

Krystian Kozioł\*

## **Numeryczny model terenu dla wielorozdzielczej/wieloreprezentacyjnej bazy danych przestrzennych**

### **1. Wprowadzenie**

Prace naukowo-badawcze i wdrożeniowe nad tworzeniem oraz wykorzystaniem modelu 3D doprowadziły do zdefiniowania cyfrowego modelu terenu. Na podstawie badań zastosowań numerycznego modelu terenu, określony został zestaw funkcji i procedur, niezbędnych w modelu 3D [12].

Ilość informacji zwartych w modelu trójwymiarowym w połączeniu z wciąż rozwijającym się oprogramowaniem GIS oraz metodami pozyskiwania danych trójwymiarowych (lotniczy skaning laserowy oraz naziemny, radar) powodują, że model 3D w wielu dziedzinach nauki i życia gospodarczego staje się standardowym wymogiem do analiz wspomagających podejmowanie decyzji. Jego szerokie zastosowania powodują większe wymagania względem jednostek, których zadaniem jest pozyskiwanie, przechowywanie oraz aktualizacja NMT, oraz w zakresie tworzenia bazy danych topograficznych (BDT).

### **2. NMT podstawy funkcjonowania**

W narzędziach GIS powszechne jest posługiwanie się obiektami dwu- i trójwymiarowymi, przy czym wykorzystanie danych 2D jest znacznie częstsze, niż 3D. Powodem są następujące czynniki: trudności w stworzeniu uniwersalnej trójwymiarowej struktury danych, zwłaszcza struktur topologicznych [7, 13], koszty, czasochłonność pozyskania danych 3D, wizualizacja oraz możliwości analiz.

---

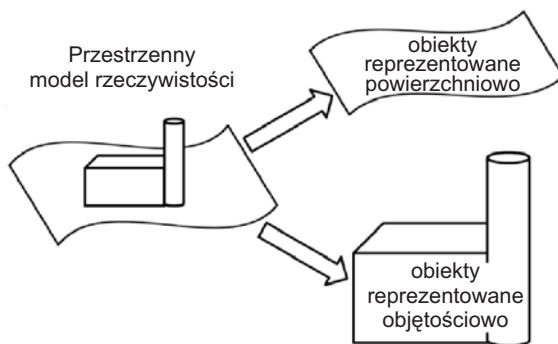
\* Katedra Geomatyki, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Dane geoprzestrzenne w przestrzeni mogą być reprezentowane na trzy różne sposoby:

- 2D – określa lokalizację w dwóch wymiarach za pomocą współrzędnych  $X, Y$ ;
- 2.5D – określa położenie w przestrzeni 2D z dodatkowym wymiarem pochodzącym z wartości atrybutu dołączonego do lokalizacji, przykładem może być wartość rzędna na elipsoidzie odniesienia, w tym wypadku będzie ona wartością atrybutu dla obiektu;
- 3D – określa lokalizację w trzech wymiarach poprzez rozszerzenie przestrzeni zdefiniowanej przez  $X, Y, Z$  (Raper, 1992).

Modele stosowane w geomatyce muszą spełniać następujące warunki w odniesieniu do obiektów:

- zapis zgodny z wymiarami,
- zapis zgodny z ich kształtami (regularne i nieregularne),
- umiejętność reprezentacji obiektów o zdefiniowanych granicach lub o rozmytych granicach,
- zdolność definiowania wzajemnych relacji między obiektami,
- oparcie reprezentacji geometrycznej obiektów na zastosowaniu trzech podstawowych typów geometrycznych (punkt, linia, powierzchnia).



Rys. 1. Dwie kategorie reprezentacji obiektów przestrzennych [7]

