

**OCENA WPŁYWU ROZDZIELCZOŚCI I METODY POZYSKIWANIA  
DANYCH WYSOKOŚCIOWYCH NA DOKŁADNOŚĆ NUMERYCZNYCH  
MODELI TERENU ORAZ MODELI SPADKÓW I EKSPOZYCJI**

**ESTIMATION OF RESOLUTION INFLUENCE AND METHODS  
OF ACQUIRING HIGH-ALTITUDE DATA ON THE ACCURACY  
OF NUMERIC TERRAIN MODELS  
AND MODELS OF SLOPES AND ASPECTS**

**Jan Burdziej, Mieczysław Kunz**

Zakład Teledetekcji i Kartografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, LiDAR, SRTM, rozdzielczość, ekspozycja, spadek terenu

**STRESZCZENIE:** Jednym z podstawowych i najbardziej rozpowszechnionych źródeł danych o ukształtowaniu terenu są numeryczne modele terenu (NMT). Numeryczne modele terenu są jedynie modelami rzeczywistości, a nie jej idealnym odwzorowaniem. Nieodłącznym elementem modeli terenu, podobnie jak wszystkich innych zbiorów danych przestrzennych są błędy, którymi obarczone są te dane. Istotny wpływ na dokładność NMT ma metoda pozyskiwania danych wysokościowych. Do najpowszechniej wykorzystywanych należą: metoda fotogrametryczna, poziomicowa, laserowa (LiDAR) oraz interferometryczna (InSAR). Każda z nich w odmienny sposób przekształca dane, wykorzystując różne algorytmy. Dodatkowym źródłem błędów w modelach terenu wykorzystujących zapis rastrowy jest wielkość najmniejszego pola, dla którego zapisana została określona wartość wysokości. Rozdzielczość modeli rastrowych jest jedną z głównych cech determinujących dokładność odwzorowania terenu. Celem niniejszej pracy było dokonanie oceny dokładności wybranych modeli terenu pod kątem ich przydatności w badaniach środowiska geograficznego. Analiza ta posłużyła do wykazania wpływu rozdzielczości i metod pozyskiwania danych do NMT na dokładność samego modelu terenu, jak również na obliczane na jego podstawie spadki terenu i ekspozycje. Porównane zostały modele pozyskane czterema wymienionymi wcześniej metodami. Do porównania przyjęto ponadto następujące wielkości pikseli (oczek rastra): 1, 5, 10, 25, 50 i 100 m. Największa rozdzielczość (1 m), zbliżona jest do rzeczywistej dokładności pomiarów laserowych. Najmniejsza natomiast (100 m) odpowiada w przybliżeniu rozdzielczości modelu SRTM. Taki wachlarz analizowanych rozdzielczości pozwala dosyć „płynnie” prześledzić, w jaki sposób zmienia się wielkość i charakter błędów w poszczególnych modelach. Badania zostały przeprowadzone na wybranym fragmencie 2×2 km doliny Wisły pod Toruniem.

## **1. WPROWADZENIE**

Obecnie Numeryczne Modele Terenu (NMT) są jednym z najpowszechniej wykorzystywanych źródeł danych o ukształtowaniu Ziemi. Większość z nich oparta jest na rastrowym modelu danych graficznych, który przyporządkowuje poszczególnym

komórkom rastra (pikselom) określoną wysokość n.p.m. Stosowanie modeli rastrowych umożliwia stosunkowo łatwe i szybkie przetwarzanie nawet dużych zbiorów danych, wymusza jednak przedstawienie naturalnie nieregularnej rzeczywistości za pomocą rastra – siatki pól regularnych. Decydującym czynnikiem wpływającym na szczegółowość NMT jest jego rozdzielczość, definiowana za pomocą wielkości pojedynczego piksela. Spadek rozdzielczości, a tym samym zwiększenie wielkości najmniejszego elementu NMT, jakim jest piksel, prowadzi do zmniejszenia szczegółowości całego modelu.

Wpływ rozdzielczości zauważyć można jeszcze wyraźniej w obliczanych na podstawie NMT spadkach terenu oraz ekspozycjach stoków. Te dwa parametry topograficzne mają bardzo istotny wpływ na wiele procesów naturalnych (np. determinują intensywność procesów erozji i ruchów masowych, określają potencjalną ilość akumulowanej energii słonecznej). Są one wykorzystywane w modelowaniu różnych, często bardzo złożonych procesów funkcjonujących w środowisku geograficznym.

Istnieje szereg metod pozyskiwania NMT, które obok rozdzielczości mają istotny wpływ na dokładność odwzorowania ukształtowania danego terenu. Każda z tych metod korzysta z odmiennych narzędzi pozyskiwania danych, różniących się precyzją, wymaga również odmiennego postępowania w celu stworzenia rastrowego NMT. Rezultatem tego jest różna dokładność uzyskiwanych modeli terenu. Do najbardziej rozpowszechnionych metod pozyskiwania NMT należą: skaniny laserowe (LIDAR), pomiary fotogrametryczne na stereogramach (w tym m.in. automatyczna korelacja obrazów), wektoryzacja poziomic z map topograficznych oraz radarowe pomiary interferometryczne InSAR, np. model SRTM.

Rozdzielczość, metoda pozyskiwania a także inne czynniki przyczyniają się do wprowadzenia mniej lub bardziej systematycznych błędów. Informacja o tym, jak dużym błędem obarczony jest NMT jest niezbędna dla potencjalnego użytkownika do właściwego wykorzystania modelu. Każde zastosowanie wymaga określonego poziomu dokładności, który w dużym stopniu zależy od przedmiotu oraz skali badań. Powszechnie do oceny dokładności NMT stosuje się wielkość błędu RMSE (Root Mean Square Error), obliczoną na podstawie porównania wybranych punktów modelu z punktami kontrolnymi (np. pomierzonymi w terenie). Wielkość ta nie oddaje jednak przestrzennego charakteru rozkładu błędów i obliczana jest z reguły na podstawie stosunkowo niedużej liczby punktów kontrolnych.

