

Dariusz GOŚCIEWSKI¹

USTALENIE WIELKOŚCI SIATKI BAZOWEJ STRUKTURY GRID W ZALEŻNOŚCI OD UKSZTAŁTOWANIA TERENU

Streszczenie

Jednym ze sposobów reprezentacji numerycznego modelu terenu (DTM) w systemach informacji przestrzennej (SIP, GIS) jest regularna siatka kwadratów (GRID). Podstawowym problemem pojawiającym się podczas konstrukcji takiej siatki jest odpowiednie ustalenie jej zagęszczenia w zależności od ukształtowania terenu. W większości przypadków dobór elementarnego parametru konstrukcyjnego, jakim jest wielkość kwadratu bazowego, dokonywany jest przez operatora systemu. Różnie ukształtowany teren wymaga różnej rozdzielczości siatki interpolacyjnej, odpowiednio dobranej, w celu uchwycenia szczegółów morfologicznych terenu i przedstawienia go w odpowiedniej jakości oraz z odpowiednią dokładnością. Dobór zagęszczenia siatki w zależności od ukształtowania terenu jest pracochłonny i bywa często intuicyjny oraz subiektywny ponieważ wynika z doświadczenia danego operatora. Rosnące wymagania, stawiane współczesnym systemom informacji przestrzennej, determinują stosowanie procedur, które automatyzują proces przetwarzania danych, czyniąc go obiektywnym dla różnego rodzaju informacji. Dotyczy to także definiowania zagęszczenia węzłów GRID. W artykule zaproponowano automatyzację ustalania tej wielkości w zależności od ukształtowania morfologicznego terenu. Po zastosowaniu opisywanych procedur różnie ukształtowany teren otrzymuje różne zagęszczenie siatki, co pozwala zminimalizować niedokładności tworzonego modelu powierzchni. W rezultacie powstaje GRID niejednorodny, który umożliwia ograniczenie liczby punktów przechowywanych w bazie DTM do niezbędnego minimum, przy jednoczesnym zachowaniu zrównoważenia dokładności modelu terenu na całym obszarze.

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu, siatka regularna, GRID, numeryczne modelowanie powierzchni, analiza dokładności, GIS

1. Wstęp

Numeryczny model terenu (DTM) stanowi jedną z podstawowych warstw informacyjnych w systemach opisujących zjawiska przestrzenne (SIP, GIS) [1], [2], [3], [4]. Obecnie dane do utworzenia takiego modelu pozyskiwane są często w procesie automatycznej rejestracji punktów pomiarowych poprzez laserowy skanowanie lotnicze, echosondy wielowiązkowe, laserowe stacje pomiarowe itp. [5], [6]. Pozwala to na zgromadzenie bardzo dużej ilości danych w stosunkowo krótkim czasie. Jednak ze względu na ich ilość, rozmieszczenie przestrzenne i specyfikę, zbiorów takich nie można z reguły bezpośrednio wykorzystać przy tworzeniu DTM [7], [8], [9]. Informacje pozyskiwane w sposób automatyczny wymagają często gruntownego opracowania przed umieszczeniem ich w systemie informacji przestrzennej. Dotyczy to zwłaszcza dynamicznego przetwarzania dużych ilości danych zebranych w różnych epokach pomiarowych oraz dokonywania analiz dużych obiektów powierzchniowych w czasie rzeczywistym [10], [11]. Jedną ze struktur pozwalających na ograniczenie ilości danych, ich uporządkowanie i zmniejszenie redundancji jest regularna siatka kwadratów (GRID) [12], [13]. Powstaje ona w procesie interpolacji wartości w ustalonych punktach węzłowych na podstawie otaczających je punktów pomiarowych. Dokładność

¹ dr inż., Instytut Geodezji, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

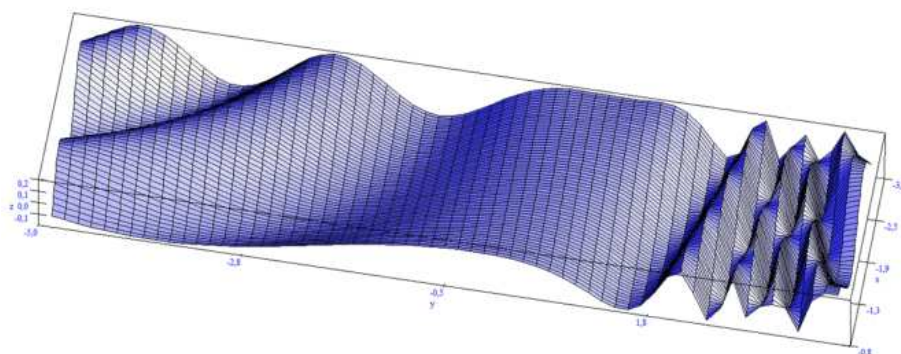
i jakość modelu terenu, tworzonego przy pomocy struktury typu GRID, determinowana jest przez jego parametry konstrukcyjne, które zależą między innymi od założonej dokładności modelu, zagęszczenia węzłów, zagęszczenia punktów pomiarowych, promienia poszukiwań punktów wokół węzła, algorytmów interpolacyjnych itp.[14], [15]. Jednym z najistotniejszych elementów konstrukcyjnych siatki, mającym zasadniczy wpływ na jakość numerycznego modelu terenu, jest rozmiar kwadratu bazowego. Wielkość oczka siatki jest ustalana między innymi na podstawie analizy rzeźby terenu. Aby cały obszar został wymodelowany z jednakową dokładnością, w strefach zróżnicowanych morfologicznie zagęszczenie węzłów siatki powinno być większe niż w strefach o niewielkich deniwelacjach. Dodatkowo odległości między poszczególnymi punktami węzłowymi siatki powinny być dobierane w taki sposób, aby tworzona struktura pozwalała na możliwie dokładną charakterystykę rzeźby terenu, przy wykorzystaniu minimalnej ilości punktów węzłowych. Obszary różne morfologicznie lokalizowane są przeważnie podczas analizy dokonywanej na bazie punktów pomiarowych lub zdjęć fotogrametrycznych [2], [7]. Jest to proces pracochłonny ponieważ wymaga przetworzenia bardzo dużej ilości danych. Przed przystąpieniem do ustalania wielkości oczka siatki bazowej na poszczególnych obszarach często należy przeanalizować bardzo zróżnicowany teren i dokonać jego generalizacji. Prawidłowe wykonanie tego zadania zależy w głównej mierze od intuicji i doświadczenia operatora systemu. W praktyce nie sposób uwzględnić wszystkich detali analizowanej powierzchni i GRID jest z reguły konstruowany jako siatka jednorodna na obszarach różnorodnych morfologicznie. Manualne ustalanie wielkości siatki nie pozwala również na precyzyjne zrównoważenie dokładności całego modelu. W rezultacie teren bardziej zróżnicowany jest modelowany z większym błędem, ponieważ siatka interpolacyjna na tym obszarze jest zbyt rzadka. Jednocześnie teren mało zróżnicowany charakteryzuje się redundancją danych, ponieważ do jego dokładnego przedstawienia wystarcza siatka o większym kwadracie bazowym. Powyższe trudności, występujące w większości systemów informacji przestrzennej, skłaniają do przeanalizowania i rozwiązania tego problemu. W celu zautomatyzowania procesu ustalania wielkości siatki bazowej w zależności od ukształtowania terenu, przy uwzględnieniu zrównoważenia dokładności całego modelu na obszarach różnorodnych morfologicznie, opracowany został zbiór autorskich aplikacji pozwalających przeanalizować to zagadnienie i wskazać możliwości rozwiązań.

