

Opublikowano: Rzeszewski M. Jasiewicz J., 2008 - *“Konstrukcja cyfrowych modeli rzeźby na obszarach problemowych w strefie wybrzeża.”* [W:] *Holocenijskie przemiany wybrzeży i wód południowego Bałtyku – przyczyny, uwarunkowania i skutki.* Rotnicki K., Jasiewicz J., Woszczyk, M. (red.), Poznań, s 113-118.

Konstrukcja cyfrowych modeli rzeźby na obszarach problemowych w strefie wybrzeża

Michał Rzeszewski, Jarosław Jasiewicz

Abstract: Digital terrain models (DTM) are one of the most important sources of data for environmental modeling and analysis. Yet, widely available datasets like SRTM and DTED2 are lacking the resolution and accuracy necessary for modeling coastal and lowland areas. The best methods for obtaining data are LIDAR and field survey but they are either too expensive or time-consuming for regional-scale research. This is why topographical maps are still considered as one of the most popular data sources for DTM. There are some serious disadvantages in standard “contours to dtm” workflow resulting in errors and interpolation artifacts. Instead of applying extensive post-processing, the method proposed here aims for increased accuracy of source data. By using all the elevation-related information existing on the topographical maps (hydrological system, anthropogenic changes etc.) as well as his knowledge of the terrain, the operator is able to interpret the relief and identify the problem areas (ie. where the errors of interpolation will occur). Then, by adding contours where necessary the proper shape of the terrain relief is assured. The final isoline dataset can be used as a source for any interpolation algorithm.

1. Wprowadzenie

Cyfrowy model rzeźby lub Numeryczny model terenu (NMT) to w najprostszym, pierwotnym ujęciu statystyczna reprezentacja ciągłej powierzchni terenu za pomocą pewnej ilości punktów o znanych trzech współrzędnych (x, y, z) umiejscowionych w arbitralnie przyjętym układzie współrzędnych (Miller, Laflamme 1958). Na obecnym etapie rozwoju geoinformacji wykorzystywany jest jako źródło informacji o rzeźbie, stanowi podstawę modelowania i analiz dotyczących środowiska geograficznego a także wszelkiego rodzaju wizualizacji (Magnuszewski 1999, Longley 2005).

Dostępne są liczne programy i algorytmy pozwalające na wykonywanie skomplikowanych analiz i opracowań opartych o wykorzystanie NMT. Niezmiennym jednak problemem pozostaje jakość danych źródłowych i związana z nimi dokładność i rozdzielczość modelu. Powszechnie dostępne dane takie jak DTED2 czy SRTM są zbyt mało szczegółowe już dla skali regionu. Szacowana dla nich dokładność pozioma a przede wszystkim pionowa, wynosząca przykładowo dla SRTM zaledwie 4,7 - 9,8 metrów (Rodriguez et. al 2005) jest niewystarczająca dla prawidłowego odwzorowania rzeźby. Ma to szczególne znaczenie w przypadku obszarów o małych różnicach wysokości względnych takich jak niziny i wybrzeża. Chociaż istnieje szereg metod pozwalających na uzyskanie danych wysokościowych o odpowiednio wysokiej jakości są one często zbyt drogie (LIDAR, InSAR) lub czasochłonne (pomiar terenowy). Z tych powodów nadal bardzo popularnym źródłem NMT są istniejące mapy topograficzne w skali 1:10000. Nie są one jednak pozbawione wad co wynika ze specyficznego dla nich sposobu zapisu ukształtowania terenu (Kurczyński et. al 2007).

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie metod pozwalających na uzyskanie szczegółowego i wiernego modelu terenu przy wykorzystaniu informacji o rzeźbie z map topograficznych, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki strefy wybrzeża.