Głównym celem prezentowanej pracy było zbadanie jak rozdzielczość wpływa na dokładność NMT pozyskiwanych czterema wymienionymi wcześniej metodami. W tym celu wygenerowano Numeryczne Modele Terenu o rozdzielczości 1, 5, 10, 25, 50 i 100 m dla każdej z metod, obejmujące ten sam fragment terenu. Na ich podstawie obliczono modele spadków oraz modele ekspozycji terenu. Uzyskane w ten sposób zbiory danych zostały poddane analizie statystycznej, dla każdego z nich obliczono również wielkość błędu RMSE. Jako źródło danych kontrolnych (referencyjnych) przyjęto model laserowy o rozdzielczości 1 m, którego wiarygodność była największa.

Obszar badań obejmuje fragment doliny Wisły pod Toruniem. Ma on charakter poligonu badawczego o wymiarach 2×2 km i obejmuje fragment koryta rzeki Wisły, terasę zalewową oraz wyższe terasy pradoliny. Charakterystycznym elementem ukształtowania terenu jest stroma krawędź jednej z teras zlokalizowana w północnej części poligonu, której

wysokość dochodzi do 30 m, a nachylenie osiąga wielkość 45°. Wisła na tym odcinku pozbawiona jest wałów przeciwpowodziowych, co jest przyczyną stosunkowo częstych powodzi.

## 2. METODYKA

Rozdzielczość, która wpływa na dokładność numerycznych modeli terenu jest przedmiotem badań wielu autorów. Modelowaniem poziomej i pionowej dokładności NMT zajmował się Miliareris i Paraschou, 2005 oraz Chang *et al.*, 2004. Acharya *et al.*, 2000 opisali różne metody określania dokładności NMT a Zhou, Liu, 2004 oraz Thompson *et al.*, 2001 badali wpływ rozdzielczości i innych atrybutów NMT na dokładność numerycznych modeli terenu.

W niniejszej pracy jako źródło danych o rzeczywistym ukształtowaniu terenu został wykorzystany model laserowy o rozdzielczości 1 m. Wysoka precyzja narzędzi stosowanych w metodzie laserowej i w efekcie duża dokładność wysokościowa modelu (RMSE  $\approx$  0.2 m) pozwoliła uznać ten model za najbardziej odpowiadający rzeczywistości. Na potrzeby przeprowadzonych analiz modelowi temu przypisano wiarygodność 100 %, posłużył on tym samym jako źródło danych referencyjnych (kontrolnych). Dzięki temu wszystkie piksele pozostałych modeli terenu (a więc modeli laserowych o mniejszej rozdzielczości oraz wszystkich modeli uzyskanych pozostałymi trzema metodami) mogły zostać porównane z odpowiadającymi im wielkościami w modelu laserowym, który został uznany za najbardziej odpowiadający rzeczywistości. Tym samym każdorazowo analizie poddać można było 100 % danych badanego zbioru. Ponadto porównanie danych z modelem o wielkości piksela równej 1 m pozwoliło zaobserwować, jak rozkładają się błędy „wewnątrz” pikseli w modelach o mniejszej rozdzielczości (a więc w pikselach o boku 5, 10, 25, 50 i 100 m). Na każdy, bowiem piksel o boku 5 m przypadało 25 punktów referencyjnych, analogicznie na piksel 100-metrowy punktów tych było 10 000.

Podobnie, modele spadków i ekspozycji o rozdzielczości 1 m uzyskane z przeliczenia modelu laserowego zostały uznane za najbardziej wiarygodne. Wszystkie pozostałe modele spadków i ekspozycji zostały porównane z tymi właśnie modelami referencyjnymi.

### 2.1. Przygotowanie danych źródłowych

Jak wspomniano we wstępie, analizie dokładności poddano modele pozyskane czterema najczęściej stosowanymi metodami, tj. laserową, fotogrametryczną, poziomową oraz interferometryczną. Numeryczne modele terenu pozyskane tymi metodami mają różną postać. Wykorzystane w niniejszej pracy dane wymagały, więc wstępnego przetworzenia i doprowadzenia do jednakowej postaci, która umożliwiłaby ich dokładne porównanie.

Przed wszystkim dane te musiały zostać sprowadzone do wspólnego układu współrzędnych oraz do jednolitego formatu, tak, aby mogły być przetwarzane w jednym środowisku GIS. Jako docelowy, wspólny dla wszystkich zbiorów danych, przyjęto Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 1992 (PUWG 1992) oraz formaty SHP (tzw. *shapefile*) i GRID odpowiednio dla danych wektorowych i rastrowych. Oba te formaty zostały stworzone przez firmę ESRI (Environmental Systems Research Institute)

i są wykorzystywane przez programy z rodziny ArcGIS. Dane źródłowe zostały przetransformowane do układu PUVG 1992, a następnie „przycięte” do zasięgu poligonu badawczego.

