

**WPLYW PRĘDKOŚCI
JEDNOSTKI HYDROGRAFICZNEJ
NA DOKŁADNOŚĆ UZYSKANYCH MODELI DNA***

**THE IMPACT OF THE HYDROGRAPHIC SHIP'S VELOCITY
ON THE ACCURACY OF SEABED MODELS**

Wojciech Maleika, Michał Pałczyński

Katedra Systemów Multimedialnych, Wydział Informatyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Słowa kluczowe: cyfrowy model terenu, sondaż batymetryczny, echosonda wielowiązkowa
Keywords: digital terrain model, bathymetric survey, multibeam echosounder

Wprowadzenie

Eksploatacja akwenów wodnych, zarówno związana z transportem, jak i eksploracją dna i zasobów pod dnem, wymaga szczegółowych danych przestrzennych, w szczególności dotyczących głębokości. Coraz częściej informacja ta jest wizualizowana i przetwarzana za pomocą narzędzi geoinformatycznych, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie głębszych i bardziej wszechstronnych analiz. W przeciwieństwie do obszarów lądowych, gdzie metody geodezyjne czy globalne systemy pozycjonowania pozwalają określić wysokość każdego punktu z dużą dokładnością, pomiar głębokości wciąż nie jest dziś ani dokładny ani tani, w dodatku na wielu akwenach szybko traci aktualność z uwagi na ciągłe zmiany rzeźby dna. Optymalizacja procesu pozyskiwania danych batymetrycznych, ze względu na dokładność i koszty, ma więc dużą wartość gospodarczą.

Obecnie jedną z najbardziej wydajnych i najdokładniejszych metod pomiaru głębokości jest sondaż z użyciem echosondy wielowiązkowej, który pozwala uzyskać zbiór punktów sondażowych pokrywający pas dna wzdłuż tzw. *profilu* czyli trasy, zwykle prostoliniowej, przebytej przez jednostkę hydrograficzną (Maleika i inni, 2010). Punkty ułożone są w linii, zwane dalej *liniami pomiarowymi*. Pomiar całego akwenu zwykle wymaga rejestracji wielu profili, planowanych jako ciąg odcinków, których układ zależy od kształtu akwenu. Ostateczny rozkład punktów pomiarowych zależy od kształtu dna, a także od parametrów echo-

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jak projekt badawczy nr N N526 073038.

sondy, np. liczby i kąta rozwarcia wiązek czy częstotliwości impulsów oraz od parametrów sondażu, takich jak prędkość jednostki czy układ profili.

Rejestracja akwenu za pomocą echosondy wielowiązkowej z reguły prowadzi do zgromadzenia bardzo dużej liczby punktów, które charakteryzują się nieregularnym rozkładem przestrzennym. Tego typu dane, ze względu na rozmiary i rozkład, nie nadają się do praktycznego wykorzystania, np. do wizualizacji, analizy czy przetwarzania. Zwykle dane sondażowe są przetwarzane do bardziej uporządkowanych struktur danych, jakimi są modele TIN (nieregularna siatka trójkątów) oraz GRID (regularna siatka kwadratów), zwane cyfrowymi modelami dna (DTM). Metody interpolacyjne modelowania GRID na podstawie danych pochodzących z sondy wielowiązkowej można znaleźć w pracach (Calder, Mayer 2003; Dinn i inni, 1995; Hamilton, 1980; Hammerstad i inni, 1993; Gao, 2001; Stateczny, 2004).

W artykule przedstawiono analizę czynników wpływających na dokładność uzyskanego modelu dna oraz wyniki szczegółowych badań wpływu prędkości jednostki dokonującej pomiarów z wykorzystaniem echosondy wielowiązkowej na dokładność tworzonych DTM.

Istota dokładności w modelowaniu dna morskiego

Najważniejszym parametrem w procesie modelowania dna morskiego jest jego dokładność, wyrażana jako błąd czyli różnica głębokości pomiędzy każdym z punktów w utworzonym modelu a głębokością rzeczywistą w tym miejscu. Całość prac sondażowych powinna być wykonana w taki sposób, aby możliwe było oszacowanie wartości tego błędu, a tym samym dokładności stworzonego modelu.

Na całkowity błąd modelowania wpływ mają poszczególne błędy powstające w kolejnych etapach modelowania, tj:

- błędy odczytu głębokości przez urządzenie pomiarowe (zależne m.in. od głębokości, rodzaju dna, modelu urządzenia – wartość zazwyczaj podawana jest przez producenta),
- błędy wynikające z przyjętych parametrów sondażu (prędkość jednostki pomiarowej, układ profili, parametry echosondy wielowiązkowej – trudne do oszacowania i zazwyczaj pomijane),
- błąd określenia pozycji (zależny od systemu pozycyjnego),
- błędy powstające w procesie modelowania DTM (dotychczas trudne do oszacowania i pomijane).

Konieczność oszacowania błędu całkowitego tworzonych modeli wynika z wymogu zachowania wysokiej wiarygodności map, a maksymalne dopuszczalne wartości błędów określone są przez przepisy Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej (IHO) (IHO, 1998).

Istotnym problemem w procesie wykonywania prac sondażowych jest brak możliwości precyzyjnego oszacowania dokładności modelowania. Wynika to z faktu, iż nie znamy faktycznego ukształtowania mierzonej powierzchni dna, a co za tym idzie nie możemy porównać utworzonego modelu do powierzchni pierwotnej. Określanie dokładności polega więc na oszacowaniu, a następnie zsumowaniu błędów, które powstają w poszczególnych etapach modelowania. Przyjmuje się najczęściej, iż błąd głębokości odpowiada dokładności pomiarowej urządzenia, która podawana jest przez jego producenta. Często pomijane są pozostałe składowe zakładając, że są na tyle małe, iż nie mają istotnego wpływu na błąd całkowity. W dostępnych publikacjach naukowych nie znaleziono żadnych prac, które badałyby szczegó-

łowo wpływ parametrów sondażu, a w szczególności prędkości jednostki na tworzony model powierzchni dna.

