

**Krystian Koziół\*, Jolanta Knecht\*,  
Stanisław Szombara\*\*(\*\*)**

\*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
Katedra Geomatyki

\*\* Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna  
im. ks. Bronisława Markiewicza w Jarosławiu  
Instytut Inżynierii Technicznej  
*krystian.koziol@agh.edu.pl, jknecht@agh.edu.pl,  
szombara@agh.edu.pl*

## **Znaczenie hierarchii w generalizacji Numerycznego Modelu Terenu**

**Słowa kluczowe:** *numeryczny Model Terenu, MRDB, generalizacja  
kartograficzna, klasyfikacja danych*

### **Streszczenie**

Poniższy artykuł przedstawia zestawienie wybranych algorytmów generalizacji numerycznego modelu terenu w postaci nieregularnych siatek trójkątów. Zagadnienie to, mimo rozwoju komputeryzacji, a także cyfrowego zapisu i przedstawiania danych wysokościowych, stanowi duży problem we współczesnej kartografii. Przechowywanie NMT w Wielorozdzielczych Bazach Danych wiąże się z zastosowaniem względem nich algorytmów generalizujących, umożliwiających przedstawienie danych wysokościowych na dowolnym poziomie uogólnienia. W artykule skupiono się przede wszystkim na uogólnianiu modeli nieregularnych ze względu na ich złożoność i istotność w modelowaniu kartograficznym. Zwrócono również uwagę na wieloaspektowość generalizacji numerycznych modeli terenu. Wymieniono czynniki, które powinny mieć szczególny wpływ w trakcie klasyfikacji danych i ustalaniu hierarchii. Uwzględnienie tych czynników w procesie generalizacji modeli przestrzennych zapewni rozpoznawalność elementów terenu i poprawność modelu pod względem topograficznym w odniesieniu do przestrzeni geograficznej, którą reprezentuje.

## Wprowadzenie

Dane przestrzenne reprezentujące powierzchnię terenu gromadzone w bazach danych zawierają przeważnie ogromną liczbę obiektów. W zależności od sposobu przedstawienia tych danych istnieje niejednokrotnie potrzeba przedstawienia ich na różnych poziomach uogólnienia. Przechowywanie w jednej bazie tych danych wymaga zastosowania Wielorozdzielczej Bazy Danych określanych również jako MRDB (ang. MultiResolution/MultiRepresentation Data Base). Przedstawiają one taką konstrukcję bazy danych, w której wyróżnia się kilka poziomów uogólnienia danych i dla każdego z poziomów przechowuje się inną reprezentację obiektu. Tworzenie wielorozdzielczych baz danych pozwala zarządzać danymi o różnym stopniu szczegółowości [GOTLIB, 2008]. Wykorzystanie MRDB do przechowywania danych numerycznego modelu terenu w postaci TIN przyspieszyłoby pracę z danymi wysokościowymi na różnych poziomach uogólnienia i umożliwiłoby szybsze tworzenie pochodnych modeli uogólnionych oraz wizualizacji danych trójwymiarowych. Chcąc zmniejszyć poziom szczegółowości danych wysokościowych, należy zastosować jeden z wielu algorytmów generalizacyjnych.

Zagadnienie generalizacji rzeźby terenu jest procesem klasyfikowanym na wiele sposobów, w zależności od przyjętej metodyki. Duże znaczenie ma również rodzaj danych źródłowych. Uproszczenie danych w modelu TIN składającego się z sieci ściśle połączonych ze sobą trójkątów zachowujących relacje topologiczne. Po dodaniu do modelu linii strukturalnych, należy dodatkowo uwzględnić ich położenie i wpływ, jaki mają na przyległe wierzchołki i trójkąty. Dlatego też zagadnieniu temu należy poświęcić dużo uwagi w momencie tworzenia Wielorozdzielczych Baz Danych.

### 1. Podstawy teoretyczne

Zagadnienie generalizacji rzeźby terenu zawiera w sobie dwie spośród trzech największych problemów kartografii nazwanych przez niemieckiego kartografa Emila von Sydowa rafaami [OLSZEWSKI, 2009]. Problemy te dotyczą przedstawienia rzeźby terenu na mapie oraz samej generalizacji kartograficznej. Mimo że zagadnienia te zostały opisane w 1866 roku, to nadal zaliczane są do podstawowych problemów kartografii. Problem ten nie zniknął mimo zdecydowanego rozwoju kartografii w kierunku kartografii cyfrowej, a co za tym idzie – innych metod zapisu, przechowywania i przedstawiania danych.

### **1.1. Reprezentacja rzeźby terenu**

Przedstawienie rzeźby terenu na mapach jest jednym z najstarszych problemów w kartografii [SALISZCZEW, 1984]. Począwszy od map kopczykowych, poprzez mapy kreskowe, hipsometryczne, a kończąc na mapach izolinii, model rzeźby terenu reprezentowany był na różne sposoby. Tworzenie map z perspektywnym obrazem terenu pozwalało na wizualizację różnic wysokości, kształtu czy też orientacji poszczególnych form, jednak odbywało się to kosztem dokładności położenia obiektów przedstawionych na mapie. Popularną metodą, oprócz prezentacji informacji w ujęciu perspektywnym, były mapy kopczykowe oraz blokdiagramy [ROBINSON, SALE, MORISON, 1988]. Mapy takie nie pozwalały jednak na przedstawienie zbyt dużej ilości informacji, dlatego też z czasem takie formy prezentacji rzeźby terenu zostały wyparte innymi metodami.