2. Opracowanie modelu testowego

Miarodajne porównanie dokładności różnych powierzchni, tworzonych przy użyciu struktury GRID, wymaga zastosowania określonych procedur pozwalających na określenie błędów na poszczególnych węzłach siatki. W tym celu, przy pomocy autorskiej aplikacji, opracowany został specjalny teoretyczny model testowy. Przy pomocy funkcji dwóch zmiennych (1), w podanym przedziale wartości x i y utworzona została powierzchnia matematyczna przedstawiona na rysunku 1.

$$f(x, y) = \cos(x * y * \exp(y))$$

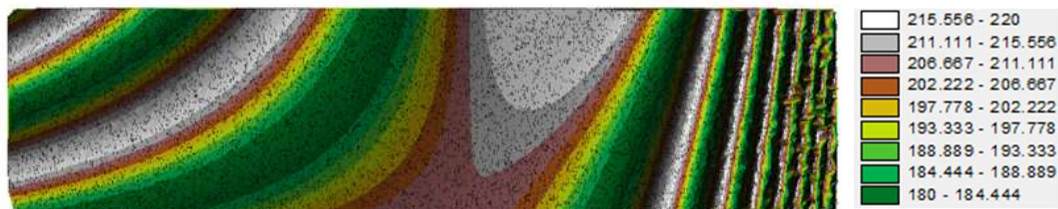
$$x \in < -3.0; -5.0 > \quad , \quad y \in < -0.8; 4.0 >$$
(1)



Rys. 1. Matematyczny model powierzchni

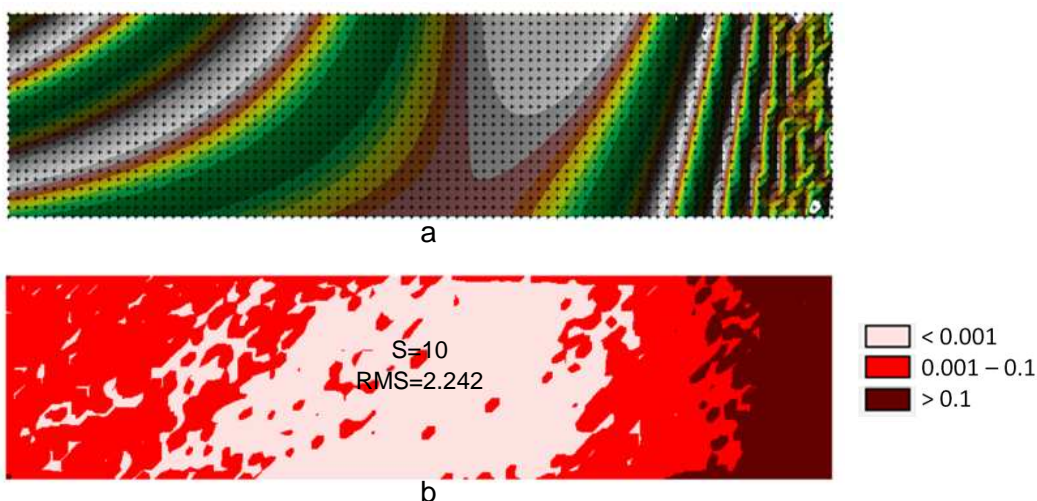
Funkcja została tak dobrana aby można było, na tworzonej przez nią powierzchni, zlokalizować strefy o różnym zróżnicowaniu morfologicznym. Następnie cały obszar wzorcowy został przeskalowany i przesunięty tak, że w rezultacie utworzył prostokąt o wymiarach 220 m X 900 m i zawierał wyłącznie

dodatknie wartości współrzędnych xy. W oparciu o taką powierzchnię wygenerowano 10000 punktów pseudopomiarowych (pp) będących odpowiednikami punktów pomiarowych. Pozwoliło to osiągnąć średnie zagęszczenie pp na przewidywany kwadrat bazowy siatki wynoszące ok. 5 pp / 100 m² powierzchni modelu. Na bazie punktów pseudopomiarowych wygenerowany został model powierzchni TIN pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Model powierzchni utworzony przez strukturę TIN

Na tak utworzonym modelu widoczne są obszary o różnym zróżnicowaniu morfologicznym. W celu przeanalizowania wpływu różnej morfologii powierzchni na jakość tworzonego modelu interpolacyjnego, na całym obszarze wygenerowana została jednorodna siatka interpolacyjna o rozmiarze bazowym $S=10$ m. Interpolacji węzłów siatki dokonano metodą aproksymacji powierzchni wielomianami 3R trzeciego stopnia [14]. Działania te pozwoliły na zbudowanie praktycznego modelu powierzchni składającego się z 2093 węzłów, pokazanego na rysunku 3a.



Rys. 3. Interpolacyjny model powierzchni utworzony przez strukturę GRID jednorodną na całym obszarze

W celu przeanalizowania dokładności utworzonego praktycznego modelu GRID i jego dopasowania do powierzchni teoretycznej, wygenerowano teoretyczną siatkę węzłów tworzących teoretyczną strukturę GRID. Dokonano tego, w oparciu o tą samą funkcję (1), w węzłach posiadających te same współrzędne co poprzednio. Następnie wyznaczono różnice pomiędzy siatką praktyczną i teoretyczną uzyskując w ten sposób błędy prawdziwe wyznaczenia wysokości na poszczególnych węzłach struktury. Wartości bezwzględne błędów, przyporządkowane do punktów węzłowych siatki kwadratów, pozwoliły na utworzenie diagramu różnicowego pokazanego na rysunku 3b. Obrazuje on dokładność dopasowania modelu interpolacyjnego do powierzchni teoretycznej. Najlepsze dopasowanie ma miejsce w środkowym, mało zróżnicowanym obszarze analizowanej powierzchni, gdzie błąd prawdziwy nie przekracza 0.001 m. W strefach bardziej zróżnicowanych morfologicznie błędy dopasowania są większe, jednak nadal nie przekraczają 0.1 m. Najmniej dokładne dopasowanie powierzchni model GRID osiągnął w strefie najbardziej zróżnicowanej, gdzie błędy przekraczają 0.1 m. Z omawianego przykładu wynika, że siatka jednorodna, zastosowana na całym obszarze, modeluje powierzchnię z różną dokładnością. Do scharakteryzowania dokładności dopasowania powierzchni interpolacyjnej do powierzchni teoretycznej

można wykorzystać również współczynnik *RMS*, którego wartość wyznaczana jest na podstawie wzoru (2).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2} \quad (2)$$

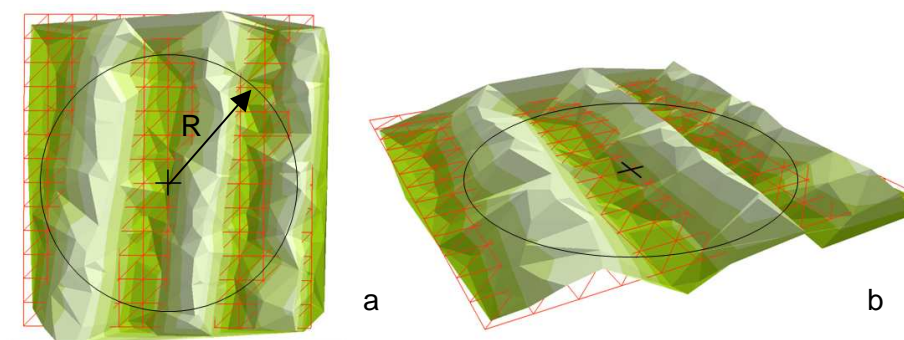
gdzie:

- $f(x, y)$ – wartość funkcji (1) w punkcie węzłowym o współrzędnych x, y ,
- z – wartość obliczona przez algorytm interpolacyjny na podstawie punktów pomiarowych w punkcie węzłowym o współrzędnych x, y ,
- n – ilość punktów węzłowych.

