

**Rafał ROZPONDEK, Katarzyna WANCISIEWICZ**

Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska  
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa  
e-mail: r.rozpondek@is.pcz.pl, katarzynawancisiewicz@gmail.com

## **Stosowanie wybranych metod generowania regularnych modeli terenu z lotniczego skaningu laserowego do badań środowiskowych**

### **Application of Selected Methods of Generating Regular Terrain Models from Airborne Laser Scanning for Environmental Research**

The accuracy of models representing the shape of the land surface is important in environmental studies. Accurate model can be used to detect even small changes in the landform and landuse, as well as to develop a spatial model of water and soil pollution. Due to the fact that environmental studies are carried out on diversified areas in terms of landuse, this study indicated the appropriate methods for generating Digital Terrain Model (DTM) and Digital Surface Model (DSM). Both of them can be used in processes and analyzes research. Those analyzes mainly take into account the formation of the Earth's surface in the context of hydrological, geomorphological and biological modeling. The example of practical use of hydrological modeling is a ISOK project, which goal is to reduce the danger and minimize losses caused by the floods. The main aim of this study was to select the appropriate method of generating regular models from airborne laser scanning. The data on which analysis was performed, were obtained for the area of Cracow city within the project ISOK. To achieve this goal, four methods available in ArcGIS, were selected: nearest neighbour, inverse distance weighted, triangulation with linear interpolation and triangulation with natural neighbour interpolation. Additionally several different sizes of the cell of regular model were selected: 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5 m. Each generated model has been studied in terms of a accuracy (Gaussian statistical model was used). Firstly the analysis was made for digital terrain model and digital surface model for one archive module of point cloud. For this stage, 48 models were generated. After that, the area of analysis was expanded. Because of similar results obtained by both triangulations methods in the first stage, only the method of triangulation with linear interpolation was studied. In the second stage of research, 54 models were generated for other archive modules of point cloud. The results of the two stages were compatible. It has been noticed that the nearest neighbour method is the most accurate for generating Digital Surface Models.

**Keywords:** DTM, DSM, DEM, interpolation

## **Wprowadzenie**

Ukształtowanie powierzchni Ziemi ma istotny wpływ na wiele zachodzących na niej procesów fizycznych i biologicznych. Jedną z podstawowych postaci danych dotyczących modelu wysokościowego Ziemi jest mapa topograficzna.

W formie analogowej złożona jest z poziomicy, natomiast jej cyfrowa reprezentacja to Numeryczny Model Terenu (NMT). NMT umożliwia szybkie i istotne przetwarzanie danych. Dzięki temu daje on wiele możliwości zastosowania go w procesach i analizach badawczych w inżynierii i ochronie środowiska. Analizy obejmują głównie uwzględnienie ukształtowania powierzchni Ziemi w poznawaniu i modelowaniu procesów hydrologicznych, geomorfologicznych i biologicznych [1, 2]. Analizy geomorfologiczne wykorzystują modele w celach badania procesów kształtujących powierzchnię Ziemi, np. trzęsienia ziemi, powstawanie osuwisk [1, 3-5]. W zagadnieniach ekologicznych mogą być wykorzystane do badań rozmieszczenia, wysokości i budowy roślinności [6]. Modele terenu wykorzystywane są także w planowaniu oraz badaniu historii zagospodarowania terenu [7]. Hydrologiczna analiza Numerycznego Modelu Terenu umożliwiła wprowadzenie automatycznego i znacznie bardziej wiarygodnego sposobu wydzielenia granic zlewni i wyznaczania dla danego miejsca obszarów zasilanych spływem powierzchniowym. Dzięki NMT możliwe jest modelowanie spływu wody w rezultacie gwałtownych opadów, dopływu zanieczyszczeń do wód przybrzeżnych ze źródeł niepunktowych, przewidywanie zalewania terenu podczas powodzi [1]. Projektem dotyczącym zagrożeń powodziowych, który opiera się w głównej mierze na Numerycznym Modelu Terenu, jest „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami” (ISOK). Projekt ten jest realizowany od 2010 roku. Jego głównym zadaniem jest zwiększenie bezpieczeństwa obywateli i zminimalizowanie strat powstałych w wyniku powodzi poprzez stworzenie map zagrożenia i ryzyka powodziowego. Obecnie został zrealizowany dla zlewni rzek o powierzchni bliskiej 289 tysięcy km<sup>2</sup>, co stanowi w przybliżeniu 92% całkowitej powierzchni kraju [8].

