

**Jerzy WYSOCKI, Paweł ORŁOWSKI**

Katedra Inżynierii Budowlanej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Department of Civil Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

## **Zagadnienie wpływu warunków terenowych na dokładność aproksymacji powierzchni terenu w procesie redukcji NMT** **The issue of the impact of the field conditions on the accuracy of the approximation of the terrain surface in the process of reduction of the DTM**

### **Wprowadzenie**

Obecnie w Polsce do realizacji wielu zagadnień inżynierskich wykorzystywany jest coraz częściej numeryczny model terenu (Wysocki, 1998, 2002, 2008, 2010; Wysocki i Orłowski, 2012, 2013). Ostatnio znalazł on szerokie zastosowanie przy tworzeniu map zagrożenia powodziowego (Kurczyński, 2012). NMT generowany jest dla tych potrzeb na podstawie danych ze skaningu laserowego – ALS (Airborn Laser Scanning), który dostarcza odpowiednio dokładne i bardzo duże zbiory danych. Przyjęta w ramach projektu ISOK (Informatyczny system osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami) dokładność wysokościowa NMT, determinująca tak duże zbiory danych, jest stosunkowo duża. Jest przydatna dla odwzorowania małych naturalnych form terenowych oraz ważnych form antropogenicznych, jak: wały

przeciwpowodziowe, skarpy, nasypy drogowe itp. Generowane bardzo duże zbiory danych stwarzają istotne problemy na przykład przy modelowaniu hydraulicznym fali powodziowej (Bakuła, 2012). Wiele opracowanych w tym celu programów komputerowych jest ograniczonych jeżeli chodzi o liczbę wprowadzanych danych. Można przewidywać, że po wstępnym ustaleniu potrzebnych małych form terenowych ogólny zbiór NMT mógłby podlegać odpowiedniej redukcji, czyli punkty NMT potrzebne dla tych jak i innych zagadnień, opisujące „nadliczbowo” już zamodelowaną powierzchnię byłyby usuwane ze zbioru przetwarzanych danych, czyli redukowane, przy zachowaniu założonej dokładności modelowania powierzchni terenu. W artykule przedstawiono przeprowadzone analizy tego zagadnienia na przykładzie redukcji NMT w kontekście tworzenia map zagrożenia powodziowego.

### **O dokładności NMT na potrzeby tworzenia map zagrożenia powodziowego oraz wybrane aspekty jego redukcji**

W procesie tworzenia map zagrożenia powodziowego potrzebny jest NMT o odpowiedniej gęstości i dokładności wysokościowej. Według ekspertów pracujących przy Komisji Europejskiej – Eximap (European Exchange Circle on Flood Mapping), w płaskim terenie z niewielkimi nachyleniami obszarów zalewowych dokładność danych wysokościowych powinna być lepsza niż 0,5 m (Eximap, 2007). Jednak inne publikacje (Kraus, 2003; Mandlbürger i Briesse, 2007) wskazują na wyższe potrzeby dokładnościowe w tym zakresie. Autorzy wskazują, że uzyskanie dokładności pionowej rzędu kilku do kilkudziesięciu centymetrów jest możliwe przy użyciu lotniczego skaningu laserowego (Kraus, 2007). W związku z tym, jest on coraz częściej wykorzystywany także do tworzenia map zagrożenia powodziowego (Eximap, 2007). Wykorzystaniu skaningu laserowego do generowania numerycznych modeli terenu na potrzeby oceny zagrożenia powodziowego sprzyja obowiązująca w UE dyrektywa tzw. powodziowa (Dyrektywa 2007/60/UE). Jest to dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim, nakładająca na państwa członkowskie obowiązek wytworzenia dokumentów planistycznych w tym zakresie. Podstawowymi z nich są mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego.