2. Numeryczne Modele Terenu w strefie wybrzeża

Strefa wybrzeża z uwagi na wymagania jakie stawia numerycznym modelom terenu posiada dwie charakterystyczne cechy, których uwzględnienie jest konieczne przy doborze metod ich budowy i analizy:

- **Występowanie rozległych płaskich przestrzeni nizin** (doliny rzeczne, równiny zalewowe, obszary podmokłe, plaże) o deniwelacjach rzędu 1-2 metrów. Tak małe różnice wysokości są niedostatecznie dokładnie odwzorowane w większości źródeł danych (a co za tym idzie w większości modeli) jednak z punktu widzenia modelowania procesów przyrodniczych (np. zalewów powodziowe) są to wielkości niezmiernie istotne.
- **Bliskie sąsiedztwo krajobrazów płaskich i o zróżnicowanej rzeźbie.** Płaskie powierzchnie nizin przybrzeżnych sąsiadują często na obszarach wybrzeża z formami takim jak klify i pola wydumowe. Wysoka anizotropia takiego krajobrazu powoduje, że niemożnością staje się dobranie parametrów interpolacji skutkujących prawidłowym odwzorowaniem rzeźby w całym regionie (Mitasova et. al 2004). Stosowanym niekiedy rozwiązaniem jest interpolacja jego odpowiednio wydzielonych części (według form rzeźby lub wysokości względnych), należy zwrócić jednak uwagę, iż wszelkie analizy pochodnych na tak skonstruowanym modelu będą niereprezentatywne (Peckham, Jordan 2007).

3. Mapy topograficzne jako źródło danych dla NMT

Spośród wielu źródeł danych dla numerycznych modeli terenu mapy topograficzne w skali 1:10.000 nie są ani najbardziej dokładne ani najwygodniejsze. Ich zaletami są natomiast:

- Dostępność - mapy w układzie 1965 pokrywają całość terytorium Polski
- Niski koszt – umożliwiające dokładne analizy dla rozległych obszarów
- Wysoka dokładność – dla map topograficznych dokładność pionowa wynosi 1/3 podstawowego cięcia poziomicowego. Wartość ta na większości obszarów pozwala na prawidłowe odwzorowanie rzeźby przy zastosowaniu odpowiednich technik digitalizacji i interpolacji.
- Obecność pozapozioomicowej informacji o ukształtowaniu terenu – niedostrzeżoną często własnością omawianych map jest wielość informacji na nich zawartej, która może posłużyć do uszczegółowienia i zwiększenia poprawności modelu – hydrologia, przekształcenia antropogeniczne itp.

Wymienione powyżej cechy powodują, że mapy topograficzne nadal często stosowane są we wszelkiego rodzaju analizach a także stanowią punkt wyjścia przy konstruowaniu baz danych geograficznych.

Standardową, obecną w literaturze metodą konstruowania NMT z poziomic, zorientowaną na jak największe ograniczenie wpływu czynnika ludzkiego (Rus et. al 2005) można podzielić na trzy etapy (Soille 2007, San et. al 2004, Arrighi, Soille 1999):

1. **Ekstrakcja poziomic** – automatyczna (możliwa przy mapach dwu lub wielokolorowych) lub ręczna digitalizacja poziomic do formatu wektorowego lub rastrowego. Format pliku wyjściowego zależy od wybranej metody interpolacji.
2. **Interpolacja** - według wybranego algorytmu.
3. **Postprocesing** – rezultat interpolacji często jest zaledwie punktem wyjścia do stworzenia modelu z uwagi na liczne błędy i artefakty. Szczególnie dotyczy to poprawności hydrologicznej. Na tym etapie stosowane jest wypalanie cieków, wypełnianie zagłębień lub różne ich wariacje (*carving, filling etc.*).

