

**ANALIZA PORÓWNAWCZA
METOD MODELOWANIA POWIERZCHNI
W ASPEKCIE OPRACOWANIA
NUMERYCZNEGO MODELU DNA MORSKIEGO**

COMPARATIVE ANALYSE OF SURFACE MODELLING
METHODS WITH REGARD TO BUILDING
A NUMERICAL SEA BOTTOM MODEL

Jacek Łubczonek

Akademia Morska w Szczecinie

**Słowa kluczowe: metody modelowania powierzchni, numeryczny model dna, nawigacja
morska**

Keywords: surface modelling methods, digital seabed model, marine navigation

Wstęp

Obecny rozwój map nawigacyjnych coraz częściej jest związany z nowoczesnymi technikami pomiaru głębokości, które realizuje się z wykorzystaniem sond wielowiązkowych. Niewątpliwą zaletą tych urządzeń jest możliwość wykonania dokładnego sondażu, pokrywającego dno akwenu w sposób ciągły i charakteryzującego się wysoką gęstością punktów pomiarowych. Otrzymane w ten sposób dane umożliwiają zbudowanie dokładnego numerycznego modelu dna morskiego, który jest wyjściowym produktem do wyznaczenia izobat wykorzystywanych w mapach nawigacyjnych, czy przetwarzania danych w innych produktach związanych z wykorzystaniem danych batymetrycznych. W nawigacji morskiej, opracowanie numerycznego modelu dna z pomiarów wysokogęstościowych oznacza pozyskanie dokładniejszej informacji batymetrycznej. Uwidacznia się to w takich produktach jak mapy batymetryczne, które posiadają zwiększoną liczbę izobat generowanych dla mniejszych różnic głębokości, czy w nowszych rozwiązaniach implementujących trójwymiarową wizualizację dna morskiego (Łubczonek, 2005). Opracowanie standardów dla nowych produktów ujęte jest w nowych przepisach (IHO, 2005), które również poszerzają ich stosowalność w systemach map elektronicznych przeznaczonych dla żeglugi śródlądowej (InlandECDIS).

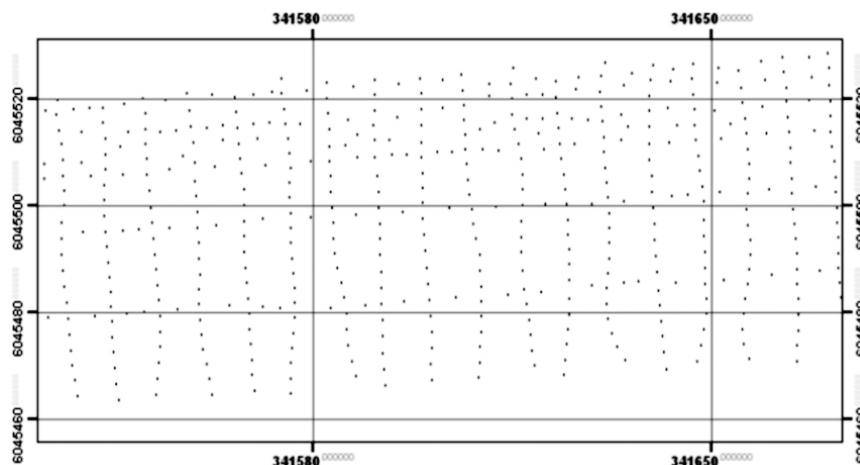
Odpowiednie opracowanie numerycznego modelu dna warunkuje pozyskanie dokładnej informacji batymetrycznej, wykorzystywanej w etapie końcowym, m.in. w mapach nawigacyjnych. W pracy skupiono uwagę na zbadaniu metod wykorzystywanych do budowy numerycznego modelu dna. Powodem podjęcia badań było dość znaczne zróżnicowanie

struktury zbiorów pomiarowych, zawierających dane wyjściowe do opracowania numerycznego modelu dna, a w etapie końcowym ustalenie jej wpływu na dokładność rekonstrukcji modelowanej powierzchni w zależności od zastosowanego algorytmu interpolacyjnego/aproksymacyjnego. Obszar badań zawężono do akwenów ograniczonych, w których wymagana jest największa dokładność określenia głębokości akwenu. Po przeprowadzeniu analizy porównawczej wybrano metody, za pomocą których opracowano numeryczny model dna z danych pochodzących z sondażu wysokogęstościowego.

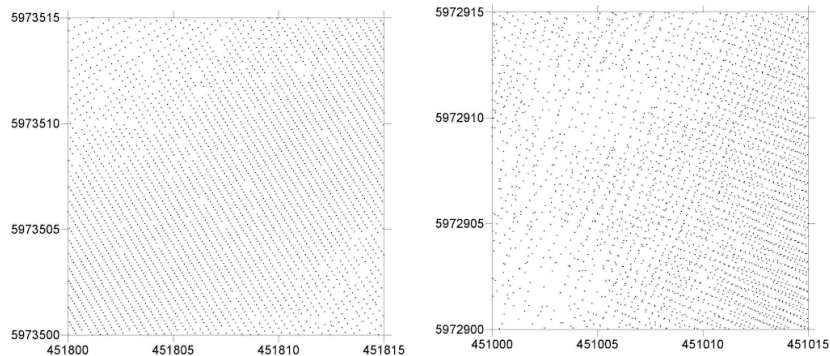
Struktura zbiorów danych

Obecnie podczas sondażu hydrograficznego mogą być wykorzystane sondy jedno- i wielowiązkowe. Sondaż z wykorzystaniem sondy jednowiązkowej jest zazwyczaj planowany w równoległych liniach pomiarowych, których odstępstwa zależą od typu akwenu. Dla akwenów ograniczonych (kanały, obszary ograniczone często zróżnicowaną geometrią nabrzeży) przyjmuje się 5–10 metrowe odstępstwa profili (mniejsze odstępstwa stosowane są podczas wykonywania sondażu przy nabrzeżach). Rozkład linii pomiarowych może się zmienić przyjmując układ promienisty, np. na zakolach toru wodnego. Dodatkowo stosowane są pomiary kontrolne, polegające na wykonaniu kilku pomiarów na liniach prostopadłych do planowanych profili. Dla tego typu pomiaru planowane linie pomiarowe wyznaczają główną strukturę rozkładu przestrzennego punktów pomiarowych w płaszczyźnie XY , który przybiera formę rozkładu regularnego. Zagęszczenie punktów pomiarowych na profilu jest uzależnione od częstości sondowania i prędkości jednostki hydrograficznej. Przykład sondażu wykonanego sondą jednowiązkową Simrad EA400 przy nabrzeżu (Stateczny, 2006) przedstawiono na rysunku 1.