W Polsce akty prawne wdrażające dyrektywę powodziową określają wy-

magana wysokością dokładność NMT na poziomie przynajmniej 0,15 m dla powierzchni odkrytych i przynajmniej 0,30 m dla powierzchni zalesionych. Do wypełnienia tych zadań powstał projekt ISOK (Informatyczny system osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami). W ramach projektu przewidziano pokrycie powierzchni kraju danymi skaningu laserowego i wygenerowanie na ich podstawie numerycznych modeli terenu. Tworzony wynikowy NMT o strukturze GRID ma wymiary oczka siatki 1 × 1 m. Przyjęte parametry dokładnościowe ALS pozwalają na ich wykorzystanie również dla innych potrzeb (Wysocki, 1998, 2002, 2008, 2010; Hejmanowska i in., 2008; Wasilewski i Chormański, 2009; Ostrowski i Falkowski, 2012). Obrona gęstość punktów jest stosunkowo duża. Powodują to często potrzebę redukcji NMT dla analiz powodziowych czy również dla innych zagadnień (Wysocki, 1998, 2002, 2008, 2010; Wysocki i Orłowski, 2012, 2013). Jak wskazują prowadzone badania omawiane w źródłach literaturowych, również w niektórych publikacjach podanych w spisie literatury do niniejszego artykułu istotny wpływ na dokładność NMT w procesie jego redukcji mają warunki terenowe.

### **Zagadnienie wpływu warunków terenowych na dokładność NMT w procesie jego redukcji**

W wielu zagadnieniach inżynierskich dokładność aproksymacji powierzchni terenu ma podstawowe znaczenie (Wysocki, 1987, 1997, 2008). W związku z dynamicznym rozwojem techniki

komputerowej, główne zastosowanie w procesie aproksymacji powierzchni terenu znajdują numeryczne modele terenu – NMT-DTM (Schut, 1976; Piasek 1981; Wysocki, 1987, 2008). Jak już wskazano w innych pracach autora (Wysocki, 1987, 1997, 2008), główne metody NMT traktują aproksymację powierzchni terenu jako proces stochastyczny o charakterze stacjonarnym, to znaczy kowariancja zmiennych zależy tu od odległości punktów odniesienia (są to punkty NMT, do których odnoszona jest interpolacja wysokości innych punktów powierzchni terenu). Jeżeli mamy  $n$  punktów odniesienia, to do aproksymacji z wyrównaniem metodą najmniejszych kwadratów można użyć  $n$  równań błędów, co można zapisać w postaci wzoru:

$$Z = H + h = \mathbf{BX} + h \quad (1)$$

gdzie:

$Z$  – wysokości punktów odniesienia,  
 $H$  – składowe decydujące (pojęcie stosowane np. przez Schuta) opisane wielomianem ( $\mathbf{BX}$ ), określające charakterystyczne formy terenu,

$h$  – różnice wysokości między pomierzonymi wysokościami punktów odniesienia a wyznaczonymi na podstawie wielomianu.

W każdym punkcie odniesienia  $i$ , wartość  $h_i$  będąca funkcją pomiarów (obserwacji), może być podzielona na składowe:

$$h_i = s_i + r_i \quad (2)$$

gdzie:

$s_i$  – składowe współzależne, tj. formy terenowe, które z powodu swej różnorodności nie mogą być opisane funkcją matematyczną (wielomianami) i dlatego

wyznaczane są metodami statystycznymi z użyciem wariancji i kowariancji,  $r_i$  – reprezentuje błąd pomiaru – „szum”, czyli błędy przypadkowe pomiaru oraz wielkości związane z rodzajem terenu.

Można wyróżnić dwie podstawowe grupy błędów związanych z rodzajem terenu i mających istotny wpływ na dokładność przedstawienia jego rzeźby (Wysocki, 1979):

- Błędy spowodowane „szorstkością” powierzchni terenu. Wynika ona z bardzo drobnych form naturalnych, powstałych pod wpływem warunków atmosferycznych oraz działalności człowieka. Wielkość błędów nie zależy w zasadzie od odległości (gęstości) pomierzonych punktów terenu. Wartość błędu, na podstawie badań eksperymentalnych omawianych w źródłach literaturowych oraz wybranych publikacjach podanych w spisie literatury do niniejszego artykułu, można oszacować w przeciętnych warunkach terenowych, średnio na około  $\pm 0,05$  m.
- Błędy spowodowane „chropowatością” rzeźby. Jest ona zaczątkiem morfologii terenu i przejawia się małymi nierównościami (małymi formami) oraz niejednostajnymi spadkami (nachyleniami) pomiędzy punktami terenu. Wartość błędów jest uzależniona od odległości (gęstości) pomierzonych punktów aproksymujących powierzchnię terenu na danym obszarze – punktów odniesienia (punktów NMT).