Obecnie najczęstszą formą przedstawiania rzeźby terenu są mapy poziomicowe, gdzie wysokość terenu przedstawiona jest za pomocą izolinii o odpowiednim interwale. Również popularną metodą do wizualizacji rzeźby terenu jest stosowanie map hipsometrycznych, gdzie kolor lub jego natężenie dostarczają informacji na temat wysokości terenu. Powszechna komputeryzacja umożliwiła zapis danych wysokościowych w postaci numerycznego modelu terenu, który może być nie tylko podstawą do stworzenia mapy wysokościowej i prezentacji rzeźby terenu, lecz również do modelowania oraz wykonywania analiz przestrzennych.

### **1.2. Numeryczny model terenu**

Istnieje wiele definicji numerycznego modelu terenu. Jedna z nich [KURCZYŃSKI, PREUSS, 2003] mówi, że „Numeryczny Model Rzeźby Terenu (Digital Terrain Model – DTM) jest numeryczną, dyskretną (punktową) reprezentacją wysokości topograficznej powierzchni terenu, wraz z algorytmem interpolacyjnym umożliwiającym odtworzenie jej kształtu w określonym obszarze”. Oznacza to, że rzeźbę terenu nie wystarczy przedstawić w postaci zbioru punktów i linii, lecz jako ciągłą powierzchnię zawierającą algorytm, dzięki któremu w dowolnym miejscu na tej powierzchni możliwe będzie odczytanie współrzędnej wysokościowej.

W trakcie tworzenia numerycznego modelu terenu należy zwrócić uwagę na źródło pozyskania danych, a także na ich dokładność i szczegółowość. Poprawny numeryczny model terenu (NMT) będzie zawierał nie tylko informacje dotyczące wysokości poszczególnych punktów, lokalnych ekstremów i punktów charakterystycznych, lecz będzie również przedstawiał miejsca charakterystyczne ze względu na występowanie nieciągłości, linii szkieletowych czy też obszarów wyłączeń. Przedstawienie takich miejsc możliwe jest dzięki wykorzystaniu w NMT linii strukturalnych.

Niekiedy takie linie strukturalne można pozyskać na podstawie charakterystycznych punktów terenu (wierzchołki, punkty siodłowe, punkty grzbietowe, ujścia cieków, wypukłości i wklęsłości grzbietów, dna dolin itp.), jednak najlepiej, jeśli są one pozyskiwane bezpośrednio w trakcie pomiaru punktów źródłowych. Linie te tworzą swoisty szkielet konstrukcyjny form rzeźby terenu [KOCHMAN, OLSZEWSKI, 2005].

Numeryczny model terenu przedstawiany jest najczęściej w strukturze regularnej – GRID, lub nieregularnej – TIN. Każda z tych postaci posiada wielu zwolenników, jak i przeciwników. Model GRID określany jest jako macierz wysokości punktów z określonym rozmiarem pojedynczego oczka siatki modelu. Wykorzystuje się go przede wszystkim do analiz przestrzennych, a także tworzenia pochodnych modelu wysokościowego, takich jak mapy spadków, ekspozycji, warstwice. Model ten wykorzystywany jest często ze względu na prostotę jego zapisu, łatwość modelowania powierzchni oraz archiwizacji. Mimo tych zalet należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że model ten nie zawiera oryginalnych danych pomiarowych, lecz punkty go tworzące są interpolowane do położenia odpowiadającego rozmiarowi oczka siatki numerycznego modelu terenu.

Model TIN powstaje w wyniku triangulacji punktów pomiarowych. Przedstawia on rzeźbę terenu za pomocą sieci trójkątów zachowujących topologię między poszczególnymi formami terenu. Model TIN posiada źródłowe dane wzbogacone przeważnie liniami strukturalnymi. Charakter struktury nieregularnej pozwala na lepsze przedstawienie rzeźby terenu z relatywnie mniejszą liczbą punktów pomiarowych niż w przypadku modelu regularnego. Model nieregularny nie jest jednak powszechnie stosowany ze względu na złożoność zapisu. Często więc jest przetwarzany do postaci regularnej za pomocą jednego z wielu algorytmów interpolacyjnych.

### **1.3. Generalizacja kartograficzna**

Termin „generalizacja” wywodzi się z łacińskiego słowa *generalis*, które oznacza uogólnienie. Jest to złożony proces mający na celu przedstawienie danych geograficznych na mapie z zachowaniem ich podstawowej struktury i charakteru. W trakcie tworzenia mapy niemożliwe jest przedstawienie wszystkich szczegółów terenu bez zmniejszenia ich szczegółowości i złożoności do odpowiedniej skali, dlatego też konieczne jest odpowiednie przekształcenie tych danych w celu zwiększenia efektywności przekazu kartograficznego.