Te podstawowe założenia modelowania dwuwymiarowego i trójwymiarowego zostały zdefiniowane między innymi przez T. Peuckera i N. Chrismana [11], oraz M. Molenaara [8, 9]. Jednak autorzy ci przyznają, że nie wszystkie obiekty są możliwe do przedstawienia wraz ze spełnieniem wszystkich powyższych warunków. Powodem jest lawinowy rozwój możliwości analitycznych systemów GIS oraz rosnące zapotrzebowanie na dane typu 3D. Oprócz problemu tworzenia systemu zdolnego do modelowania 3D i oferującego odpowiednią funkcjonalność w zakresie danej dziedziny pojawia się kolejny problem dotyczący rodzaju mode-

lu 3D. W modelu, muszą znajdować się obiekty będące reprezentantami dwóch typów (rys. 1). Są to obiekty rzeczywiste posiadające precyzyjnie zdefiniowane granice i relacje z innymi obiektami, np. budynek – droga, drugim rodzajem obiektów są wszystkie te, które nie posiadają tak wyraźnie zarysowanych granic i relacji z innymi obiektami, np. budynek – NMT. Dodatkowo te dwa typy obiektów muszą współistnieć w modelu. Tradycyjne systemy GIS przypisują każdemu z tych typów obiektów osobny model danych, co powoduje utworzenie dwóch osobnych systemów i konieczność odrębnego ich analizowania.

## 2.1. Modele danych NMT

J. Raper [13] definiując dwa typy obiektów, do pierwszej kategorii zaliczył obiekty posiadające właściwości dyskretne, których granice łatwo określić, takie jak budynki, działki, zlewnie. Druga kategoria, znana jako obiekty „ograniczonej definicji”, obejmuje obiekty posiadające różne właściwości, które można zdefiniować za pomocą klasyfikacji lub z wykorzystaniem jako kryterium zasięgu danej cechy. M. Molenaar [10] w odniesieniu do tych obiektów używa określenia „przestrzenne obiekty rozmyte”. Oddzielne modelowanie tych dwóch kategorii obiektów zazwyczaj prowadzi do trudności w przedstawieniu związków pomiędzy nimi. Model obiektów należących do tej klasy oparty jest na elementach powierzchniowych.

Obiekty tego typu reprezentowane są przez:

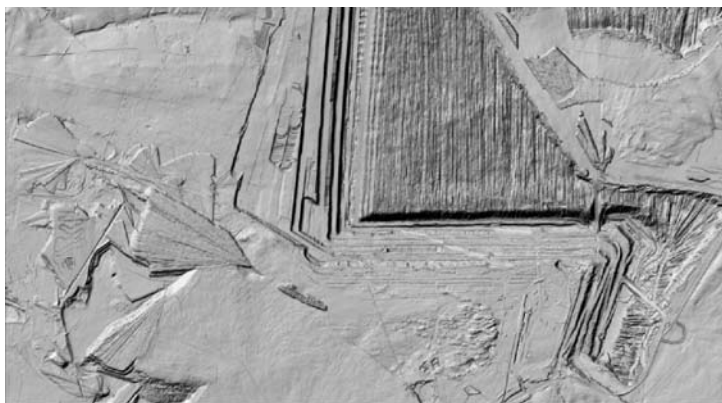
- modele wektorowe,
- modele rastrowe,
- modele hybrydowe.

W systemach informacji przestrzennej zastosowanie modelu 3D ułatwia analizę oraz wizualizację z uwzględnieniem trzeciego wymiaru. Jednakże w NMT informacje przestrzenne przechowywane są w postaci współrzędnych i przez nie są wzajemnie powiązane. Oznacza to, że relacje między różnymi obiektami nie mogą być właściwie reprezentowane na skutek braku topologii.

## 2.2. Formaty przechowywania NMT i metody pozyskania

Szeroka gama oprogramowania typu GIS/CAD/CAM powoduje wzrost liczby formatów przechowywania NMT stosowanych przez ośrodki odpowiedzialne za ich przechowywanie. Jednocześnie wykonawcy odpowiedzialni za pozyskiwanie danych trójwymiarowych stosują narzędzia umożliwiające dokładniejsze określenie przebiegu obiektów rozmytych w przestrzeni przez zwiększenie gęstości punktów pomierzonych.

Jeszcze do niedawna pomiar bezpośredni lub pozyskanie numerycznego modelu metodą kartograficzną (digitalizacja map warstwicznych) były najpopularniejszymi metodami, ale zostały one wyparte w późniejszym okresie przez metody fotogrametryczne. Obecnie coraz popularniejszymi metodami na pozyskanie danych typu 3D są pomiary z wykorzystaniem aktywnych metod teledetekcyjnych, takich jak lotniczy skanিং laserowy – LiDAR (*Light Detection And Ranging*) oraz metoda interferometrii radarowej. Wymienione dwie ostatnie metody pozyskania wymagają zastosowania wyspecjalizowanych algorytmów filtrowania (rys. 2).