Jak wynika z powyższego, błędy spowodowane szorstkością powierzchni terenu można zaliczyć do „szumu”. Błędy przypadkowe pomiaru mogą więc

mieć wpływ, jeżeli będą istotnie większe od tych błędów. Błędy spowodowane chropowatością wejdą natomiast do składowej współzależnej. Zasadniczy wpływ na ich wielkość będzie miała gęstość i poprawność rozmieszczenia mierzonych punktów odniesienia.

Na podstawie prowadzonych badań oraz wykorzystując dane z opracowań zagranicznych, została zaproponowana metoda oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą siatki punktów NMT (Wysocki, 1998), która w postaci ogólnej została zapisana w formule:

$$m_h^2 = p_1 A^2 + p_2 (D \operatorname{tg} \alpha)^2 + C^2 \quad (3)$$

gdzie:

$m_h$  – średni błąd wysokości wyznaczanego (interpolowanego) punktu powierzchni terenu, określający również dokładność aproksymacji powierzchni terenu na podstawie punktów odniesienia (punktów NMT aproksymujących powierzchnię terenu),

$p_1$  – współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji (powierzchniowej),

$A$  – parametr charakteryzujący za pomocą błędu średniego dokładność określenia (pomiaru) wysokości punktów odniesienia,

$p_2$  – współczynnik wynikający z wpływu kąta  $\alpha$ , występującego tutaj jako parametr związany

z oddziaływaniem warunków terenowych (chropowatość terenu w określonych warunkach terenowych),

$D$  – przeciętna odległość punktów siatki odniesienia,

$\alpha$  – przeciętny kąt nachylenia terenu na opracowywanym obszarze,

$C = D t$  – wpływ chropowatości terenu na dokładność aproksymacji jego powierzchni przy małych (bliskich zera) wartości kąta  $\alpha$  i różnych wielkości  $D$  przy użyciu współczynnika  $t$ .

Wartości współczynników formuły (3) wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych na obiektach naturalnych (Wysocki, 1987) oraz badań eksperymentalnych na modelach powierzchni terenu generowanych za pomocą komputera z wykorzystaniem założeń teorii fraktali (Wysocki, 2007, 2010). Wyznaczone wartości współczynników przedstawiono w formule:

$$m_h^2 = 0,55 A^2 + 0,000015 (D^2 \operatorname{tg} \alpha)^2 + (D 0,0020)^2 \quad (4)$$

Opracowaną metodę oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą pomierzonej siatki punktów zastosowano dalej do przeprowadzenia analiz w zakresie wpływu warunków terenowych na dokładność NMT w procesie jego redukcji. Zaletą wykorzystanej metody jest możliwość uwzględnienia w takich analizach różnych czynników.

Do przeprowadzenia analiz ilustrujących powyższe zagadnienie przyjęto obiekt, na którego obszarze generowano zmienną wartość średniego kąta nachylenia terenu ( $\alpha$ ), która dla kolejnych wariantów ukształtowania powierzchni obiektu wynosiła odpowiednio: 1<sup>g</sup>, 2<sup>g</sup>, 4<sup>g</sup>, 6<sup>g</sup>. Dla każdego z wariantów ukształtowania powierzchni obiektu wygenerowano różne warianty pomierzonych siatek punktów NMT o gęstości ( $D$ ) wynoszącej odpowiednio: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 25, 50 oraz 75 m. Zgodnie z podanymi

wcześniej uwarunkowaniami skanowania laserowego przyjęto, że dokładność wysokościowa wygenerowanych punktów NMT ( $A$ ) wynosiła  $\pm 0,15$  m. Wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono w tabeli.

laserowego (tj. poniżej 15–20 cm) może być wykorzystana siatka punktów zredukowana do wymiaru  $D$  wynoszącego około 25 m, to jest przy współczynniku redukcji na poziomie dziewięćdziesięciu kilku procent.

