$$\pi_{s2}: h_i = -0,139989424 \times 10^{-5}x_i + 1,489752322 \times 10^{-5}y_i + 184,537 \quad (15)$$

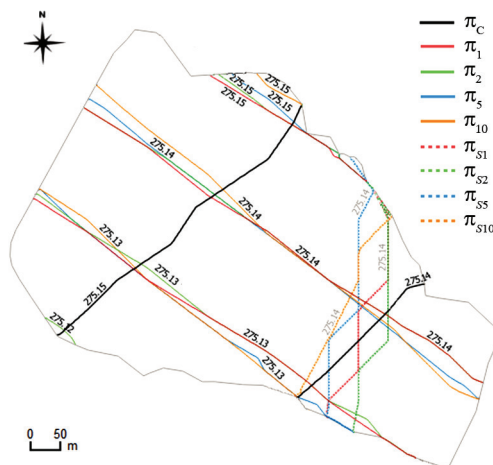
$$\pi_{s5}: h_i = -0,185004319 \times 10^{-5}x_i + 1,440399501 \times 10^{-5}y_i + 190,298 \quad (16)$$

$$\pi_{s10}: h_i = -0,846994226 \times 10^{-5}x_i + 1,299545693 \times 10^{-5}y_i + 236,383 \quad (17)$$

Wykorzystując wybrane punkty obwodnicy zbiornika z pomiaru kontrolnego, obliczono płaszczyznę kontrolną:

$$\pi_c: h_i = 2,149204374 \times 10^{-5}x_i - 2,047385351 \times 10^{-5}y_i - 290,928 \quad (18)$$

Dla każdego punktu kontrolnego (ryc. 2) określono wysokość chwilowego lustra wody wykorzystując wyznaczone płaszczyzny ( $\pi_1, \pi_2, \pi_5, \pi_{10}, \pi_{s1}, \pi_{s2}, \pi_{s5}, \pi_{s10}$ ). Następnie obliczono różnice wysokości ( $\Delta h$ ) pomiędzy płaszczyzną kontrolną a płaszczyznami określonymi w oparciu o dane z pomiaru batymetrycznego.



Ryc. 3. Interpolacja warstwicy dla płaszczyzn

Fig. 3. Interpolation contour for planes



Wyznaczono także dokładność wpasowania płaszczyzn w punkty pomiarowe, czyli punkty pochodzące z pomiaru batymetrycznego oraz pomiaru obwodnicy.

Tabela 2. Dokładność wpasowania płaszczyzn oraz ilość punktów biorących udział w obliczeniach  
Table 2. The accuracy of the fitting of planes and the number of points participants in the calculation

|                                              | $Z_1$       | $Z_2$       | $Z_5$       | $Z_{10}$    | $Z_{S1}$    | $Z_{S2}$    | $Z_{S5}$    | $Z_{S10}$   |
|----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Liczność                                     | 4072        | 2036        | 815         | 408         | 2854        | 1432        | 553         | 272         |
| %                                            | 100         | 50          | 20          | 10          | 70          | 70          | 68          | 67          |
| $h_{max}$ , m                                | 275,255     | 275,255     | 275,239     | 275,213     | 275,164     | 275,164     | 275,164     | 275,164     |
| $h_{min}$ , m                                | 275,024     | 275,024     | 275,044     | 275,051     | 275,110     | 275,110     | 275,112     | 275,112     |
| $R$ , m                                      | 0,231       | 0,231       | 0,195       | 0,162       | 0,054       | 0,054       | 0,052       | 0,052       |
| $h_{sr}$ , m                                 | 275,137     | 275,137     | 275,138     | 275,138     | 275,137     | 275,138     | 275,138     | 275,138     |
| $\sigma$ , m                                 | 0,028       | 0,028       | 0,028       | 0,027       | 0,014       | 0,014       | 0,014       | 0,014       |
| $\sigma_M$ , m                               | 0,0004      | 0,0006      | 0,0010      | 0,0013      | 0,0003      | 0,0004      | 0,0006      | 0,0008      |
| $M$ , m                                      | 275,137     | 275,138     | 275,138     | 275,138     | 275,138     | 275,138     | 275,138     | 275,138     |
| $V$ , m                                      | 0,0008      | 0,0008      | 0,0007      | 0,0007      | 0,0002      | 0,0002      | 0,0002      | 0,0002      |
| Średni kwadratowy błąd dopasowania $M_n$ , m |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Względem                                     | $\pi_1$     | $\pi_2$     | $\pi_5$     | $\pi_{10}$  | $\pi_{S1}$  | $\pi_{S2}$  | $\pi_{S5}$  | $\pi_{S10}$ |
| $\pi_C$                                      | $\pm 0,023$ | $\pm 0,023$ | $\pm 0,022$ | $\pm 0,022$ | $\pm 0,019$ | $\pm 0,019$ | $\pm 0,018$ | $\pm 0,019$ |
| $(x_i, y_i, h_i) \in Z_1$                    | $\pm 0,027$ | $\pm 0,027$ | $\pm 0,027$ | $\pm 0,027$ | $\pm 0,028$ | $\pm 0,028$ | $\pm 0,028$ | $\pm 0,028$ |
| $(x_i, y_i, h_i) \in Z_{S1}$                 | $\pm 0,016$ | $\pm 0,016$ | $\pm 0,016$ | $\pm 0,015$ | $\pm 0,014$ | $\pm 0,014$ | $\pm 0,014$ | $\pm 0,014$ |