Generalizacja kartograficzna jest złożonym procesem, który ma na celu prezentację obiektów na mapie. Według Robinsona [ROBINSON, SALE, MORRISON, 1988] można wyróżnić cztery kategorie procesów, zwane również elementami generalizacji kartograficznej:

- wybór i uproszczenie – określenie istotnych cech danych, ich zachowanie i uwypuklenie, a także eliminacja niepożądanych szczegółów;
- klasyfikacja – uporządkowanie danych, dobór odpowiedniej skali, grupowanie danych;
- symbolizacja – graficzne zakodowanie pogrupowanych danych;
- indukcja – zastosowanie logicznego procesu wnioskowania;

Istnieje wiele definicji procesu generalizacji [SALISZCZEW, 1984, BRASSEL, WEIBEL, 1988, CHROBAK, 2007], jednak nieodzownym elementem generalizacji kartograficznej jest konieczność ustalenia reguł upraszczania oraz wyboru, kiedy te reguły mają być stosowane. Generalizacja, ze względu na swój subiektywizm (co i kiedy jest upraszczane zależy od przyjętej metody), może być traktowana jako sztuka lub też jako zespół mechanizmów i algorytmów [OLSZEWSKI, 2009].

Wraz z rozwojem technologii cyfrowej podjęto próby automatyzacji procesu generalizacji informacji geograficznej. W przypadku wektorowych danych cyfrowych większość algorytmów opiera się na ich upraszczaniu poprzez redukcję liczby punktów tworzących dany obiekt (obiekty liniowe i poligonowe). Operatory upraszczania wybierają położenie punktów do ich odrzucenia lub pozostawienia, przy ocenie ich stosowania w procesie upraszczania linii [CHROBAK, 2007]. Dla danych rastrowych stosuje się filtry z algorytmami interpolującymi mające na celu zmniejszenie rozdzielczości obrazów źródłowych.

W przypadku generalizacji numerycznego modelu terenu problem jest bardziej złożony niż w przypadku uproszczenia linii łamanych, czy też obiektów poligonowych. Model TIN składa się z sieci połączonych ze sobą trójkątów, tworzących spójny i poprawny topologicznie obiekt powierzchniowy. W związku z tym generalizacja takiej powierzchni powinna uwzględniać i zachowywać wszystkie reguły topologiczne tworzące ten model, nie naruszając jego ciągłości oraz zachowując główne charakterystyki morfologiczne modelu.

## **2. Generalizacja rzeźby terenu**

Jednym z większych wyzwań współczesnej kartografii jest zagadnienie dotyczące generalizacji numerycznego modelu terenu. Zgodnie z teorią Sydowa, tematyka ta dotyczy dwóch z trzech zdefiniowanych przez niego problemów kartografii i w dalszym ciągu stanowi ona problem do rozwiązania.

Przedstawiając na mapie model wysokościowy, najczęściej posługujemy się modelem warstwicowym. Różne skale opracowań kartograficznych wymagają zmiany wartości cięcia warstwicowego, jak i redukcji złożoności samego modelu. Niektórzy [STANEK, 2006, LI, SUI, 2000, MATUK, GOLD, LI, 2006] w swoich pracach bazowali na generalizacji samego mo-

delu warstwiczowego, pozostawiając bez zmian źródłowy model wysokościowy (regularny lub nieregularny), jednak patrząc na numeryczny model terenu w kontekście wielorozdzielczych baz danych, należy skupić się na generalizacji modelu, nie zaś samej jego reprezentacji na mapie.

Wielu autorów zajmowało się generalizacją rzeźby terenu. W wyniku ich prac powstał ogromny zasób algorytmów generalizujących. Kłasyfikację tych algorytmów można przedstawić na różne sposoby.

Poniżej przedstawiono kilka rodzajów metod generalizacji. Część z algorytmów opisanych poniżej może z powodzeniem zaliczać się do kilku grup, jednak zdecydowano przypisać je do grupy, w której większe znaczenie ma sposób wyboru danych do uproszczenia. Spośród wielu metod generalizacji postanowiono w tym artykule skupić się na następujących:

- metody wykorzystujące dziesiątkowanie wierzchołków;
- metody wykorzystujące eliminację krawędzi trójkątów;
- metody dekompozycyjne;
- metody wykorzystujące konwersję do postaci regularnej;
- metody bazujące na inteligencji obliczeniowej.

Poniżej przedstawionych zostanie kilka przykładów algorytmów generalizujących NMT w postaci nieregularnej z uwzględnieniem przedstawionego podziału.