TABELA. Dokładność zredukowanego numerycznego modelu terenu według metody (4) oraz metody (5)  
TABLE. The accuracy of the reduced Digital Terrain Model by method (4) and method (5)

D	Ilość punktów number of points ( $n$ )	Współczynnik redukcji Reduction factor	$m_h - m_{NMT}$ dla metod (4), (5)/for methods (4), (5)							
			(4)	(5)	(4)	(5)	(4)	(5)	(4)	(5)
m	pkt./ha	%	1 <sup>g</sup>		2 <sup>g</sup>		4 <sup>g</sup>		6 <sup>g</sup>	
1	10 000	0	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,15
2	2 500	75	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,16
3	1 110	88,9	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,16	0,11	0,16
4	625	93,8	0,11	0,15	0,11	0,15	0,11	0,16	0,11	0,17
5	400	96	0,11	0,15	0,11	0,16	0,11	0,17	0,11	0,18
10	120	98,8	0,11	0,16	0,11	0,17	0,12	0,21	0,12	0,25
25	25	99,8	0,13	0,20	0,14	0,25	0,20	0,40	0,26	0,52
50	9	99,9	0,21	0,29	0,34	0,46	0,63	0,76	0,93	1,01
75	4	99,96	0,39	0,40	0,71	0,62	1,38	1,14	2,07	1,51

W tabeli dla podanych siatek punktów o gęstości ( $D$ ) podano ilość pomierzonych punktów NMT ( $n$ ) przypadających na 1 ha powierzchni terenu oraz obliczono i podano w procentach współczynnik redukcji liczby punktów danego wariantu siatki w stosunku do wariantu najdokładniejszego o gęstości punktów  $D = 1$  m. Dokładność aproksymacji powierzchni terenu dla różnych wariantów siatek i przyjętych wcześniej wartości średniego kąta nachylenia terenu wyrażono za pomocą błędu średniego ( $m_h$ ) obliczonego według formuły (4). Otrzymano zbliżone dokładności aproksymacji powierzchni terenu również przy dużych współczynnikach redukcji. Z tabeli wynika, że dla uzyskania dokładności aproksymacji powierzchni terenu z błędem średnim w granicach zakładanej dokładności lotniczego skaningu

Należy dodać, że również z analiz przeprowadzonych w zakresie dokładności obliczania objętości mas ziemnych w pracach inżynierskich (Wysocki i Orłowski, 2012) czy też określania rzeczywistej powierzchni obiektu (Wysocki i Orłowski, 2013) – z wykorzystaniem NMT, wynika ogólny wniosek, że dla potrzeb wymagających wysokościowej aproksymacji powierzchni terenu z dokładnością rzędu 0,2 m, za optymalną w przeciętnych warunkach terenowych można przyjąć gęstość siatki ( $D$ ) o wielkości oczka około 25 m. Oczywiście podnosząc wymagania dokładnościowe, będziemy potrzebowali wygenerować siatkę o odpowiednio mniejszym oczku. Jednocześnie trzeba mieć na uwadze, że generowane bardzo duże zbiory danych mogą często stwarzać istotne problemy przy dalszym ich przetwarzaniu.