Wartość tego współczynnika wraz z odstępem węzłów ($S=10$ m) została podana wewnątrz diagramu pokazanego na rysunku 3b. Z analizy diagramu, pokazanego na rysunku 3b, wynika, że zastosowanie siatki jednorodnej na całym obszarze nie pozwala na zrównoważenie błędów modelu GRID. Zrównoważenie dokładności modelu na całej powierzchni wymaga wydzielenia stref o różnym ukształtowaniu powierzchni i w zależności od tego odpowiedniego dobrania zagęszczenia siatki. W strefie zróżnicowanej, gdzie model jest słabo dopasowany, należy zwiększyć zagęszczenie siatki, natomiast w środkowej strefie najdokładniejszego dopasowania modelu, nie jest wymagane tak duże zagęszczenie węzłów i można je rozrzedzić. W omawianym przykładzie stwierdzono to na podstawie diagramów różnicowych, które wymagają powierzchni teoretycznej. W praktyce nie dysponujemy jednak taką powierzchnią, mając do czynienia wyłącznie ze zbiorem punktów pomiarowych. Dodatkowo wizualizacja całego pomierzonego obszaru, w celu uchwycenia jego morfologii, na podstawie bardzo dużej ilości punktów pomiarowych jest często utrudniona lub wręcz niemożliwa. Mając to na uwadze należy zbadać możliwość zastosowania analizy numerycznej i wyznaczenia wskaźnika morfologicznego, charakteryzującego zróżnicowanie terenu bezpośrednio ze zbioru punktów pomiarowych, we wcześniej zdefiniowanych punktach teoretycznych.

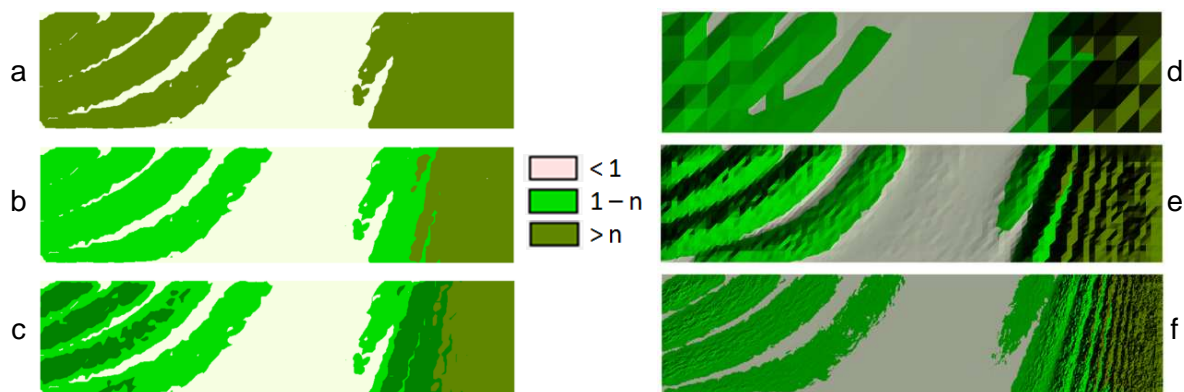
3. Wyznaczenie wskaźnika morfologicznego

W celu wyznaczenia wskaźnika morfologicznego opracowany został autorski system aplikacji pozwalający na zautomatyzowanie procesu normalizacji zagęszczenia struktury typu GRID na dowolnie zróżnicowanym obszarze pomiarowym. W systemie wskaźniki zróżnicowania morfologicznego badanej powierzchni można wyznaczyć w punktach teoretycznych zlokalizowanych w węzłach siatki, której wielkość bazową przyjmuje się jako wyjściową. Bazowa wielkość siatki ustalana jest z reguły w zależności od pożądanej dokładności opracowania. Wokół każdego węzła na badanym obszarze, w zdefiniowanym promieniu, wyszukiwane są punkty pomiarowe (rys.4a). Na bazie odszukanych w ten sposób punktów pomiarowych, leżących na badanej powierzchni, wyznaczana jest, przy pomocy metody najmniejszych kwadratów, płaszczyzna aproksymacyjna (rys.4b). Układ równań liniowych rozwiązywany jest metodą eliminacji Gaussa. Ilość punktów pomiarowych, brana pod uwagę podczas aproksymacji, zależy od ich zagęszczenia na danym obszarze i regulowana jest w systemie przez zdefiniowanie wielkości promienia poszukiwań R wokół węzła, jako wartości będącej funkcją boku kwadratu bazowego ($R=f(S)$; np. $R=\sqrt{2} \cdot S$). Istnieje również możliwość określenia minimalnej ilości pp położonych najbliżej węzła, rozmieszczonych w wybranych sektorach. Jako wskaźnik morfologiczny do poszczególnych węzłów przypisywana jest wartość pierwiastka kwadratowego z sumy kwadratów poprawek (z metody najmniejszych kwadratów, która jest stosowana podczas aproksymacji płaszczyzną fragmentu terenu wokół węzła w zadanym promieniu) podzielonej przez ilość pp. Stanowi on pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów odległości poszczególnych pp od aproksymowanej płaszczyzny, podzielonej przez ilość odszukanych punktów i określa w jakim stopniu badany obszar wokół węzła różni się od aproksymowanej płaszczyzny czyli od terenu płaskiego.



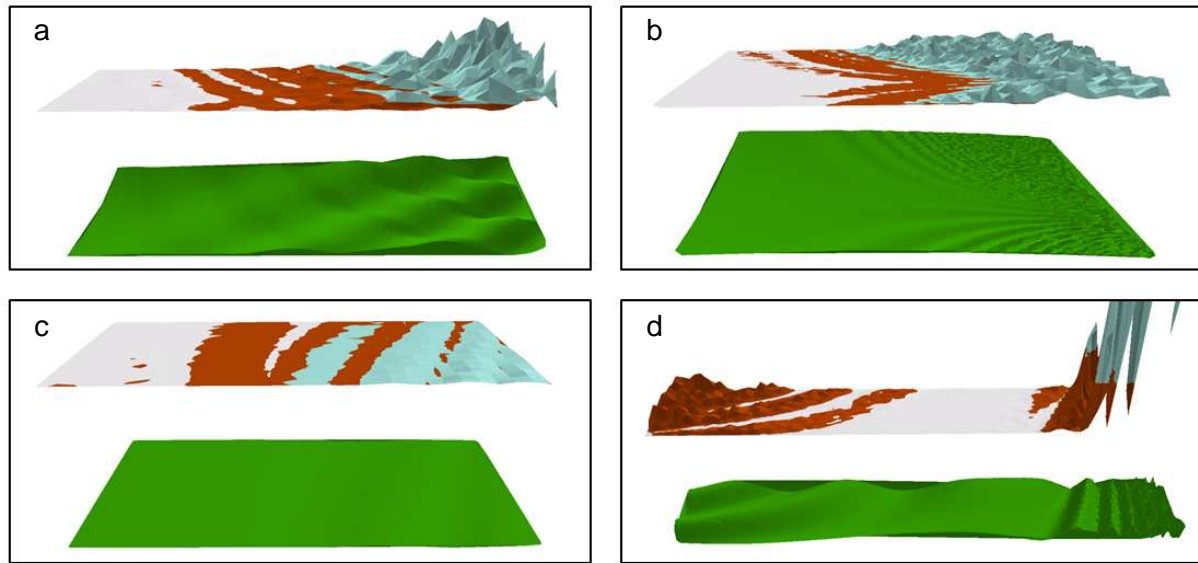
Rys. 4. Płaszczyzna aproksymacyjna wskaźnika morfologicznego

Wskaźnik jest tym większy, im większe jest zróżnicowanie danego terenu w stosunku do powierzchni płaskiej. Ponieważ wartości wskaźnika rosną wraz ze zwiększaniem zróżnicowania powierzchni w różny sposób dla różnych terenów, aby można było je uniwersalnie stosować w różnych przypadkach, należy poddać je normalizacji. W tym celu dla wartości wskaźnika przeprowadzane jest progresywne ustalenie przedziałów klas interwałem geometrycznym lub kwantylami [16], [17]. Po ustaleniu przedziałów klasowych dokonywana jest normalizacja środkowego przedziału, sprowadzająca dolną granicę przedziału do 1, a górną do „n” - wartości określonej w czasie progresywnego ustalenia przedziałów klas, pomnożonej przez współczynnik normalizacji dolnego przedziału dla określonej grupy danych. Różne przedziały klas ustalone dla omawianego przypadku siatki jednorodnej, przy $S=10$ m pokazane zostały na rysunku 5. Przypisując znormalizowane wartości wskaźnika do poszczególnych węzłów można utworzyć diagramy, na których wydzielone zostaną obszary odpowiadające strefom zróżnicowania morfologicznego badanej powierzchni (rys.5). Podział na 2 klasy (rys.5a) można wykorzystać do wskazania stref, gdzie należy zagęścić lub rozrzedzić strukturę GRID. Wykorzystując podział na trzy klasy (rys.5b) można wyodrębnić strefy, gdzie siatka może pozostać bez zmian, oraz strefy gdzie należy ją zagęścić lub rozrzedzić. Podział na cztery klasy (rys.5c) jeszcze dokładniej różnicuje morfologię badanego terenu, pozwalając na precyzyjniejsze dopasowanie rozmiaru siatki bazowej w poszczególnych strefach.