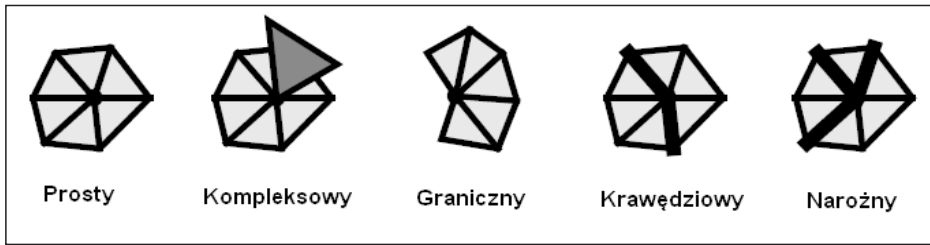
### **2.1. Dziesiątkowanie wierzchołków**

Założeniem tej metody jest zmniejszenie liczby trójkątów z zachowaniem topologii oraz przybliżonego kształtu pierwotnej powierzchni. Metoda ta bazuje na dziesiątkowaniu wierzchołków trójkątów na podstawie zadanego kryterium. Jest to jedna z szybszych metod generalizacji numerycznego modelu terenu i w swoich pracach wykorzystali ją między innymi Schroeder et. al. [SCHROEDER, ZARGE, LORENSEN., 1992] oraz Guoqing et. al. [GUOQING, ZHUN, MAO, 2006].

Przykładowo, algorytm zaproponowany przez Schroeder et. al. [SCHROEDER, ZARGE, LORENSEN., 1992] składa się z trzech prostych kroków:

- określenie typu wierzchołka, jego geometrii i topologii,
- określenie warunków upraszczania,
- triangulacja obszaru po usunięciu punktu.

W pierwszym kroku algorytmu określany jest typ wierzchołka. Wierzchołek może być prosty, kompleksowy, graniczny, krawędziowy lub też narożny (rys. 1). Następnie w zależności od typu wierzchołka określany jest warunek upraszczania. Jeśli dany punkt nie spełnia zadanego kryterium, zostaje usunięty wraz ze wszystkimi trójkątami, które do niego przylegały. W miejscu powstałej luki przeprowadzana jest ponowna triangulacja.



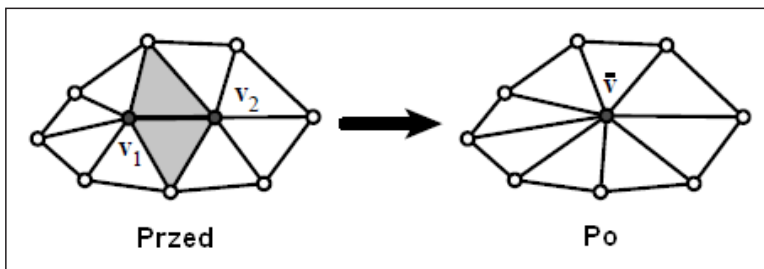
Rysunek 1. Typy wierzchołków w siatce trójkątów

Źródło: [SCHROEDER, ZARGE, LORENSEN, 1992].

Algorytmy bazujące na dziesiątkowaniu punktów są wydajne pod względem czasowym, jednak bez dodatkowych założeń nie zawsze dobrze odzwierciedlają topografię terenu, niekiedy znacznie ją zaburząc w stosunku do pierwotnego modelu (zwłaszcza w obszarach z dużą ilością linii strukturalnych).

## 2.2. Eliminacja krawędzi

W metodzie tej modyfikowane są krawędzie trójkątów poprzez eliminację jednego z wierzchołków krawędzi lub eliminację obu wierzchołków i wstawienie punktu pośredniego znajdującego się w określonym miejscu na eliminowanej krawędzi (rys. 2). Algorytmy bazujące na modyfikacjach krawędzi trójkątów wykorzystali w swojej pracy m.in.: Guéziec [GUÉZIEC, 1997], Hoppe [HOPPE, 1996], Garland i Heckbert [GARLAND, HECKBERT, 1998] oraz De Floriani, Magillo i Puppo [DE FLORIANI, MAGILLO, PUPPO, 2000]. Podstawową różnicą w stworzonych przez nich algorytmów był sposób wyboru krawędzi do modyfikacji.

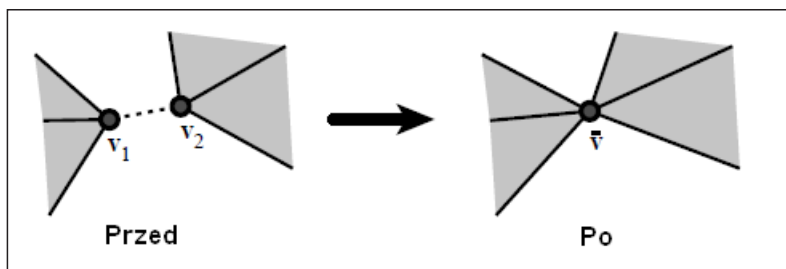


Rysunek 2. Modyfikacja krawędzi trójkąta. W wyniku uproszczenia pogrubiona krawędź zostanie przekształcona, trójkąty, które przylegały do tej krawędzi zostaną usunięte, a w ich miejscu zostanie przeprowadzona ponowna triangulacja

Źródło: [GARLAND, HECKBERT, 1998].