Otrzymane wyniki analiz porównano z analizami przeprowadzonymi z wykorzystaniem metody oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu opracowanej na podstawie obszernych badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez prof. F. Ackermanna (Ackermann, 1996), zapisanej przy użyciu formuły:

$$m_{NMT}^2 = m_z^2 + (\alpha d)^2 \quad (5)$$

gdzie:

$m_{NMT}$  – błąd średni wyznaczenia interpolowanej wysokości punktu terenu na podstawie znanych punktów NMT (dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu),

$m_z$  – błąd średni wyznaczenia (pomiaru) wysokości punktów NMT,

$\alpha$  – parametr opisujący charakter terenu,  $d$  – średnia odległość pomiędzy punktami NMT,

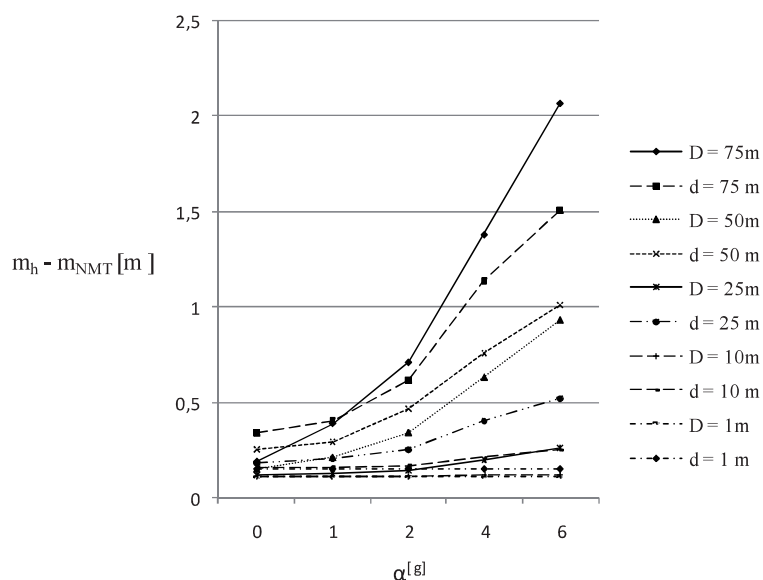
$\alpha_1 = 0,004 - 0,007$  – dla terenów łatwych o gładkich powierzchniach,

$\alpha_2 = 0,010 - 0,020$  – dla terenów o średniej trudności,

$\alpha_3 = 0,022 - 0,044$  – dla terenów trudnych (o nieregularnych i stromych powierzchniach).

Dodatkowe, w stosunku do zapisu oryginalnego, wskaźniki 1, 2, 3 przy parametrze  $\alpha$  zostały tutaj wprowadzone przez autorów.

Wyniki oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu (cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu) przeprowadzonej na podstawie formuły (5) porównano z wynikami powyższych analiz i zestawiono w tabeli. W tym celu przyjęto założenie, że parametrowi  $\alpha_1$  w formule (5) odpowiada zakres przedziału dla kątów nachylenia terenu do 2<sup>g</sup>, zaś parametrowi  $\alpha_2$  odpowiada zakres przedziału 2<sup>g</sup>–6<sup>g</sup>. Jak wynika z tabeli, otrzymano dobrą zbieżność wyników na



RYSUNEK. Dokładność zredukowanego numerycznego modelu terenu według tabeli  
FIGURE. The accuracy of reduced digital terrain model according to table

podstawie obydwu metod. Wskazuje to na spójność podstawowych założeń przyjętych przy opracowywaniu tych metod. Należy jednak dodać, że formuła (3) jest bardziej uniwersalna, ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny parametr jakim jest kąt nachylenia, zamiast subiektywnego doboru parametru  $\alpha$  w formule (5). Formuła (3) ma również współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji (powierzchniowej). W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę funkcji sklejaných przestrzennych-powierzchniowych (bicubic spline) uznawaną za jedną z najlepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych, obejmujących przede wszystkim tereny z podanych wyżej przedziałów.