W przypadku sondy wielowiązkowej jednostka hydrograficzna jest prowadzona po liniach pomiarowych, które powinny zapewnić częściowe pokrycie pasów sondażowych (szerokość pasa wyznaczają skrajne wiązki) i w ten sposób zapewnić stu procentowe pokrycie pomiarami dna. Tak zarejestrowane dane charakteryzują się zróżnicowanym rozkładem



Rys 1. Rozkład przestrzenny punktów pomiarowych – sondaż wykonany echosondą jednowiązkową



Rys 2. Przykładowe rozkłady przestrzenne punktów pomiarowych w sonaży wykonanej echosondą wielowiązkową

dem przestrzennym, natomiast gęstość danych zależy, oprócz częstości sondowania i prędkości jednostki, od ilości wiązek sondujących (np. sonda Simrad EM 3000 firmy Kongsberg przy zastosowaniu jednej głowicy sonaru posiada 127 wiązek, a przy zastosowaniu dwóch – 254). Przykład rozkładu danych przedstawiono na rysunku 2, przy czym na rysunku z lewej strony posiadają rozkład regularny, natomiast na drugim rysunku rozkład przybiera formę rozproszonego oraz regularnego o większej koncentracji danych na skutek nakładania się danych, w wyniku powtórzenia sonaży lub w części pokrywających się pasów sonażowych. Przedstawione rozkłady są najbardziej charakterystyczne dla analizowanych danych rzeczywistych, pochodzących z sonaży przeprowadzonego sonaży wielowiązkową Simrad EM 3000 na torze wodnym Szczecin-Świnoujście.

Struktura danych testowych

W pracy przeprowadzono analizę porównawczą metod modelowania powierzchni z wykorzystaniem powierzchni symulowanych (matematycznych). W celu zachowania zbliżoności do danych i powierzchni rzeczywistych zastosowano zbliżoną strukturę danych oraz kształty powierzchni. Z jednej strony stanowią one pewne uproszczenie danych i powierzchni rzeczywistych, z drugiej jednak umożliwiają efektywną ocenę dokładności odwzorowania powierzchni dzięki wykorzystaniu powierzchni matematycznych o znanym kształcie.

Do badań wybrano powierzchnie o trzech różnych kształtach, które reprezentują zróżnicowane poziomy nieregularności (rys. 13). Powierzchnia 1 reprezentuje powierzchnię nieregularną, która charakteryzuje się większą krzywizną. Stanowi ona zarazem jeden z trudniejszych przypadków modelowania, wynikający z występowania zróżnicowanych form – uskoki, lokalne wzniesienia lub zagłębienia. Powierzchnia 2 reprezentuje powierzchnię z nagłym spadkiem głębokości. Wybór takiej powierzchni wynika ze specyfiki kształtu dna na torach wodnych, gdzie nagły spadek powierzchni najczęściej związany jest z koniecznością ich pogłębienia w szerokości pasa ruchu statków. Podobne formy mogą wynikać również z naturalnego ukształtowania powierzchni, np. cieśniny, wąskie przejścia. Powierzchnia 3 reprezentuje ogólnie powierzchnię regularną, odpowiednią w większości przypadków dla akwenów otwartych, która charakteryzuje się mniejszą krzywizną oraz łagodnymi zmianami wartości głębokości.

Powierzchnie wzorcowe zbudowano w wykorzystaniem funkcji matematycznych odpowiednio dla powierzchni wzorcowej 1, 2, i 3:

$$f_T(x, y) = \frac{\tanh(9x - 9y) + 1}{9} + \frac{(\cos(5.4y))^2}{6(1 + (3x - 1)^2)}, \quad x, y \in [0.1, 1] \quad (1)$$

$$f_T(x, y) = \frac{\tanh(9x - 9y) + 1}{9}, \quad x, y \in [0.1, 1] \quad (2)$$

$$f_T(x, y) = \frac{1.25 + \cos(5.4y)}{6 + 6(3x - 1)^2}, \quad x, y \in [0.1, 1] \quad (3)$$

W celu przedstawienia wymiarów powierzchni w jednostkach metrycznych, co umożliwia wygenerowanie punktów pomiarowych zachowujących relacje przestrzenne w płaszczyźnie XY zgodne z rzeczywistymi pomiarami, przeskalowano wartości x, y tak, aby domena powierzchni wzorcowych była kwadratem o boku 100 m. Podobnie postąpiono z wartością głębokości $f_T(x, y)$, przeskalowując ją do ustalonych wartości, opisanych poniżej (w dalszej części pracy są oznaczone jako wartości funkcji $F(X, Y)$, gdzie $X, Y \in [1, 100]$).

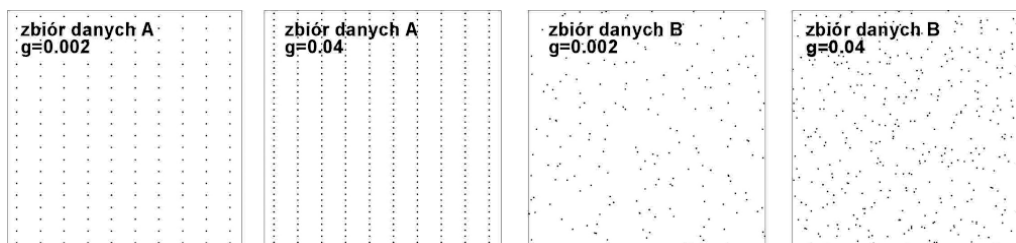
Zakres głębokości powierzchni wzorcowych dobrano odpowiednio do zakresu głębokości potencjalnie limitujących obszar żeglowny różnych typów statków. Obszar taki jest wyznaczony izobatą bezpieczeństwa i jest charakterystyczny dla obszarów ograniczonych. Wymiary geometryczne akwenu o bezpiecznej głębokości będą zależęć w zasadzie od aktualnego zanurzenia statku, które z kolei zależy od typu statku. Zakres głębokości akwenów wzorcowych dobrano zgodnie z przedziałem zanurzeń odpowiednich dla statków wymiarowo największych i najmniejszych. Według wykazu typowych rozmiarów statków (PIANC, 1997) największe zanurzenia mają tankowce typu ULCC (wyporność od 590 000 do 420 000 t) i zawierają się w przedziale od 22 do 24 m. Mniejsze zanurzenia mają statki pozostałych typów, o wyporności średnio od 4000 do 40 000 t, i są to wartości z przedziału od 5 do 10 m. W związku z tym określono, uwzględniając również ogólny zapas wody pod stępką, że głębokość dla powierzchni wzorcowych dochodzi do 30 m. Zmiany kształtu dna, odpowiednio do wymienionych zanurzeń, zawierają się w przedziale od 5 do 30 m. Wyjątek stanowi powierzchnia 2, reprezentująca pogłębione drogi wodne, dla której krzywizna zmienia się w mniejszym zakresie – od 5 do 15 m.