Na podstawie tak przygotowanych danych wygenerowano numeryczne modele terenu o rozdzielczościach 1, 5, 10, 25, 50 i 100 m dla każdej z czterech metod pozyskiwania danych, a więc w sumie 24 modele. Posłużyły one do obliczenia spadków i ekspozycji terenu, co dało kolejne 48 zbiorów. Podsumowując, do analiz wykorzystano dane pozyskane 4 różnymi metodami (laserową, fotogrametryczną, poziomową oraz interferometryczną), na podstawie których wygenerowano 3 rodzaje modeli (NMT, modele spadków i modele ekspozycji) w 6 różnych rozdzielczościach. Daje to w efekcie 72 zbiory danych, zapisane w formacie GRID. Poniżej przedstawiono skrótowo etapy wstępnego przetwarzania danych w odniesieniu do modeli pozyskanych poszczególnymi metodami, z uwzględnieniem zastosowanych funkcji i algorytmów. Celem tej prezentacji jest pokazanie, jak silnym nieraz przekształceniom poddane muszą być dane źródłowe, aby uzyskać efekt w postaci rastrowego NMT zapisanego w pożądanym układzie współrzędnych. Należy przy tym mieć na uwadze, że w zasadzie każdy etap przetwarzania danych przyczynia się do powstania kolejnych, mniej lub bardziej systematycznych błędów.

#### **2.1.1. Model laserowy**

W pierwszej kolejności plik tekstowy, zawierający wyniki pomiarów laserowych został zaimportowany do programu ArcGIS i zapisany jako plik shapefile (\*.shp). Punkty te posłużyły bezpośrednio do wyinterpolowania rastra o rozdzielczości 1 m. Do interpolacji wykorzystano metodę naturalnego sąsiedztwa (*Natural Neighbor*), która najmniej zmienia oryginalne wartości, a jednocześnie stosunkowo szybko pozwala przetwarzać duże zbiory danych. Otrzymany raster został następnie przycięty do zasięgu obszaru badawczego. W ten sposób powstał model referencyjny. Na jego podstawie za pomocą funkcji *Aggregate* zostały wygenerowane modele o rozdzielczości 5, 10, 25, 50 i 100 m. Zastosowano tu uśrednianie wartości pikseli wynikowych, a więc wynikowa wartość piksela o boku 5 m była średnią arytmetyczną z 25 pikseli modelu o rozdzielczości 1 m, itd.

#### **2.1.2. Model fotogrametryczny**

Model ten zapisany był oryginalnie w pliku projektowym MicroStation. Został on zaimportowany do programu ArcGIS. Następnie warstwy zawierające poszczególne elementy (tzn. linie strukturalne „ostre”, linie strukturalne „miękkie”, punkty, groble, wały przeciwpowodziowe, linie ciekowe, brzegi cieków, jeziora oraz poziomicę) zostały zapisane do oddzielnych plików \*.shp. Wykorzystano je do obliczenia modelu triangulacyjnego (TIN) przy użyciu funkcji *Create Tin From Features* dostępnej w rozszerzeniu 3D ANALYST. Na jego podstawie zostały wygenerowane właściwe modele rastrowe (funkcja *Tin To Raster*), o przyjętych rozdzielczościach i odpowiadające zasięgiem obszarowi badawczemu.

### 2.1.3. Model poziomicowy

Format wyjściowy tego modelu był identyczny, jak w przypadku modelu fotogrametrycznego (plik projektowy MicroStation), stąd też sposób postępowania był bardzo zbliżony. Z mapy topograficznej dostarczonej w postaci pliku \*.dgn wybrano warstwę poziomic, skarp, wód (płaskich powierzchni), cieków oraz punktów wysokościowych, które zostały zapisane do plików \*.shp. W następnej kolejności utworzono model TIN, a następnie modele rastrowe o rozdzielczościach 1, 5, 10, 25, 50 i 100 m, używając funkcji wymienionych powyżej.

### 2.1.4. Model interferometryczny

Do analizy wykorzystano model SRTM pozyskany ze strony internetowej Amerykańskiej Służby Geologicznej (U.S. Geological Survey). Model ten, mimo iż dostępny jest od razu w formacie GRID, wymagał stosunkowo największej przekształceń. Przede wszystkim należało go przetransformować do układu PUVG 1992 i „przepróbkować”, tj. dostosować jego rozdzielczość. W tym celu oryginalny model rastrowy w układzie WGS 1984 został otwarty w programie ArcGIS, a następnie wyeksportowany do pliku tekstowego (za pomocą skryptu Raster2xyz). W efekcie uzyskano zbiór punktów (o współrzędnych x, y, z), które odpowiadały środkom oryginalnych pikseli modelu SRTM. Punkty te zostały następnie przetransformowane do układu PUVG 1992 i zapisane w postaci pliku \*.shp. W celu uzyskania modeli rastrowych przeprowadzono interpolację punktów metodą *Kriging*, uzyskując modele o żądanych rozdzielczościach.

## 2.2. Analiza dokładności

Tak przygotowane dane poddano następnie analizie dokładności, która polegała na: porównaniu wszystkich badanych zbiorów (modeli) z modelami referencyjnymi oraz charakterystyce statystycznej badanych zbiorów oraz zbiorów będących wynikiem ich porównania z modelami referencyjnymi. Uzyskano w ten sposób wartości minimalne, maksymalne i średnie charakteryzujące wszystkie 72 badane zbiory. Obliczono również najmniejsze i największe różnice pomiędzy badanymi modelami a modelami referencyjnymi, a także wielkość błędu RMSE.