## Podsumowanie

Zagadnienie wpływu warunków terenowych na dokładność aproksymacji powierzchni terenu w procesie redukcji NMT. Obecnie w Polsce do realizacji wielu zagadnień inżynierskich wykorzystywany jest coraz częściej numeryczny model terenu generowany na podstawie danych ze skaningu laserowego, który dostarcza odpowiednio dokładne i bardzo duże zbiory danych. Tak duże zbiory danych stwarzają istotne problemy przy dalszym ich przetwarzaniu. Powodują to często potrzebę redukcji gęstości zbioru punktów NMT przy jego wykorzystaniu dla różnych potrzeb. W pracy przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych w zakresie wpływu warunków terenowych na dokładność aproksymacji powierzchni terenu w procesie redukcji NMT. Do przeprowadzenia analiz wykorzystano autorską metodę oceny

dokładności numerycznej aproksymacji powierzchni terenu oraz metodę prof. F. Ackermanna dotyczącą oceny dokładności cyfrowego modelu terenu. Otrzymano dobrą zbieżność wyników na podstawie obydwu metod.

Przeprowadzone analizy wskazują, że dla uzyskania wysokościowej dokładności aproksymacji powierzchni terenu rzędu 0,2 m możliwe jest, w przeciętnych warunkach terenowych, wykorzystanie siatki punktów NMT zredukowanej do gęstości wynoszącej około 25 m, czyli zredukowanie ilości pomierzonych punktów o ponad 90%, bez znacznej utraty dokładności uzyskanego wyniku aproksymacji. Aby uzyskać większą dokładność aproksymacji powierzchni terenu, trzeba by podnieść wymagania dokładnościowe odnośnie wykorzystywanego zbioru NMT. Podnosząc wymagania dokładnościowe, musimy jednak mieć siatkę punktów NMT o większej gęstości (o odpowiednio mniejszym oczku  $D$ ), pomierzonych z odpowiednio wyższą dokładnością pionową, mając jednocześnie na uwadze, że generowane bardzo duże zbiory danych mogą często stwarzać istotne problemy przy dalszym ich przetwarzaniu.

Do podjęcia racjonalnych w tym zakresie ustaleń pomocne mogą być przedstawione w artykule badania i analizy.

## Literatura

- Ackermann, F. (1996). Technique and strategies for DEM generation. W C. Greve (red.), *Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry*. (strony 135-141). Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

- Bakuła, K. (2012). Porównanie wpływu wybranych metod redukcji NMT w tworzeniu map zagrożenia powodziowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 19-28.
- Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim. Dz.U.E L 288.
- Eximap (2007). *European Exchange Circle on Flood Mapping. Handbook on good practice on flood mapping in Europe*. The Netherlands: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
- Hejmanowska, B., Drzewiecki, W. i Kulesza, L. (2008). Zagadnienie jakości numerycznych modeli terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 163-175.
- Kraus, K. (2003). *LaserScanDTMs for Modeling Flood Risk Areas*. Stuttgart: Institut für Photogrammetrie.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans*. Wyd. II. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Kurczyński, Z. (2012). Mapy ryzyka i zagrożenia powodziowego a dyrektywa powodziowa. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 209-217.
- Mandlbürger, G. i Briese, C. (2007). *Using Airborne Laser Scanning for Improved Hydraulic Models*. Proceedings of International Congress on Modeling and Simulation 10–13.12.2007, Christchurch, New Zealand. Pobrano z lokalizacji: [http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo\\_2167.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_2167.pdf).
- Ostrowski, P. i Falkowski, T. (2012). GIS jako narzędzie integrujące metody badań morfologii dna doliny Bugu na odcinku jego Podlaskiego Przełomu. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 21 (57), 151-158.
- Piasek, Z., Milbert, S. i Pierzchała, H. (1981). Przegląd numerycznych modeli terenu. *Zesz. Nauk. AGH, Geodez.*, 62, 36-47.
- Schut, G.H. (1976). Review of interpolation methods for digital terrain models. *Canadian Surveyor*, 30, 389-412.
- Waśilewski, M. i Chormański, J. (2009). The Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model as an alternative data source for deriving hydrological characteristics in lowland catchment – Rogożynek catchment case study. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – Land Reclamation*, 41, 71-82.
- Wysocki, J. (1979). Analiza dokładności opracowań warstwicowych do projektowania drenowania użytków rolnych. *Zesz. Nauk. SGGW-AR, Melioracje Rolne*, 18, 51-61.
- Wysocki, J. (1987). *Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map warstwicowych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych*. Rozprawy naukowe i monografie. Warszawa: Wydawnictwo SGGW-AR.
- Wysocki, J. (1997). On the approximation of the land surface in the computerised methods of working out contour lines. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – Land Reclamation*, 28, 71-76.
- Wysocki, J. (1998). Numeryczny model terenu (NMT) jako baza danych dla przestrzennego urządzania zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich. *Przeł. Nauk. Wydz. IiK.*, 15, 66-72.
- Wysocki, J. (2002). *Numeryczne modele terenu i zagadnienie ich zastosowania w kształtowaniu zabudowy obszarów wiejskich*. Mat. konf. „Inżynierskie i przestrzenne aspekty zabudowy obszarów niezurbanizowanych”. Warszawa: SGGW.
- Wysocki, J. (2007). Europejska dyrektywa INSPIRE i problematyka jej implementacji w zakresie dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 4 (38), 39-46.
- Wysocki, J. (2008). *Geodezja z fotogrametrią i geomatyką dla inżynierii i ochrony środowiska oraz budownictwa*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Wysocki, J. (2010). Podstawowa rola geodezji w tworzeniu katastru trójwymiarowego (3D) jako nowoczesnego systemu informacji przestrzennej na potrzeby rozwoju terenów niezurbanizowanych (wiejskich). *Przegląd Geodezyjny*, 10, 17-19.
- Wysocki, J. i Orłowski, P. (2012). Wpływ dokładności numerycznego modelu powierzchni terenu na obliczanie objętości mas ziemnych przy projektowaniu obiektów inżynierskich. *Przegląd Geodezyjny*, 5, 9-11.
- Wysocki, J. i Orłowski, P. (2013). Wpływ numerycznego modelu terenu na dokładność wyznaczenia aproksymowanej powierzchni obiektu. *Acta Scientiarum Polonorum – Architectura*, 12, 3-16.