W badaniach zastosowano sześć typów rozkładów przestrzennych, które zestawiono w tabeli. Pierwszy rozkład (zbiór A) odpowiada pomiarom wykonywanym echosondą jednowiązkową, a następny (zbiór B) rozkładem rozproszonym (dane takie mogą być pozyskane np. na drodze digitalizacji sondaży z map nawigacyjnych). Rozkłady zbiorów danych C , D i E są rozkładami odpowiednimi dla sondy wielowiązkowej z wydzieleniem struktury regularnej, rozproszonej i odpowiedniej dla danych nałożonych na siebie. Gęstość danych symulowanych jest zbliżona do rzeczywistej gęstości danych pomiarowych. Dla pomiarów wykonywanych sondą jednowiązkową ustalono dwie gęstości – $g_1 = 0,002$, $g_2 = 0,04$, natomiast dla danych wysokogęstościowych $g_3 = 10$, $g_4 = 15$, $g_5 = 20$ (średnie gęstości ustalone na podstawie danych z sondażu toru wodnego Szczecin - Świnoujście). Rozkłady były generowane osobno dla każdego zbioru danych wykorzystywanych w badaniach, z zachowaniem warunku, że dane w zbiorze nie duplikują się.

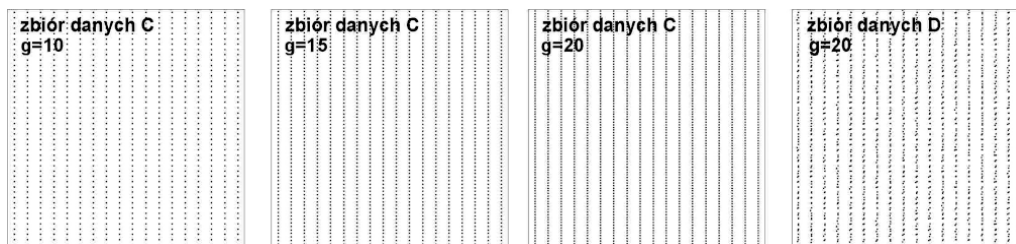
Rozkłady przestrzenne zbiorów danych symulowanych przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5.

Tabela. Charakterystyka danych symulowanych

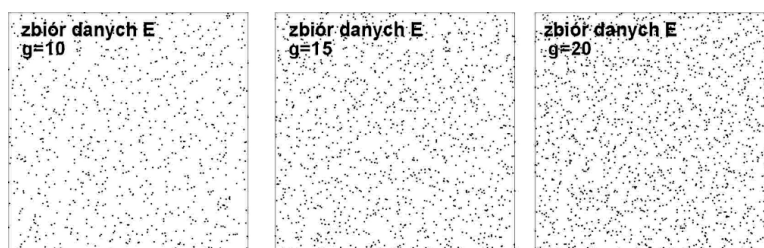
Oznaczenie zbioru danych	Symulacja danych	Rozkład	Gęstość (liczba punktów przypadająca na m ² domeny powierzchni)				
			g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A	sonda jednowiązkowa	regularny	$g_1=0,002$	$g_2=0,04$	–	–	–
B	inny	rozproszony	$g_1=0,002$	$g_2=0,04$	–	–	–
C	sonda wielowiązkowa	regularny	–	–	$g_3=10$	$g_4=15$	$g_5=20$
D	sonda wielowiązkowa	liniowy (dane nałożone)	–	–	–	–	$g_5=20$
E	sonda wielowiązkowa	rozproszony	–	–	$g_3=10$	$g_4=15$	$g_5=20$



Rys. 3. Rozkład przestrzenny punktów pomiarowych dla zbiorów danych A i B



Rys. 4. Rozkład przestrzenny punktów pomiarowych dla zbiorów danych C i D



Rys. 5. Rozkład przestrzenny punktów pomiarowych dla zbiorów danych E

Dodatkowo dane zostały obarczone błędem pomiaru. Podstawą do ustalenia wartości błędu były dane producenta echosond Simrad modeli EA 400 i EM 3000 oraz wymagania dotyczące dokładności pomiarów wg rezolucji IHO S-44 (IHO, 1998). W przypadku pierwszego modelu producent podaje dokładność od 1 do 5 cm, natomiast w przypadku drugiego jest to wartość wyrażona błędem RMS = 5 cm. Z kolei wg rezolucji, dla akwenów z minimalnym zapasem wody pod stępką (właściwych dla akwenów ograniczonych), granica błę-

du głębokości jest obliczana za pomocą wzoru i nie może być większa od 0,25 m. W związku z tym, aby ograniczyć liczbę eksperymentów, w badaniach przyjęto pośrednie wartości błędów pomiarów, które wynoszą odpowiednio: $e_2 = 5$, $e_3 = 10$, $e_4 = 15$, $e_5 = 20$ cm oraz dodatkowo dane nie obciążone błędem ($e_1 = 0$ cm). Błędy były generowane losowo dla każdego typu powierzchni, rozkładu przestrzennego i gęstości danych. W sumie otrzymano 165 zbiorów danych, z których budowano numeryczny model dna z wykorzystaniem wybranych algorytmów interpolacyjnych.

Metody modelowania powierzchni

Obecnie można wykorzystać wiele algorytmów interpolacyjnych/aproksymacyjnych do opracowania NMT, włączając w to metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe (Łubczonek, Stateczny, 2003a; Łubczonek, 2004). Do badań wybrano jednak metody, które są obecnie wykorzystywane przez większość programów umożliwiających opracowanie numerycznego modelu terenu. Metody te są znane z charakterystycznych cech, które można uwzględnić podczas budowy NMT. W związku z tym, że są szeroko przedstawione w literaturze przedmiotu (Franke, 1982; Renka, 1988; Stateczny, 2004), w pracy wymienione są tylko wartości parametrów poszczególnych metod:

- metoda odwrotnych odległości (ODW) – potęga odległości = 2, bez parametru wygładzania,
- triangulacja (TRI) – algorytm Delanaya,
- kriging (KRI) – model wariogramu teoretycznego,
- metoda naturalnego sąsiada (NAS),
- metody RBF (RBF) – bazowa funkcja *multiquadratic*, parametr kształtu był obliczony wg wzoru $R^2 = Q^2 / (25 * n)$, gdzie Q oznacza przekątną obszaru danych, natomiast n liczbę punktów,
- zmodyfikowana metoda Sheparda, ustawienie parametrów *Quadratic neighbors* = 16, *Weighting neighbors* = 19, bez parametru wygładzania.

Przy ustalaniu opcji metod, oprócz rekomendowanych wartości parametrów, wykorzystano wyniki wcześniejszych badań związanych z ich optymalizacją, które przeprowadzili m.in. J. Łubczonek (2003b) i J. Cynowska (2005).

Obliczenia zostały wykonane z wykorzystaniem programu *Surfer* (wersja 8.05) na platformie *WindowsXP*. W przypadku dostępnej opcji przeszukiwania danych ustawiono przeszukiwanie czterosektorowe, natomiast wartość obliczono z 24 najbliższych próbek (po 6 próbek na sektor). Wyniki dla pierwszych pięciu metod zestawiono na wykresach. W przypadku zmodyfikowanej metody Sheparda wystąpiły problemy z budową NMT z danych o rozkładzie regularnym, co dobrze ilustruje rysunek 14, na którym porównano powierzchnie modelowane z danych o różnym rozkładzie o tej samej gęstości (g_2). Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy jest to wina metody czy implementacji algorytmu w programie *Surfer*. Podobne problemy zasygnalizowano we wcześniejszych pracach (Franke, Nielson, 1992), gdzie zwracano uwagę na pewne rozbieżności wyników związanych z samą implementacją kodu różnych algorytmów. Niemniej jednak należy stwierdzić, że ta metoda wymaga dalszych badań, na podstawie których można będzie jednoznacznie określić stabilność metody podczas budowy NMT z różnych typów danych.