Garland i Heckbert [GARLAND, HECKBERT, 1998] jako podstawę do wyboru krawędzi brali wartość błędu wyznaczaną na podstawie macierzy błędów dla wierzchołków danej krawędzi. Iteracyjnie usuwane były krawędzie, których znaczenie przy tworzeniu powierzchni było najmniejsze. Po modyfikacji pojedynczej krawędzi następowała ponowna triangulacja w obszarze, który uległ zmianom, a następnie znów przypisywano wartości wag nowoutworzonym krawędziom. W ten sposób iteracyjnie usuwano wszystkie krawędzie trójkątów, które nie przekraczały zadanej wartości wagi.

etoda ta z powodzeniem stosowana jest również do przeprowadzania upraszczania na dowolnych powierzchniach przedstawianych za pomocą siatki trójkątów. Znajduje ona zastosowanie zarówno w medycynie, jak i klasycznej grafice komputerowej. Pozwala wyszukiwać dowolne punkty znajdujące się w zadanej od siebie odległości, niekoniecznie stanowiących wierzchołki wspólnej krawędzi. W wyniku przeprowadzenia algorytmu na takich danych dwa sąsiadujące ze sobą obszary mogą zostać połączone w jeden spójny model (rys. 3).



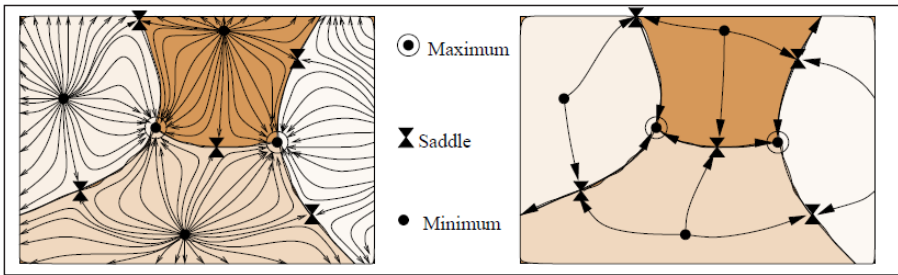
Rysunek 3. Modyfikacja punktów nieposiadających wspólnej krawędzi, lecz znajdujących się w określonej odległości od siebie. W wyniku przeprowadzenia algorytmu obszary zostają połączone

Źródło: [GARLAND, HECKBERT, 1998].

### 2.3. Metody dekompozycyjne

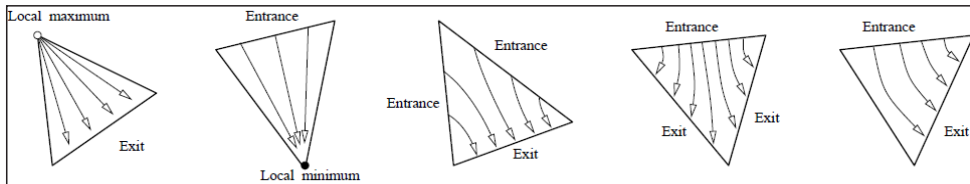
Metody bazujące na dekompozycji w dobry sposób oddają charakter topografii terenu. Zwracają one uwagę na takie elementy jak punkty ekstremalne oraz linie strukturalne terenu. Upraszczonej powierzchni jest z reguły dzielona na obszary ograniczone liniami szkieletowymi i ciekowymi terenu, a następnie wewnątrz tych obszarów przeprowadzana jest generalizacja dowolną metodą. Dekompozycje w swojej pracy stosowali m.in. Bajaj i Shikore [BAJAJ, SHIKORE, 1998] oraz Danavaro i in. [DANAVARO i in., 2003].





Rysunek 4. Podział terenu na regiony  
 Źródło: [DANAVARO i in., 2003].

Danavaro w swojej pracy stworzyła algorytm dekompozycyjny bazujący na nachyleniu trójkąta. Dla każdego trójkąta w modelu obliczano iloczyn skalarny między gradientem trójkąta a normalną do każdej krawędzi. W ten sposób wyznaczono wejścia i wyjścia w każdym z trójkątów oraz najlepsze wyjścia – zgodne z linią największego spadku (rys. 5). Trójkąty o spadku równym 0 wykluczane były z analizy i brane jako obszar wyłączony.



Rysunek 5. Określenie wejść i wyjść trójkątów  
 Źródło: [DANAVARO i in., 2003].

Całość algorytmu dekompozycyjnego podzielono na dwie części. W pierwszej rozważane były punkty o największych wysokościach. Jeśli punkt był lokalnym maksimum, wówczas wszystkie trójkąty przypisane zostały do danego punktu. Następnie do przypisanych trójkątów dopisywano trójkąty przynależące do krawędzi będącej krawędzią oznaczoną jako „najlepsze wyjście”, pod warunkiem, że nie należały one już do innych grup, oraz krawędź stykająca się z obszarem była krawędzią wejścia przypisywanego trójkąta. Gdy do danego punktu przypisano już wszystkie trójkąty spełniające powyższe warunki, wówczas brano kolejny punkt o największej wysokości. Jeśli punkt ten był również lokalnym maksimum, procedurę powtarzano i tworzone nowy obszar, jeśli natomiast punkt ten nie był lokalnym maksimum, wówczas trójkąty przypisywano do sąsiedniego obszaru posiadającego największą wysokość punktu. W ten sposób

wyznaczone zostały linie ciekowe terenu przedstawiające dna dolin i linie największego spadku.

Druga część algorytmu polegała na analogicznym rozpatrywaniu lokalnym minimów. Dzięki temu powstawały obszary podzielone wzdłuż linii grzbietowych. Po nałożeniu obu obszarów na siebie powstawała sieć krytyczna dzieląca model na obszary o zbliżonej topografii (Rys. 4).