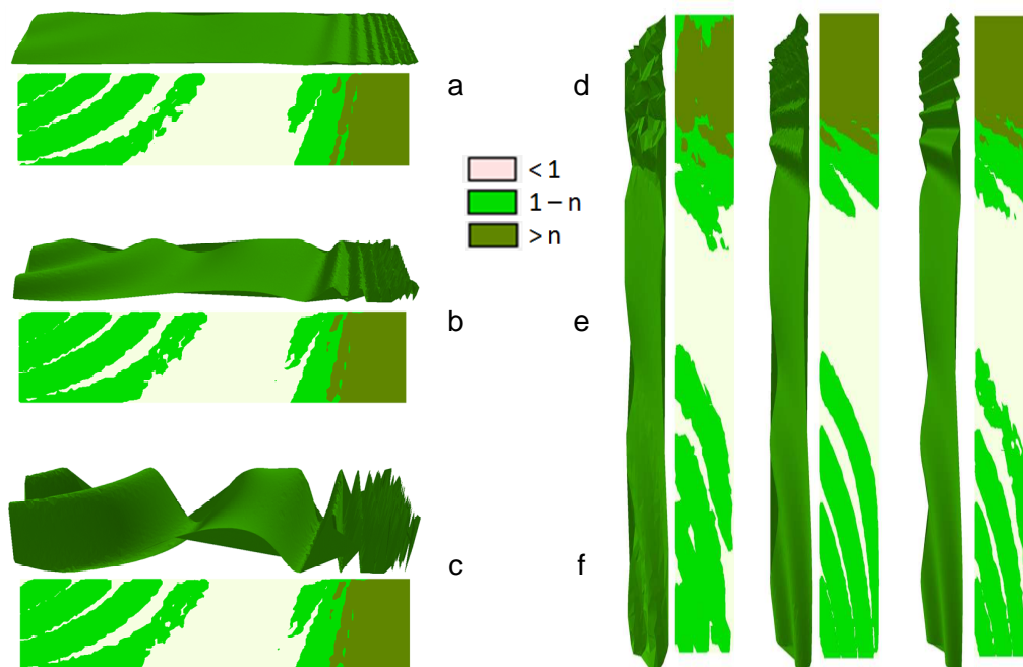
Rys. 5. Obszary zróżnicowania morfologicznego wyznaczone dla różnych parametrów wskaźnika morfologicznego

Metoda wyznaczania wskaźnika jest na tyle uniwersalna, że podobne wyniki uzyskiwane są niezależnie od rozdzielczości wyjściowej GRID. Rysunek 5 pokazuje diagramy obrazujące strefy zróżnicowania morfologicznego utworzone dla siatki o boku odpowiednio: $S=40$ m (rys.5d), $S=10$ m (rys.5e) oraz $S=2$ m (rys.5f). Dla wszystkich przypadków strefy zróżnicowania terenu wyznaczone zostały podobnie. Opisaną metodę wyznaczania stref zróżnicowanego ukształtowania terenu przetestowano również na różnych morfologicznie powierzchniach, utworzonych przez modele matematyczne.



Rys. 6. Obszary wyznaczone przez wskaźnik morfologiczny dla różnych modeli powierzchni

W celu wygenerowania modeli matematycznych wykorzystano autorską aplikację pozwalającą dowolnie modyfikować ukształtowanie tworzonej powierzchni. Na rysunku 6 pokazane zostały, w układzie przestrzennym, cztery różne modele powierzchni. Nad nimi pokazano trójwymiarowe wykresy wartości wskaźnika morfologicznego po ustaleniu trzech klas i po normalizacji. We wszystkich przypadkach określone zostały trzy strefy o różnym zróżnicowaniu morfologicznym. Wskaźnik został prawidłowo wyznaczony zarówno dla powierzchni w różnym stopniu zróżnicowanej (rys.6a, rys.6.b), jak i powierzchni stosunkowo płaskiej (rys.6c). Rysunek 6d pokazuje przypadek szczegółowo omawiany w tej publikacji.



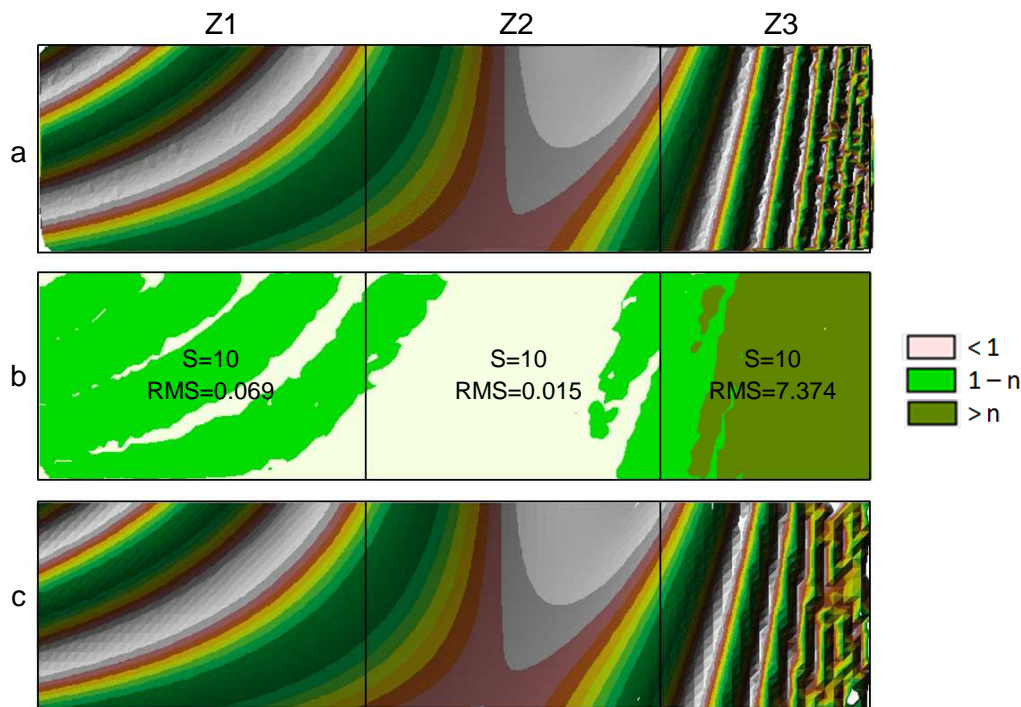
Rys. 7. Obszary wyznaczone przez wskaźnik morfologiczny dla różnego zróżnicowania powierzchni i różnego zagęszczenia punktów pomiarowych

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadkach innych powierzchni, wygenerowanych przy różnych parametrach (rys.7). Po lewej stronie rysunku 7 pokazana została powierzchnia utworzona na bazie tej samej funkcji (1), jednak o różnym współczynniku zróżnicowania, który w aplikacji określony został przez mnożnik wartości wysokości – mz . Zarówno powierzchnia stosunkowo płaska (rys.7a; $mz=5$), średnio zróżnicowana (rys.7b; $mz=20$), jak i mocno zróżnicowana (rys.7c; $mz=80$) charakteryzują się podobnymi diagramami. We wszystkich przypadkach zastosowana metoda wyznaczania wskaźnika pozwoliła na prawidłowe wydzielenie stref zróżnicowania. Po prawej stronie rysunku 7 pokazane zostały powierzchnie utworzone przy różnym zagęszczeniu punktów pomiarowych przypadających na kwadrat bazowy siatki 10 m X 10 m (0.5 pp / 100 m² – rys.7d ; 5 pp / 100 m² – rys.7e ; 50 pp / 100 m² – rys.7f). Również w tym przypadku, opisane wcześniej wyznaczenie wartości wskaźnika, pozwoliło na skonstruowanie diagramów, które umożliwiają prawidłową identyfikację trzech stref zróżnicowanego ukształtowania powierzchni.