Wyniki i podsumowanie badań

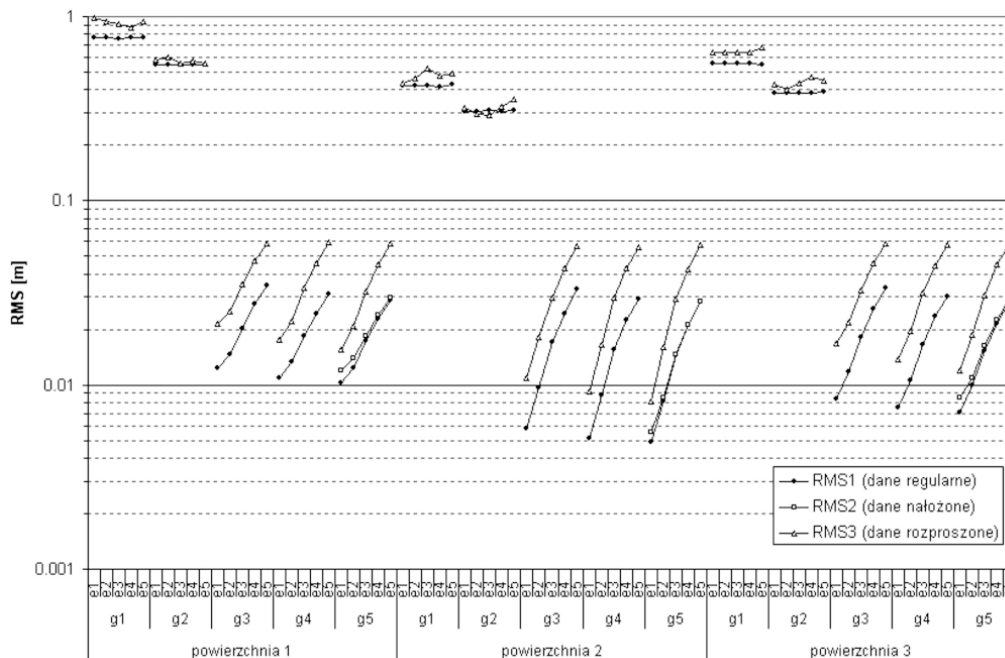
Do oceny dokładności odwzorowania powierzchni wzorcowych zastosowano, przyjęty w literaturze przedmiotu, pierwiastkowy błąd średniokwadratowy (*RMS*). W związku z tym, że stosując różne metody można oczekiwać pewnych charakterystycznych, często lokalnych zniekształceń, dodatkowo oceniano wizualnie kształty powierzchni. Błąd *RMS* był obliczony wg wzoru:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(X_i, Y_i) - F(X_i, Y_i))^2}$$

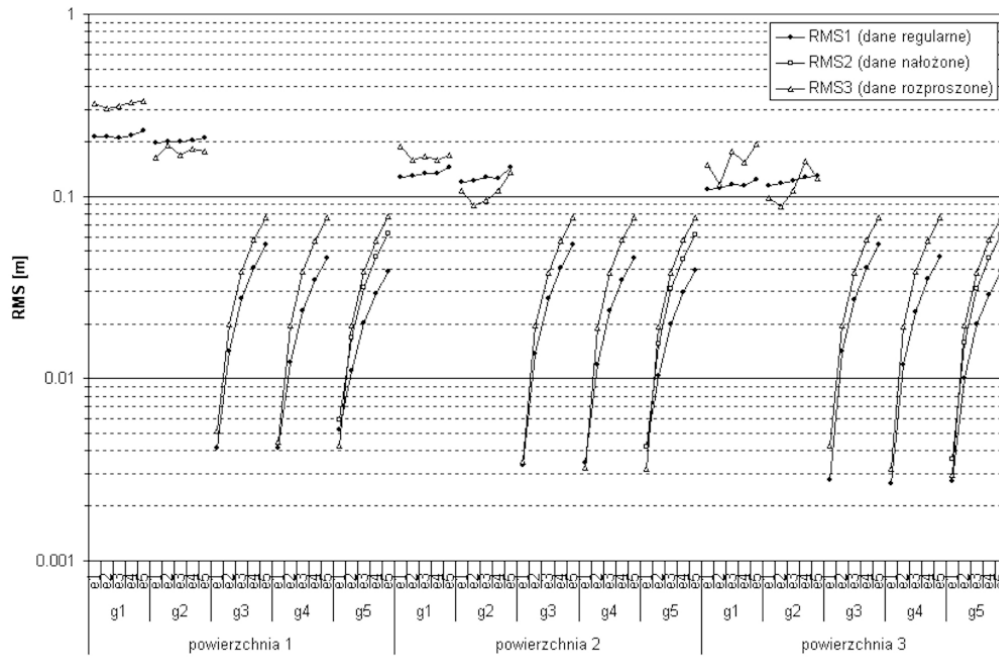
gdzie: $f(X, Y)$ oznacza funkcję reprezentującą algorytm interpolacyjny/aproksymacyjny; $F(X, Y)$ funkcję reprezentującą powierzchnię symulowaną (wzorcową); N liczbę węzłów interpolacji w obszarze domeny powierzchni (10 000 – przy rozdzielczości siatki 1 m w obszarze badań 100×100 m); x_i, y_i oznaczają współrzędne węzłów siatki.

Wyniki badań, zestawione dla każdej metody z pominięciem zmodyfikowanej metody Sheparda, przedstawiono na rysunkach 8–12 (na wykresach zastosowano skalę logarytmiczną).

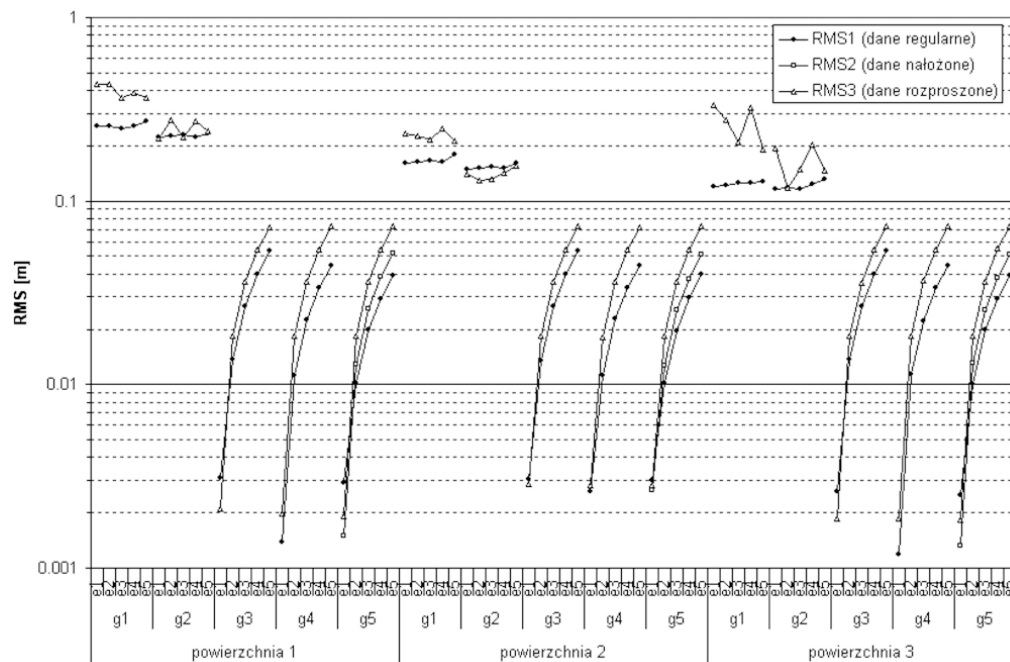
Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że w przypadku danych wysokogęstościowych (gęstość g_3, g_4, g_5) wzrost błędu *RMS* jest proporcjonalny do zwiększającego się błędów pomiarów. Wyjątek stanowi metoda triangulacji, która nie zachowuje tych zależności w przypadku danych rozproszonych (wykres RMS_3 ma tendencję do zmian skokowych).



