

OCENA DOKŁADNOŚCI NUMERYCZNEGO MODELU TERENU ZBUDOWANEGO Z DANYCH BEZPOŚREDNICH

Czesław Suchocki, Marzena Damińska-Suchocka,
Paweł Błoch, Marcin Stec

Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Podstawowym i szeroko rozpowszechnionym źródłem informacji o ukształtowaniu terenu jest Numeryczny Model Terenu (NMT). Jest on wykorzystywany w wielu dziedzinach naukowych i gospodarczych. Najczęściej powierzchnię terenu prezentuje się w postaci nieregularnej siatki trójkątów (TIN) lub regularnej siatki kwadratów (GRID). Współcześni użytkownicy NMT zgłaszają zapotrzebowanie na coraz wierniejsze zobrazowanie rzeczywistego ukształtowania terenu. Istotnym zagadnieniem staje się więc porównywanie jakości i dokładności numerycznego modelu TIN z modelem GRID.

W pracy dokonano oceny dokładności Numerycznych Modeli Terenu zbudowanych z danych bezpośrednich. Dane te pozyskano z pomiaru techniką GPS RTK terenu o powierzchni około jednego hektara i deniwelacji około 12 m. Do badań wybrano model typu TIN oraz dwa modele typu GRID zbudowane algorytmami interpolacyjnymi: Natural Neighbor i Spline. Ocena dokładności wszystkich modeli przeprowadzono na podstawie wartości błędów RMS oraz wybranych parametrów statystycznych.

Słowa kluczowe: Numeryczny Model Terenu (NMT), GRID, TIN, błąd RMS, parametry statystyczne

WSTĘP

W dobie ciągłego rozwoju technologii informatycznych oraz zwiększenia zapotrzebowania na dokładne opracowania rzeźby terenu Numeryczny Model Terenu (NMT) stał się wiodącym produktem w wielu dziedzinach naukowych i gospodarczych. Jest to spowodowane jego wszechstronnym zastosowaniem przy opracowaniach i analizach wszelkiego rodzaju prac w układach dwu- i trójwymiarowych jak np. w procesach projektowych

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Adres do korespondencji – Address correspondence to: Czesław Suchocki, Katedra Geodezji, Wydział Inżynierii Łądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, e-mail: suchockic@gmail.com

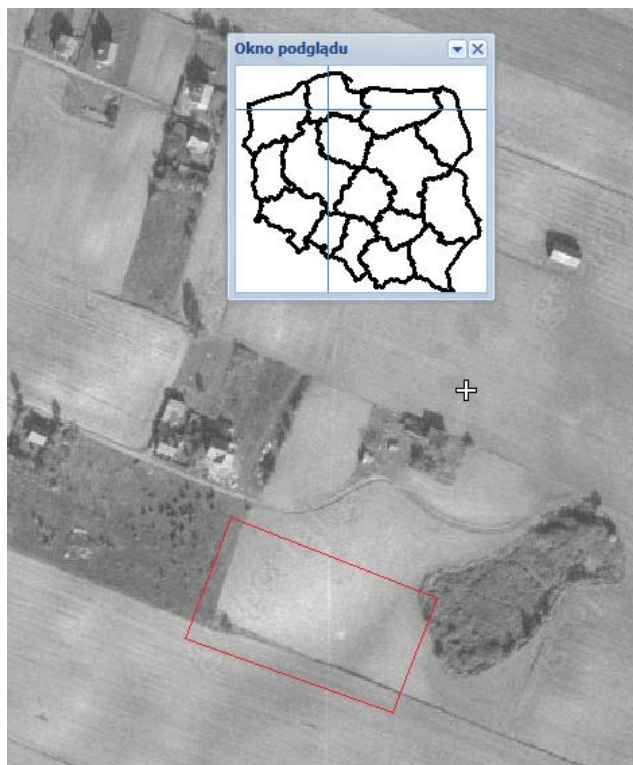
i inwestycyjnych. Współcześni użytkownicy NMT zgłaszają zapotrzebowanie na coraz dokładniejsze modele, stawiając duże wymagania co do jakości danych, czyli wysokiej dokładności wiernego zobrazowania ukształtowania terenu.

Na dokładność wyników Numerycznego Modelu Terenu znaczący wpływ ma nie tylko stopień zagęszczenia punktów pomiarowych i ich dokładność, ale również sposób jego wymodelowania. Wiarygodne odzwierciedlenie naturalnej powierzchni terenu za pomocą dostępnych metod numerycznych jest jednym z głównych problemów badawczych związanych z modelowaniem NMT.