## Streszczenie

**Zagadnienie wpływu warunków terenowych na dokładność aproksymacji powierzchni terenu w procesie redukcji NMT.** Obecnie w Polsce do realizacji wielu zagadnień inżynierskich wykorzystywany jest coraz częściej numeryczny model terenu generowany na podstawie danych ze skaningu laserowego, który dostarcza odpowiednio dokładne i bardzo duże zbiory danych. Tak duże zbiory danych stwarzają istotne problemy przy dalszym ich przetwarzaniu. Powodują to często potrzebę redukcji gęstości zbioru punktów NMT przy jego wykorzystywaniu dla różnych potrzeb. W pracy przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych w zakresie wpływu warunków terenowych na dokładność aproksymacji powierzchni terenu w procesie redukcji NMT. Do przeprowadzenia analiz wykorzystano autorską metodę oceny dokładności numerycznej aproksymacji powierzchni terenu oraz metodę prof. F. Ackermanna dotyczącą oceny dokładności cyfrowego modelu terenu. Otrzymano dobrą zbieżność wyników na podstawie obydwu metod.

## Summary

**The issue of the impact of the field conditions on the accuracy of the approximation of the terrain surface in the process of reduction of the DTM.** Currently in Poland

to a number of engineering problems is used digital terrain model (DTM) generated based on data from laser scanning, which provides adequately accurate but very large data sets. Such large datasets pose significant problems in many issues. This is often the need to reduce the DTM. The paper presents the results of analyzes carried out on the impact of the field on the accuracy of the DTM in its reduction. To carry out the analysis used an original method for evaluating the accuracy of the numerical approximation of the land surface and the method of prof. F. Ackermann on the assessment of the accuracy of the digital terrain model. Good convergence of the results obtained on the basis of both methods. The analysis has demonstrated the ability to reduce altitude information about the area for more than 90% without significant loss of obtained accuracy.

### Authors' address:

Jerzy Wysocki, Paweł Orłowski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Katedra Inżynierii Budowlanej  
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159,  
Poland  
e-mail: pawel\_orlowski@sggw.pl