**Rys. 2.** NMT uzyskany na podstawie odfiltrowanych danych LiDAR  
(źródło: Milan GmbH – koplania odkrywkowa)

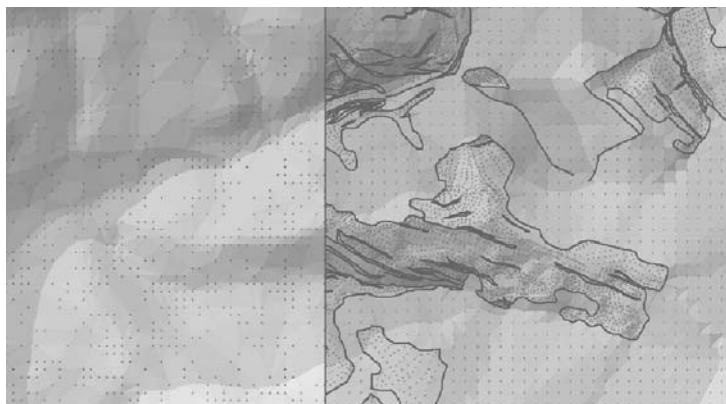
Do podstawowych formatów funkcjonujących w przetwarzaniu NMT oraz jego przechowywania należy zaliczyć:

- siatki regularne w postaci rastrowej lub wektorowej,
- modele oparte o geometryczne siatki nieregularne,
- wektorowe modele obiektowe (punkt, linia, poligon).

Wymienione modele danych nie zawsze mogą być przekształcane jedne w drugie, a w przypadku niektórych przekształceń zachodzi konieczność świadomego zaokrąglenia, zubożenia przechowywanej informacji. Przykładem może tu być przekształcenie modelu siatki nieregularnej do modelu siatki regularnej: użytkownik decydując się na rozmiar siatki regularnej, powoduje zmniejszenie dokładności odwzorowania powierzchni w nowym modelu. Innym przykładem przekształcenia jest przejście od modelu obiektowego do modelu siatki nieregularnej. Jest to przykład przekształcenia, w którym dokładność modelu się nie zmienia, ale zostaje stracona informacja o obiekcie. Największą przydatnością w zakresie analiz przestrzennych charakteryzuje się model rastrowy.

Wytyczne techniczne dla BDT (wersja 1.0 z maja 2008) [15] jednoznacznie wskazują, że formatem przechowywania jest ciągły przestrzennie model obiektowy, wyróżniając obiekty jako:

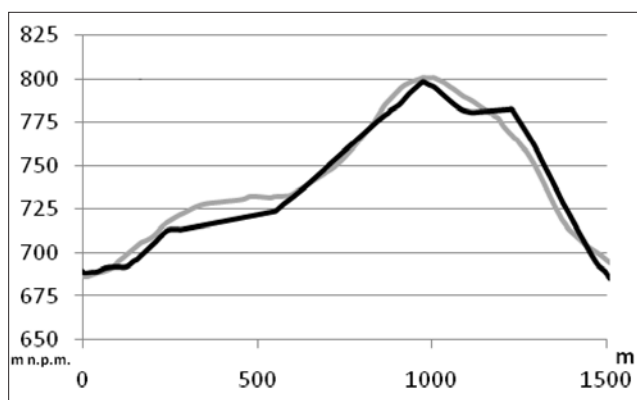
- punkty terenowe o pomierzonej wysokości – pikiety, punkty ekstremalne lokalnych wypiętrzeń i zagłębień, punkty położone na szczycie, siodle i przełęczy;
- punkty pozyskiwane z pomiarów terenowych (w tym koty wysokościowe z mapy topograficznej 1:10 000);
- warstwie z nadaną wysokością;
- linie strukturalne – położone wzdłuż grzbietów i żlebów oraz wzdłuż krawędzi górnej i dolnej naturalnych, bądź sztucznych, zagłębień i wypiętrzeń, linie położone wzdłuż skarp, urwisk i murów oporowych, linie ciekowe;
- linie wyznaczające zasięg obszaru planarnego;
- linie położone wokół obszarów wyłączonych.