Celem niniejszego artykułu jest porównanie dokładności Numerycznych Modeli Terenu zbudowanych różnymi metodami z danych bezpośrednich. Ocenie podlegał model TIN oraz dwa modele GRID utworzone za pomocą algorytmów interpolacyjnych: Natural Neighbor i Spline.

OBIEKT BADAŃ I JEGO POMIARY

Do przeprowadzenia badań wybrano teren o powierzchni około jednego hektara, zlokalizowany na obrzeżach miasta Brusy (powiat chojnicki, województwo pomorskie). Wybrany obszar charakteryzował się zróżnicowaną rzeźbą terenu o deniwelacji około 12 m, brakiem zabudowy i zadrzewienia (rys. 1, 2).



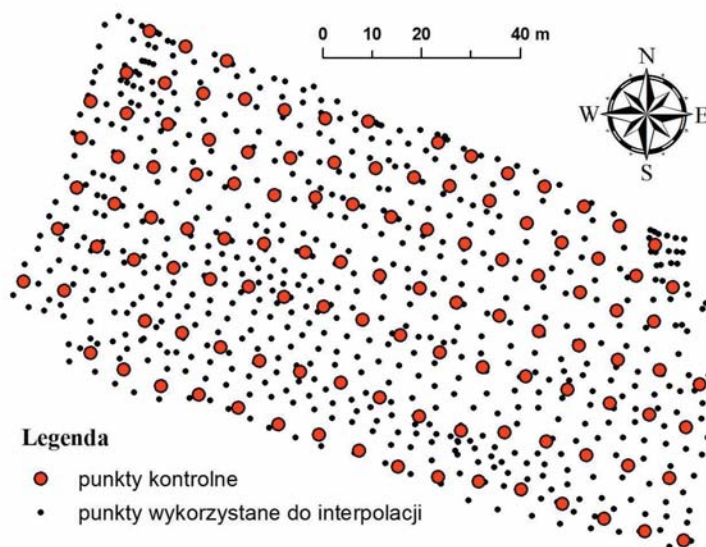
Rys. 1. Zobrazowanie lotnicze obszaru badań [www.maps.geoportal.gov.pl]

Fig. 1. Aerial picture of research area



Rys. 2. Teren objęty pomiarem

Fig. 2. Measurement area

**Legenda**

- punkty kontrolne
- punkty wykorzystane do interpolacji

Rys. 3. Rozmieszczenie punktów kontrolnych i punktów wykorzystanych do interpolacji

Fig. 3. Location of control points and points used for interpolation

Do pozyskania danych niosących informację o ukształtowaniu terenu wybrano technikę GPS RTK, wykorzystując poprawki VRS z sieci stacji ASG EUPOS. Pomiar terenowy składał się z dwóch odrębnych etapów. Etap pierwszy polegał na pomiarze wybranego

terenu taką liczbą punktów pomiarowych, aby wiarygodnie odzwierciedlić zróżnicowaną rzeźbę terenu. Uzyskany zbiór punktów został wykorzystany do budowy Numerycznych Modeli Terenu. Natomiast celem etapu drugiego było pozyskanie sieci punktów kontrolnych, równomiernie rozmieszczonych na tym samym obszarze. Punkty te posłużyły do oceny dokładności uprzednio zbudowanych Numerycznych Modeli Terenu. Na rysunku 3 przedstawiono rozmieszczenie punktów kontrolnych i punktów wykorzystanych do budowy NMT.

PORÓWNANIE DOKŁADNOŚCI NUMERYCZNYCH MODELI TERENU TYPU TIN I GRID

W praktyce ocena dokładności NMT jest bardzo ważnym zagadnieniem, ponieważ klasyfikuje zastosowanie danego modelu do konkretnych celów. Na wartość końcową błędu modelu (m_H) mają wpływ poszczególne źródła, takie jak: błąd pomiaru (m_{pom}), błędy spowodowane obliczeniami (m_{obl}), błąd uzależniony od przyjętego modelu (m_{model}) i pozostałe błędy. Wartość błędu modelu wyliczamy ze wzoru [Wyczałek 2009]:

$$m_H = \sqrt{m_{pom}^2 + m_{obl}^2 + m_{model}^2 + \dots} \quad (1)$$

Jednym ze źródeł błędów przypadkowych, o którym należy wspomnieć, jest szorstkość terenu, definiowana przez Wysockiego [2005] jako mikrorelief, czyli bardzo drobne zmiany powierzchni terenu spowodowane warunkami atmosferycznymi, działalnością agrarną itp. Wielkości te mieszczą się zazwyczaj w granicach $\pm 0,05$ m i często są zanedbywane. Wybrany obszar badawczy charakteryzuje się widoczną działalnością agrarną i wynik pomiaru obarczone są tym błędem. Innym parametrem odnotowanym przez Wysockiego [2005] jest „chropowatość”, która została zdefiniowana jako zaczątki morfologii terenu, przez co należy rozumieć małe formy terenu o niejednostajnym spadku.