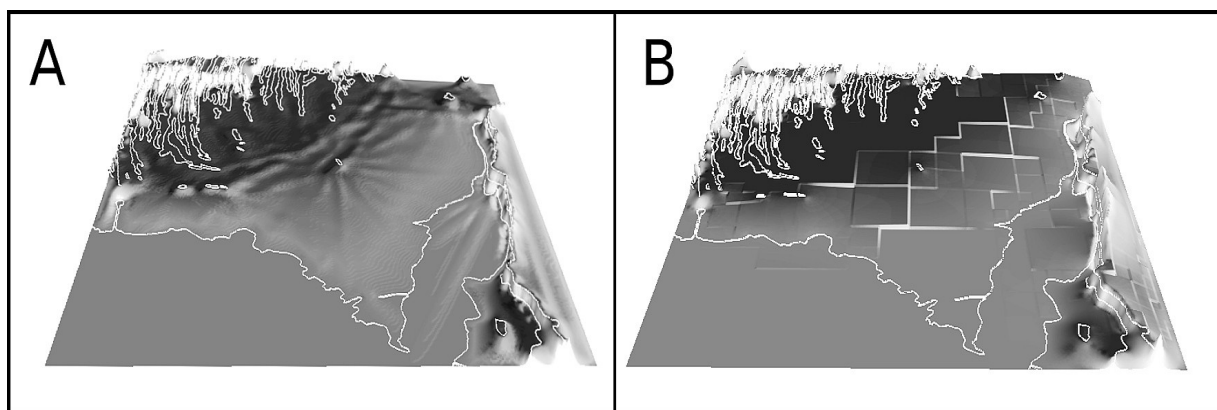
Powyższy sposób postępowania ma jednak liczne wady. Najważniejsza z nich to praktycznie całkowite ignorowanie pozapozioomicowej informacji o terenie takiej jak układ cieków, obecność dróg, wiedzy o charakterystyce form opisywanych przez sygnatury itp.. Szczególnie jest to

widoczne przy automatycznej digitalizacji, gdyż podczas ręcznego procesu operator mimo wszystko zmuszony jest do interpretacji rzeźby. Ponadto jak zauważa Weibel (Weibel, Brändli 1995) wykorzystanie poziomic stwarza specyficzne problemy wynikające z nierównomiernego rozmieszczenia informacji o wysokości i niemożliwości wiernego oddania za ich pomocą punktowych cech terenu (wierzchołki, zagłębienia).

Nie do pominięcia jest również wrażliwość tej metody na dobór algorytmu interpolacji (Mitasova et al 2004). Jego charakterystyka wymusza bowiem sposób digitalizacji oraz wpływa na ostateczny kształt modelu czyli wierność odwzorowania rzeczywistego układu rzeźby oraz charakter artefaktów. Należy zauważyć, że istnieją takie obszary na których niezależnie od algorytmu interpolacja „surowych” poziomic doprowadzi do powstania błędów uniemożliwiających późniejszą analizę. W dalszej części pracy będą one nazywane obszarami problemowymi. Najważniejsze z nich to:

- klify i półki abrazyjne
- pola wydymowe
- skarpy
- wyspy
- półwyspy
- zagłębienia bezodpływowe
- meandry rzeczne
- rozległe obszary o małych deniwelacjach
- formy antropogeniczne: wały brzegowe, przekopy itp.

Korzystając z map topograficznych w skali 1:10000 wybrano przykłady wymienionych wyżej obszarów problemowych i po wektoryzacji poziomic dokonano interpolacji za pomocą trzech metod: Minimum Curvature (MINQ) w programie TNT Mips (Briggs 1974), Topogrid (ANUDEM) w Arc/Info (Hutchinson 1989) oraz Regularized Spline with Tension (RST) w GRASS GIS (Mitášová, Mitáš 1993). Choć ilość i rodzaj błędów znacząco się różniły w poszczególnych przypadkach (Ryc. 1) to w każdym surowe dane z poziomic okazały się niewystarczające do prawidłowego odwzorowania rzeźby.