Po przeanalizowaniu omawianych przykładów można stwierdzić, że metoda wyznaczania wskaźnika morfologicznego charakteryzującego strefy o różnym zróżnicowaniu ukształtowania powierzchni jest uniwersalna dla wszystkich przebadanych przypadków. Jest ona niezależna od ukształtowania terenu, jego zróżnicowania jak również od zagęszczenia punktów pomiarowych. Metodę wyznaczania wskaźnika tworzącego omawiane strefy zróżnicowania wykorzystano następnie do ustalenia takiego zagęszczenia struktury GRID na badanej powierzchni, które umożliwiło zrównoważenie błędu modelu na całym obszarze.

4. Zastosowanie wskaźnika morfologicznego do wyznaczenia zagęszczenia siatki GRID w strefach różnego ukształtowania powierzchni

Proces ustalania wielkości struktury GRID na całym obszarze można podzielić na kilka etapów. Pierwszym z nich jest analiza zbiorów pomiarowych pod kątem zróżnicowania morfologicznego. W omawianym przypadku, zbiorem wyjściowym jest zbiór 10000 pp wygenerowanych w oparciu o funkcję (1) (rys.8a). Na wstępie, na całym obszarze, ustalana jest jednakowa wyjściowa siatka bazowa. Jej wielkość zależy od pożądanej dokładności opracowania, zagęszczenia pp, stosowanej metody interpolacji itp. W omawianym przypadku wygenerowana została jednorodna siatka bazowa rozmiarze $S=10$ m. Następnie wyznaczane są wskaźniki morfologiczne w poszczególnych węzłach takiej struktury. Po obliczeniu wartości wskaźników, ustalone są przedziały klas interwałem geometrycznym oraz dokonywana jest normalizacja. W efekcie powstaje diagram pokazany na rysunku 8b. Na utworzonym diagramie można wydzielić trzy strefy o różnym zróżnicowaniu powierzchni (Z1, Z2, Z3). Odpowiadają one odpowiednim strefom zróżnicowania modelu TIN, który pokazano na rysunku 8a. GRID jednorodny, który został wygenerowany na bazie tej samej siatki ($S=10$ m) pokazano na rysunku 8c. Interpolacji siatki w poszczególnych węzłach dokonano metodą aproksymacji powierzchni wielomianami 3R trzeciego stopnia. Analizując otrzymaną powierzchnię interpolacyjną, pokazaną na rysunku 8c, można zauważyć, że wygenerowany GRID jednorodny nie utworzył jednakowo dokładnego modelu. Również na powierzchni interpolacyjnej można zlokalizować 3 strefy o różnym stopniu zróżnicowania. Po środku każdej ze stref podano wielkość kwadratu bazowego siatki oraz współczynnik RMS, ukazujący dokładność dopasowania powierzchni interpolacyjnej modelu GRID do powierzchni teoretycznej w danej strefie (rys.8b). Strefa pierwsza obejmuje obszar o średnim zróżnicowaniu powierzchni i średnim dopasowaniu modelu GRID (Z1 - rys.8b,c). Strefa druga jest najmniej zróżnicowana i tu model GRID jest najdokładniej dopasowany (Z2 - rys.8b,c). Najbardziej zróżnicowana jest strefa trzecia, gdzie siatka jest najgorzej dopasowana do powierzchni teoretycznej (Z3 - rys.8b,c).

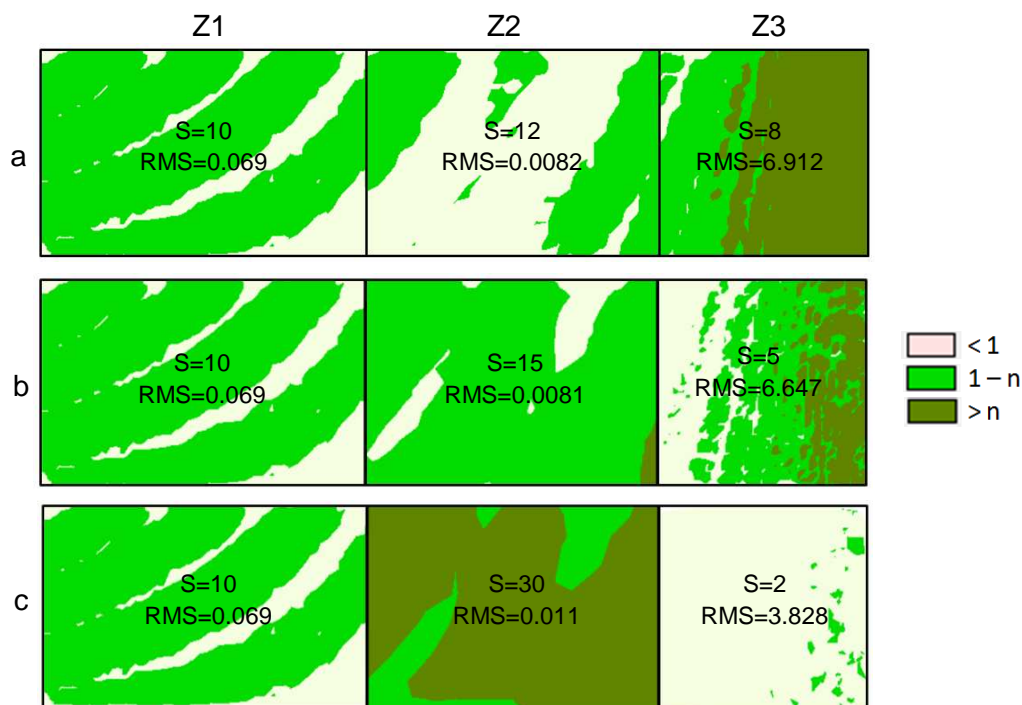


Rys. 8. Obszary wyznaczone przez wskaźnik morfologiczny odpowiadające strefom zróżnicowania powierzchni modelu

W drugim etapie postępowania należy ustalić strefę, gdzie dokładność modelu interpolacyjnego jest wystarczająca i odpowiada oczekiwaniom. W omawianym przypadku założono, że dokładność modelu GRID jest wystarczająca w strefie Z1, ponieważ błędy dopasowania siatki do powierzchni teoretycznej na tym obszarze nie przekraczają 0.1 m, co zostało zobrazowane na diagramie różnicowym pokazanym na rysunku 3b. W celu ujednolicenia dokładności modelu interpolacyjnego na całym obszarze, przy jednoczesnym zminimalizowaniu ilości węzłów struktury GRID należy zmienić rozmiar siatki bazowej w odpowiednich strefach wyznaczonych przez wskaźnik morfologiczny. Dążąc do zrównoważenia wielkości wskaźnika na całym obszarze należy zmienić odpowiednio zagęszczenie siatki, zmniejszając je w strefie lepszego dopasowania (Z2) i zwiększając w strefie, gdzie dopasowanie modelu jest gorsze (Z3). W związku z tym w strefie Z1 zagęszczenie węzłów siatki pozostawiono bez zmian ($S=10$ m), ponieważ w tej strefie uznano, że model został dopasowany prawidłowo. W strefie Z2 zwiększono kwadrat bazowej siatki do $S=12$, a w strefie Z3 zmniejszono go do $S=8$. Następnie obliczono wskaźniki morfologiczne, w tak ustalonych węzłach, w poszczególnych strefach i utworzono diagram pokazany na rysunku 9a. Po tych operacjach ujednolicenie wskaźnika uległo poprawie (rys.9a) w stosunku do sytuacji poprzedniej, którą ilustruje rysunek 8b. W celu określenia dopasowania powierzchni interpolacyjnej do powierzchni teoretycznej, w oparciu o nowo ustalone węzły, w poszczególnych strefach wygenerowany został GRID niejednorodny (tą samą metodą interpolacji) i policzony współczynnik RMS. Zarówno w strefie Z2 jak i Z3 dopasowanie modelu uległo poprawie o czym świadczą mniejsze wartości współczynników RMS (rys.9a) w porównaniu z sytuacją pokazaną na rysunku 8b, jednak wskaźnik morfologiczny w poszczególnych strefach nie został jeszcze ujednolicony.