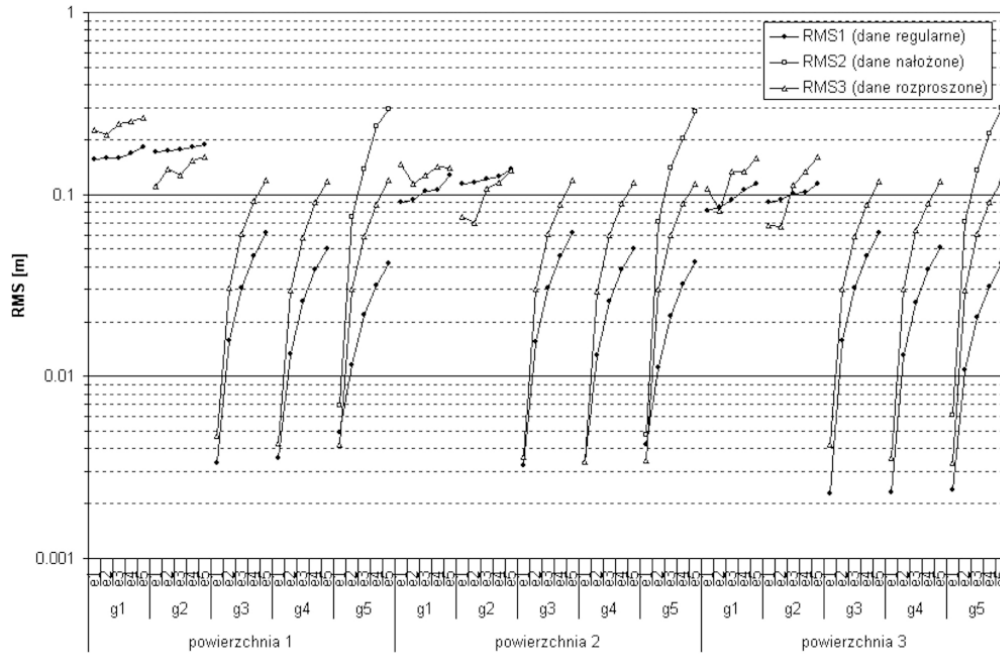
Rys. 6. Wartości błędów *RMS* dla metody odwrotnej odległości



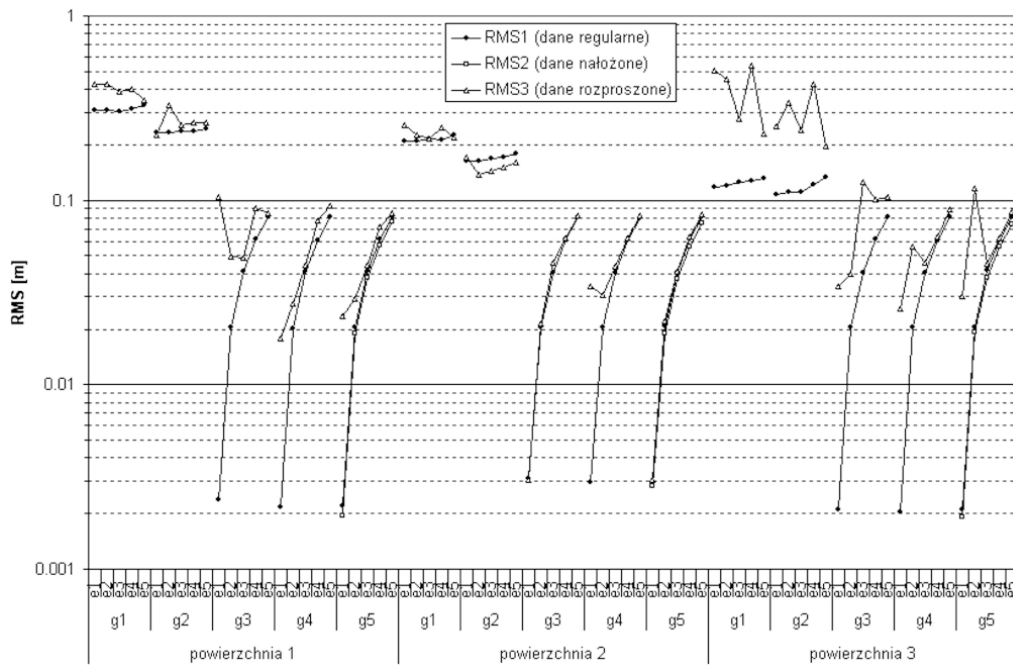
Rys. 7. Wartości błędów RMS dla krigingu