W ramach szerokich badań prowadzonych przez autorów, dokonywana jest analiza błędów powstających w różnych etapach prac sondażowych. W tym celu opracowano technikę *wirtualnego sondażu* wykorzystującą autorski symulator echosondy wielowiązkowej (Maleika i Pałczyński, 2008a, 2008b, 2011), dokonano analizy danych i szacowania błędów otrzymywanych z echosondy wielowiązkowej Simrad EM-3000 (Maleika i inni, 2010), a także badano różne metody tworzenia struktury GRID na podstawie danych pomiarowych i powstające w tym procesie błędy.

Prędkość jednostki w aspekcie dokładności modelowania

Dane źródłowe stanowią miliony punktów zbieranych w trakcie jednej sesji pomiarowej przez urządzenia hydroakustyczne. W przypadku powszechnie używanej echosondy wielowiązkowej, co pewien okres następuje zapisanie kilkudziesięciu (często powyżej 100) pojedynczych pomiarów, leżących na linii pomiarowej prostopadłej do kierunku płynięcia statku. Odległości pomiędzy kolejnymi liniami pomiarowymi zależą od częstotliwości echosondy (zazwyczaj stałej dla danego urządzenia, np. 10Hz) oraz prędkości statku, która ma wobec tego istotny wpływ na liczbę i rozkład punktów pomiarowych. Metodyka pomiarów sondażowych, z wykorzystaniem echosondy wielowiązkowej, została opisana w pracy (Hammerstad i inni, 1993). Na rysunku 1 zaprezentowano przykładowe rozkłady punktów pomiarowych, przy różnych prędkościach jednostki pomiarowej.

Można przyjąć, że w obecnych czasach, tam gdzie oczekiwana jest najwyższa dokładność, do akwizycji danych wykorzystywane są nowoczesne sondy wielowiązkowe, a model dna oparty jest na jednorodnej siatce kwadratów zwanej GRID.

Aby możliwe było badanie wpływu różnych parametrów sondażu na dokładność tworzonoego modelu, autorzy wykorzystują powierzchnie testowe o wysokiej rozdzielczości oraz symulator echosondy wielowiązkowej, który wykonuje wirtualne pomiary. Na podstawie tak pozyskanych danych tworzone są różne modele powierzchni (dla różnych parametrów wejściowych). Dzięki takiemu podejściu możliwe jest zarówno ilościowe, jak i jakościowe porównanie otrzymanej powierzchni w stosunku do powierzchni wzorcowej, a co za tym idzie szacowanie błędów powstałych w procesie akwizycji danych i modelowania struktury GRID.

Powierzchnie wzorcowe

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem 4 powierzchni testowych uzyskanych na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, które zostały zebrane przez jednostki Urzędu Morskiego w Szczecinie na obszarze kanału Piastowskiego oraz zatoki Pomorskiej. Powierzchnie te posiadają różnorodne ukształtowanie dna (rys. 2):

- *brama* – znaczne zmiany głębokości charakteryzujące się łagodnością form,
- *kotwicowisko* – dno płaskie, nie posiadające gwałtownych zmian głębokości,
- *obrotnica* – powierzchnia urozmaicona, z gwałtownymi uskokami głębokości oraz nietypowymi formami powstałymi w wyniku prac czerpanych,
- *wraki* – stosunkowo płaski obszar, na którym znajdują się wraki samochodów, przykład powierzchni z niewielkimi, nietypowymi obiektami.

Każda utworzona powierzchnia wzorcowa zapisana jest w strukturze GRID o rozmiarze 0,1 x 0,1 m i obejmuje obszar 200 x 200 m, z wyjątkiem powierzchni *wraki*, która ma rozmiar 700 x 250 m. Modele o takich parametrach można określić jako modele o wysokiej rozdzielczości.

Wirtualny sondaż

W celu wyznaczenia danych batymetrycznych, na podstawie których tworzono modele powierzchni, wykorzystano symulator sondy wielowiązkowej opracowany na Wydziale Informatyki ZUT (Maleika, Palczyński, 2008b). Jego działanie polega na symulacji ruchu jednostki pomiarowej zgodnie z zaplanowaną trasą oraz pobierania punktów pomiarowych (x, y, z) na podstawie wskazanej powierzchni wzorcowej, przy uwzględnieniu parametrów ruchu jednostki i charakterystyki działania echosondy. W symulatorze zaimplementowano także generator błędów pomiarowych, który opracowano opierając się o badania rzeczywistego rozkładu błędów echosondy Simrad EM3000 (Maleika i inni, 2010).

Procedura testowa

Podczas badań wykonano 20 wirtualnych sondaży, z następującymi parametrami pracy symulatora:

- prędkość jednostki: 2, 5, 8, 12 i 16 węzłów,
- parametry echosondy: liczba wiązek – 127, szerokość wiązek – 110 stopni, częstota sondowania – 10 Hz,
- układ profili: równoległe, zachodzące, 100% pokrycia badanej powierzchni,
- powierzchnie testowe: brama, kotwiczowisko, obrotnica, wraki.

Na podstawie danych batymetrycznych uzyskanych z każdego sondażu zbudowano modele GRID, z wykorzystaniem 3 metod interpolacji: kriging, metoda odwrotnych odległości (ang. *inverse distance to a power*), metoda średniej kroczącej (ang. *moving average*). Zakres i rozdzielczość uzyskanych modeli były zgodne z odpowiednimi parametrami modeli wzorcowych, dzięki czemu możliwe było ich bezpośrednie porównanie.