**Rys. 3.** Niejednorodność danych w TBD w zakresie NMT  
(źródło: WODGiK)

Wytyczne te określają format danych udostępniany użytkownikowi i będący podstawowym typem danych w TBD jako jeden z modeli geometrycznych (siatka regularna lub nieregularna), w przypadku którego nie zostają zachowane atrybuty wymienione powyżej. Jednocześnie funkcjonowanie TBD w zakresie NMT spowodowało pojawienie się w modelu topograficznym danych niejednorodnych zarówno pod względem dokładności, jak i przyjętego schematu danych. Powodem są różne źródła danych oraz stan prawny na dzień ich powstania i zasilenia bazy danych topograficznych. Problem ten został przedstawiony na rysunku 3.

Niejednorodność danych i jej wpływ na analizy więcej niż jednego arkusza mapy topograficznej w skali 1: 10 000 jako elementu ciągłego ilustruje rysunek 4. Brak zdefiniowanych punktów ekstremalnych oraz punktów siódłowych utrudnia przeprowadzenie prawidłowego procesu „mozaikowania” poszczególnych wycinków NMT w ciągły element, uniemożliwiając przeprowadzenie analizy na większym obszarze. Przeprowadzenie w pełni automatycznego procesu generalizacji kartograficznej jest wówczas utrudnione.



Rys. 4. Przekrój przez niejednorodne NMT dla fragmentu linii styku dwóch sekcji mapy topograficznej w skali 1:10 000. Kolorem szarym oznaczono przekrój dla modelu zilustrowanego po lewej stronie rysunku 3, kolorem czarnym – przekrój dla modelu po prawej stronie rysunku 3

### 3. Generalizacja kartograficzna a NMT

Zastosowanie procesów automatycznej generalizacji kartograficznej w odniesieniu do obiektów zdefiniowanych przez M. Molenaara [10] jako „rozmyte przestrzenie” jest zadaniem bardzo trudnym ze względu na brak jednoznacznych granic obiektów. W ostatnich latach w literaturze z zakresu generalizacji kartograficznej pojawiło się wiele opracowań będących próbą przybliżenia procesu generalizacji NMT do procesu automatycznego. Gdy rozdziela się cyfrowy model kartograficzny DCM (*Digital Cartographic Model*) od cyfrowego modelu krajobrazu DTM (*Digital Topographic Model*), następuje, w przypadku generalizacji NMT, swoistego rodzaju dualizm procedur, gdyż nie istnieje obecnie jednoznaczna, obiektywna i weryfikowalna metoda generalizacji NMT obydwóch modeli jednocześnie. Generalizacja NMT w modelu krajobrazu odgrywa dominującą rolę w wizualizacji na mapach chwilowych, wirtualnych (ekran komputera). Metody oparte na nieregularnej siatce (TIN) są stosowane w odniesieniu do modelu krajobrazu i wykorzystują między innymi upraszczanie i dekompozycję tej siatki. Jako

przykłady opracowań takich metod należy przytoczyć prace [1, 3, 4, 5]. Głównym efektem ich zastosowania jest ułatwienie i przyspieszenie procesu wizualizacji w różnych skalach. Metody oparte na modelu siatki regularnej, wywodzącej się z technologii teledetekcyjnej, wykorzystują różnego rodzaju filtrowanie.

Przeprowadzenie generalizacji jako procesu automatycznego jest możliwe tylko wtedy, gdy zbiór obiektów jest co najmniej półporządkowany, zachowuje topologię oraz jest możliwa weryfikacja wyniku po generalizacji.

W NMT należy wyodrębnić w orografii terenu obiekty i podać ich klasyfikację. Wyodrębnienie obiektów NMT może odbywać się automatycznie, przez dekompozycję siatki trójkątów, przez określenie punktów krytycznych siatki, filtrowanie siatki regularnej (grid). Jednakże w przypadku modelu topograficznego następuje konieczność określenia przebiegu izolinii oraz zdefiniowania obszarów, które na mapie zostaną przedstawione jako elementy nieciągłe (skarpy, wały). Elementy te charakteryzują się brakiem rozpoznawalności na płaszczyźnie mapy obrazu izolinii w określonej skali.