W literaturze można odnaleźć badania głównie nad dokładnością numerycznych modeli opartą na modelach teoretycznych, dzięki czemu wyeliminowano błędy o charakterze przypadkowym jak np. błąd pomiaru i błędy obliczeń [Gościewski 2005, 2007, Stateczny i Łubczonek 2004, Wyczałek 2009]. Analizie podlegały głównie błędy dopasowania zbudowanego modelu do powierzchni wzorcowej, które w znacznej mierze wynikają z uproszczeń algorytmów. Zgodnie z badaniami zamieszczonymi w pracy [Peng Hu i in. 2009] błędy te mają charakter systematyczny. Aby pozyskać materiał badawczy, wykorzystywano funkcję dwóch zmiennych do utworzenia wzorcowej powierzchni matematycznej i generowania na jej podstawie pseudopunktów pomiarowych. Według nich interpolowano modele GRID lub budowano model TIN, a następnie oceniano dokładność zbudowanego modelu poprzez przyrównanie do funkcji matematycznej.

Niniejszy artykuł zawiera wyniki badań nad dokładnością Numerycznych Modeli Terenu, zbudowanych na podstawie danych pozyskanych z pomiaru bezpośredniego. Wyniki badań uzyskanych z danych rzeczywistych przekazują faktyczną informację o dokładności NMT, co jest niemożliwe w przypadku pozyskiwania danych generowanych za pomocą funkcji matematycznej. Poza tym bardzo trudno jest przedstawić złożoność i przypadkowość naturalnej rzeźby terenu teoretyczną funkcją matematyczną.

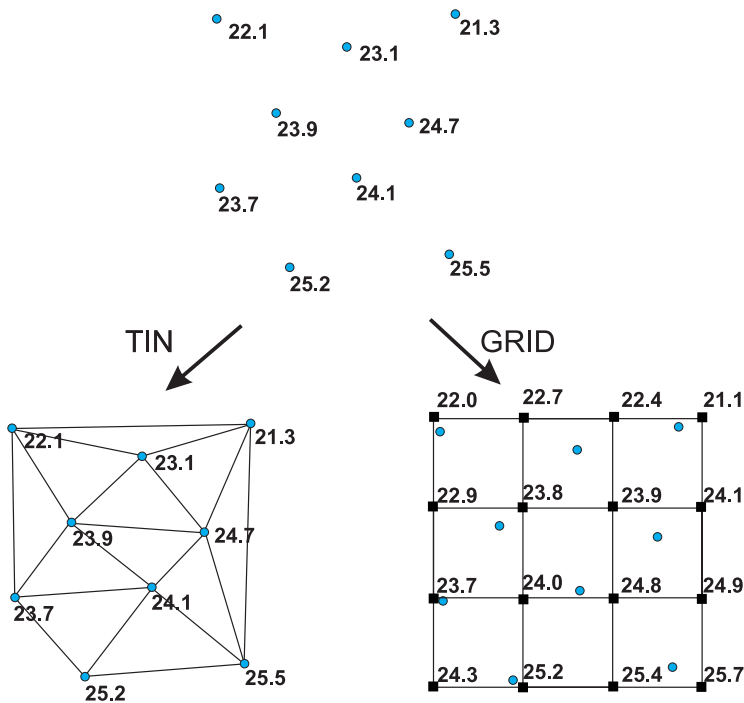
Do budowy NMT wykorzystano popularne oprogramowanie z dziedziny SIP jakim jest ArcGis v. 9.1. W oprogramowaniu tym istnieje możliwość budowy NMT typu TIN

oraz NMT typu GRID algorytmami: Natural Neighbor, Spline, IDW i Kriging. Do analiz wybrano model typu TIN oraz dwa modele typu GRID zbudowane algorytmami interpolacyjnymi: Natural Neighbor i Spline. Pominięto algorytm Kriging i IDW, ponieważ wcześniejsze badania [Kowalczyk 2007, Stateczny i Łubczonek 2004] w większości wykazywały, że algorytmy te nie dają dobrych rezultatów podczas budowy NMT. W przypadku metody Kriging może to wynikać z trudności ustalenia prawidłowego wariogramu, co jest zadaniem stosunkowo trudnym, gdyż [Clark 1987]:

- dane mogą nie wykazywać zależności lub dana zależność może być przypadkowa,
- w sytuacji opracowania danych dla dużych obszarów bądź danych bardzo zróżnicowanych może być niezmiernie trudne albo niemożliwe określenie wariogramu teoretycznego, ponieważ może stanowić ich kombinację.