Numeryczny Model Terenu (NMT) i Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) to numeryczna reprezentacja wysokości topograficznej powierzchni lub terenu wraz z algorytmem interpolującym. Obecnie głównym źródłem powstawania modeli jest lotniczy skaning laserowy. Umożliwia on w bardzo szybkim czasie pozyskanie dużej ilości dokładnych danych o badanym obszarze. Dzięki zastosowaniu systemu GPS (*ang. Global Positioning System*), określającego pozycję samolotu, wspieranego przez system INS (*ang. Inertial Navigation System*), wyznaczającego aktualne nachylenia kątowe głowicy skanującej, z której wykonywany jest pomiar, możliwe jest wyznaczenie współrzędnych XYZ punktów terenowych [9]. Wynikiem lotniczego skaningu laserowego jest nieregularny zbiór punktów wysokościowych - tzw. chmura punktów. Aby uzyskać modele NMT i NMPT, chmura musi zostać poddana działaniom matematycznym. Najlepszą postacią modelu pod względem możliwości i szybkości wykonywania działań jest regularna siatka kwadratów (GRID). W związku z tym istotnym zagadnieniem jest dokładność procesu generowania regularnych modeli na podstawie chmury punktów. Większa dokładność wiąże się ze zminimalizowaniem strat informacji na tym etapie przetwarzania danych, co prowadzi do uniknięcia ryzyka sfałszowania wyników badań prowadzonych nad środowiskiem.

Dostępne źródła literaturowe nie wskazują najbardziej odpowiedniego algorytmu służącego do generowania modeli NMT i NMPT. W pracy zbadano wybrane metody interpolacji dostępne w oprogramowaniu ArcGIS. Jedna z tych metod została wykorzystana w badaniach rozkładu zanieczyszczeń w osadach dennych w przybrzeżnej strefie zbiornika wodnego Ostrowy na rzece Biała Oksza [10].

Celem przeprowadzonych badań było wskazanie najbardziej dokładnego algorytmu generowania regularnych modeli terenu na podstawie nieregularnego zbioru punktów wysokościowych w zastosowaniu w pomiarach przydatnych w ocenie stanu środowiska. Analizie poddano cztery wybrane metody interpolacji:

- IDW (*ang. Inverse Distance Weighted*) - metoda wagowanej odwrotnej odległości,
- *Nearest neighbour* - metoda najbliższego sąsiada,
- Triangulacja (TIN - *ang. Triangulated Irregular Network*) z interpolacją metodą liniową,
- Triangulacja z interpolacją metodą naturalnego sąsiada.

Na podstawie klas pokrycia oraz rzeźby terenu do wykonania prac badawczych wybrano cztery arkusze o różnym sposobie zagospodarowania terenu. Godła wykorzystanych arkuszy w układzie 1992 to: M-34-64-D-d-1-4-4-4 (rys. 1), M-34-64-D-d-1-3-2-2 (rys. 2), M-34-64-D-d-1-3-1-4 (rys. 3), M-34-64-D-d-1-1-3-4 (rys. 4).