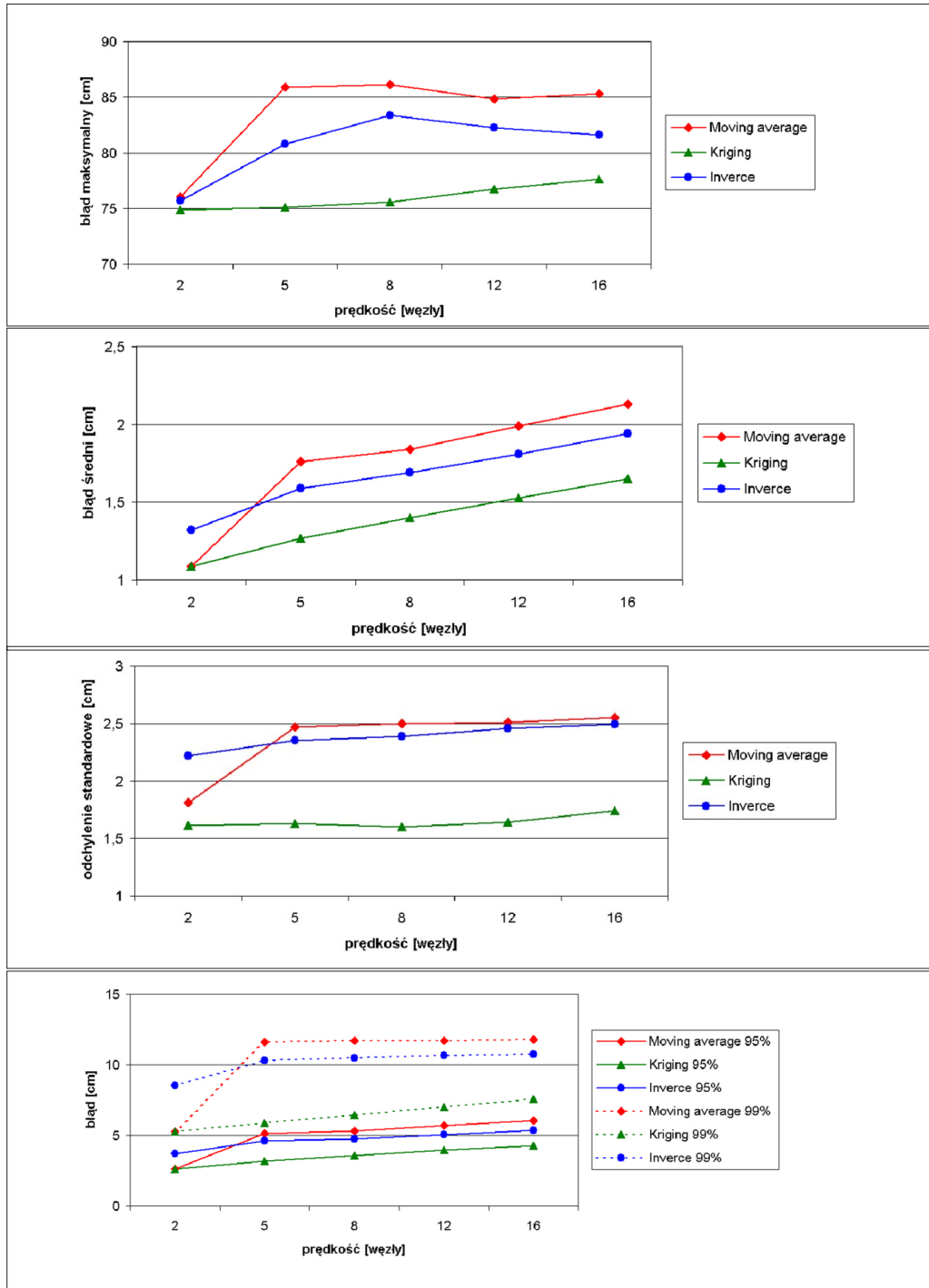
Dla każdego z uzyskanych 60 modeli wyznaczono tzw. *powierzchnie błędów* czyli macierze, opisujące błędy powstałe w procesie pobierania danych i ich modelowania. Analiza otrzymanych wyników polegała na wyznaczeniu błędu maksymalnego, błędu średniego, odchylenia standardowego oraz wartości błędu przy poziomie ufności 95 oraz 99%.