Trzeci etap polega na iteracyjnym powtarzaniu wszystkich czynności opisanych w etapie drugim. Kolejno zmniejszane jest zagęszczenie węzłów w strefie Z2 (S rośnie) i zwiększane w strefie Z3 (S maleje). Obliczane są nowe wskaźniki morfologiczne dla kolejnych zmienianych rozdzielczości siatki i tworzone są kolejne diagramy, aż do momentu, w którym wskaźniki w poszczególnych strefach zostaną możliwie najlepiej ujednolicone. Taką sytuację ilustruje rysunek 9b. Model GRID utworzony na bazie tak zagęszczonych węzłów jest dokładniej dopasowany do powierzchni teoretycznej o czym świadczą współczynniki RMS w poszczególnych strefach (rys.9b). Kolejne iteracje należy przerwać w momencie, w którym wskaźniki morfologiczne utworzą diagramy gorzej ujednolicone niż w poprzedniej iteracji. Taką sytuację obrazuje rysunek 9c, gdzie wielkość siatki bazowej w strefie Z2

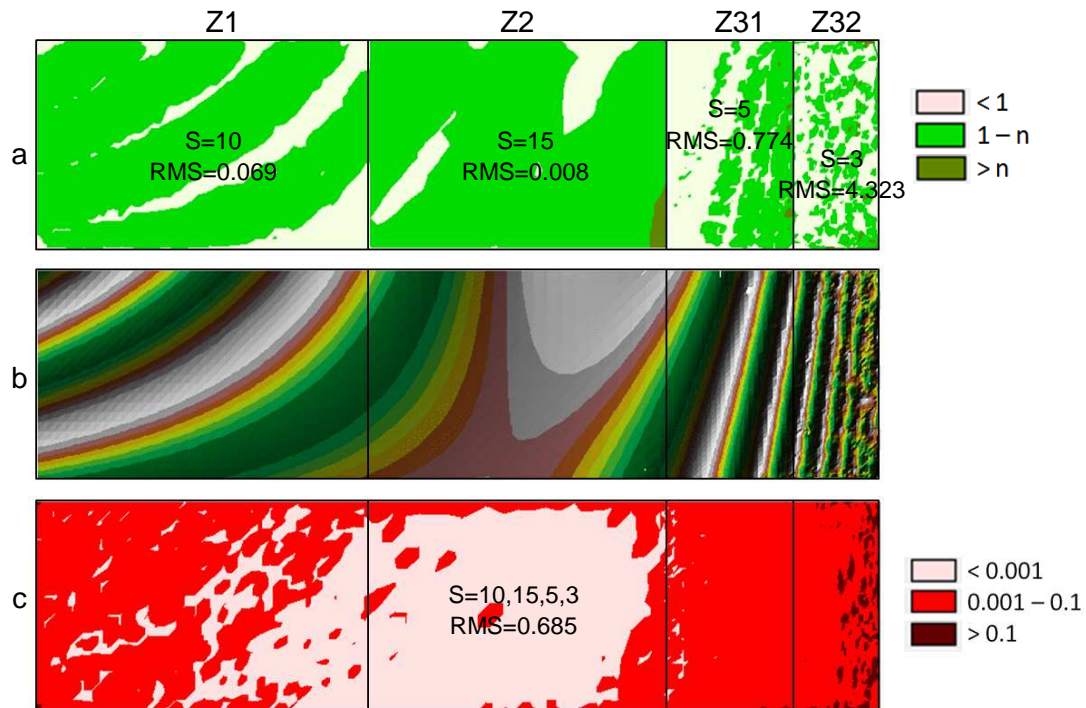
wynosi 30 m, a w strefie Z3 2 m. Utworzony model GRID w strefie Z2 przy $S=30$ m jest mniej dokładny (większy RMS) (rys.9c) niż w poprzednim przypadku (rys.9b).



Rys. 9. Równoważenie wielkości wskaźnika morfologicznego w strefach zróżnicowania powierzchni modelu

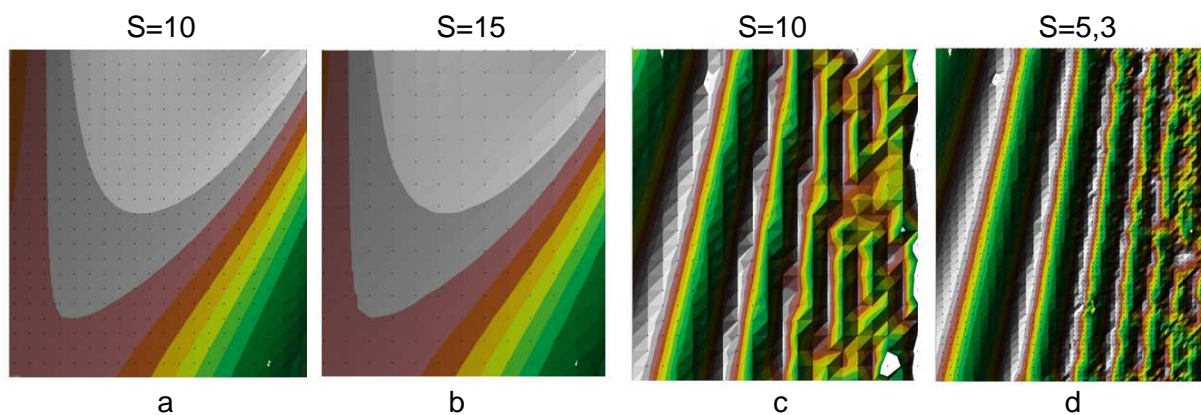
W strefie Z3 siatka o rozmiarze $S=2$ m tworzy co prawda dopasowanie lepsze niż ustalone na początku, jednak odbiega to od pierwotnego założenia minimalnej ilości węzłów na badanym obszarze i ujednolicenia wskaźnika morfologicznego we wszystkich strefach. Ponieważ strefa Z3, pokazana na rysunku 9b, wciąż zawiera obszar ze wskaźnikami przekraczającymi założoną wartość, w celu dokładniejszego ujednolicenia wskaźnika morfologicznego na tym obszarze, można ją dodatkowo podzielić na dwa kolejne podobszary Z31 i Z32 (rys.10a). Wielkość siatki w strefie Z31 pozostawiono na poziomie $S=5$ m, a w strefie Z32 zmniejszono do $S=3$ m. Po obliczeniu wskaźnika, w tak ustalonych węzłach utworzony został diagram pokazany na rysunku 10a. Podział na dodatkowe strefy pozwolił na osiągnięcie, założonego na wstępie, ujednolicenia wskaźnika na całym obszarze.