Rys. 1. Fragment dzielnicy Dębniki, osiedla Podwawelskiego. Charakteryzuje się obecnością większości klas pokrycia terenu

Fig. 1. Part of the district Dębniki. It is characterized by diverse classes of land cover



Rys. 2. Fragment dzielnicy Zwierzyniec, osiedla Wola Justowska. Charakteryzuje się niską zabudową i urozmaiconą rzeźbą terenu (rowy, skarpy)

Fig. 2. Part of the district Zwierzyniec. It is characterized by varied terrain and low buildings



Rys. 3. Obszar zalesiony w okolicach kopca Kościuszki  
Fig. 3. Wooded area near the kopiec Kościuszki



Rys. 4. Fragment dzielnicy Zwierzyniec, osiedla Wola Justowska i krakowskich Błoni - charakteryzuje się zwartą, niską zabudową  
Fig. 4. Part of the district Zwierzyniec. It is characterized by low buildings

## 1. Metodyka badań

Dane wejściowe to cztery arkusze chmury punktów w formacie LAS w układzie współrzędnych prostokątnych PL-2000 oraz układzie wysokościowym Kronsztadt'86. Dane swoim zakresem obejmują teren miasta Krakowa. Wykonane zostały zgodnie ze standardem II dotyczącym parametrów lotniczego skanowania laserowego [11]. Każdy arkusz chmury punktów zawiera od 6 000 000 do 8 000 000 punktów wysokościowych. Do badań wykorzystano również ortofotomapę (układ 1992, projekt ISOK, piksel terenowy 12 cm) jako pomoc w interpretacji wyników.

Na podstawie wybranych arkuszy wygenerowano 96 regularnych modeli NMT i NMPT o różnych rozmiarach wynikowej siatki (od 0,125 m do 5 m). W tym celu wykorzystano cztery wybrane metody interpolacji. Wykonano 48 modeli (rozmiary siatek - 0,125 m, 0,25 m, 0,5 m, 1 m, 2,5 m, 5 m) dla arkusza M-34-64-D-d-1-4-4-4 oraz 54 modele dla pozostałych (rozmiary siatek - 0,125 m, 1 m, 5 m). W przypadku arkusza M-34-64-D-d-1-3-1-4 pominięto NMT ze względu na znaczne zalesienie, natomiast dla arkusza M-34-64-D-d-1-3-2-2 pominięto NMPT z uwagi na przeważającą ilość terenów odkrytych. Arkusz M-34-64-D-d-1-4-4-4 został dokładniej zbadany ze względu na najbardziej zróżnicowane pokrycie terenu.

Przeprowadzone badania można podzielić na dwa główne etapy. Pierwszym z nich było wygenerowanie 48 modeli dla arkusza M-34-64-D-d-1-4-4-4, kolejnym

wykonanie 54 modeli dla pozostałych arkuszy w celu potwierdzenia wyników pierwszego etapu.

Zastosowana metodyka oceny dokładności algorytmu (rys. 5) ujmuje niżej opisany sposób postępowania:

- Wejściowa chmura punktów - arkusze zostały przygotowane odpowiednio pod kątem generowania NMT i NMPT (wybrano odpowiednie klasy pokrycia terenu i przeprowadzono filtrację chmury punktów).
- Wygenerowanie modeli NMT i NMPT (wykorzystane oprogramowanie ArcGIS) wybranymi metodami interpolacji:
  - IDW (*ang. Inverse Distance Weighted*) - algorytm wyznacza wysokość piksela na podstawie punktów znajdujących się w jego otoczeniu. Im punkt znajduje się dalej, tym otrzymuje mniejszą wagę. W badaniach przyjęto domyślne wartości parametrów (ArcGIS, funkcja *LAS Dataset to Raster*) - parametr potęgi równy 2 i obszar poszukiwań ograniczony do rozmiaru najmniejszej komórki generowanego modelu [12, 13].
  - Metoda najbliższego sąsiada - każda komórka wynikowego modelu przyjmuje wartość wysokości punktu, znajdującego się najbliżej centrum komórki [13, 14].
  - Triangulacja z interpolacją metodą liniową i naturalnego sąsiada - obie metody opierają się na utworzeniu modelu wektorowego TIN (*ang. Triangulated Irregular Network*) [15]. Metoda liniowa opiera się na wagowaniu liniowym, natomiast naturalnego sąsiada na wagowanych strefach wpływu (granice stref wyznaczone są na podstawie poligonów Thiessena) [13, 16].
- Export danych w formacie XYZ do programu CloudCompare i analiza dokładności (model Gaussa) - wyznaczenie błędu wygenerowanych modeli NMT i NMPT w stosunku do chmury punktów opiera się na wykonaniu rzutu ortogonalnego punktów wysokościowych na model, utworzony przez triangulację Delaunaya 2,5D przeprowadzoną na punktach wchodzących w skład NMT i NMPT [17]. Według monografii „Zastosowanie rozkładu Laplace’a do określania niepewności danych przestrzennych na przykładzie NMT i systemu IACS” [18], rozkład Gaussa przeszacowuje rzeczywisty błąd generowanych modeli. Jako bardziej odpowiedni wydaje się rozkład Laplace’a. Natomiast dzięki popularności rozkładu Gaussa większość oprogramowania stworzonego do pracy na danych GIS zawiera możliwość automatycznego wyznaczenia parametrów rozkładu. Dodatkowo względne porównywanie uzyskanych wartości błędu (porównywanie błędów siatek, wyznaczonych tym samym modelem statystycznym) może potwierdzić poprawność zastosowanego modelu.
- Wizualizacja i ocena wyników - dzięki wizualizacji określono miejsca problematyczne dla zastosowanych algorytmów. Natomiast ocena wyników pozwoliła wybrać najdokładniejszą metodę interpolacji.



Rys. 5. Schemat wykonanych analiz dokładności

Fig. 5. Diagram of the accuracy analysis

## 2. Triangulacja Delaunaya na chmurze punktów 2D

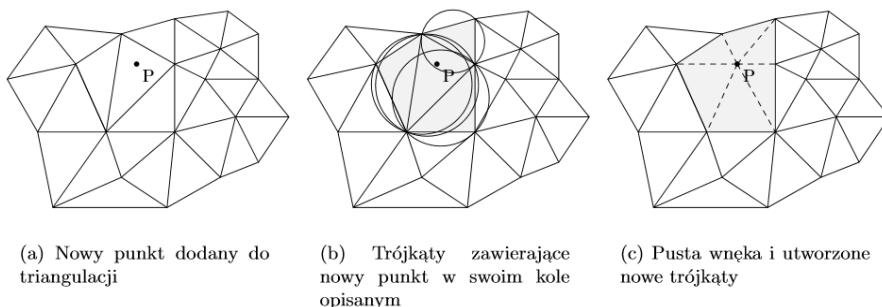
Triangulacja Delaunaya jest to metoda generowania siatki trójkątów. Jej zaletą jest optymalizacja triangulacji - tworzy ona siatkę trójkątów, starając się generować trójkąty o jak największych najmniejszych kątach.

Sposób działania algorytmu można przedstawić w kilku etapach:

- Wyznaczenie prostokąta obejmującego wszystkie punkty,
- Konstrukcja dwóch trójkątów w wyznaczonym prostokącie - inicjacja triangulacji,
- Dla każdego punktu chmury punktów:
  - Dodaj punkt do obszaru opracowania,
  - Wykonaj ponowną triangulację.