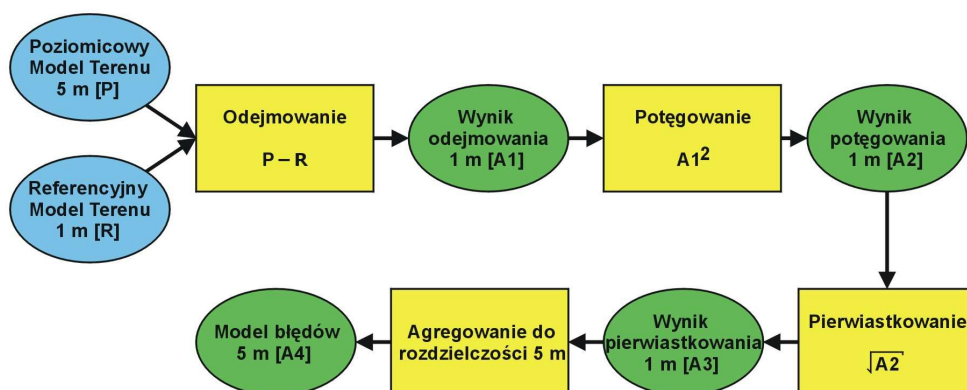
W analizie wykorzystano narzędzie *Model Builder* dostępne w programie ArcGIS, które umożliwiło stworzenie schematów postępowania i zoptymalizowanie wszystkich etapów analizy. Przykładowy schemat został zaprezentowany na rysunku 1. Przedstawia on wszystkie etapy analizy przeprowadzonej dla poziomicowego modelu terenu o rozdzielczości 5 m. Jak wynika ze schematu, badany model poziomicowy (P) odejmowany jest najpierw od modelu referencyjnego (R). Powstaje w ten sposób nowy zbiór (A1), którego wartości odzwierciedlają różnicę pomiędzy modelem (P) a modelem (R). Zbiór ten, podobnie jak wszystkie pośrednie zbiory wynikowe, ma rozdzielczość 1 m, ponieważ na każdy piksel o boku 5 m przypada 25 pikseli w modelu referencyjnym o rozdzielczości 1 m. Wartość bezwzględna piksela w zbiorze (A1) świadczy o tym, jaka była różnica pomiędzy modelem (P), a wysokością rzeczywistą (R). Natomiast znak wartości piksela

wskazuje, czy wartość ta była zaniżona (znak „-”, gdy  $P < R$ ) czy zawyżona (znak „+”, gdy  $P > R$ ) w stosunku do wysokości rzeczywistej ( $R$ ).

Następnie wartości w zbiorze ( $A1$ ) zostały podniesione do kwadratu. W efekcie uzyskano zbiór ( $A2$ ), którego wartości są kwadratami różnic między modelem ( $P$ ) i modelem ( $R$ ). Suma wartości wszystkich pikseli (a więc suma kwadratów różnic) podzielona przez liczbę pikseli i poddana pierwiastkowaniu dała wielkość błędu RMSE.

Kolejne dwa etapy przedstawione na schemacie miały na celu przygotowanie map bezwzględnych wartości błędów. W tym celu wartości zbioru ( $A2$ ) zostały poddane pierwiastkowaniu dając zbiór bezwzględnych wartości błędów ( $A3$ ), które zostały następnie zagregowane do początkowej rozdzielczości badanego modelu (w tym przypadku 5 m) ( $A4$ ). Agregacja polegała na obliczeniu średniej arytmetycznej z wartości wszystkich pikseli zbioru ( $A3$ ) leżących w obrębie wejściowego piksela o boku 5 m.

W podobny sposób przebiegała analiza wszystkich trzech rodzajów modeli (a więc modeli terenu, spadków i ekspozycji), dla wszystkich czterech metod (tj. laserowej, fotogrametrycznej, poziomicowej i interferometrycznej), jak również dla wszystkich badanych rozdzielczości (tj. 1, 5, 10, 25, 50 i 100 m). Pewnych modyfikacji wymagała jedynie analiza modeli ekspozycji, z uwagi na konieczność reklasyfikacji danych i pominięcia w obliczeniach obszarów płaskich.



Rys. 1. Schemat postępowania podczas analizy dokładności przykładowego modelu terenu

### 3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

#### 3.1. Prezentacja wyników

Wszystkie wyniki opisanych powyżej analiz zostały ujęte w postaci tabel, wykresów oraz map. Zarówno tabele, jak i wykresy pozwoliły ocenić modele pod kątem wielkości ekstremalnych oraz średnich, natomiast mapy umożliwiły zaobserwowanie, jaki był charakter przestrzennego rozmieszczenia błędów w odniesieniu do poszczególnych pikseli

i odpowiadających im form terenu. Na tej podstawie dokonano oceny i porównania poszczególnych modeli i wyciągnięto wnioski.

Na wykresach dotyczących NMT uwzględniono wysokość minimalną, występującą w danym modelu, wysokość maksymalną oraz wysokość średnią. Ich zmienność wraz ze zmianą rozdzielczości wykazuje z reguły niewielkie wahania. Ponadto podano najmniejsze oraz największe różnice pomiędzy danym modelem a modelem referencyjnym wyrażone w metrach. Wszystkie przedstawione wielkości odnoszą się do wysokości wyrażonej w metrach nad poziomem morza. Wielkości ujemne należy rozumieć, jako piksele, które w badanym modelu posiadały wartości niższe niż w modelu referencyjnym, wielkości dodatnie – jako wartości wyższe.

Przeanalizowanie skrajnych wielkości błędów jest istotne, daje bowiem obraz ich rzeczywistych wielkości, w przeciwieństwie do błędu RMSE, który określa średnią wartość dla całego modelu. Analiza taka umożliwia tym samym określenie charakteru błędów, a więc stwierdzenie, czy wielkości w danym miejscu są zawyżone czy zaniżone. Wystarczy wspomnieć zastosowanie NMT do oceny zagrożenia powodziowego, by stwierdzić, że wiedza o tym, czy wysokość wału przeciwpowodziowego została zawyżona czy zaniżona, jest bardzo istotna. W przypadku modeli spadków i ekspozycji wszystkie wielkości zostały przedstawione w stopniach.