### 3.1. Określenie cech orograficznych punktów według NMT

Numeryczny model terenu pozwala na wyodrębnienie atrybutów i ich wartości w zakresie spadku terenu, ekspozycji stoków, hydrografii i hydrologii (akumulacja, uwilgotnienie, zlewnie, linie ciekowe), nasłonecznienia. Obliczone są one na podstawie modelu siatki regularnej w postaci rastrowej (grid). A. Weiss [14] w 2001 roku zaprezentował sposób obliczenia atrybutu zwanego topograficznym indeksem pozycji TPI (*Topographic Position Index*), który jest oparty na analizie otoczenia punktu (komórki) w zadanej odległości. Dysponując obliczoną wartością TPI w otoczeniu oraz wartościami spadków, można dokonać klasyfikacji terenu ze względu na orografię i wyodrębnić takie formy terenowe, jak: szczyty, stoki, doliny. Ponieważ wartość TPI jest uzależniona od wielkości przyjętego otoczenia, wykryte formy terenowe także będą wyznaczone w odpowiedniej skali. Wartość TPI dla  $i$ -tej komórki w otoczeniu równym  $D$  określa wzór

$$TPI(D)_i = H_i - \frac{\sum H_j}{n} \quad (1)$$

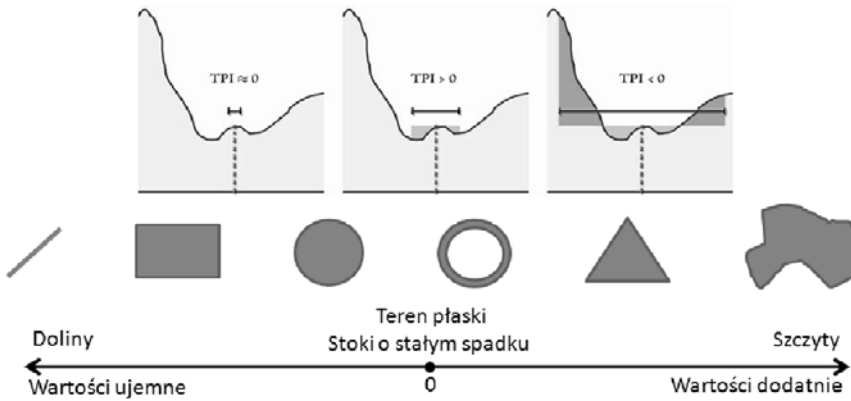
gdzie:

$H_i$  – wartość wysokości badanej komórki,

$H_j$  – wartość wysokości komórek w otoczeniu  $i$ -tej komórki,

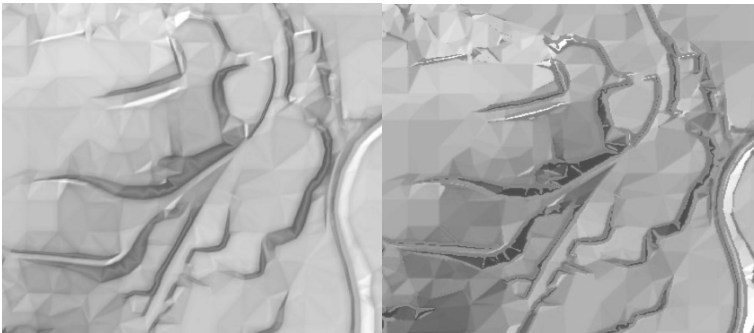
$n$  – liczba komórek w otoczeniu.

Otocznice komórki może mieć różne formy geometryczne: okrąg, owal, kwadrat itp. Wartości przyjmowane przez TPI i ich charakterystyka zostały pokazane na rysunku 5.



Rys. 5. Topograficzny indeks pozycji – zależny od skali parametr opisujący położenie punktu [14]

Wartości dodatnie wskazują na szczyty, a wartości ujemne na doliny. Uwzględniając dodatkowo nachylenie terenu, można dokonać klasyfikacji terenu. W przypadku generalizacji kartograficznej dla NMT niniejsza wartość TPI może zostać wykorzystana do wskazywania miejsc, gdzie nastąpi konieczność zastąpienia izolinii symbolami (rys. 6).