Ponowna triangulacja jest wykonywana na podstawie jednego z dwóch kryteriów:

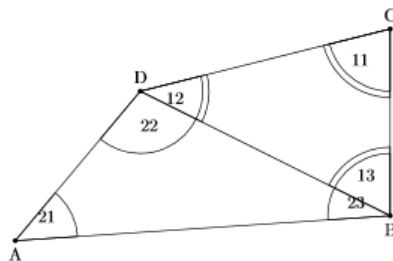
1. Kryterium koła opisanego na trójkącie (rys. 6) - kryterium triangulacji polega na tym, że każde opisanie koła na trójkącie zawiera tylko punkty trójkąta, na którym jest opisanie. Po dodaniu nowego punktu sprawdzane są wszystkie koła opisanie na sąsiednich trójkątach. Jeżeli punkt znajduje się w obszarze sprawdzanego koła, trójkąt, na którym jest opisanie sprawdzane koło, zostaje usunięty. Nowe boki trójkąta są tworzone poprzez połączenie wstawionego punktu z wierzchołkami powstałej wnęki [17].



Rys. 6. Kryterium koła opisanego [17]

Fig. 6. Criterion of circumcircle [17]

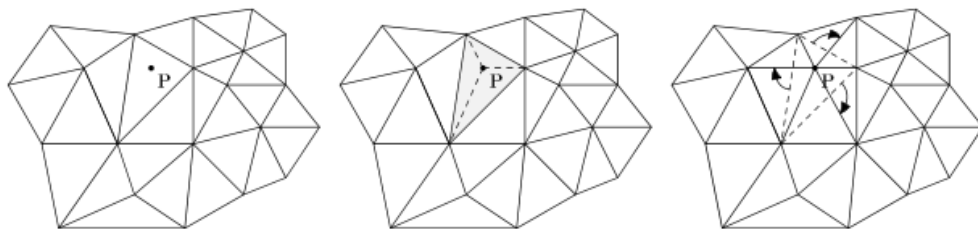
2. Kryterium kątów wewnętrznych (rys. 7) - warunek jest wynikiem tego, że triangulacja Delaunaya tworzy trójkąty o jak największych najmniejszych kątach. Każdy nowo wstawiony punkt jest łączony z wierzchołkami trójkąta, w którym się znajduje. Następnie sprawdza się każdą parę sąsiadujących trójkątów względem spełnienia kryterium kątów wewnętrznych. W przypadku niespełnienia warunku następuje zamiana krawędzi (rys. 8) [17].



$$\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{22} + \alpha_{23} \geq \alpha_{11} + \alpha_{21}$$

Rys. 7. Kryterium kątów wewnętrznych [17]

Fig. 7. Criterion of interior angle [17]



(a) Nowy punkt dodany do triangulacji

(b) Podział trójkąta na trzy mniejsze

(c) Zamiana krawędzi

Rys. 8. Zastosowanie kryterium kątów wewnętrznych [17]

Fig. 8. Application of criterion of interior angle [17]

W badaniach wykorzystano triangulację Delaunaya 2,5D. Polega ona na wykonaniu w pierwszej kolejności triangulacji Delaunaya na płaszczyźnie dwuwymiarowej, a następnie, na podstawie wysokości punktów, dopasowaniu jej do płaszczyzny trójwymiarowej.

### 3. Analiza wyników badań

W pierwszym etapie wykonano analizy NMT i NMPT dla arkusza M-34-64-D-d-1-4-4-4. Odczytano wartości opisujące rozkład Gaussa - średnią, odchylenie standardowe i dodatkowo wartość błędę maksymalnego. Wyniki dla NMT umieszczono w tabeli 1, dla NMPT - w tabeli 2.

Tabela 1. Wyniki analiz dokładności dla NMT (Arkusz M-34-64-D-d-1-4-4-4)

Table 1. Results of accuracy analysis for DTM (M-34-64-D-d-1-4-4-4)