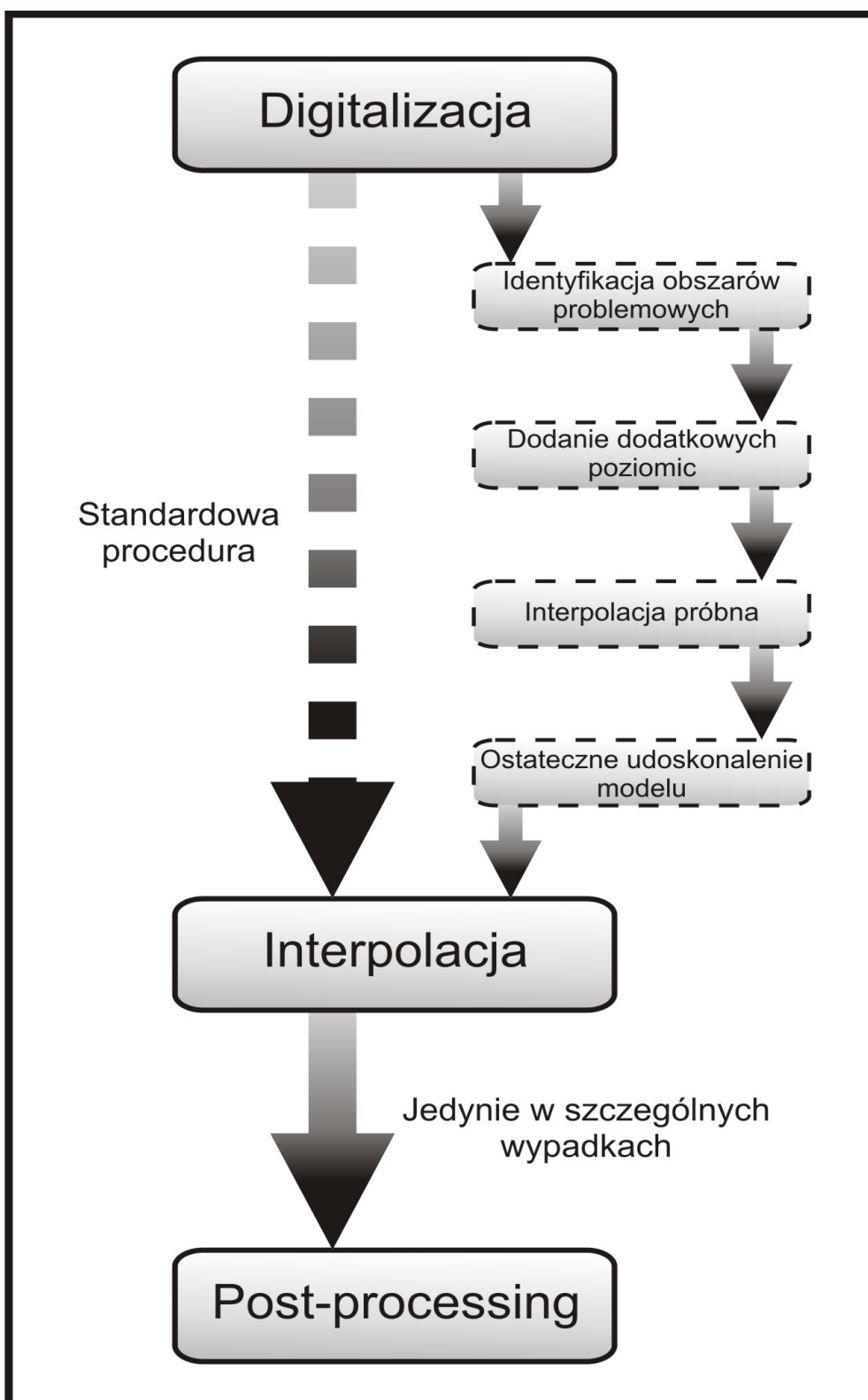
Rycina 1. Błędy i niedoskonałości powstałe w rezultacie interpolacji poziomic z mapy topograficznej w skali 1:10000 przy pomocy algorytmów MINQ (A) oraz RST (B).