Tak podzielony obszar uwzględniał tereny rozdzielone między sobą liniami strukturalnymi oraz obszary płaskie. W każdym z tych obszarów następowała następnie generalizacja. W sieci krytycznej niezmiennikami były punkty siodłowe, które nie mogły zostać usunięte. Pozostałe punkty zależnie od przyjętego kryterium generalizacji były upraszczane bądź pozostawiane.

#### **2.4. Konwersja do postaci regularnej**

Metoda ta polega na nałożeniu regularnej siatki na model nieregularny i nadanie każdemu oczku tej siatki wysokości wynikającej z wierzchołków znajdujących się wewnątrz oczka siatki lub leżących w jego najbliższym sąsiedztwie [ROSSIGNAC, BORREL, 1993]. Jest to metoda dość szybka, jednak wiąże się z utratą bardzo dużej liczby informacji oraz możliwą zmianą topografii terenu poprzez usunięcie linii strukturalnych oraz mniejsze uwypuklenie punktów charakterystycznych. Ponadto jakość danych powstałych w wyniku tej generalizacji jest przeważnie bardzo niska.

#### **2.5. Wykorzystanie metod inteligencji obliczeniowej**

Zagadnienie dotyczące wykorzystania w generalizacji NMT metod inteligencji obliczeniowej jest dość złożone. Olszewski [OLSZEWSKI, 2009] w swojej pracy zaproponował wykorzystanie do generalizacji Numerycznego Modelu Terenu metod inteligencji obliczeniowej poprzez stworzenie wieloparametrowego algorytmu iteracyjnej filtracji lokalnej modelu TIN umożliwiającego ewaluację uzyskanych wyników. Takie podejście umożliwia kontrolę błędów topograficznych, zachowuje topologię i linie strukturalne. Wykorzystanie wagowania punktów w oparciu o istniejące w modelu linie strukturalne zezwala na utworzenie hierarchicznego modelu TIN. Linie strukturalne nie zostały jednak pozyskane na drodze analizy modelu, lecz na etapie opracowania danych pomiarowych. Dlatego też w metodzie tej istotne jest posiadanie odpowiednio skonstruowanej sieci strukturalnej modelu na wstępie pracy.

Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych lub systemów wnioskowania rozmytego do generalizacji numerycznego modelu terenu mimo automatyzacji nie pozbawia procesu subiektywności i wciąż zależne jest od wiedzy i doświadczenia osoby wykonującej tę operację.

### **3. Uwzględnienie hierarchii w generalizacji nmt**

Przedstawione powyżej algorytmy generalizujące mają na celu uproszczenie kształtu i zmniejszenie elementów składowych modelu TIN. Niezależnie od przyjętej metody otrzymywany jest uproszczony obraz w odniesieniu do obrazu pierwotnego. W przypadku generalizacji modelu TIN przedstawiającego rzeźbę terenu należy dokonać klasyfikacji obiektów składowych i odpowiednio je uporządkować. Aby poprawnie zgeneralizować numeryczny model terenu w postaci TIN należy dokonać klasyfikacji, uwzględniając następujące hierarchie:

- hierarchia wynikająca z rodzaju punktów,
- hierarchia wynikająca z rodzaju krawędzi,
- hierarchia wynikająca z przestrzeni geograficznej,
- hierarchia wynikająca z warunku rozpoznawalności.

W odróżnieniu od generalizacji modelu TIN przedstawiającego wybrany obiekt (grafika komputerowa) uwzględnienie przestrzeni geograficznej i warunku rozpoznawalności ma istotne znaczenie. Poniżej zostaną omówione poszczególne warunki i rodzaje klasyfikacji.

#### **3.1. Hierarchia wynikająca z rodzaju punktów**

Uproszczenie numerycznego modelu terenu polega przede wszystkim na usunięciu wierzchołków, które mają relatywnie mały wpływ na jego kształt. Dlatego też bardzo istotne jest, aby punkty były odpowiednio sklasyfikowane. Punkty ekstremalne mają ogromne znaczenie w modelowaniu i określaniu kształtu terenu, dlatego też muszą one zająć wysokie miejsce w hierarchii punktów. Wyróżnić należy również punkty siodłowe, punkty znajdujące się na liniach nieciągłości oraz wszelkie punkty charakterystyczne niebędące punktami masowymi.

Hierarchia wierzchołków trójkątów modelu TIN może być zastosowana w połączeniu z algorytmami wykorzystującymi dziesiętkowanie wierzchołków. Odpowiednia modyfikacja algorytmu zaproponowanego przez Schroeder i in. [SCHROEDER, ZARGE, LORENSEN, 1992] połączona z analizą topograficznego indeksu pozycji (TPI) [JENNES, 2006] podzieli wierzchołki w modelu nie tylko ze względu na ich umiejscowienie w modelu (prosty, graniczny, krawędziowy), lecz również uwzględni występowanie lokalnych ekstremów oraz istnienie punktów siodłowych. Klasyfikacja ta pozwoli łatwo zdefiniować, które punkty istotnie wpływają na kształt modelu oraz nadać im odpowiednią wagę.