Nieco odmienny sposób oceny dokładności przyjęto dla modeli ekspozycji. Modyfikacja ta wynikała ze specyfiki danych. Wartości ekspozycji zawierały się w zakresie  $0\div 359.9^\circ$ , ponieważ jednak określały one w praktyce kierunki według stron świata maksymalny błąd mógł wynieść  $180^\circ$ . Taki błąd oznaczał określenie kierunku dokładnie przeciwnego do faktycznego, np. zamiast  $90^\circ$  (kierunek E) –  $270^\circ$  (kierunek W). Dlatego też na wykresach przedstawiono jedynie procentowy udział poszczególnych kierunków w ogólnej powierzchni poligonu badawczego.

Wykresy posłużyły graficznemu przedstawieniu danych zawartych w tabelach. Przedstawiają one zmianę wielkości wartości maksymalnych, minimalnych i średnich w zależności od rozdzielczości, a także zmianę skrajnych wielkości błędów. Na wykresach tych wyraźnie widać zależności pomiędzy badanymi wielkościami a rozdzielczością. Ponadto można podjąć próbę oszacowania wielkości błędów dla rozdzielczości nie uwzględnionych w analizie, a zawierających się w przedziale od  $1\div 100$  m lub też prognozować wielkość błędów dla rozdzielczości mniejszych (powyżej 100 m).

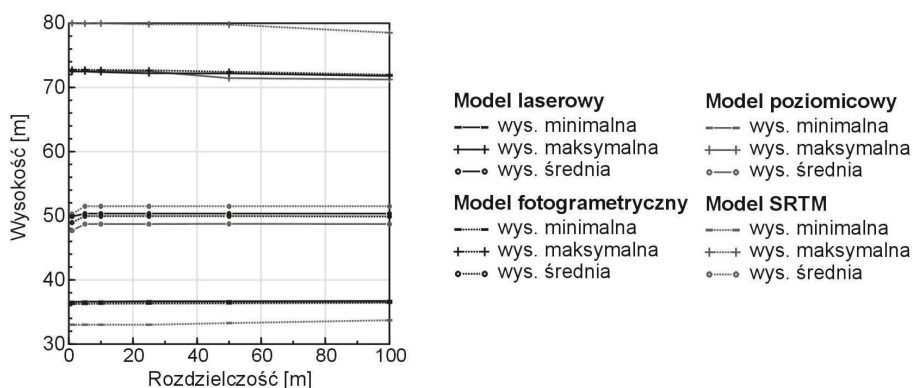
Z uwagi na wieloaspektowość przeprowadzonej analizy interpretacja wyników badań została dokonana oddzielnie dla modeli terenu, spadków oraz ekspozycji. W ramach każdej z tych grup ocenie poddano modele o różnych rozdzielczościach z uwzględnieniem różnych metod ich pozyskiwania.

### **3.2. Ocena dokładności numerycznych modeli terenu**

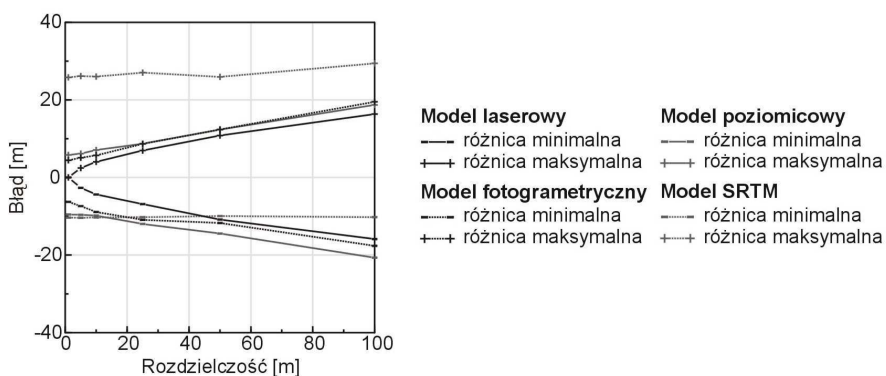
Analiza wyników dotyczących modeli terenu pozwala zauważyć, że niezależnie od rozdzielczości wysokość minimalna, maksymalna i średnia wykazują niewielkie wahania (rys. 2). Zwiększenie wielkości piksela nawet do 100 m spowodowało jedynie nieznaczną zmianę wysokości ekstremalnych. Wraz ze wzrostem wielkości piksela nieznacznie

wzrosła wysokość minimalna, spadła natomiast wysokość maksymalna. Zauważyć można, że reguła ta dotyczy wszystkich czterech metod pozyskiwania NMT, z wyjątkiem modelu poziomicowego, gdzie wysokość minimalna jest stała i bez względu na wielkość piksela wynosi 36.60 m.

Z punktu widzenia dokładności istotna jest ocena maksymalnych rozbieżności w stosunku do modelu referencyjnego (rys. 3). Widać wyraźnie, że wielkość ekstremalnych błędów rośnie wraz ze wzrostem rozmiaru piksela, a wartości bezwzględne błędów maksymalnych i minimalnych są bardzo zbliżone. Dla modelu laserowego o  $r = 5$  m błędy te wynoszą  $\pm 2.5$  m, dla  $r = 25$  m:  $\pm 6.9$  m, dla  $r = 100$  m:  $\pm 16$  m.