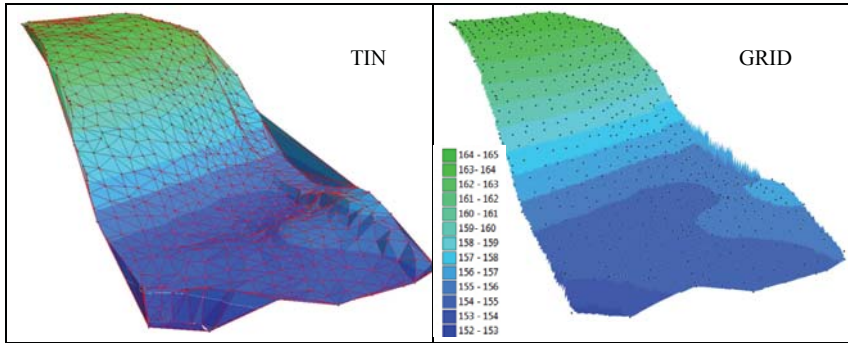
Natomiast metoda IDW opiera się na prostym wzorze matematycznym, w którym wartość funkcji w dowolnym punkcie jest średnią ważoną znanych wartości wysokości z n punktów pomiarowych [Stateczny i Łubczonek 2004].

Przeprowadzone analizy miały na celu wskazanie, który z przebadanych modeli cechuje się najwyższą dokładnością. Teoretycznie NMT typu TIN powinien charakteryzować się wyższą dokładnością w stosunku do NMT typu GRID, ponieważ jego węzły oparte są bezpośrednio na punktach pomiarowych, więc w węzłach siatki są zachowane rzeczywiste wartości z pomiaru terenowego. Natomiast węzły NMT typu GRID powstają w wyniku interpolacji, czyli oszacowania nieznannej wielkości między znanymi wielkościami. Na rysunku 4 zaprezentowano schematycznie zasadę budowy NMT typu TIN i GRID.



Rys. 4. Schemat budowy NMT typu TIN i GRID
Fig. 4. Construction of DTM for TIN and GRID types

Z pozyskanych danych o średnim zagęszczeniu przekraczającym 6 pkt./10 m² zostały wyinterpolowane dwa NMT typu GRID o rozdzielczości 0,50×0,50 m oraz zbudowano NMT typu TIN. Na rysunku 5 zaprezentowano przykładowe NMT rozpatrywanego obszaru badawczego.



Rys. 5. Przykładowe Numeryczne Modele Terenu rozpatrywanego obszaru badań
Fig. 5. Examples of Digital Terrain Models for the research area

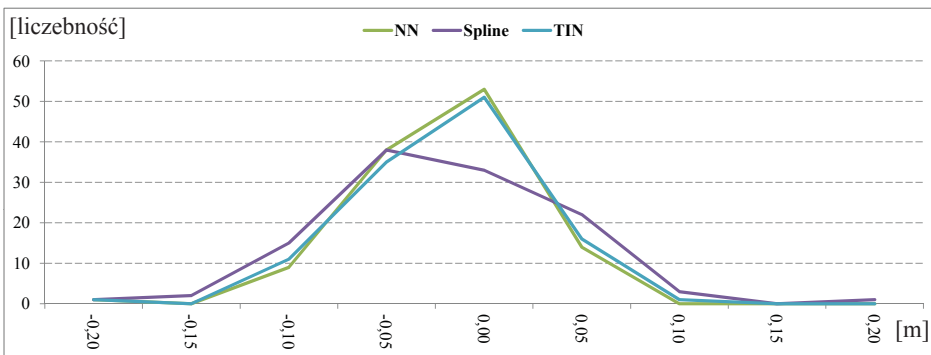
Dokładność wszystkich modeli określano za pomocą 116 punktów kontrolnych równomiernie rozmieszczonych na badanym obszarze, o średnim zagęszczeniu około 1 pkt./10 m². Odległość tych punktów od NMT wzdłuż osi OZ traktowano jako wartość błędu modelu w punkcie kontrolnym. Błąd ten wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta z = f(x, y) - z \quad (2)$$

gdzie:

$f(x, y)$ – wartość funkcji interpolującej w punkcie o współrzędnych x i y ,
 z – rzędna punktu pomiarowego o współrzędnych x i y .