#### **3.2. Hierarchia wynikająca z rodzaju krawędzi**

Kolejnym ważnym elementem numerycznego modelu terenu jest istnienie linii szkieletowych. Uwzględnienie istnienia tych linii pozwala na

uwzględnienie w modelu miejsc charakterystycznych, takich jak: grzbiety górskie, dna dolin, tereny o jednakowym nachyleniu czy tereny wyłączone z tworzenia modelu. Linie te mogą być przedstawione pierwotnie na modelu lub być wyznaczone za pomocą algorytmów dekompozycyjnych. Oba rodzaje tych linii powinny być jednak uwzględnione w trakcie procesu generalizacji, co pozwoli na dokładniejsze odzwierciedlenie kształtu powierzchni terenu.

Algorytm zaproponowany przez Danavaro [DANAVARO i in., 2003] pozwoli sklasyfikować linie tworzące model szkieletowy nieregularnej siatki trójkątów. Linie wyznaczone w trakcie dekompozycji uzupełnione istniejącymi na modelu liniami szkieletowymi w bardzo dobry sposób odzwierciedlą kształt terenu, dzieląc go na obszary o jednakowej ekspozycji. Dzięki temu możliwy będzie podział modelu na obszary jednorodne, w obrębie których dokonywane będzie uproszczenie w postaci eliminacji wierzchołków.

### **3.3. Hierarchia wynikająca z przestrzeni geograficznej**

Numeryczny model terenu powinien jak najwierniej przedstawiać przestrzeń geograficzną na wybranych poziomach uogólnienia. Oznacza to, że dany element środowiska przyrodniczego, który jest przedstawiany w wybranej skali, powinien być również uwzględniony na modelu. Dotyczy to przede wszystkim obiektów, takich jak drogi, rzeki, jeziora, tereny zurbanizowane oraz inne punkty i obiekty charakterystyczne, mające wpływ na budowę modelu wysokościowego.

Obiekty o strategicznym znaczeniu za względu na topografię terenu powinny mieć swoje odzwierciedlenie na modelu wysokościowym. Cieki wodne są przeważnie zbieżne z liniami szkieletowymi prezentującymi dna dolin, jednak obiekty przedstawiające szlaki komunikacyjne (drogi, tory kolejowe) nie zawsze znajdują odzwierciedlenie w istniejących, bądź też wyznaczonych liniach szkieletowych modelu. Ważne jest natomiast, aby ich przebieg został uwzględniony w upraszczanym modelu, gdyż tylko w ten sposób zostanie zachowana spójność danych przestrzennych. Klasyfikacja ta dotyczy również krawędzi odzwierciedlających obiekty, takie jak brzeg jeziora oraz punktów przedstawiających obiekty istotne ze względu na swoje położenie, niebędące ekstremami lokalnymi oraz punktami siodłowymi.

### **3.4. Hierarchia wynikająca z warunku rozpoznawalności**

Integracja między modelem wysokościowym a elementami przestrzeni geograficznej na dowolnym poziomie uogólnienia możliwa jest dzięki zastosowaniu jednakowego kryterium upraszczania. Zastosowanie warunku rozpoznawalności [CHROBAK, 2007] przy upraszczaniu numerycz-

nego modelu terenu pozwoli na odpowiednie przedstawienie tych danych w wybranej skali. Z racji, że dane wysokościowe powinny uwzględniać istniejące elementy przestrzeni geograficznej, w trakcie ich upraszczania należy zastosować warunek rozpoznawalności wynikający z trójkąta elementarnego. Dzięki temu dane wysokościowe będą upraszczane w takim samym stopniu jak elementy przestrzeni geograficznej.

Dokonując odpowiednich klasyfikacji składowych modelu wysokościowego, będzie można określić minimalny próg rozpoznawalności dla każdego rodzaju danych, co w znacznym stopniu może przyspieszyć proces generalizacji. W ten sposób zostaną usunięte krawędzie, które nie spełniają warunku rozpoznawalności na odpowiednim poziomie uogólnienia.

Wykorzystując przedstawione klasyfikacje, otrzymamy w pełni uporządkowany zbiór danych numerycznego modelu terenu, który następnie będzie mógł być przedstawiony na dowolnym w dowolnej skali. Takie przedstawienie danych pozwoli na odpowiednią ich analizę, gdyż tylko dane odpowiednio uporządkowane będą poprawnie przeanalizowane ze względu na wpływ, jaki mają w tworzeniu numerycznego modelu terenu. Jest to niewątpliwą zaletą tego podejścia. Niestety taka klasyfikacja, obejmująca swym zakresem wiele aspektów, może być czasochłonna i niekiedy dać sprzeczne wyniki.