Rys. 8. Wartości błędów RMS dla metody naturalnego sąsiada



Rys. 9. Wartości błędów RMS dla metody RBF

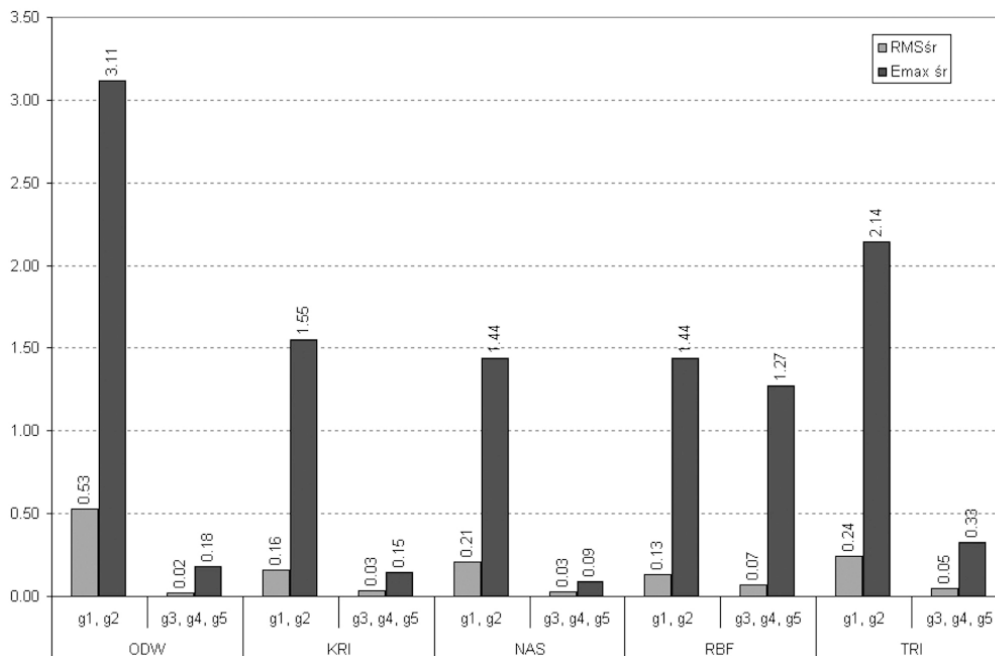


Rys 10. Wartości błędów RMS dla triangulacji

Metody różnie radzą sobie z rozkładem danych. Regułą jest to, że błąd odwzorowania NMT z danych regularnych jest zauważalnie mniejszy niż analogiczny błąd otrzymany z danych rozproszonych, chociaż znów wyjątek stanowi metoda triangulacji, gdzie różnice te są dość zmienne. Błąd RMS_2 (dane nałożone) jest większy od analogicznych błędów RMS_1 i RMS_3 tylko dla metody RBF (rys. 9), natomiast jego wartość jest zbliżona do błędu RMS_3 (dane rozproszone) w przypadku krigingu (rys. 7). Dla metody odwrotnej odległości i triangulacji wykres błędu RMS_2 jest bardzo zbliżony do wykresu błędu RMS_1 , natomiast dla metody naturalnego sąsiada ma on wartości pośrednie, pomiędzy błędem RMS_1 a RMS_3 . Analizując wszystkie wykresy błędów RMS można stwierdzić, że dla danych wysokogęstościowych ich wartości są zbliżone dla wszystkich typów powierzchni.

W przypadku danych o gęstości g_1 i g_2 rozkład błędów jest bardziej zróżnicowany. W przypadku danych o rozkładzie regularnym można zaobserwować jego stały wzrost wraz ze zwiększającymi się błędami pomiarów (e_i). Dla danych rozproszonych wykres RMS nie zachowuje takiej reguły – generalnie ma tendencję wzrostową, jednak momentami może się zmniejszać (dotyczy wszystkich metod). Generalnie błędy dla danych rozproszonych są większe niż analogiczne błędy dla danych regularnych. Analizując wszystkie wykresy błędów RMS można stwierdzić, że dla danych o gęstości g_1 i g_2 ich wartości są największe dla powierzchni 1, natomiast podobne dla powierzchni 2 i 3 (w przypadku triangulacji dla powierzchni 3 błędy RMS_1 są widocznie mniejsze od pozostałych).

Aby porównać wszystkie metody, zestawiono wartości średnich błędów RMS i maksymalnych (E_{max}) z wszystkich eksperymentów, dla danych wysokogęstościowych i o gęstości g_1 i g_2 na wykresie (rys. 11).

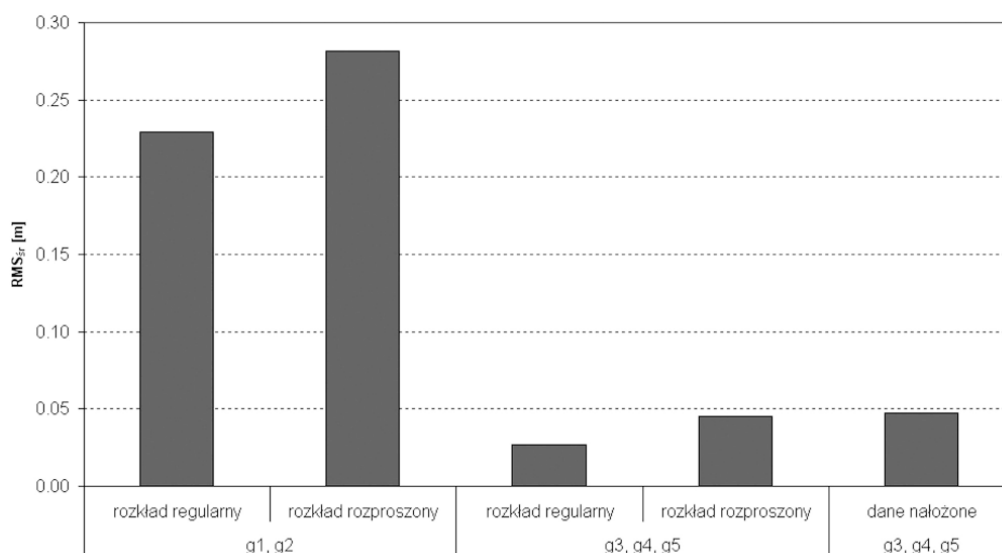


Rys. 11. Wartości średnich błędów RMS i maksymalnych (E_{max}) dla wszystkich metod

Z zestawienia tego wynika, że najmniejsze błędy dla danych wysokogęstościowych posiadają trzy metody: metoda odwrotnych odległości, kriging i metoda naturalnego sąsiada. Pierwsza metoda charakteryzuje się najmniejszymi błędami *RMS*, ale posiada największe błędy maksymalne. Najmniejsze błędy maksymalne osiąga z kolei metoda naturalnego sąsiada (należy tu jednak pamiętać, że metoda ta nie posiada właściwości ekstrapolujących w przeciwieństwie do dwóch pozostałych metod). Przykłady powierzchni testowych zrekonstruowanych tymi metodami przedstawia rysunek 15. Zauważalną cechą jest wzrost nieznacznie „pomarszczenia” powierzchni wraz ze wzrostem błędu e . Inaczej jest w przypadku danych o gęstości g_1 i g_2 . W tym przypadku najlepsze rezultaty otrzymano dla metody RBF oraz krigingu, nieco gorsze wyniki dla metody naturalnego sąsiada. Największe błędy odnotowano dla metody odwrotnej odległości. Przykłady powierzchni testowych zrekonstruowanych tymi metodami przedstawia rysunek 16. Dla krigingu i metod RBF modele powierzchni wizualnie są bardzo zbliżone do powierzchni symulowanych, natomiast w przypadku metody odwrotnych odległości czy triangulacji widoczne są znaczne zniekształcenia.

Ostatni wykres (rys. 12) ilustruje zależność błędu średniego *RMS* od rozkładu przestrzennego danych. Jak widać, dane o rozkładzie rozproszonym dają gorsze wyniki niż w przypadku danych o rozkładzie regularnym. Dla danych wysokogęstościowych nieco gorsze wyniki otrzymano dla danych nałożonych. Wykres wskazuje również, że budowa NMT z danych wysokogęstościowych daje nieporównywalnie lepsze wyniki niż w przypadku danych odpowiednich dla sondy jednowiązkowej.