Wyniki

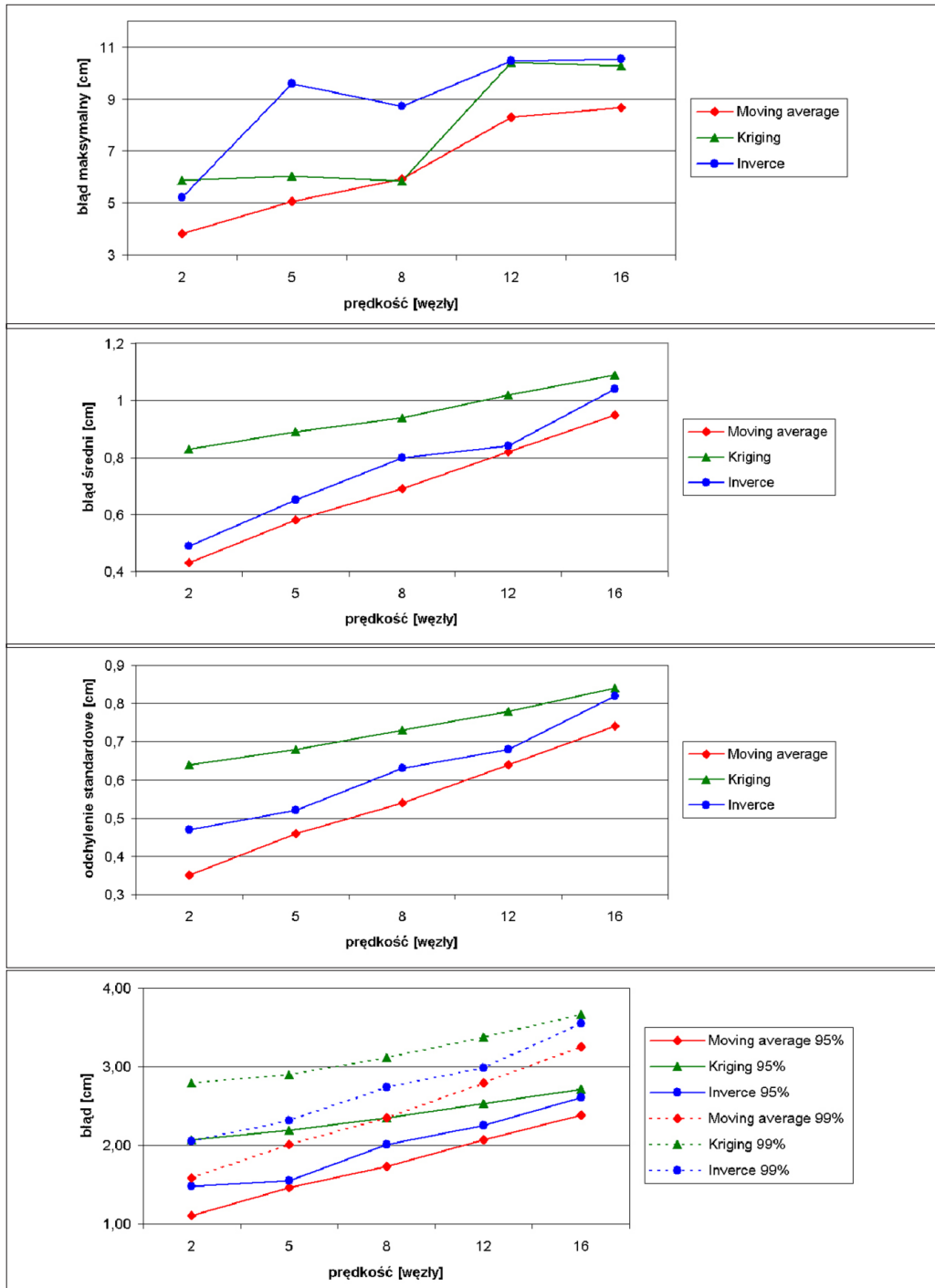
Niezależne wyniki otrzymano dla każdej z badanej powierzchni testowych. Rysunki 3-6 prezentują otrzymane wyniki odpowiednio dla powierzchni *brama*, *kotwiczowisko*, *obrotnica*, *wraki*.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników można stwierdzić, że:

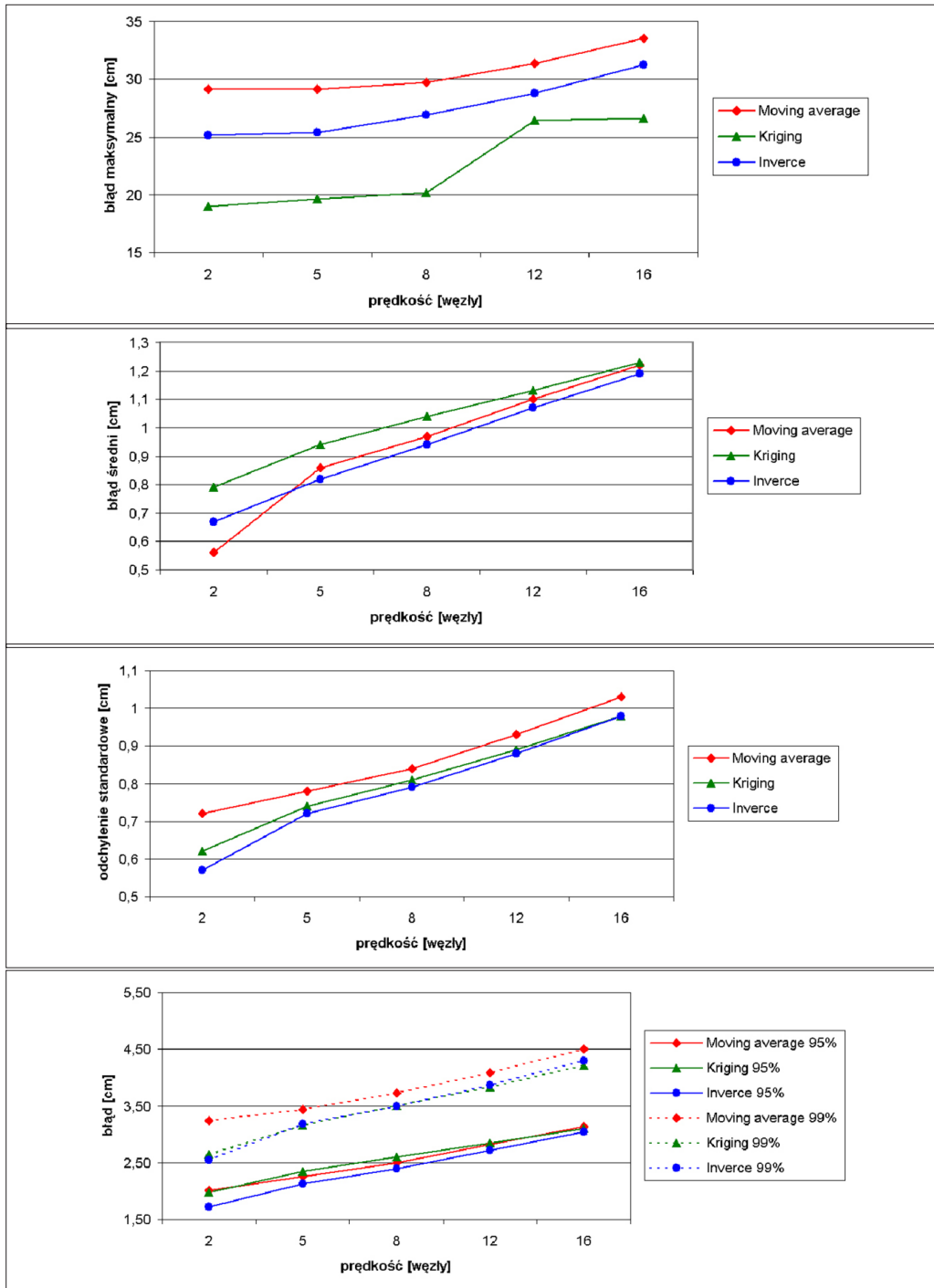
- błąd maksymalny w niewielkim stopniu zależy od prędkości przy której dokonuje się pomiaru i choć widać tendencje wzrostu błędu wraz z prędkością, to nie jest to zjawisko powtarzalne,
- wraz ze wzrostem prędkości rośnie wartość błędu średniego – uogólniając można przyjąć, że jest to zależność liniowa, jednakże przyrost tego błędu nie jest znaczny: pięciokrotny wzrost prędkości generuje wzrost błędu o 50%,