4. Metoda udoskonalania modelu

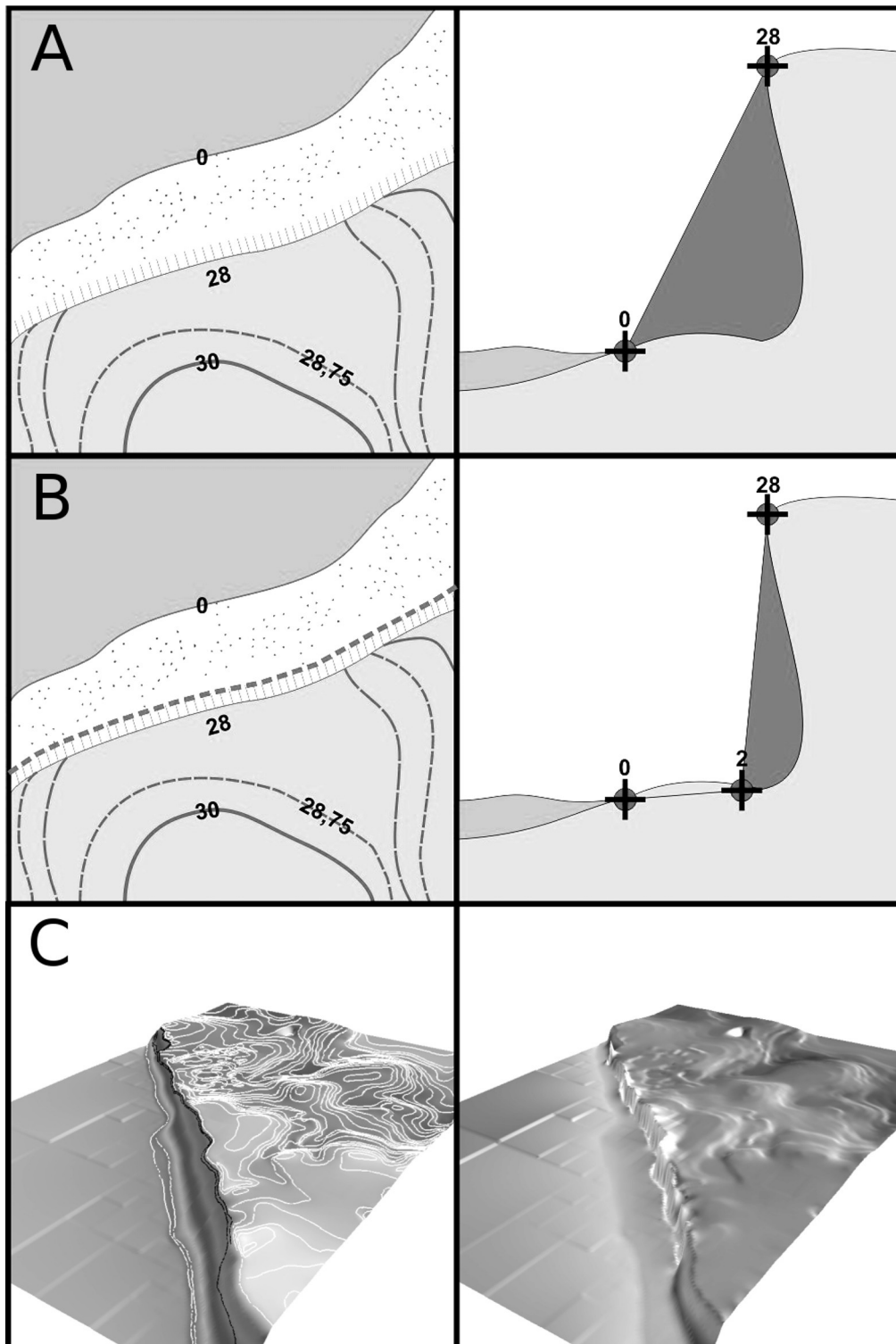
Jak wspomniano wcześniej niwelowanie błędów w modelu odbywa się na ostatnim etapie jego konstruowania - postprocesingu. Należy pamiętać, że zabieg ten pozwala jedynie na przystosowanie modelu do konkretnych analiz i częstokroć wymaga zastosowania dodatkowych danych np. o układzie hydrologicznym, obecności zagłębień bezodpływowych itp. Ponadto części zniekształceń powstających w miejscach występowania skarpy i klifów nie da się tą metodą w łatwy sposób usunąć. Wydaje się, iż znacznie lepszym sposobem postępowania prowadzącym do

zmniejszenia ilości artefaktów i zwiększenie wierności w odwzorowaniu rzeczywistej rzeźby terenu jest udoskonalenie modelu już na etapie digitalizacji. Poniżej proponowana metoda polega na interpretacji ukształtowania terenu, identyfikacji obszarów problemowych i wprowadzeniu dodatkowych izolinii w celu dostarczenia informacji niezbędnej do prawidłowej interpolacji. Środek ciężkości całej procedury konstrukcyjnej zostaje przesunięty w stronę digitalizacji, co skutkuje jednak lepszą jakością surowych danych.