## DYSKUSJA

Najbardziej problematyczne okazało się określenie poprawnego nachylenia wyznaczanych płaszczyzn zwierciadła zbiornika. Biorąc pod uwagę płaszczyznę kontrolną i jej nachylenie jako najbardziej wiarygodne, co zdaje się także potwierdzać zaobserwowany w trakcie pomiaru ruch powierzchni zbiornika, wskazano jako niepoprawne pod względem poruszanego kryterium płaszczyzny ( $\pi_1, \pi_2, \pi_5, \pi_{10}$ ). Nachylenie tych płaszczyzn jest wręcz prostopadłe do wskazanego jako poprawne (ryc. 3). Poprawę odwzorowania nachylenia obserwujemy w przypadku zastosowania filtracji danych w oparciu o odchylenie standardowe każdego zbioru. Nachylenie jest wtedy zgodne z nachyleniem płaszczyzny kontrolnej ( $\pi_C$ ), przebieg warstwicy jest zbliżony do równoległego (ryc. 3).

W przypadku obiektów charakteryzujących się niewielkim zróżnicowaniem morfologicznym dna przeprowadzone pomiary są zazwyczaj precyzyjne i cechuje je dokładność

rzędu 0,03 m, natomiast w strefach przybrzeżnych rzędu 0,19 m [Gołuch i in. 2010]. Dlatego w przypadku aproksymacji powierzchni lustra wody spodziewać się można dokładnych wyników, po odrzuceniu wartości skrajnych. Potwierdzają to otrzymane wyniki, średni błąd dopasowania wyaproksymowanych płaszczyzn względem zarówno płaszczyzny kontrolnej, jak i zbioru punktów bezpośrednio otrzymanego z pomiaru ( $Z_1$ ) oraz zawężonego na podstawie odchylenia standardowego z próby zbioru  $Z_{S1}$  nie przekroczył  $\pm 0,03$  m. Jak zauważa Ogrodniczak [2006], wartości głębokości punktów, które leżą w niewielkich odległościach od siebie nawzajem, przestają być od siebie niezależne. Dane te są wysoce skorelowane, a tym samym powielają tę samą informację. Dlatego też, filtracja polegająca na zmianie interwału rejestracji danych nie przyniosła znacznych różnic w otrzymanych wynikach wpasowania otrzymanych płaszczyzn w stosunku do płaszczyzny kontrolnej ( $\pi_C$ ). Dla płaszczyzn otrzymanych na podstawie zbiorów  $Z_1$ ,  $Z_2$  średni kwadratowy błąd dopasowania wyniósł  $\pm 0,023$  m, zaś dla  $Z_5$  i  $Z_{10}$  odpowiednio  $\pm 0,022$  m. Natomiast po zawężeniu wspomnianych zbiorów w oparciu o wartość odchylenia standardowego dokładność wpasowania wzrosła dla płaszczyzn  $\pi_{S1}$  i  $\pi_{S2}$  do  $\pm 0,019$  m i dla płaszczyzn  $\pi_{S5}$  i  $\pi_{S10}$  do  $\pm 0,018$  m. Zauważyć należy, że w przypadku wszystkich płaszczyzn otrzymanych w wyniku eksperymentu ich błąd średni względem punktów należących do zbioru  $Z_1$  i  $Z_{S1}$  jest taki sam niezależnie od ilości danych wykorzystanych do aproksymacji płaszczyzny. W opisanym eksperymencie istotne znaczenie ma to, czy płaszczyzna została obliczona w oparciu o zbiory przefiltrowane, czy też nie. Nachylenie płaszczyzn może być konsekwencją dokładności zastosowanej metody RTN. Ponieważ w przypadku użytej metody obserwuje się cykliczne zmiany wartości współrzędnej wysokościowej [Kudas i in. 2016]. Zjawisko to mogło spowodować wystąpienie nachylenia chwilowej płaszczyzny lustra wody. Jest to istotny problem, jeśli pomiar jest długotrwały, a trasa ruchu łodzi z sondą nieregularna. Poprawna płaszczyzna powinna posiadać małe nachylenie, co świadczyć będzie o spójności i dokładności danych z pomiaru batymetrycznego przy użyciu metody RTN.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stosując przedstawioną metodykę można otrzymać rzetelny poziom zwierciadła wody wyznaczony dla okresu wykonywania pomiarów batymetrycznych. Tym samym wykazano, że wykonywanie pomiaru kontrolnego jest nieobligatoryjne, jednakże może stanowić cenną informację korygującą. Filtracja danych w oparciu o odchylenie standardowe pozwoliła wyznaczyć poprawne nachylenie płaszczyzny zwierciadła zbiornika. W ten sposób otrzymać można płaszczyznę najbardziej zbliżoną do rzeczywistej powierzchni zbiornika. Otrzymane w wyniku filtracji danych płaszczyzny potwierdzają zaobserwowany w trakcie pomiaru kierunek falowania powierzchni zbiornika. Nie zaobserwowano, aby zmiana interwału rejestracji danych, a tym samym redukcja ich ilości wpłynęła istotnie na otrzymane płaszczyzny lustra wody.

Dane wykorzystane do badań są ściśle związane z danymi opisującymi dno zbiornika. Dlatego analizując dokładności wyznaczenia płaszczyzny zwierciadła oraz znając zależności pomiędzy punktami opisującymi płaszczyznę wody a danymi o głębokości dna, można wykryć i skorygować ewentualne błędy modelu dna. Jest to proces zalecany, gdyż

łatwiej wykazać błędy w stosunku do powierzchni płaskiej, za jaką uznać można przy pewnym uogólnieniu powierzchnię zwierciadła wody, niż względem zazwyczaj złożonej powierzchni dna zbiornika.