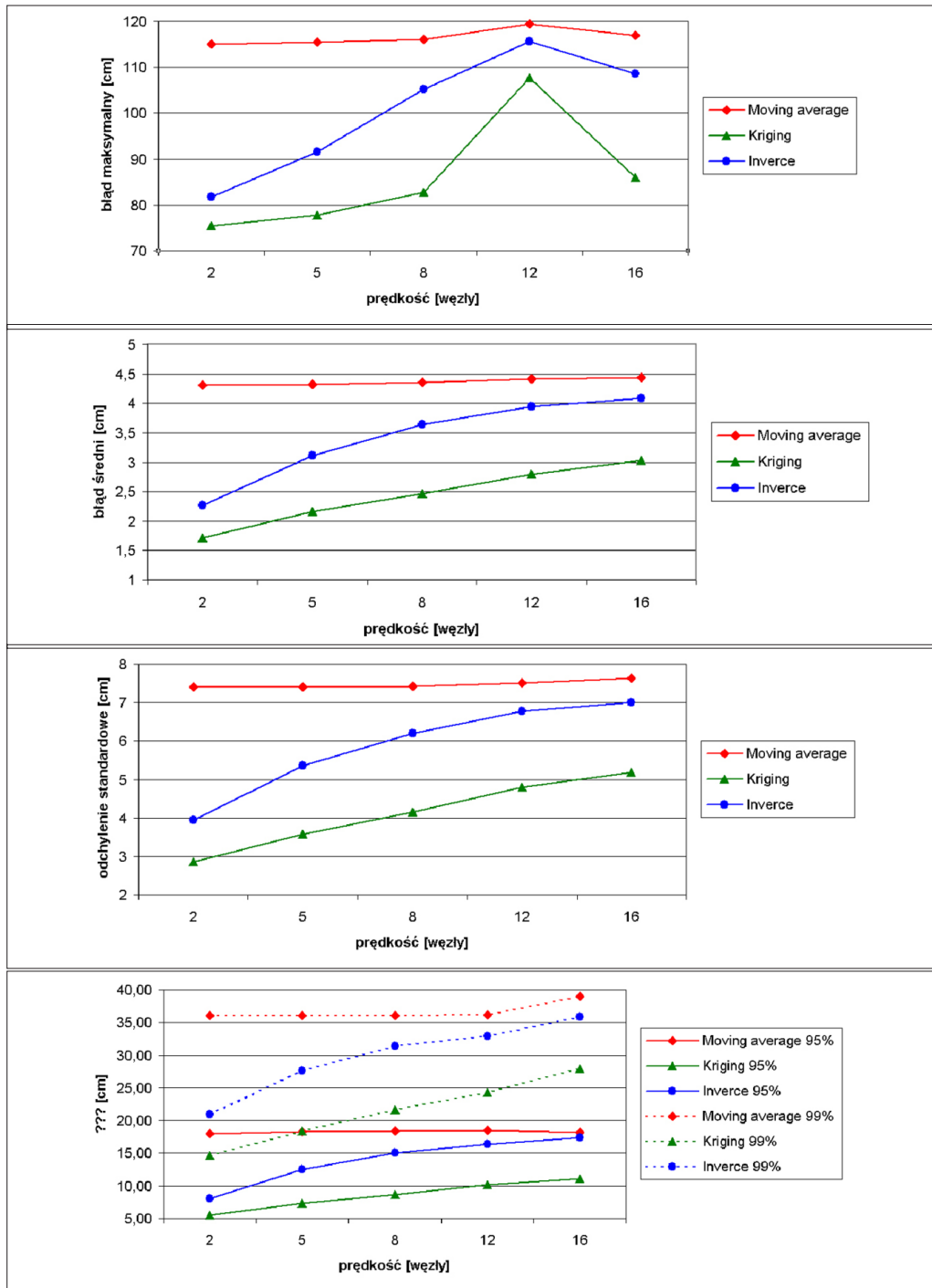
Rys. 3. Wyniki uzyskane dla powierzchni *brama*