Rys. 6. Topograficzny indeks pozycji otoczenie 5 m: po lewej wartości bezwzględne, po prawej wynik klasyfikacji z uwzględnieniem spadków (źródło: WODGiK)

W celu zdefiniowania obiektów topograficznych należy uwzględnić małe i duże formy terenowe, a więc zbadać TPI w odniesieniu do małego i dużego otoczenia.



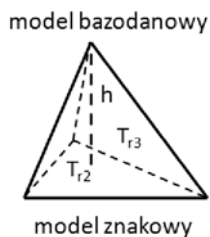


Rys. 7. Klasyfikacja z uwzględnieniem otoczenia 300 m i 2000 m

Takie działanie prowadzi do wyznaczenia dziesięciu klas terenu: wąwozy i wcięte doliny, płytkie małe doliny, wyżyny z dolinami, doliny kształtne, obszary płaskie, otwarte stoki, połoniny, płaskie szczyty, lokalne grzbiety i szczyty, wysokie szczyty i grzbiety (rys. 7). Klasyfikacja ta będzie niezbędna do weryfikacji zgeneralizowanych obiektów modelu w procesie automatycznym.

### 3.2. Miara rozpoznawalności rysunku w generalizacji NMT

Przedstawiony we wcześniejszych rozdziałach sposób zapisu i prezentacji NMT w bazie danych oraz wykazana konieczność jego generalizacji skłaniają do zastosowania automatyzacji w procesie upraszczania. Generalizacja jest automatyczna i powtarzalna, jeżeli jest weryfikowalna oraz oparta na obiektywnych algorytmach. Warunki takie spełnia metoda Chrobaka [2], która wymaga zdefiniowania rozpoznawalności rysunku. W przypadku map topograficznych miarę rozpoznawalności odzwierciedla trójkąt elementarny, który decyduje o eliminacji wierzchołków upraszczanego obiektu. Jednakże w odniesieniu do danych uwzględniających trzeci wymiar dotychczasowa definicja jest niewystarczająca. Trójkąt elementarny dla obiektu trójwymiarowego będzie zdefiniowany w celu ustalenia rozpoznawalności przestrzennej (trójwymiarowej) obiektów jako czworościan, natomiast jego obraz na płaszczyźnie jest miarą rozpoznawalności obrazów obiektów na płaszczyźnie mapy (rys. 8).

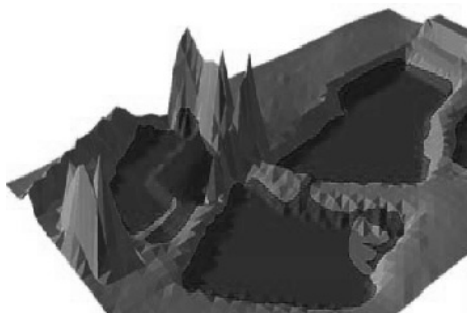


Rys. 8. Graficzne zobrazowanie problemu trójkąta elementarnego w trzech wymiarach

Zatem generalizacja sklasyfikowanych obiektów NMT zgodnie z metodą Chrobka będzie przebiegać inaczej w modelu kartograficznym DCM, a inaczej w odniesieniu do obiektów trójwymiarowych zapisanych w bazie danych.

Na płaszczyźnie badań długość najkrótszego boku trójkąta elementarnego  $T_{r2}$  decyduje o eliminacji określonego wierzchołka zgodnie z rozpoznawalnością rysunku (rys. 8).

W przypadku obiektów przestrzennych zapisanych w formacie TIN o eliminacji wierzchołków decydować będzie najkrótsza wysokość czworoboku elementarnego  $T_{r3}$ , w którym zawiera się trójkąt elementarny  $T_{r3}$  (rys. 8).



Rys. 9. Przykład obrazujący problem niespójności danych NMT względem części TOPO i KARTO [6]

Generalizacja numerycznego modelu terenu nie może odbywać się w oderwaniu od danych z bazy danych topograficznych i ich modelu kartograficznego DCM (rys. 9). Metody integracji i weryfikacji danych NMT z obiektami topograficznymi są przedmiotem badań kartografów od ponad piętnastu lat. W 2004 r. na międzynarodowej konferencji poświęconej przetwarzaniu danych przestrzennych A. Koch oraz C. Heipke przedstawili koncepcję semantycznej korekty NMT, uwzględniając położenie przestrzenne obiektów topograficznych [6]. Problem generalizacji NMT nie może przebiegać w oderwaniu od generalizacji obiektów topograficznych. Prace T. Chrobaka wykazały że metoda z zastosowaniem rozpoznawalności zwiększa procent automatyzacji w zakresie upraszczania obiektów topograficznych liniowych oraz powierzchniowych [2].