## PIŚMIENNICTWO

- Aktualizacja Programu Ochrony Środowiska dla Gminy Trzebinia na lata 2014–2017 z uwzględnieniem perspektywy na lata 2018–2021. 2014. Trzebinia. ss. 48
- Dąbrowski, M., Węglarczyk, S. (2005). Cyclical nature of fluctuations in the levels of lakes of Northern Poland. *Limnol. Rev.*, 5, 61–67.
- Gołuch, P., Dombek, A., Kapłon, J. (2010). Ocena dokładności danych uzyskanych z pomiaru batymetrycznego wykonanego echosondą Lawrance LMS-527C DF iGPS. *Arch. Fotogram., Kartogr. Teledet.*, 21, 109–118.
- Gradka, R., Kotlarz, P. (2013). Aspekt geodezyjno-prawny pomiaru rzeki w warunkach Ojcowskiego Parku Narodowego. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 1/IV/201, s. 311–320
- Konatowska, M., Rutkowski, P. (2008). Zmiany powierzchni i poziomu lustra wody Jeziora Kamińsko (nadleśnictwo doświadczalne zielonka) na przestrzeni ostatnich 150 lat. *Stud. Mat. Centr. Eduk. Przyr.-Leśnej*, 10, 2(18).
- Krauze-Tomeczyk, I., Ostrowski, J. (red.) (2006). *Hydronimy. T. 1. Cz. 2: Wody stojące. Komisja Nazw Miejscowości i Obiektów Fizjograficznych, GUGiK, Warszawa.*
- Korczak, A. (2004). Aproksymacja skończonego układu punktów płaszczyzny figurą będącą sumą punktu i prostej. *Badania Operac. Decyz.*, 2, 37–50.
- Lisowski, M. (2015). Synchronizacja danych batymetrycznych i pomiarów sytuacyjno-wysokościowych w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi śródlądowej i zagrożeń powodziowych. *Przeł. Geodez.*, 6, 12–17.
- Kudas, D., Szylar, M., Cegielska, K. (2016). Dobowy pomiar współrzędnych punktu metodą RTN GPS. *Episteme, Czas. Nauk.-Kult.*, 30, t. II, s. 511–524
- McHugh, C., Church, I., Kim, M., Maggio, D. (2015). Comparison of horizontal and vertical resolvable resolution between repetitive multi-beam surveys using different kinematic GNSS methods. *Intern. Hydrogr. Rev.*, 14, 7–18.
- Ogrodniczak, J. (2006). Metody przyrostowe w przetwarzaniu danych batymetrycznych – kryteria oceny dokładności dopasowania przebiegu aproksymującego do sygnału wejściowego. *Rocz. Geomat.*, 4(3), 165–172.
- Owerko, T., Ortyl, Ł., Kwartnik-Pruc, A., Ćwiąkała, P. (2011). Integracja technologii geodezyjnych na przykładzie pomiarów batymetrycznych, *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 4, 21–29.
- Popielarczyk, D., Tyszko, A., Kazimierzczak, R. (2012a). Analiza dokładności pozycjonowania GNSS z wykorzystaniem serwisów ASG-EUPOS dla potrzeb sondu hydroakustycznego. *Zesz. Nauk. Polit. Rzesz.*, 238, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 59, s. 265–276