Rys. 4. Wyniki uzyskane dla powierzchni kotwiczowisko



Rys. 5. Wyniki uzyskane dla powierzchni *obrotnica*

Rys. 6. Wyniki uzyskane dla powierzchni *wraki*

- błąd średniokwadratowy (MSE) również cechuje się niewielkim liniowym wzrostem wraz ze wzrostem prędkości jednostki pomiarowej,
- błąd przy poziomie ufności równym 95% kształtuje się na poziomie 2-3 cm dla powierzchni mniej urozmaiconych i 5-10 cm dla powierzchni o bogatych, zmiennych formach dna – wszystkie te wyniki mieszczą się w normach IHO,
- błąd przy poziomie ufności 99% kształtuje się na poziomie 3-5 cm dla powierzchni mniej urozmaiconych i 10-15 cm dla powierzchni urozmaiconych – wszystkie te wyniki także mieszczą się w normach IHO,
- można zauważyć że błąd średni rośnie tym szybciej wraz ze wzrostem prędkości, im bardziej nieregularne jest ukształtowanie dna (powierzchnia brama i wraki); w niektórych badanych przypadkach wzrost prędkości z 2 do 16 węzłów powodował wzrost błędu o blisko 100%,
- dla regularnych powierzchni (np. kotwiczowisko), nawet znaczny wzrost prędkości generuje nieznaczny wzrost błędów; w badanym przypadku wzrost prędkości z 5 na 16 węzłów spowodował wzrost błędu o ok. 60%, jednak wartości rzeczywiste tych błędów są bardzo niskie – ok. 1-2 cm,
- wzrost błędu wraz ze wzrostem prędkości jest podobny dla wszystkich trzech metod interpolacji,
- dla większości prędkości, powierzchni i metod interpolacyjnych 99% błędów była niższa od 12 cm (dopuszczalny błąd IHO wynosi ok. 20-25 cm dla badanych powierzchni); wyjątek stanowi jedynie powierzchnia wraki, gdzie błąd ten wynosi do 20 cm.

Na podstawie zebranych wyników można sformułować następujące wnioski i propozycje:

1. Znaczny wzrost prędkości powoduje zmniejszenie liczby punktów pomiarowych, na podstawie których następuje modelowanie powierzchni dna. Jest ich jednak nadal na tyle dużo, że wpływa to w niewielki sposób na dokładność rekonstrukcji, wszystkie wyniki mieszczą się w normach IHO. Można zatem stwierdzić, iż z tego punktu widzenia pomiarów można dokonywać przy możliwie dużych prędkościach jednostki pomiarowej, co pozwoli zaoszczędzić czas (nie bierzemy tutaj pod uwagę kosztów paliwa).
2. Największe błędy powstają na krawędziach mierzonych obszarów, zaleca się zatem dokonywanie pomiarów na nieznacznie większym obszarze (wystarczy kilka metrów) od tego który będzie modelowany.
3. W przypadkach gdy powierzchnia dna morza jest mocno urozmaicona, a my oczekujemy jak najprecyzyjniejszych wyników, zaleca się dokonywanie pomiarów przy niskich prędkościach (2-5 węzłów) co spowoduje wzrost dokładności modelu o ok. 50-100% (w stosunku do prędkości pomiarowej rzędu 10-16 węzłów).
4. Dodatkowo należy zauważyć, że badania prowadzone były w oparciu o modele GRID o rozdzielczości 0,1 x 0,1 m. W przypadku modeli o mniejszej rozdzielczości (np. 1 x 1 m), wpływ prędkości na dokładność może być jeszcze mniejszy.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dokładności modeli dna morskiego uzyskane na podstawie danych z echosondy wielowiązkowej w zależności od prędkości jednostki pokazują, że dokładność tworzonych modeli maleje nieznacznie wraz ze wzrostem prędkości. Z tego punktu widzenia pomiary mogą być dokonywane przy dowolnych prędkościach jednostki pomiarowej, także dużych, bez znacznego pogorszenia dokładności. Nie brano jednak tutaj pod uwagę właściwości samej echosondy wielowiązkowej i metody jej działania, a jedynie zmianę liczby i rozkładu punktów pomiarowych. Jedynie w sytuacji gdy oczekuje się najwyższej możliwej dokładności, zwłaszcza dla urozmaiconych powierzchni dna, powinno się dokonywać pomiarów przy prędkości poniżej 5 węzłów. Zaleca się modelowanie powierzchni z wykorzystaniem metody interpolacji *moving average* dla powierzchni płaskich lub lekko urozmaiconych albo *kriging* dla powierzchni bardziej urozmaiconych.

Dokładność wszystkich zbudowanych w czasie badań modeli była zgodna z normami IHO.

Szacując rzeczywistą wartość średniego błędu pomiaru można powiedzieć, że dla powierzchni mniej urozmaiconych jest on na poziomie 1 cm przy niższych prędkościach pomiaru oraz 2 cm przy prędkościach wyższych. Dla powierzchni bardziej urozmaiconych rośnie ona do wartości odpowiednio 2 i 4 cm. Należy stwierdzić, że są to dokładności wystarczające dla większości obecnych zastosowań modelowania.

Należy zauważyć, że w badaniach brano pod uwagę był jedynie rozkład punktów pomiarowych, błąd MSE pomiaru echosondy wielowiązkowej oraz dobór metody interpolacyjnej. W rzeczywistych pomiarach, na błąd modelowania przy różnych prędkościach zbierania danych, mogą wpływać także inne czynniki, takie jak: systemy pozycyjne, systemy stabilizacyjne, jak i sama konstrukcja echosondy. Autorzy planują weryfikację badań, dokonując rzeczywistych pomiarów tego samego obszaru przy różnych prędkościach statku badawczego.