Rys. 2. Maksymalne, minimalne i średnie wysokości obserwowane w poszczególnych modelach terenu



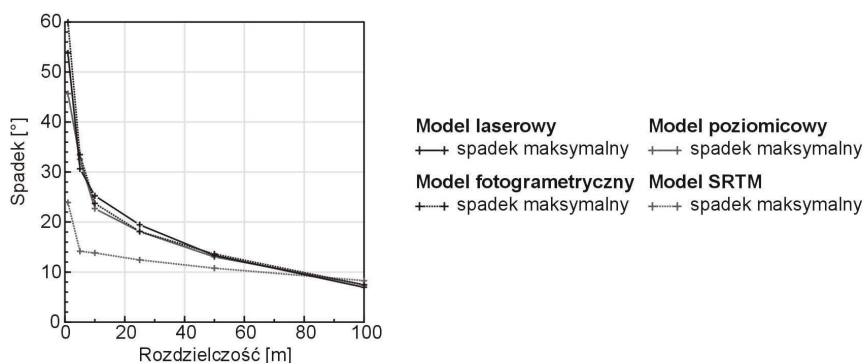
Rys. 3. Ekstremalne błędy wysokości w poszczególnych modelach terenu

### 3.3. Ocena dokładności modeli spadków

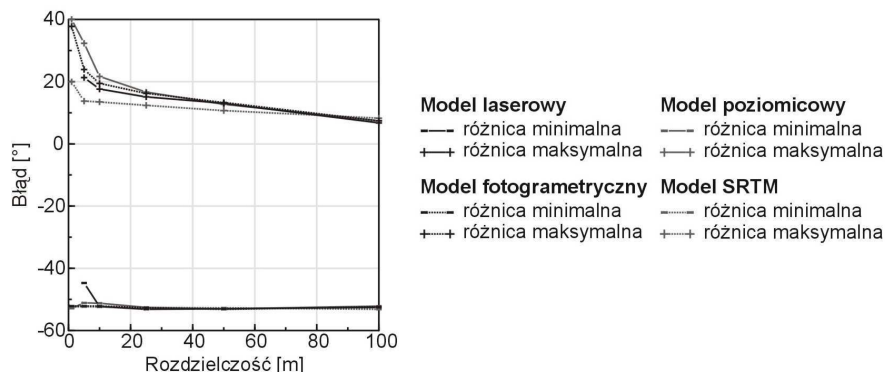
Nieco inaczej przedstawia się kwestia oceny dokładności modeli nachylenia terenu (rys. 4 i 5). Przede wszystkim zauważalne jest gwałtowne zmniejszenie spadków maksymalnych wraz ze wzrostem wielkości piksela ( $r$ ). I tak dla modelu referencyjnego



( $r = 1$  m) na badanym obszarze zarejestrowano spadek maksymalny wynoszący  $53.82^\circ$ , natomiast dla pozostałych modeli laserowych wielkość ta malała wraz ze spadkiem rozdzielczości ( $r$ ) i wyniosła odpowiednio: dla  $r = 5$  m:  $30.66^\circ$ , dla  $r = 10$  m:  $25.26^\circ$ , dla  $r = 25$  m:  $19.45^\circ$ , dla  $r = 50$  m:  $13.31^\circ$ , dla  $r = 100$  m:  $6.98^\circ$ . Podobnie wyglądała sytuacja w przypadku modeli fotogrametrycznych i poziomicowych. Tendencja ta zauważalna była również dla modeli interferometrycznych, jednak tu maksymalny spadek dla modelu  $r = 1$  m wyniósł zaledwie  $23.90^\circ$ , choć dla modelu  $r = 100$  m był już porównywalny z pozostałymi modelami i wyniósł  $8.29^\circ$ .



Rys. 4. Maksymalne nachylenie obserwowane w poszczególnych modelach spadków terenu



Rys. 5. Ekstremalne błędy nachylenia w poszczególnych modelach spadków terenu

Tendencja do zaniżania faktycznych wielkości nachylenia terenu nie dotyczy jednak wyłącznie wartości ekstremalnych. Już pobieżna analiza map spadków terenu w różnych rozdzielczościach pozwala zaobserwować, że zaniżane są wszystkie wartości spadków, przede wszystkim w obszarach o dużych deniwelacjach. Odnosi się to zwłaszcza do krawędzi terasy IX występującej w północnej części badanego obszaru. Mimo, iż szerokość zbocza jest przeważnie większa niż 100 m, a jego nachylenie wynosi średnio  $20\div 30^\circ$ , już

w modelach spadków o rozdzielczości 50 m maksymalne rejestrowane nachylenie na tym obszarze nie przekracza 14°.

Tak drastyczne zmniejszenie się maksymalnych zarejestrowanych spadków wyraźnie pokazuje wpływ rozdzielczości na wierność odwzorowania terenu za pomocą NMT. Jest również efektem algorytmu stosowanego do obliczania nachylenia, który oblicza spadek na podstawie „okna” o rozmiarze 3×3 piksele.

Mimo, iż wysokości maksymalne i minimalne obserwowane w modelach terenu nie ulegają zmianie, wpływ wielkości piksela na obliczanie spadków jest bardzo duży. Ma to istotne znaczenie w szeregu praktycznych zastosowań NMT. W przypadku stosowania klasyfikacji terenu na podstawie spadków (np. w celu określania stopni zagrożenia erozją, bądź też w celu oceny różnorodności ukształtowania) zastosowanie niewłaściwej rozdzielczości może w istotnym stopniu zaburzyć wyniki badań. W takich wypadkach wydaje się celowe obliczenie spadków w oparciu o model o rozdzielczości 1 m (względnie  $r = 10$  m), a następnie odpowiednie zgeneralizowanie mapy spadków do żądanej rozdzielczości (w celu zmniejszenia objętości zbioru, ewentualnie w celu dostosowania jego rozdzielczości do pozostałych zbiorów danych).