W celu przeprowadzenia szczegółowych analiz statystycznych posłużono się skończoną zbiorowością wartości błędów w punktach kontrolnych dla NMT, które pogrupowano w przedziały klasowe domknięte prawostronnie o rozpiętości 0,05 m. Na rysunku 6 zaprezentowano wykresy liczebności błędów w poszczególnych przedziałach klasowych, dla NMT typu GRID i TIN. Na osi poziomej przedstawiono rozpiętości przedziałów, a na osi pionowej liczebność błędów występujących w tych przedziałach.



Rys. 6. Rozkład błędów w punktach kontrolnych dla poszczególnych Numerycznych Modeli Terenu
Fig. 6. Graph of the interpolating errors in control points for different Digital Terrain Models

W modelowaniu wysokościowym istotne jest na ile w danym punkcie rzędna na powierzchni NMT różni się od faktycznej rzędnej terenu [Wyczałek 2009]. Dokonanie porównania tych dwóch wielkości w punktach kontrolnych na rozpatrywanym obszarze pozwala na globalną ocenę średniego błędu odwzorowania tzw. błędu średniego kwadratowego (z ang. root mean square error – RMS) [Hejmanowska i in. 2008].

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i, y_i) - z_i)^2} \quad (3)$$

gdzie:

$f(x_i, y_i)$ – wartość funkcji interpolującej w punkcie o współrzędnych x i y ,

z_i – rzędna punktu pomiarowego o współrzędnych x i y ,

N – liczba punktów.

Poza wyznaczeniem wartości błędu RMS i wizualną oceną kształtu modelowanej powierzchni, dokonano również analizy statystycznej błędów w punktach kontrolnych. Ocena taka pozwoliła określić szczegółowo efektywność i dokładność dopasowania NMT do rzeczywistej rzeźby. Do tego celu wyznaczono następujące współczynniki statystyczne:

- średnia arytmetyczna z wartości bezwzględnych:

$$\bar{x}_{bezwz.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta z_i| \quad (4)$$

- rozstęp – różnica między największą i najmniejszą wartością cechy w zbiorze:

$$R = \Delta z_{\max} - \Delta z_{\min} \quad (5)$$

- rozstęp ćwiartkowy – różnica między kwartylem trzecim i pierwszym:

$$R_{\text{ćwiartkowy}} = Q_3 - Q_1 \quad (6)$$

- trzeci moment centralny – suma trzecich potęg odchyłeń wartości cechy od jej średniej arytmetycznej podzielona przez $n - 1$:

$$M_3 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta z_i - \bar{\Delta z})^3 \quad (7)$$

- pozycyjny współczynnik asymetrii – iloraz trzeciego momentu centralnego i sześcianu odchylenia standardowego:

$$A = \frac{M_3}{s^3} \quad (8)$$

Uzyskane wartości parametrów statystycznych dla poszczególnych modeli zestawiono w tabeli 1. W tabeli tej umieszczono również wartości błędu RMS.

Analizując obliczone wartości błędu RMS dla zbudowanych modeli, można wywnioskować, że dokładność modelu GRID wyinterpolowanego algorytmem Spline charakteryzuje się najniższą dokładnością (RMS=0,058). Natomiast model GRID wyinterpolowany algorytmem Natural Neighbor oraz model TIN charakteryzują się takim samym błędem RMS, który wynosi 0,045. W przypadku tych modeli uzyskano również najmniejszą i taką samą wartość średniej arytmetycznej z bezwzględnej wartości błędu. Do ogólnej oceny stopnia zróżnicowania wartości cechy można wykorzystać rozstęp, definiowany jako różnica między maksymalną i minimalną wartością cechy w zbiorze. Rozstęp i rozstęp ćwiartkowy błędów w punktach kontrolnych dla tych dwóch modeli są

zbliżone. Wielkości trzeciego momentu centralnego i pozycyjnego współczynnika asymetrii wskazują, że rozkład błędów wyinterpolowanej powierzchni GRID algorytmem Natural Neighbor oraz modelu cechują się posiada małą lewostronną asymetrią.