Literatura

- Calder B.R., Mayer L.A., 2003: Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 4(6), 1048-1069.
- Dinn D.F., Loncarevic B.D., Costello G., 1995: The effect of sound velocity errors on multi-beam sonar depth accuracy, *Oceans '95. MTS/IEEE Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings*, vol.2, 1001-1010.
- Gao J., 2001: Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 11, issue 2, 199-212.
- Golden Software – Technologically Advanced Mapping and Graphing Software, <http://www.goldensoftware.com/>, may 2011.
- Hammerstad E., Asheim S., Nilsen K., Bodholt H., 1993: Advances in multibeam echosounder technology, *Oceans '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*, vol. 1, 1482-1487.
- Hamilton E.L., 1980: Geoacoustic modeling of the sea floor, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, issue 5, 1313-1340.
- IHO, 1998: IHO standards for hydrographic surveys, International Hydrographic Organization, Publication No. 44, 4th Edition.
- Lubczonek J., Borkowski M., 2010: Comparative analysis of digital seabed models prepared from single and multibeam sounding data, *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 19, No. 5, 1039-1043.
- Maleika W., Palczyński M. 2008a: Virtual multibeam echosounder in investigations on sea bottom modeling, *Metody Informatyki Stosowanej*, PAN o. Gdansk, vol. 4/2008, 111-120.
- Maleika W., Palczyński M., 2008b: Virtual marine sounding, *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 17, No. 4C, 312-316.

Maleika W., Pałczyński M., 2011: Opracowanie symulatora echosondy wielowiązkowej, *Biuletyn WAT*, No. 3/2011.

Maleika W., Pałczyński M., Frejlichowski D., Stateczny A., 2010: Analiza danych pomiarowych echosondy wielowiązkowej Simrad EM3000, *Metody Informatyki Stosowanej*, PAN o. Gdansk, No. 4/2010 (25), 55-64.

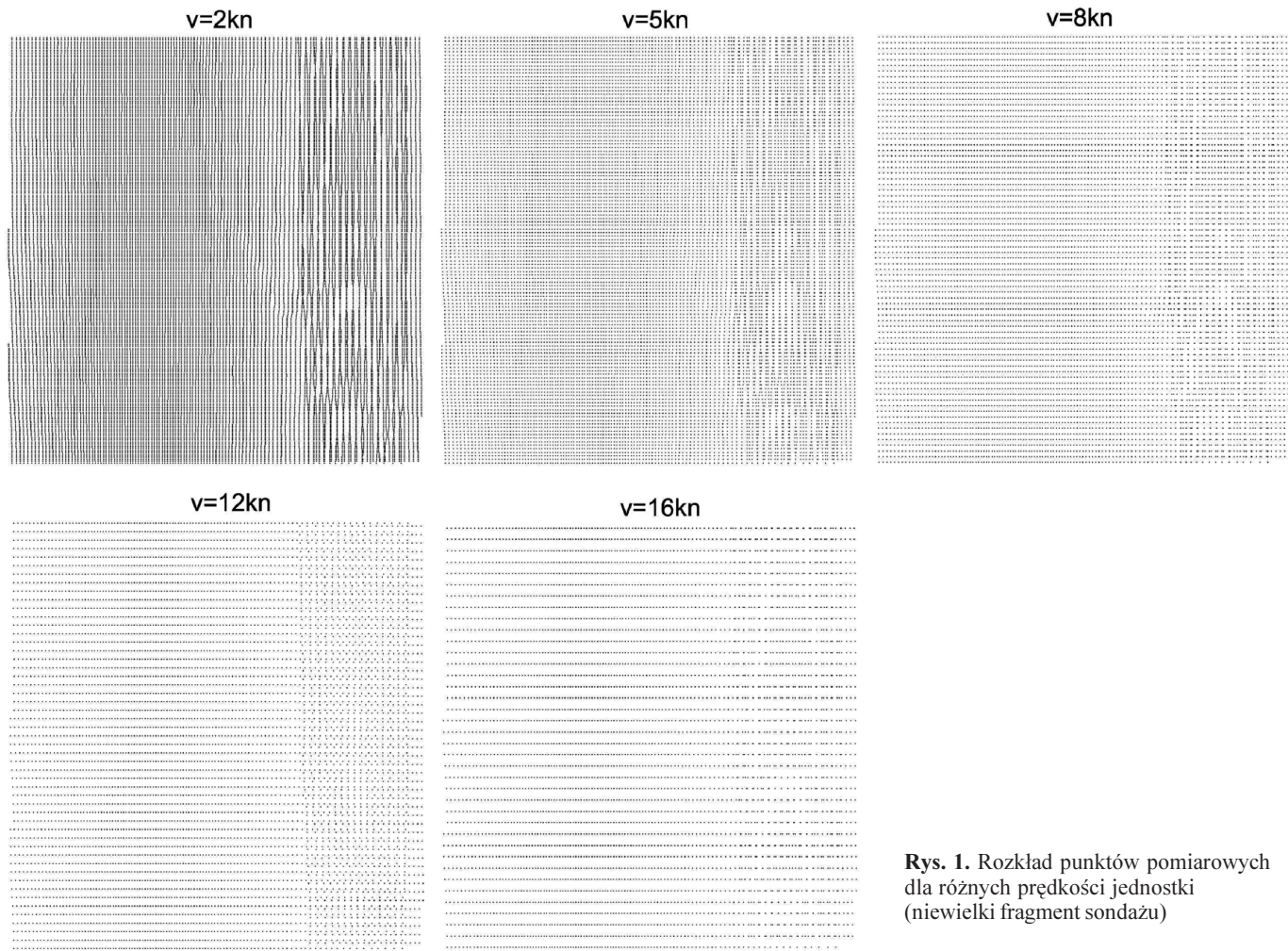
Stateczny A. (red.), 2004: *Metody nawigacji porównawczej*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk.