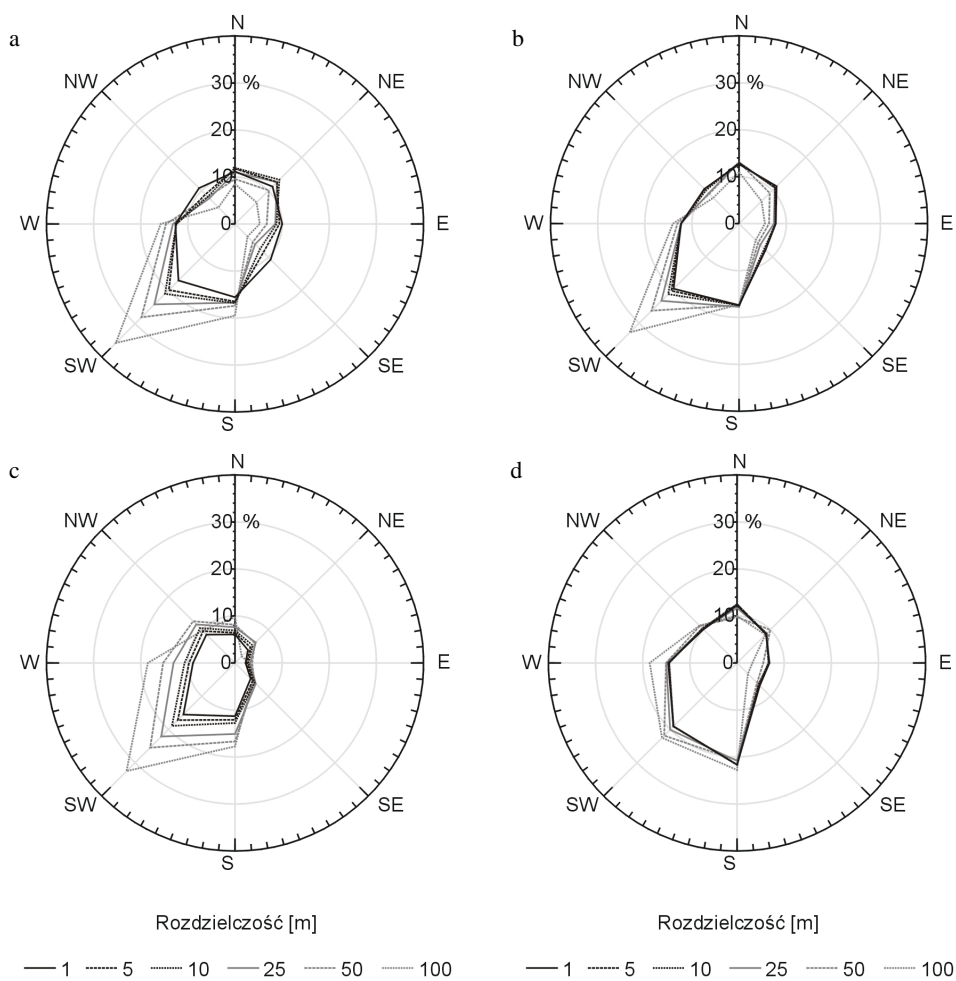
#### 3.4. Ocena dokładności modeli ekspozycji

Analiza procentowego udziału poszczególnych kierunków ekspozycji w ogólnej powierzchni poligonu (rys. 6a, b, c i d) pozwoliła zauważyć, że na badanym obszarze zdecydowanie dominuje ekspozycja południowo-zachodnia (SW) i południowa (S). Obszary nachylone w tych właśnie kierunkach mają największą powierzchnię we wszystkich modelach ekspozycji, niezależnie od rozdzielczości i metody pozyskania NMT. Najmniejszą natomiast powierzchnię zajęły obszary o ekspozycji wschodniej (NE, E, SE).

Zauważyć można również wyraźną tendencję do zwiększania się dysproporcji pomiędzy udziałem kierunków południowych i wschodnich wraz ze wzrostem wielkości piksela. Zmniejszanie rozdzielczości spowodowało przyrost powierzchni obszarów nachylonych ku południowi, a jednocześnie zmniejszenie udziału obszarów o ekspozycji wschodniej. W przypadku modelu laserowego udział kierunku SW wzrósł z 16.98 % (dla  $r = 1$  m) do 35.75 % (dla  $r = 100$  m), podczas gdy udział kierunku SE spadł z 10.69 % (dla  $r = 1$  m) do 3.75 % (dla  $r = 100$  m).

Istotny wpływ na kształtowanie się udziału poszczególnych kierunków nachylenia w ogólnej powierzchni poligonu testowego miała również powierzchnia obszarów płaskich. Zauważyć można duże różnice w procentowym udziale tych powierzchni w zależności od metody pozyskiwania NMT, w tym zwłaszcza od metody interpolacji wykorzystanej podczas tworzenia modelu. Największą powierzchnię obszary płaskie zajmują w modelu poziomicowym ( $r = 1$  m), gdzie stanowią blisko 40% badanego obszaru. Jednocześnie w modelu interferometrycznym o tej samej rozdzielczości ( $r = 1$  m) obszary takie nie występują w ogóle. Wyraźny jest też wpływ rozdzielczości na powierzchnię zajmowaną przez obszary płaskie. Zwiększanie piksela prowadzi do istotnego zmniejszenia powierzchni tych obszarów. W przypadku modelu poziomicowego udział obszarów płaskich zmniejszył się z 38.82 % (dla  $r = 1$  m) do 1.5 % (dla  $r = 100$  m).

Dysproporcje te wynikają z algorytmu stosowanego do obliczania ekspozycji. Algorytm ten do obszarów płaskich zaklasyfikuje wyłącznie te piksele, które otoczone są ośmioma pikselami o identycznej wysokości. Nawet minimalna różnica wysokości pomiędzy którymkolwiek z tych dziewięciu pikseli powoduje obliczenie ekspozycji, a tym samym zakwalifikowanie danego piksela do obszarów nachylonych. Z punktu widzenia badań geograficznych należałoby zatem z analiz ekspozycji wyłączyć wszystkie te obszary, których nachylenie jest minimalne (np.  $< 2^\circ$ ) i pozwala zakwalifikować te obszary jako płaskie.