## **Wnioski**

Mimo tak wielkiej ilości algorytmów przeznaczonych do generalizacji NMT, zagadnienie upraszczania rzeźby terenu jest wciąż rozwijane. Kierunki rozwoju tych algorytmów zależą przede wszystkim od przyjętej metody podejścia do klasyfikacji danych. Przedstawione powyżej algorytmy służą uproszczeniu numerycznego modelu terenu w postaci TIN. Bardzo ważne jednak w procesie generalizacji jest uwzględnienie odpowiedniej hierarchii danych. Należy przed zastosowaniem jednego z wybranych algorytmów dokonać klasyfikacji danych modelu. Przygotowanie modelu w taki sposób umożliwi uwzględnienie złożoności modelu, jakim jest model reprezentujący rzeźbę terenu. Numeryczny Model Terenu w postaci TIN powinien jak najwierniej odzwierciedlać kształt terenu, zachowując jego elementy charakterystyczne. Należy również w trakcie generalizacji uwzględnić przestrzeń geograficzną przedstawioną na mapach po generalizacji. Zastosowanie jednakowego warunku w trakcie upraszczania obiektów przestrzeni geograficznej oraz numerycznego modelu terenu powinno zapewnić spójność między tymi danymi na każdym poziomie uogólnienia.

## Literatura

- Bajaj C., Shikore D., 1998, Topology preserving data simplification with error bounds, *Journal on Computers and Graphics*, Vol. 22, no. 1, s. 3–12.
- Brassel K., Weibel R., 1988, A review and conceptual framework of automated map generalization, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 2, s. 229–244.
- Chrobak T., 2007, *Podstawy Cyfrowej Generalizacji Kartograficznej*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- De Florian L., Magillo P., Puppo E., 2000, Compressing Triangulated Irregular Networks, *Geoinformatica* Vol 4:1, s. 67–88.
- Danavaro et. al., 2003, Morphology-Driven Simplification and Multiresolution Modeling of Terrains, *11th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, Nowy Jork.
- Guézec A., 1997, *Surface Simplification Inside a Tolerance Volume*, Computer Science/Mathematics, RC 20440(90191).
- Guoqing Y., Zhun Ch., Mao W., 2006, The New Triangulation-Simplify Algorithm of TIN, *International Conference on Computer Graphics & Virtual Reality*, s. 79-85.
- Hoppe H., 1996, *Progressive meshes*, Siggraph, s. 99–108.
- Kurczyński Z., Preuss R., 2003, *Podstawy fotogrametrii*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 301–302.
- Li Z., Sui H., 2000, An Integrated Technique for Automated Generalization of Contour Maps, *The Cartographic Journal*, Vol.37/1.
- Matuk K., Gold Ch., Li Z., 2006, Skeleton Based Contour Line Generalization, *Progress in Spatial Data Handling*, Springer
- Olszewski R., 2009, *Kartograficzne modelowanie rzeźby terenu metodami inteligencji obliczeniowej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Robinson A., Sale R., Morison J., 1988, *Podstawy Kartografii*, Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Rossignac J., Borrel P., 1993, Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes, Falcidieno B., Kunii T., *Modeling in Computer Graphics: Methods and Applications*, s. 455–465.
- Saliszczew K.A., 1984, *Kartografia Ogólna*, Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Schroeder W., Zarge J., Lorensen W., 1992, Decimation of Triangle Meshes, *Computer Graphics*, Vol. 26, s. 65–70.

Stanek K., 2006, Design of a Support System to Cartographic Generalization of a Topographic Reference Base, *ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Portland.

### **Netografia**

Garland M., Heckbert P., 1998, *Surface Simplification Using Quadric Error Metric*, <http://mgarland.org/files/papers/quadrics.pdf> - dostępność: maj 2011.

Gotlib D., 2008, *Wybrane aspekty modelowania wielorozdzielczych I wieloreprezentacyjnych baz danych topograficznych*, materiały na Seminarium Nowe Trendy w Budowie Baz Danych Topograficznych, listopad 2008, Kraków, www: <http://www.skpan.agh.edu.pl/pliki/DariuszGotlib.pdf>

Jennes J., 2006, *Topographic Position Index (TPI) v. 1.3a*, Jenness Enterprises, <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>, aktualność strony: wrzesień 2011.

**Krystian Koziol\*, Jolanta Knecht\*,  
Stanisław Szombara\*\*(\*\*)**

\*AGH University of Science and Technology in Cracow  
Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering  
Department of Geomatics

\*\*The Bronisław Markiewicz State School  
of Technology and Economics in Jarosław  
The Institute of Technical Engineering  
*krystian.koziol@agh.edu.pl, jknecht@agh.edu.pl,  
szombara@agh.edu.pl*

## **The importance of hierarchy in the generalisation of dtm**

**Key Words:** *DEM, DSM, MRDB, cartographic generalization, data classification*

### **Summary**

The article presents the set of chosen algorithms for the Digital Terrain Model generalization in the Triangulated Irregular Networks. Despite the development in computerization as well as in digital processing and presenting the elevation data, the issue still poses a serious problem to the contemporary cartography. When DTM are stored in the Multi-resolution Databases, the generalizing algorithms are used, making it possible to present the elevation data on any level of generalization. The article focuses mainly on the generalization of the irregular models, as they are both very complex and important for the cartographic modeling. The emphasis is put also on the multi-aspect DTM generalization. The author specifies the factors which should have dominant influence while classifying the data and establishing the hierarchy. Only if these factors are taken into consideration in the process of three-dimensional models generalization, it will assure both the recognition of the terrain details and the topographical correctness of the model as far as the represented geographical space is concerned.