W ostatnim etapie postępowania, w oparciu o ustaloną odpowiednią rozdzielczość siatki, różną w poszczególnych strefach, wygenerowany został GRID niejednorodny na całym obszarze, tą samą metodą interpolacji co poprzednio. Analiza modelu interpolacyjnego przedstawionego na rysunku 10b pozwala stwierdzić, że przeprowadzone działania pozwoliły na osiągnięcie lepszej jakości powierzchni. Poprawę dopasowania powierzchni dodatkowo ilustrują współczynniki RMS przyporządkowane do poszczególnych stref (rys.10a). Dla tak utworzonej struktury GRID zostały policzone błędy prawdziwe w poszczególnych węzłach. Na ich podstawie utworzono diagram różnicowy pokazany na rysunku 10c. W porównaniu z diagramem utworzonym dla siatki jednorodnej, pokazanym na rysunku 3b, błędy dopasowania powierzchni interpolacyjnej do powierzchni teoretycznej uległy zmniejszeniu, co jest widoczne zwłaszcza na obszarze najbardziej zróżnicowanym morfologicznie (strefa $Z3=Z31+Z32$; rys.10c).



Rys. 10. Interpolacyjny model powierzchni utworzony w czterech strefach zróżnicowania przez strukturę GRID niejednorodną na całym obszarze

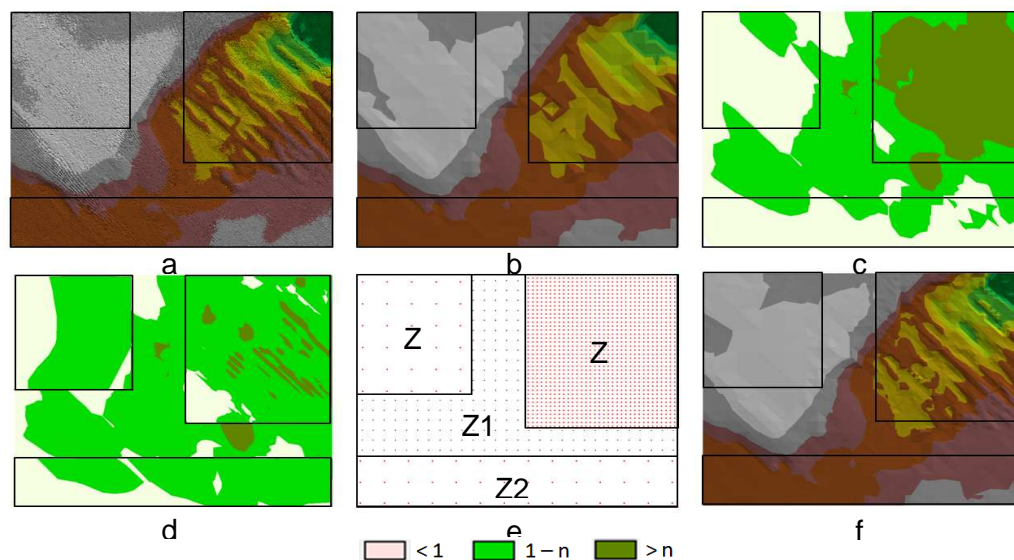
Jednocześnie w strefie Z2, pomimo rozrzedzenia siatki węzłów i zmniejszenia ich ilości, dopasowanie nie uległo pogorszeniu. Polepszoną dokładność dopasowania modelu GRID na całym obszarze można stwierdzić również na podstawie współczynnika RMS, który zmniejszył się dla siatki niejednorodnej ($RMS=0.685$; rys.10c) w porównaniu ze współczynnikiem RMS obliczonym dla siatki jednorodnej ($RMS=2.242$; rys.3b). Porównanie jakości modeli GRID w analizowanych strefach pokazane zostało dodatkowo na rysunku 11. Fragment modelu ze strefy Z2, pokazany na rysunku 11b ($S=15$), nie różni się jakością od fragmentu modelu z rysunku 11a ($S=10$), pomimo zwiększenia odstępów pomiędzy węzłami i znacznego ograniczenia ich ilości. Jednocześnie fragment modelu ze strefy Z3, pokazany na rysunku 11d ($S=5, S=3$), w wyniku zagęszczenia węzłów w tym obszarze, jest dokładniejszy od fragmentu modelu pokazanego na rysunku 11c ($S=10$). Dzięki zastosowaniu omawianej metody, stosując kolejne iteracje pozwalające na odpowiednie ustalenie zagęszczenia struktury GRID, w sposób automatyczny dokładności modelu w różnych strefach zostają zrównoważone. Wykorzystanie modelu matematycznego powierzchni pozwoliło zweryfikować wzrost dokładności dopasowania modelu na podstawie współczynnika RMS i diagramów różnicowych. Warto jednak przetestować omawianą metodę dla rzeczywistego numerycznego modelu terenu.



Rys. 11. Porównanie dokładności modeli dla siatki jednorodnej i niejednorodnej

5. Zastosowanie wskaźnika morfologicznego w modelu DTM

Jako model praktyczny wybrano fragment dna morskiego, którego pomiaru dokonano echosondą wielowiązkową. Analizowany obszar zawierał 195898 punktów pomiarowych, które umożliwiły utworzenia modelu TIN pokazanego na rysunku 12a. Biorąc pod uwagę duże zagęszczenie punktów pomiarowych założono, że do interpolacji wysokości w węzłach zostanie wykorzystana metoda równoważenia wartości odwrotnością kwadratu odległości dla najbliższych 5 punktów pomiarowych, a rozdzielczość wyjściowego jednorodnego modelu GRID na całym obszarze ustalono na poziomie $S=5$ m. Model interpolacyjny GRID, złożony z 720 węzłów, utworzony na podstawie siatki jednorodnej ($S=5$ m) na całym obszarze pokazany został na rysunku 12b. W strefach zróżnicowania morfologicznego, na modelu GRID, widoczne jest wyraźne pogorszenie jakości prezentowanej powierzchni. Jednocześnie w strefach mniej zróżnicowanych powierzchnia przedstawiana przez model nie różni się od powierzchni tworzonej przez model TIN.



Rys. 12. Zrównoważenie wartości wskaźnika morfologicznego i ustalenie zagęszczenia węzłów w numerycznym modelu terenu

W celu poprawienia jakości modelu interpolacyjnego, zakładając zachowanie minimalnej ilości punktów tworzących, przy jednoczesnym ujednoliceniu dokładności struktury GRID na całym obszarze, zastosowano etapy omawiane w rozdziale 4. Na podstawie danych pomiarowych wyznaczony został wskaźnik morfologiczny w poszczególnych węzłach siatki jednorodnej ($S=5$ m). Wartości wskaźnika zostały podzielone na 3 klasy i poddane normalizacji w sposób opisywany w rozdziale 3. Pozwoliło to na utworzenie diagramu pokazanego na rysunku 12c. Na diagramie wydzielono 3 strefy o różnym zróżnicowaniu morfologicznym i założono, że strefa Z1 spełnia wymagania dokładnościowe. Jednocześnie stwierdzono, że strefa Z3 obejmuje obszar najbardziej zróżnicowany, a obie strefy Z2 obejmują podobnie ukształtowany obszar, o najmniejszym zróżnicowaniu powierzchni. Następnie stosując kolejne iteracje, opisane w rozdziale 4, polegające na sukcesywnym zwiększaniu zagęszczenia siatki w strefie Z3 i jednoczesnym zmniejszaniu tego zagęszczenia w obu strefach Z2, doprowadzono do ujednolicenia wskaźnika morfologicznego na całym obszarze (rys.12d), przy jednoczesnym ustaleniu różnego zagęszczenia węzłów w różnych strefach (rys.12e). W strefie Z1 pozostawiono GRID wyjściowy ($S=5$ m), w obu strefach Z2 rozrzedzono siatkę do $S=10$ m, a w strefie Z3 zagęszczono ją do $S=2$ m (rys.12e). Następnie w oparciu o tak ustalone rozdzielczości siatki w poszczególnych strefach, wygenerowany został niejednorodny model GRID na całym obszarze, składający się łącznie z 1600 węzłów (rys.12f). Jakość powierzchni utworzonej w oparciu o niejednorodny model GRID (rys.12f) jest wyraźnie lepsza od powierzchni utworzonej przez jednorodny model GRID (rys.12b). W strefie o największym zróżnicowaniu (Z3; rys.12f) wyodrębnione zostało charakterystyczne ukształtowanie terenu, zbliżone jakością do modelu TIN (Z3; rys.12a). Jednocześnie nie pogorszo dokładności modelu GRID w obu strefach Z2,

pomimo zmniejszenia ilości tworzących go węzłów. Można stwierdzić, że interpolacyjny model powierzchni dokładnie odzwierciedla ukształtowanie terenu pomimo zmniejszenia ilości punktów tworzących z 195898 pp w przypadku modelu TIN do 1600 węzłów w przypadku modelu GRID. W rezultacie osiągnięto postawione założenie zmniejszenia ilości punktów tworzących model przy jednoczesnym zrównoważeniu dokładności odzwierciedlenia powierzchni na całym zróżnicowanym obszarze.