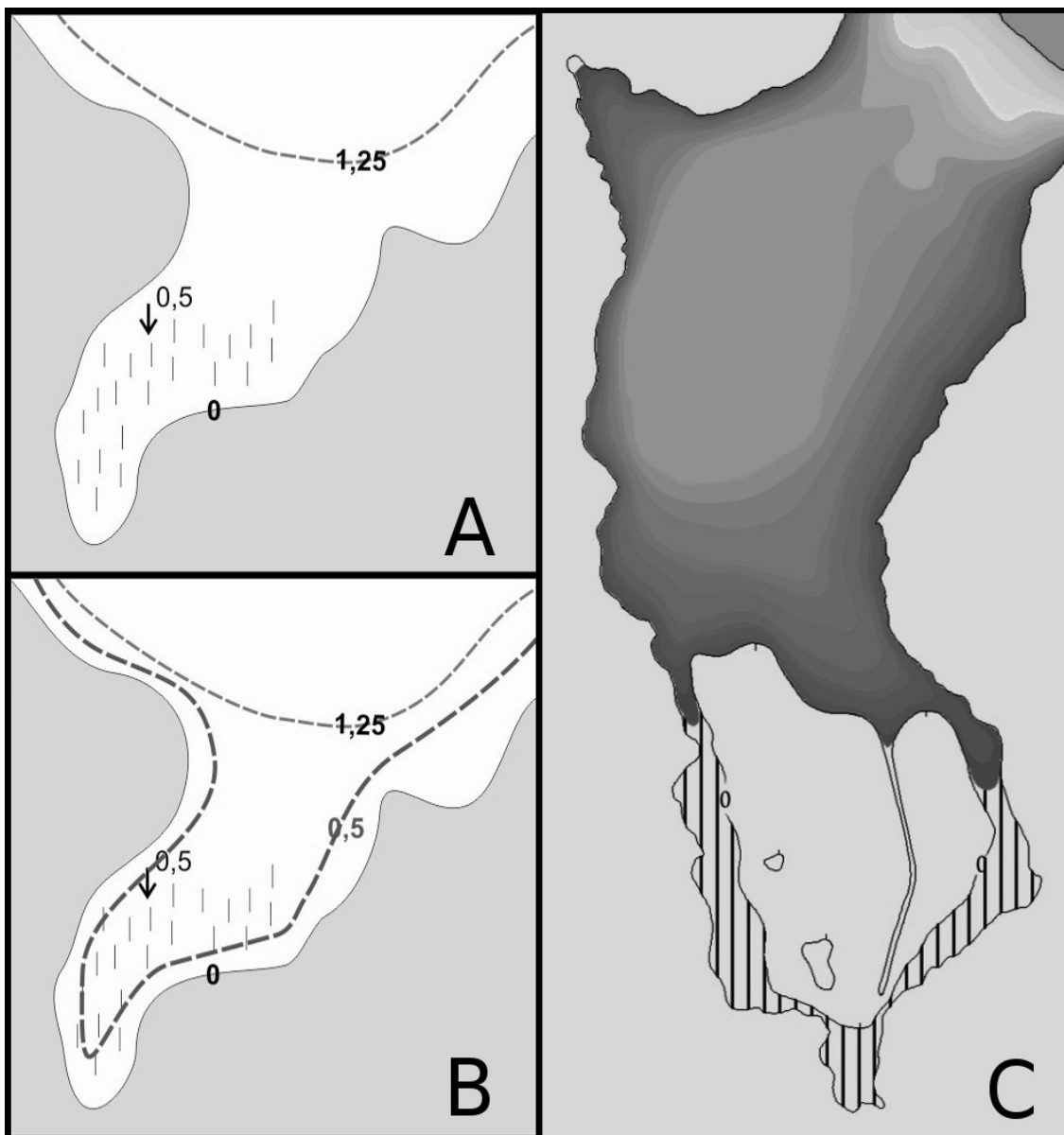
Pomocnicze poziomice należy lokalizować wszędzie tam, gdzie zapis kartograficzny nie pozwala na odwzorowanie ukształtowania terenu. W rezultacie następuje wzmocnienie roli operatora digitalizacji i zostaje on obciążony dodatkowym obowiązkiem interpretacji rzeźby co wymaga dużego nieraz doświadczenia. Prezentowany schemat (Ryc. 2) stanowi uzupełnienie i rozszerzenie standardowej procedury. Dodatkowe etapy – identyfikacji obszarów problemowych, analizy rezultatów próbnej interpolacji oraz dodania nowych izolinii, umieszczone są pomiędzy jej dwoma pierwszymi krokami.