Rys. 6. Procentowy udział kierunków ekspozycji w poszczególnych modelach:  
(a) modele laserowe, (b) modele fotogrametryczne, (c) modele poziomicowe,  
(d) modele interferometryczne

#### 4. WNIOSKI

Wyniki badań nad dokładnością numerycznych modeli terenu pozwalają sformułować następujące wnioski:

- zmniejszenie rozdzielczości (a więc zwiększanie piksela) powoduje generalizację modelu, przyczynia się do uśredniania wartości, utraty wartości ekstremalnych i zwiększania średniego błędu, zwłaszcza w odniesieniu do modeli spadków,
- metoda pozyskiwania NMT istotnie wpływa na dokładność NMT jedynie w przypadku rozdzielczości dużych (od 1 do 25 m); w przypadku modeli o pikselu powyżej 50 m o dokładności w większym stopniu decyduje rozdzielczość, a różnice pomiędzy poszczególnymi metodami pozyskiwania NMT maleją; modele o rozdzielczości 100 m różnią się dokładnością w stopniu niewielkim,
- niezależnie od metody jaką pozyskano numeryczny model terenu w analizach wymagających obliczania spadków terenu powinno się stosować możliwie największą rozdzielczość, najlepiej 1 m i nie mniejszą niż 10 m,
- dla opracowań małoskalowych, nie wymagających dużej dokładności i/lub nie wykorzystujących NMT w celu obliczania spadków terenu (np. w celach wizualizacji) stosować można model SRTM, dostępny nieodpłatnie w sieci Internet;
- największe błędy w modelach spadków terenu odpowiadają formom o największych nachyleniach, a tym samym najbardziej istotnym z punktu widzenia podejmowanych badań (np. oceny zagrożenia erozją),
- największe błędy w określaniu ekspozycji dotyczą obszarów o najmniejszych nachyleniach, względnie płaskich; obszary o dużych spadkach, niezależnie od metody pozyskania NMT, są z reguły obciążone dużo mniejszymi błędami w obliczeniach ekspozycji.

#### 5. LITERATURA

Acharya B., Fagerman J., Wright C., 2000. Accuracy assessment of DTM data: A Cost Effective Approach for a Large Scale Digital Mapping Project. *IAPRS*, Vol. XXXIII, Amsterdam.

Chang H.C., Ge L., Rizos C., 2004. Assessment of Digital Elevation Models using RTK GPS. *Journal of Geospatial Engineering*, 6(1), s. 13-20.

Miliareisis G.Ch., Paraschou C.V.E., 2005. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 7, Issue 1, 1 May 2005, s. 49-59.

Thompson J.A., Bell J.C., Butler Ch.A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma*, 100 (2001), s. 67-89.

Zhou Q., Liu X., 2004. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computer and Geosciences*, 30 (2004), s. 369-378.

Autorzy artykułu pragną podziękować Panu Jackowi Uchańskiemu z Warszawskiego Przedsiębiorstwa Geodezyjnego S.A. z Warszawy za udostępnienie numerycznych modeli terenu.

**ESTIMATION OF RESOLUTION INFLUENCE AND METHODS OF ACQUIRING HIGH-ALTITUDE DATA ON THE ACCURACY OF NUMERIC TERRAIN MODELS AND MODELS OF SLOPES AND ASPECTS**

KEY WORDS: DTM, digital terrain model, LiDAR, SRTM, resolution, aspect, slope

**Summary**

Digital terrain models (DTM) have become one of the basic and most commonly used sources of data describing the shape of the Earth. Numeric terrain models are only reality models, not the ideal projections. Inseparable elements of terrain models, like in all other groups of spatial data, are mistakes, which exist in the data. There are different methods of acquiring DTM that contribute errors. Some of the most popular methods are: photogrammetric measurements, contour lines, laser scanning (LIDAR), and interferometric (InSAR). Each of them changes data in some other way, using various algorithms. An additional source of mistakes in terrain models using the raster format is the size of the smallest field for which the specified altitude has been defined. The raster model resolution is one of the main features determining the accuracy of terrain projection.

The aim of this study was to evaluate the accuracy of chosen terrain models to their application in environment geography studies. This analysis has been used to show the influence of resolution and models of data acquisition for NTM on the accuracy of the terrain model itself, and also on terrain slopes and expositions calculated on its basis. Created models used for the above-mentioned methods were compared. Moreover, the following raster pixels sizes were used for this comparison: 1, 5, 10, 25, 50 and 100 m. The maximal resolution (1 m), is close to the real accuracy of laser measurements. The minimal resolution (100 m) is close to the resolution of the SRTM model. Such a variation of analyzed resolutions makes it possible to observe quite "fluently" how the size and character of mistakes change in separate models.

The study area is a 2×2 km test polygon covering part of the Vistula river and its valley and is located near Torun, Poland. The obtained results show the method of collecting data has an essential influence on the accuracy of DTM, especially for high resolution models. Along with a decrease in resolution, differences between models created using separate methods also decrease. For slope models, the collected results show that models with the biggest possible resolution should be used, not smaller than 10 meters. The most essential errors in the definition of aspect are connected with areas with the smallest slopes and are relatively flat.

Mgr Jan Burdziej  
e-mail: jan.burdziej@wp.pl  
tel. +48 697769363

Dr Mieczysław Kunz  
e-mail: met@umk.pl  
tel. +56 6112566