6. Wnioski

Jednym ze sposobów reprezentacji numerycznego modelu terenu w systemach informacji przestrzennej jest regularna siatka kwadratów (GRID). Podstawowym problemem pojawiającym się podczas konstrukcji takiej siatki jest odpowiednie ustalenie jej zagęszczenia w zależności od ukształtowania terenu. Wielkość siatki ma kluczowe znaczenie dla dokładności generowanego numerycznego modelu terenu. Aby cały obszar został wymodelowany z jednakową dokładnością, w strefach zróżnicowanych morfologicznie zagęszczenie węzłów siatki powinno być większe niż w strefach o niewielkich deniwelacjach. Dodatkowo odległości między poszczególnymi punktami węzłowymi struktury GRID powinny być dobierane w taki sposób, aby tworzona struktura pozwalała na możliwie dokładną charakterystykę rzeźby terenu, przy wykorzystaniu minimalnej ilości punktów węzłowych. W większości przypadków dobór elementarnego parametru konstrukcyjnego, jakim jest wielkość kwadratu bazowego, dokonywany jest przez operatora systemu. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na zautomatyzowanie i ujednolicenie procesu ustalania wielkości interpolacyjnej siatki bazowej w zależności od ukształtowania terenu. Dzięki wykorzystaniu wskaźnika morfologicznego można wyodrębnić strefy badanego obszaru, w których powierzchnia jest ukształtowana w różny sposób. Po ustaleniu stref, wyznaczonych przez wartości wskaźnika, można w nich dokonać zmiany zagęszczenia GRID. W strefach mało zróżnicowanych odległości pomiędzy węzłami mogą zostać zwiększone, co skutkuje rozrzedzeniem siatki i zmniejszeniem ilości punktów tworzących model. Natomiast w strefach dużego zróżnicowania morfologicznego odległości te mogą ulegać zmniejszeniu, prowadząc do sukcesywnego zagęszczania siatki, poprawiając tym samym jakość generowanej powierzchni. Stosując kolejne iteracje można w sposób automatyczny ujednolicić wskaźnik na całym badanym terenie. Przez ujednolicenie wskaźnika morfologicznego uzyskuje się jednocześnie zrównoważenie dokładnościowe wielkości siatki interpolacyjnej na całym obszarze. Pozwala to na takie dobranie zagęszczenia węzłów, aby dokładność modelu interpolacyjnego była zbliżona w poszczególnych strefach różnorodnych morfologicznie. Cały proces jest zautomatyzowany, co uwalnia operatora systemu od żmudnych procedur związanych z analizą morfologii terenu na podstawie punktów pomiarowych przed wyborem zagęszczenia siatki na poszczególnych obszarach. Tworzona niejednorodna siatka interpolacyjna pozwala na optymalny dobór ilości punktów tworzących model, przy jednoczesnym zrównoważeniu jego dokładności. Omawiane procedury przetestowane zostały na 26 modelach teoretycznych i na 8 przykładach praktycznych, przy zastosowaniu różnych metod interpolacji GRID, różnym ukształtowaniu terenu i różnym zagęszczeniu punktów pomiarowych. W każdym przypadku osiągnięto poprawę dokładności i jakości modelu interpolacyjnego. Metoda zastosowana w praktyce podnosi dokładność numerycznych modeli terenu tworzonych przy wykorzystaniu struktury GRID.

Literatura

- [1] O'SULLIVAN D., UNWIN D.J. *Geographic Information Analysis*. Hoboken, NJ: Wiley 2003.
- [2] MAGUIRE D.J. *GIS customization*; Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Hoboken, NJ: Wiley 2005.
- [3] MAUNE D.F. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual* (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, MD) 2001.
- [4] CARLISLE B.H. *Digital Elevation Model Quality and Uncertainty in DEM-based Spatial Modelling*. Ph.D. Thesis, University of Greenwich, London, UK 2002.
- [5] ARUGA K, SESSIONS J., AKAY A.E. Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. *Journal of Forest Research* 10: 2, 2005, s. 113–123.

- [6] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In Beek KJ & M Molenaar. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part
- [7] SHI W., FISHER P.F., GOODCHILD M.F. Recent developments in modeling uncertainties in geo-spatial data and analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 70: 8, 2004.
- [8] PIGOZZI B.W. A hierarchy of spatial marginality through spatial filtering. Professional Geographer 56: 4, 2004, s. 460–470.
- [9] GOŚCIEWSKI D. Wykorzystanie danych pozyskiwanych masowo do konstrukcji numerycznego modelu terenu. Technical Sciences. Supplement No 2. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn 2005, s. 169-183.
- [10] ARCTUR D., ZEILER M. Designing Geodatabases: Case Studies in GIS Data Modeling. Redlands, CA: ESRI Press 2004.
- [11] GOŚCIEWSKI D. Zastosowanie kompresji RLE do redukcji wielkości zbiorów typu GRID. Czasopismo Techniczne R.105, z. 2 - Ś/2008. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, s. 121-129.
- [12] RAAFLAUB L.D., COLLINS M.J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. Environmental Modelling and Software 21: 5, 2006, s. 710–732.
- [13] WECHSLERS.P. Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users. URISA Journal 15: 2, 2003, s. 57–64.
- [14] TAKEFUSA A. A Performance Evaluation System for Scheduling Algorithms on the Grids. JSPS Workshop on Applied Information Technology for Science, JWAITS 2001.
- [15] ZHOU Q., LIU X. Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 70: 8, 2004, s. 957–962.
- [16] PASŁAWSKI J. Jak opracować kartogram. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych. Warszawa 2003.
- [17] ROBINSON A., SALE R., MORRISON J. Elements of Cartography. Podstawy kartografii. PWN Warszawa 1998.

DETERMINING THE SIZE OF BASE NETWORK OF GRID STRUCTURE SUBJECT TO TERRAIN MORPHOLOGY

Summary

A regular network of squares (GRID) is often used to represent digital terrain models (DTM) in spatial information systems (SIS, GIS). The need to adjust network density to terrain morphology is one of the greatest challenges in the network construction process. In most cases, the basic structural parameter, namely the size of the base square, is selected by the system operator. Various shaped terrains require GRID of different resolution that will adequately capture morphological details and represent the terrain with satisfactory quality and precision. The selection of network density that appropriately matches a terrain's morphological features is a labor-consuming process that is often intuitive and subjective since it relies on the experience of a given operator. The growing demands placed on contemporary spatial information systems predetermine the choice of procedures which automate data processing, turning them into objective tools for handling various types of information. The above also applies to the density of GRID. This paper proposes an automated method for determining density values subject to terrain morphology. The discussed procedures are applied to create networks with different densities for morphologically varied terrains, and the proposed approach minimizes inconsistencies in the developed surface model. The result is a non-homogenous GRID which limits the number of points stored in the DTM base to the required minimum, while preserving an equivalent level of model accuracy throughout the terrain.

Key words: digital terrain model, regular network, GRID, digital surface modeling, accuracy analysis, GIS