Rozmiar siatki	Parametr, jednostka: m	Metoda interpolacji			
		Najbliższego sąsiada	IDW	TIN z interpolacją liniową	TIN z interpolacją metodą naturalnego sąsiada
0,125 m	max	0,15	0,11	0,12	0,14
	średnia	0,000	0,000	0,000	0,000
	odchylenie std.	0,012	0,011	0,012	0,012
0,25 m	max	0,23	0,25	0,22	0,27
	średnia	0,000	0,000	0,000	0,000
	odchylenie std.	0,019	0,017	0,019	0,018
0,5 m	max	0,34	0,58	0,42	0,42
	średnia	0,000	0,000	0,000	0,000
	odchylenie std.	0,026	0,023	0,024	0,023
1 m	max	0,77	0,80	0,76	0,77
	średnia	-0,001	0,000	-0,001	-0,001
	odchylenie std.	0,032	0,028	0,030	0,029
2,5 m	max	1,73	1,76	1,70	1,71
	średnia	-0,002	0,000	-0,002	-0,002
	odchylenie std.	0,056	0,053	0,055	0,054
5 m	max	3,00	2,60	2,65	2,60
	średnia	-0,002	0,000	-0,003	-0,003
	odchylenie std.	0,115	0,109	0,112	0,112

Tabela 2. Wyniki analiz dokładności dla NMPT (Arkusz M-34-64-D-d-1-4-4-4)

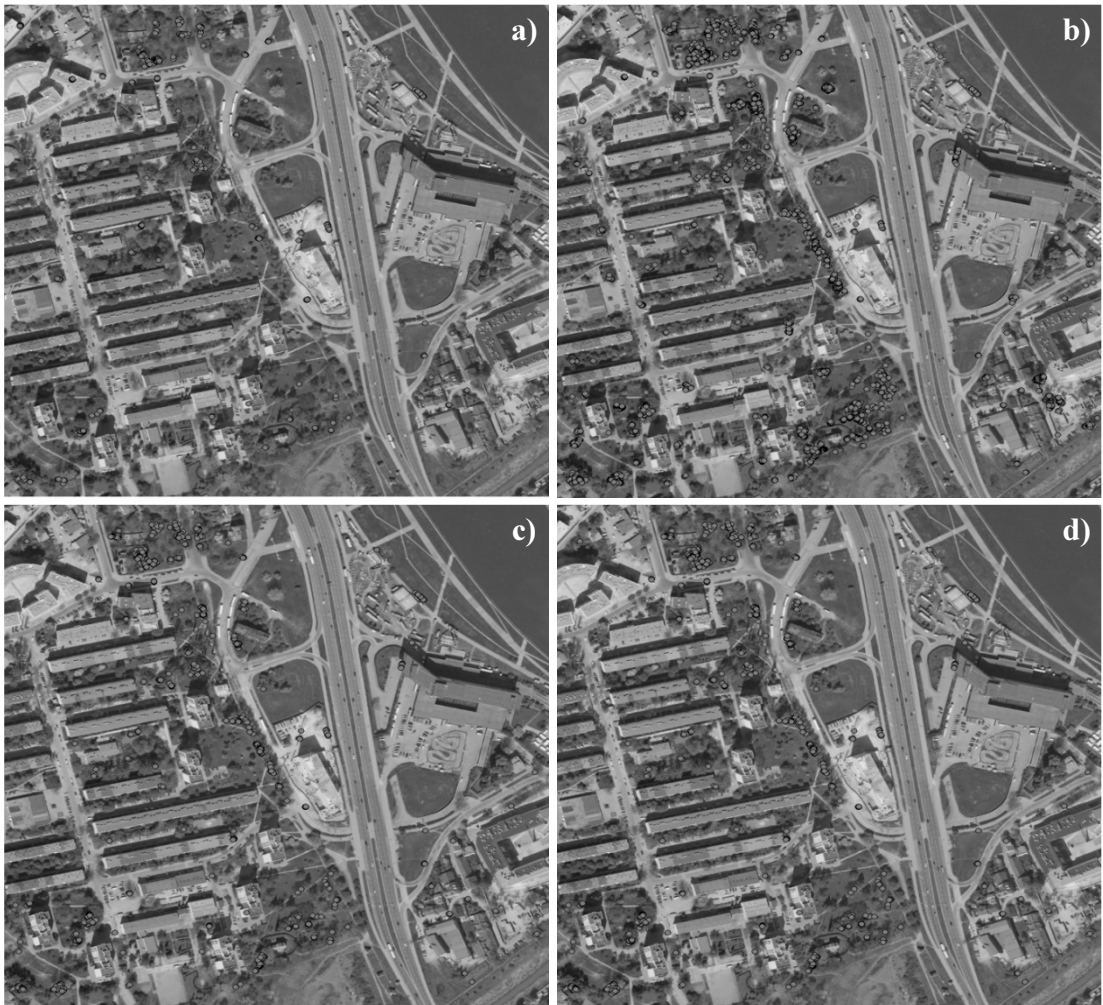
Table 2. Results of accuracy analysis for DSM (M-34-64-D-d-1-4-4-4)