Na podstawie otrzymanych wyników opracowano numeryczny model dna z pomiarów rzeczywistych, przeprowadzonych na torze wodnym Szczecin – Świnoujście. Do budowy NMT wybrano dwie metody – metodę odwrotnych odległości i kriging. Zbiór zawierał 3 913 949 danych, do budowy modelu zastosowano regularną siatkę o rozdzielczości 1 m; ustawienia metod były takie same jak w przypadku badań z wykorzystaniem powierzchni symulowanych. Widok powierzchni dna znajduje się na rysunku 17.



Rys. 12. Wpływ typu rozkładu przestrzennego danych na wielkość błędu *RMS*

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wybór odpowiedniej metody do opracowania NMT jest dość złożony. W przypadku numerycznego modelu dna podstawowym kryterium wyboru jest minimalizacja błędu aproksymacji modelu, co umożliwi pozyskanie dokładniejszej informacji batymetrycznej wykorzystywanej w różnych produktach powiązanych z hydrografią czy nawigacją. Wyniki badań wskazują, że wybór metody zależy w dużej mierze od gęstości danych. Doskonałym przykładem może być metoda odwrotnej odległości, która przyniosła najgorsze wyniki dla danych o gęstości g_1 i g_2 , natomiast dla danych o dużej gęstości okazała się jedną z lepszych metod. Przeciwstawieniem z kolei może być metoda RBF, za pomocą której otrzymano najlepsze wyniki modelując powierzchnię z danych o gęstości $g < 1$, natomiast niezbyt dobrze radziła sobie z danymi wysokogęstościowymi, które nakładały się na siebie. Kształt powierzchni ma większy wpływ na dokładność odwzorowania powierzchni w przypadku danych o mniejszej gęstości, natomiast dla pomiarów wysokogęstościowych jej wpływ jest już znikomy.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pewną uniwersalnością charakteryzuje się kriging, który dobrze radzi sobie z budową NMT z danych o zróżnicowanym rozkładzie i gęstości. Do budowy NMT z danych wysokogęstościowych można wykorzystać także metodę odwrotnej odległości, która przynosi równie dobre wyniki, będąc przy tym metodą szybkoobliczeniową (posiada prosty wzór matematyczny) oraz metodę naturalnego sąsiada. W przypadku danych o mniejszej gęstości (g_1 i g_2) za najbardziej efektywne metody można uważać metodę RBF z funkcją bazową *multiquadratic* oraz kriging.

Literatura

- Cynowska J., 2005: Opracowanie numerycznego modelu dna w aspekcie przetwarzania i wizualizacji danych batymetrycznych na cyfrowych mapach nawigacyjnych, praca dyplomowa napisana pod kierunkiem J. Łubczonka, Akademia Morska, Szczecin.
- Franke R., 1982: Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods, *Mathematics of Computation*, Vol. 38, No 157.
- Franke R., and Nielson G., 1992: Scattered Data Interpolation an Application: A Tutorial and Survey, Geometric Modelling, Methods and Application, Hagan and Roller, eds., Springer-Verlag.
- IHO, 1998: IHO Standards for Hydrographic Surveys, International Hydrographic Organisation (IHO), Special Publication No 44, 4th Edition.
- IHO, 2005: The Next Edition of IHO S-57 (4.0), Version 1.1.
- Łubczonek J., Stateczny A., 2003: Concept of Neural Model of the Sea Bottom Surface, Advances in Soft Computing, Proceedings of the Sixth International Conference on Neural Network and Soft Computing, Zakopane, Poland, June, 11-15, 2002, Rutkowski, Kacprzyk, Eds., Physica-Verlag, Berlin 2003.
- Łubczonek J., 2003: Matematyczne modelowanie kształtu dna morskiego dla potrzeb trójwymiarowej morskiej mapy numerycznej, rozprawa doktorska, Akademia Morska w Szczecinie.
- Łubczonek J., 2004: Lecture notes in artificial intelligence, 7th International Conference on Neural Networks and Soft Computing, Zakopane, Hybrid Neural Model of the Sea Bottom Surface, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, Springer-Verlag Berlin 2004, Volume 3070/2004, str. 1154-1160.
- Łubczonek J., 2005: Morska mapa elektroniczna z trójwymiarowym zobrazowaniem informacji nawigacyjnej, *Roczniki Geomatyki*, tom III, z. 2, III Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacyjne, Warszawa.
- PIANC, 1997: Approach Channels a Guide for Design, Final report of the joint Working Group PIANC and IAPH, Supplement to Bulletin no 95.
- Renka R.J., 1988: Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 14, No. 2.

- Stateczny A., 2004: Metody nawigacji porównawczej, Rozdział 6: Modele powierzchni terenu (A. Stateczny, J. Łubczonek), praca zbiorowa, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk.
 Stateczny A., 2006: Dane z pomiarów sondą jednowiązkową przeprowadzone w porcie Gdynia.

Summary

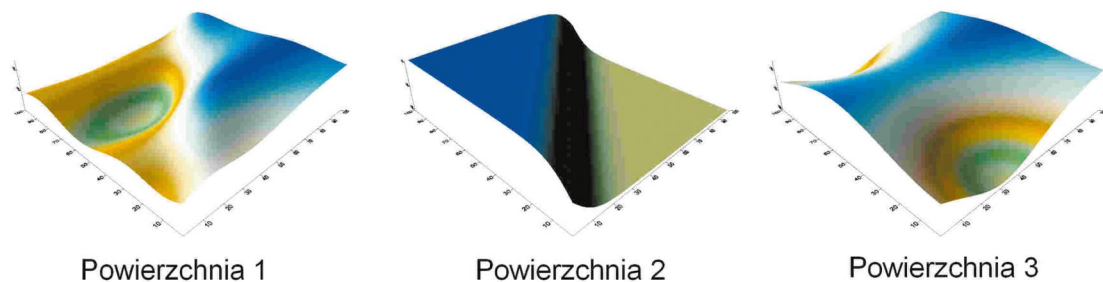
One of the basic information used in marine navigation is bathymetric information, which allows determining safe navigation water area. Presently, it is not only used in ship handling but also in coastal systems of port management or dynamic prediction of under keel clearance systems for precise assessment the ship draught. The bathymetric information such as soundings, contour lines, depth areas, is the basic content of paper or electronic charts. In the case of the latter, we can observe a steady trend to implement three-dimensional presentation of seabed, either on the level of conception project or in commercial products (charts used in fishing and marine navigation). We should also remember about new products such as bathymetric charts, which will be a part of marine maps or charts used in inland shipping (InlandECDIS).

Current development of technology has changed the way of collecting and processing bathymetric data. By using multibeam echo sounders hydrographs can collect high density data points. This had a strong influence on development of marine charts and related products. Application of modern remote sensing allows, on the one hand, for 100 % coverage of the sea bottom by sounding but, on the other hand, requires proper processing of data points for building a numerical model of sea bottom. This final phase is very important because it decides on the accuracy of bathymetric information.