Rycina 2. Zmodyfikowana procedura konstrukcji numerycznego modelu terenu.



Rycina 3. Nadmorski klif. Interpolacja na podstawie samych poziomic (A), kiedy dane są tylko wysokość korony klifu i linia brzegowa prowadzi do zniekształceń odwzorowania rzeźby, w szczególności nachylenia stoku oraz powierzchni. Po dodaniu dodatkowej izoliny o arbitralnej wartości (B) stok klifu jak i plaża zostają prawidłowo odwzorowane. Ostatnia część ryciny (C) prezentuje rezultaty rzeczywistej interpolacji.



Rycina 4. Przykład anomalii interpolacji. Na nisko położonych obszarach przybrzeżnych takich jak wyspy i półwyspy rysunek poziomicowy (A) musi zostać uzupełniony (B) aby zapobiec zniekształceniom linii brzegowej. W prezentowanym wypadku (C) próbna interpolacja wykazała, iż obszar zaznaczony szrafem został zakwalifikowany błędnie jako leżący poniżej zwierciadła wody.

Umieszczenie i wartość pomocniczych poziomicy można określić wykorzystując:

- **Wiedzę operatora o terenie** – jak ilustruje przykład nadmorskiego klifu (Ryc. 3) przy interpolacji wykorzystującej jedynie poziomice, odwzorowanie tego rodzaju form jest niewłaściwe. Dodanie izolinii, która arbitralnie określa górną wysokość plaży pozwala na wierniejsze oddanie kształtu wybrzeża.
- **Anomalie interpolacji** – przed rozpoczęciem modyfikacji poziomicy można dokonać próbnej interpolacji, w większości przypadków umożliwi ona wskazanie miejsc w których konieczna jest ingerencja operatora: nienaturalne formy, sztuczne „pofalowania” powierzchni lub też często spotykane na obszarach wybrzeży uproszczenie linii brzegowej (Ryc. 4)
- **Pozapoziomicowa informacja na mapie** – wszelkiego rodzaju sygnatury jak skarpy, przekopy, punkty wysokościowe a także układ i kierunek płynięcia cieków itp.
- **Zasięgi ekosystemów** – dotyczy to szczególnie podmokłych siedlisk leżących w zasięgu pływów morskich (Titus, Richman 2001) , jednak można z pewnymi zastrzeżeniami zastosować tą metodę traktując przykładowo górną granicę nadmorskich mokradeł jako

dotatkową izolinię wyznaczającą zasięg najwyższych rocznych zalewów sztormowych.

5. Podsumowanie

Prezentowana metoda posiada wiele cech przemawiających za jej wykorzystaniem przy konstruowaniu numerycznych modeli terenu:

- uzyskany model poziomicowy pozwala w wierniejszy sposób odwzorować rzeźbę poprzez wykorzystanie pozapozioomicowej informacji o ukształtowaniu terenu
- wyniki interpolacji tak przygotowanych danych są w mniejszym stopniu zależne od właściwości wykorzystywanego algorytmu interpolacji oraz co za tym idzie bardziej powtarzalne
- finalny model nie wymaga intensywnego zastosowania metod postprocessingu w celu uzyskania poprawności hydrologicznej ani algorytmów, które taki efekt zapewniają, często jednak na zasadzie „czarnej skrzynki”
- odpowiednie zagęszczenie siatki izolunii umożliwia łatwiejszy dobór parametrów interpolacji dzięki czemu nie zachodzi konieczność dzielenia modelu na mniejsze części podczas dopasowywania powierzchni
- wszelkie zmiany mogą być, przy założeniu odpowiedniej struktury bazy danych, w łatwy sposób usunięte
- na etapie digitalizacji powstają surowe dane o wysokiej jakości
- ubocznym niejako skutkiem udoskonalania modelu jest wskazanie obszarów problemowych co z kolei może posłużyć do opracowania nowych sposobów monitoringu środowiska (Mitasova et. al 2004).

Można zatem stwierdzić, iż konstruowanie numerycznych modeli terenu z zastosowaniem omawianych metod prowadzi do uzyskania powierzchni będącej, przy niewielkim nakładzie dodatkowej pracy, wiernym obrazem rzeźby o znacznej poprawności hydrologicznej, mogącej służyć jako źródło danych w modelowaniu.

6. Podziękowania

Autorzy pragną podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania niniejszego opracowania a w szczególności pracownikom Instytutu Paleogeografii i Geoekologii WNGiG UAM: Markowi Ewertowskiemu, Robertowi Kosteckiemu oraz Magdalenie Ratajczak.

7. Literatura

MILLER C.L., LAFLAMME R.A., 1958 - The digital terrain model-theory and application. Photogrammetric engineering 24, 433-442

MAGNUSZEWSKI A., 1999 - Gis w geografii fizycznej. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 187 s.

LONGLEY P., 2005 - Geographic information systems and science.

RODRIGUEZ E., MORRIS C.S., BELZ J.E., CHAPIN E.C., MARTIN J.M., DAFFER W., HENSLEY S., 2005 - An assessment of the srtm topographic products. Jpl publ., d143,

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI, DARIUSZ GOTLIB, ROBERT OLSZEWSKI, ROMUALD M. KACZYŃSKI, JERZY BUTOWTT, 2007 - Numeryczny model terenu - podstawy, budowa i wykorzystanie. w: Systemy informacji geograficznej w praktyce (studium zastosowań) M. Kunz (red.), UMK Toruń,

- MITASOVA H., DRAKE T., BERNSTEIN D., HARMON R., 2004 - Quantifying rapid changes in coastal topography using modern mapping techniques and geographic information system. *Environmental and engineering geoscience* 10, 1-11
- PECKHAM R.J., JORDAN G., 2007 - *Digital terrain modelling*. Springer.
- C. RUS, J. ASTOLA, C. RUSU, ,2005 - From a physical scanned map to a digital elevation model using the legend and kriging. w: *Proceedings of 13. European Signal Processing Conference, EUSIPCO, Antalya, Turkey, 4-8 September 2005,*
- PIERRE SOILLE, ,2007 - From mathematical morphology to morphological terrain features, w: *Digital Terrain Modelling*, 45-63.
- L.M. SAN, S.M. YATIM, N.A.M. SHERIFF, N. ISROZAIDI, ,2004 - Extracting contour lines from scanned topographic maps. w: *Computer Graphics, Imaging and Visualization, 2004. CGIV 2004. Proceedings. International Conference*, 187-192.
- ARRIGHI P., SOILLE P., 1999 - From scanned topographic maps to digital elevation models. *Proceedings of geovision 99*, 1-4
- WEIBEL R., BRÄNDLI M., 1995 - Adaptive methods for the refinement of digital terrain models for geomorphometric applications. *Zeitschrift für geomorphologie* 11, 13-30
- BRIGGS I., 1974 - Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39, 39-49
- HUTCHINSON M.F., 1989 - New procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of hydrology* 106, 211-232
- MITÁŠOVÁ H., MITÁŠ L., 1993 - Interpolation by regularized spline with tension: i. theory and implementation. *Mathematical geology* 25, 641-655
- TITUS J.G., RICHMAN C., 2001 - Maps of lands vulnerable to sea level rise: modeled elevations along the us atlantic and gulf coasts. *Climate research* 18, 205-228