- Popielarczyk, D., Kaźmierczyk, R., Grunwald, G. (2012b). Wyznaczenie pionowej składowej ruchu jednostki batymetrycznej w oparciu o techniki GNSS. *Zesz. Nauk. Polit. Rzesz.*, 238, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 59, 237–246.
- Popielarczyk, D., Templin, T. (2012). Opracowanie numerycznego modelu terenu dna jeziora Dargin na podstawie aktualnego sondu hydroakustycznego. *Zesz. Nauk. Polit. Rzesz.*, 283, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 59, 255–263.
- Tadeusz, P., Piwowar, S. (2005). Potok Chechło. [W:] J. Żelaziński, R. Wawręty. Ocena wybranych robót hydrotechnicznych finansowanych z pożyczki Europejskiego Banku Inwestycyjnego. TNZ, Oświęcim – Kraków, 26–27.
- Tatarkowski, J. (1974). *Geodezja wyższa. Skrypt dla szkół wyższych.* Wyd. II. AR, Kraków.

Wysocki, J. (2008). Zagadnienie metody oceny dokładności cyfrowych modeli terenu w aspekcie implantacji europejskiej dyrektywy INSPIRE. *Czas. Techn., Środowisko*, 2, 299–304  
www.trzebinia.pl [dostęp 27.05.2016]  
www.hi-target.pl [dostęp 27.05.2016]  
www.trimble.com [dostęp 27.05.2016]

## THE MODELING OF THE TEMPORARY PLANE OF WATER LEVEL DURING THE BATHYMETRIC MEASUREMENTS

**Abstract.** The research described in this article include an analysis of the accuracy of the assignment of temporary water level, based on bathymetric measurements. Data came from measuring with echo sounder Hi-Target HD380 integrated with satellite receiver Hi-Target V30. The area of research was Chechło Reservoir in the Trzebinia commune. Plane of the water level was determined using an approximation method of least squares. The impact of interval of the registration to determine the correctness of the plane was analyzed. The planes were compared with a control plane which was obtained on the basis of independent measurement of the circumference of the water reservoir using a satellite receiver. The results allowed to state that the control plane allows correct the inclination of the plane of the water, and its use can be facultative and not obligatory.

**Keywords:** bathymetry, approximation, plane, water surface, echo sounder, RTN

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.11.2016*

Do cytowań – For citation: Kudas, D., Czempas, T. (2016). Modelowanie chwilowej płaszczyzny zwierciadła wody w trakcie pomiarów batymetrycznych. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(4), 61–72.