Abstract

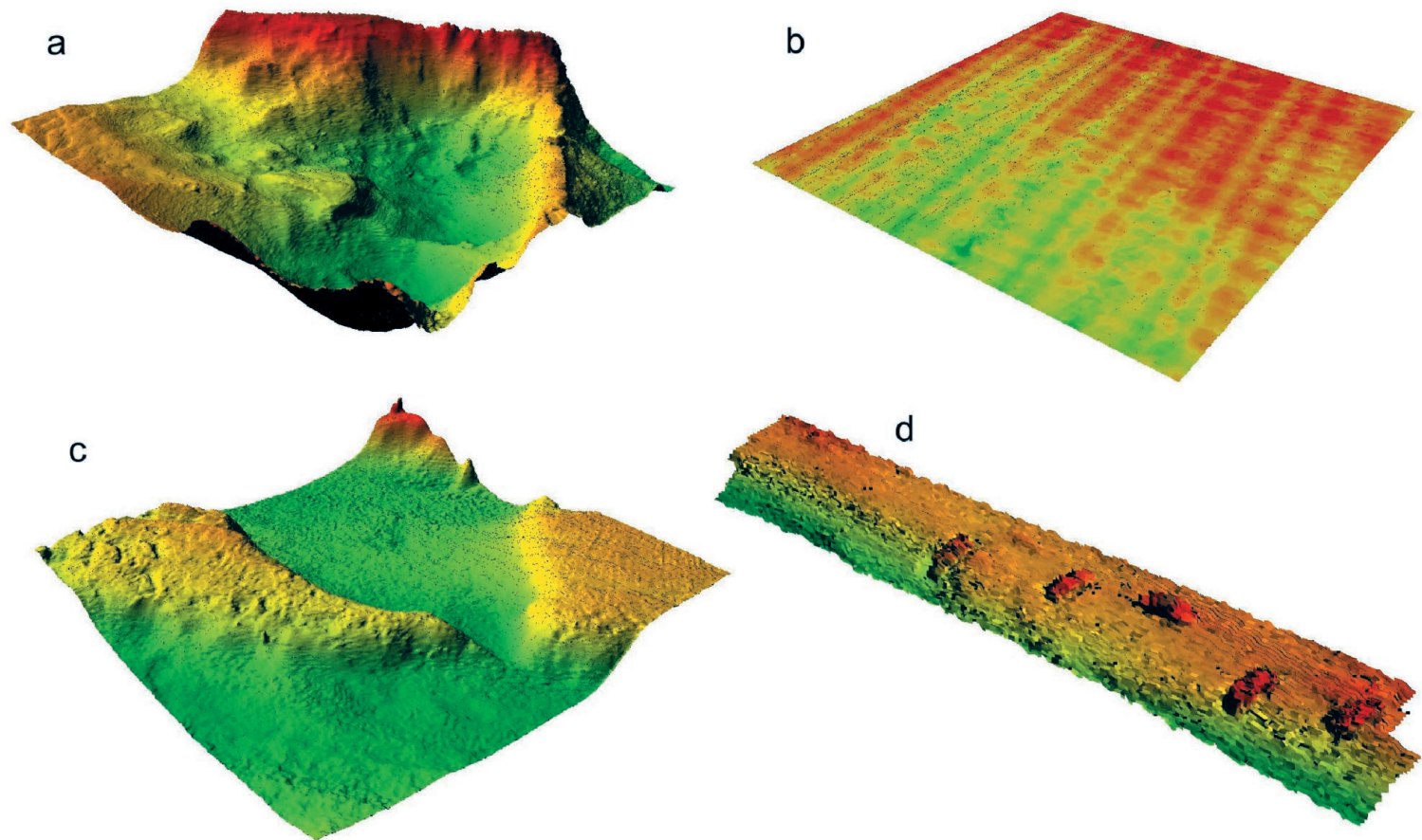
Maintenance of water areas such as ports, fairways, anchorages requires regular bathymetric measurements. In Poland, this task is performed by the Maritime Offices. At present, for this purpose mostly multibeam echosounders are used because of good accuracy of measurement. During a single survey, millions of measurement points are acquired. In order to process such data, DTMs (digital terrain models) are created, usually in the form of GRID network. The whole process of measurement and modeling should fulfill the requirements of IHO (International Hydrographic Organization), which define, among other things, the accuracy of maps based on DTMs. The error assessment, including errors made during data acquisition is thus one of the major problems in the modeling process. In the paper, parameters of the bathymetric survey affecting the accuracy of DTM are presented. During extensive investigations, the authors developed a simulation technique of the research, named virtual survey. It allows to examine the influence of individual parameters on the model accuracy. In the paper, the results of the influence of a hydrographic ship's velocity on the DTM accuracy are presented. To this end, surveys done with several speed values (2, 5, 8, 12 and 16 kn.), using 4 bottom areas, were simulated. Based on the obtained data, the models of the seabed were developed using 3 interpolation methods. Finally, the accuracy of each DTM was calculated, and compared to each other. In the conclusion, the authors interpreted the results and proposed guidelines for making real surveys. Extensive works of the authors, including these presented in the paper, are aimed at precise error assessment of the DTM and optimization of real surveys in terms of time, costs and data accuracy.

dr inż. Wojciech Maleika
wmaleika@wi.zut.edu.pl

dr inż. Michał Pałczyński
mpalczynski@wi.zut.edu.pl,
tel. 605 058377



Rys. 1. Rozkład punktów pomiarowych dla różnych prędkości jednostki (niewielki fragment sondażu)



Rys. 2. Powierzchnie testowe: a – brama, b – kotwicowisko, c – obrotnica, d – wraki