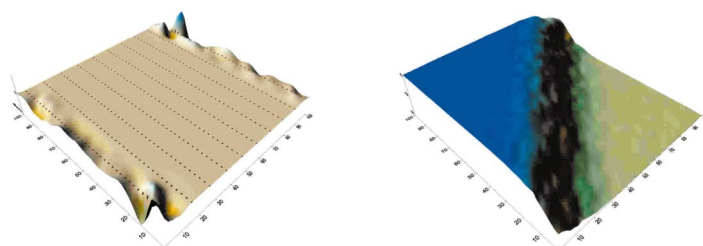
Elaboration of numerical models of seabed is complicated, first of all, by large data sets, which can consist of billions of data points or more. In many programs, which implement code for DTM elaboration we can find general recommendations, which not always make it possible to select proper modeling methods. Additionally, application the two techniques of data collecting – by using multi and singlebeam echo sounders poses certain problems. The first one is rather obligatory for most port areas, while the second is also used for controlling and updating seabed bathymetry. While elaborating DTM of seabed we can have low density data sets with regular spatial distribution (data registered by singlebeam echo sounders) or high density data sets with differential spatial distribution (data registered by multibeam echo sounders)

This paper shows comparative analysis of surface modeling methods including many factors having influence on the final error of model approximation. Apart from including influence of surface shape, the study also focused on influence of measurement data density and structure, adequate for applied technique of bathymetric data collecting. During research simulated mathematical surfaces were used, which enable to asses and determine the error of surface approximation. Numerical terrain models were built by using triangulation, weighted average methods, kriging, methods based on radial basis functions and others, applied during geographical surface modeling. The analysis explains the complexity of the process of creating a seabed numerical model with regard to elaborating a model accurately representing the real surface. The results of the research can be useful during DTM of the sea bottom creation or in elaborating models from data points with similar density and structure.

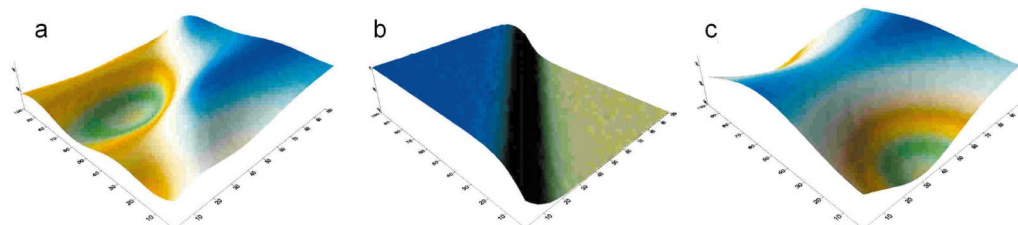
dr Jacek Łubczonek
 jaclub@am.szczecin.pl



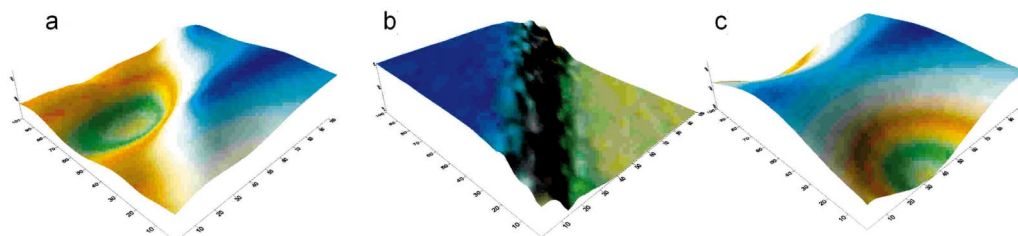
Rys. 13. Kształty powierzchni testowych



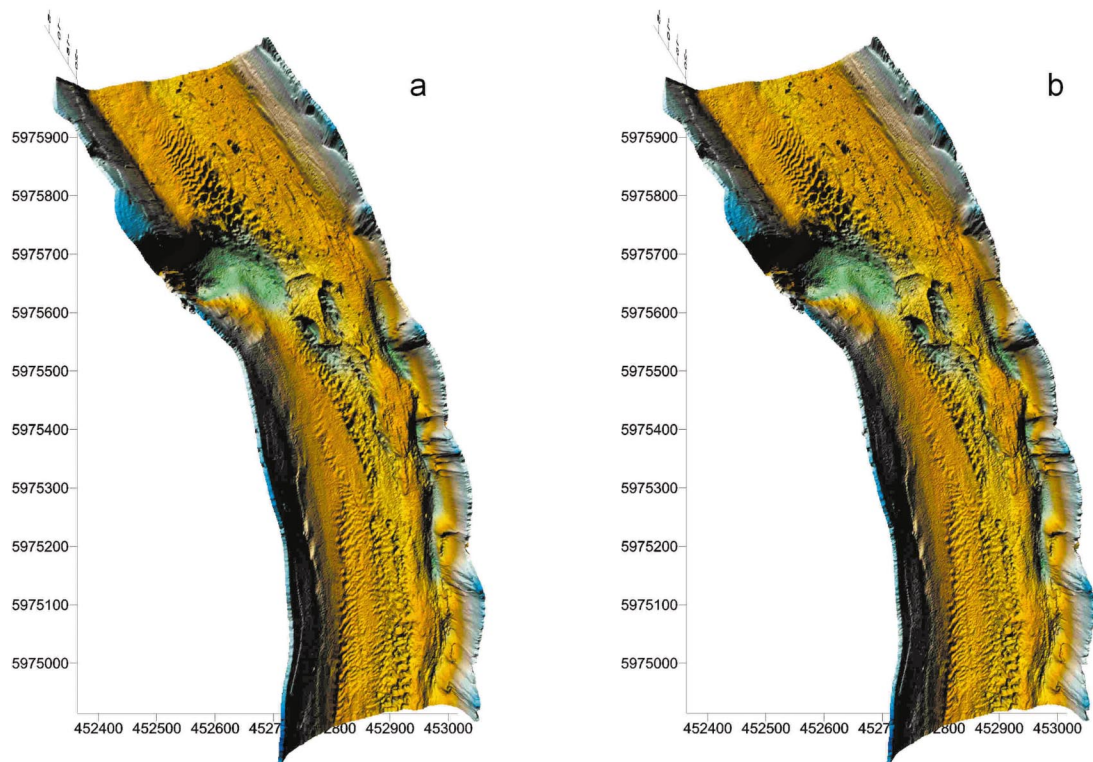
Rys. 14. Modele powierzchni otrzymane z danych regularnych i rozproszonych (gęstość g_2) z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Sheparda



Rys. 15. Kształty powierzchni otrzymane metodą krigingu (a), odwrotnej odległości (b), i naturalnego sąsiada (c); w przypadku a wykorzystano dane nałożone, b – dane regularne, c – dane rozproszone o błędzie pomiaru e_3 i gęstości g_4



Rys. 16. Kształty powierzchni otrzymane metodą krigingu (a), odwrotnej odległości (b), i naturalnego sąsiada (c); w przypadku a i b wykorzystano dane rozproszone, gęstość g_1 , błąd e_3 , c – dane regularne o błędzie pomiaru e_e i gęstości g_2



Rys. 17. Opracowany numeryczny model dna z danych rzeczywistych metodą odwrotnych odległości (a) i kręgingu (b)