### 3. Wnioski

Numeryczny model terenu funkcjonujący w bazie danych topograficznych spełnia założenia bazy wiorozdzielczej/wieloreprezentacyjnej, a generalizacja NMT jest elementem rozszerzającym funkcjonowanie NMT w wielorozdzielczej/

wieloreprezentacyjnej BDT. Podział obiektów topograficznych terenu i ich hierarchia oraz klasyfikacja są niezbędne w procesie ich automatycznej generalizacji. Upraszczenie numerycznego modelu jest możliwe z wykorzystaniem metody Chrobaka, ale niezbędnym dodatkiem jest zdefiniowanie obiektów jednorodnych. W BDT muszą zaistnieć relacje pomiędzy obiektami topograficznymi z zakresu TOPO i KARTO a NMT.

## Literatura

- [1] Bajaj C.L., Shikore D.R.: *Topology preserving data simplification with error bounds*. Computers and Graphics, 22(1), 1998, s. 3–12.
- [2] Chrobak T. (red.): *Podstawy cyfrowej generalizacji kartograficznej*. UWND AGH, Kraków 2007.
- [3] Danovaro E., de Floriani L., Magillo P., Mesmoudi M.M., Puppo E.: *Morphology-Driven Simplification and Multiresolution Modeling of Terrains*. [w:] Hoel E., Rigaux P. (Eds), Proceedings ACM-GIS 2003 – The 11th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, ACM Press, 2003, s. 63–70.
- [4] De Floriani L., Magillo P.: *Multiresolution Mesh Representation: Models and Data Structures*. [w:] Floater M., Iske A., Quak E. (Eds), Multiresolution in Geometric Modelling, Springer-Verlag, 2002, s. 363–418.
- [5] Garland M.: *Quadric-based polygonal surface simplification*. Computer Science Department, Carnegie Mellon University, Tech. Rept. CMU-CS-99-105, 210s, 1999 (praca doktorska).
- [6] Koch A., Heipke C.: *Semantically Correct 2.5D GIS Data – the Integration of a DTM and Topographic Vector Data*. [w:] Fisher P. (Ed.), Developments in Spatial Data Handling, Springer, Berlin 2004, s. 509–526.
- [7] Li R.: *Data structures and application issues in 3-D geographic information systems*. Geomatica, Vol. 48, No. 3, 1994, s. 209–224.
- [8] Molenaar M.: *A formal data structure for 3-D vector maps*. Proceedings First European Conference on Geographical Information Systems (EGIS'90). Vol. 2, Amsterdam (The Netherlands) 1990, s. 770–781.
- [9] Molenaar M.: *A topology for 3D vector maps*. ITC Journal, 1, 1992, s. 25–33.
- [10] Molenaar M.: *A syntax for representation of fuzzy spatial objects*. [w:] Molenaar M., de Hoop S. (Eds), Advanced geographic data modelling: spatial data modelling and query languages for 2D and 3D applications, Netherlands Geodetic Commission, No. 40, Delft (The Netherlands), 1994, s. 155–169.
- [11] Peucker T., Chrisman N.: *Cartographic data structures*. The American Cartographer, Vol. 2, No. 2, 1975, s. 55–69.

- 
- [12] Pilouk M., Rahman A.: *Applications of the Model. Spatial Data Modeling for 3D GIS*. Springer, Berlin – Heidelberg – New York 2007.
  - [13] Raper J.: *Key 3D modelling concepts for geoscientific analysis*. [w:] Turner A.K. (Ed.), *Threedimensional modeling with geoscientific*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishings, 1992, s. 215–232.
  - [14] Weiss A.: *Topographic Position and Landforms Analysis*. ESRI User Conference, San Diego (CA) 2001.
  - [15] Wytyczne techniczne: *Baza Danych Topograficznych (TBD) – wersja 1.0 uzupełniona*. GUGiK, Warszawa 2008.