Tabela 1. Parametry statystyczne oraz błąd RMS dla poszczególnych NMT typu GRID i TIN
Table 1. Statistical coefficients and RMS errors for different DTMs for the GRID and TIN types

Parametry statystyczne Statistical coefficients	Modele GRID GRID models		Model TIN TIN model
	Natural Neighbor	Spline	
błąd RMS [m] RMS error	0,045	0,058	0,045
minimum [m] minimum	-0,176	-0,182	-0,171
maksimum [m] maximum	0,099	0,212	0,103
średnia z wartości bezwzględnych – $\bar{x}_{\text{bezwz.}}$ [m] mean of modulus value	0,036	0,044	0,036
rozstęp – R [m] range	0,275	0,394	0,274
rozstęp ćwiartkowy – $R_{\text{ćwiartkowy}}$ [m] interquartile range [m]	0,057	0,064	0,054
trzeci moment centralny – M_3 third central moments	-0,00006	0,00002	-0,00005
pozycyjny współczynnik asymetrii – A skewness	-0,03097	0,00573	-0,02258

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że dokładność NMT typu GRID wyinterpolowanego algorytmem Natural Neighbor oraz NMT typu TIN w rozpytywanym obszarze badawczym jest zbliżona.

Można zauważyć, że regularne modele typu GRID w praktyce geodezyjnej są najczęściej wykorzystywane w systemach SIP, ze względu na ich uporządkowaną strukturę i łatwość archiwizacji danych. Poza tym modele GRID łatwo poddają się analizom statystycznym i przestrzennym. Natomiast NMT typu TIN, ze względu na zachowywanie rzeczywistych wartości w węzłach, wykorzystuje się zazwyczaj w pracach inżynierskich związanych z tyczeniem realizującym, np. w systemach obsługi maszyn 3D.

PIŚMIENNICTWO

- Clark I., 1987. *Practical Geostatistics*. Elsevier Applied Science Publisher, Essex.
- Gościński D., 2005. Influence of measurement points location on selection of interpolation algorithm, The 6th International Conference Environmental Engineering, Vilnius-Lithuania, Gediminas Technical University Press.
- Gościński D., 2007. Analiza dokładności interpolacyjnych modeli powierzchni typu GRID. Materiały XX Jesiennej Szkoły Geodezji, Wrocław.
- Hejmanowska B., Drzewiecki W., Kulesza Ł., 2008. Zagadnienie jakości numerycznych modeli terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18, s. 163-175.
- Kowalczyk K., 2007. Wynik zależny od metody. *Magazyn Geoinformacyjny Geodeta*, nr 8 (171), 54–58.
- Peng Hu, Xiaohang Liu, Hai Hu., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models based on approximation theory, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 75, No. 1, 49–56.
- Stateczny A., Łubczonek J., 2004. Modele powierzchni terenu [w:] Stateczny A. (red.), *Metody nawigacji porównawczej*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk.
- Wyczałek I., 2009. Badania wrażliwości numerycznego modelu terenu na wpływ otoczenia. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 19, 459–469.
- Wysocki J., 2005. Dokładność aproksymacji powierzchni terenu w aspekcie badań eksperymentalnych, *Przegląd Naukowy Inż. i Kształtowania Środowiska*, nr 1 (31), 102–113.

AN EVALUATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL ACCURACY USING DIRECT SURVEY DATA

Abstract. A Digital Terrain Model (DTM) is an important, widely used source of information about the shape of the Earth which is integral to many scientific and economic fields. The surface of an area of land is usually represented in the form of a Triangular Irregular Network (TIN) or a regular grid of squares (GRID). Current users of DTM have been expressing a need for more accurate representations of physical land surfaces. Comparisons of the quality and accuracy of TIN and GRID models has become an important topic of interest. This paper presents an evaluation of the accuracy of Digital Terrain Models based on direct survey data. Data were gathered from GPS RTK measurements of a 1-hectare area with about 12m of elevation. One TIN and two GRID models were built using interpolation algorithms: Natural Neighbor and Spline. The assessment of the accuracy of the models was based on errors in the value of the RMS and selected statistical coefficients

Key words: Digital Terrain Model (DTM), GRID, TIN, RMS error, statistical coefficients

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.09.2013

Do cytowania – For citation: Suchocki C., Damińska-Suchocka M., Błoch P., Stec M., 2013. Ocena dokładności numerycznego modelu terenu zbudowanego z danych bezpośrednich. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 12 (3), 17–26.