Rozmiar siatki	Parametr, jednostka: m	Metoda interpolacji			
		Najbliższego sąsiada	IDW	TIN z interpolacją liniową	TIN z interpolacją metodą naturalnego sąsiada
0,125 m	max	12,10	13,10	7,90	14,50
	średnia	0,000	0,000	0,000	0,000
	odchylenie std.	0,051	0,068	0,155	0,217
0,25 m	max	24,40	24,10	22,80	23,70
	średnia	-0,001	-0,001	0,001	0,000
	odchylenie std.	0,104	0,167	0,228	0,289
0,5 m	max	20,50	22,70	25,30	22,80
	średnia	0,001	0,012	0,005	0,007
	odchylenie std.	0,221	0,489	0,344	0,400
1 m	max	35,50	33,90	34,60	35,60
	średnia	0,007	0,031	0,014	0,016
	odchylenie std.	0,391	0,755	0,506	0,553
2,5 m	max	35,70	35,50	35,60	35,60
	średnia	0,028	0,047	0,036	0,041
	odchylenie std.	0,792	1,183	0,881	0,914
5 m	max	35,60	35,60	35,60	35,60
	średnia	0,088	0,046	0,107	0,110
	odchylenie std.	1,425	1,815	1,496	1,502

Analiza dokładności modeli NMPT wykazała znaczne różnice w dokładności między poszczególnymi wariantami wykorzystania algorytmu. Najmniej dokładne wyniki uzyskano, wykorzystując metodę wagowanej odwrotnej odległości. Może być to spowodowane występowaniem dużych różnic wysokości na małym



obszarze - ściany budynków, roślinność itp. Zauważono, że metoda najbliższego sąsiada stopniowo traci na dokładności wraz ze wzrostem rozmiaru siatki. Natomiast metody oparte na triangulacji zyskują na dokładności (względem pozostałych metod) wraz ze wzrostem rozmiaru oczka siatki. Analizując uzyskane wyniki, stwierdzono, że najmniejsze błędy generowania modeli osiągnięto przy zastosowaniu metody najbliższego sąsiada. Dodatkowo rezultaty badań mogą wskazywać na to, że dla większych rozmiarów siatki metody triangulacji mogą okazać się korzystniejsze.



**Rys. 9.** Błędy generowania NMPT (powyżej 5 metrów) dla rozmiaru oczka siatki 1 m - oznaczone symbolem punktowym, odpowiednio dla metody: a) najbliższego sąsiada, b) IDW, c) triangulacji z interpolacją liniową, d) triangulacji z interpolacją metodą naturalnego sąsiada

**Fig. 9.** Deviation (above 5 meters) of DSM (GRID size: 1 meter) - marked by point symbols, respectively for method: a) nearest neighbour, b) IDW, c) triangulation with linear interpolation, d) triangulation with natural neighbour interpolation

Błędy generowania NMPT lokalizowane są zwykle na obszarach, gdzie występują gwałtowne zmiany wysokości. Są to krawędzie budynków, obszary zalesione, skarpy lub słupy. Zauważono także, że wszystkie metody generują największe błędy w podobnej lokalizacji. Różnią się one jedynie ilością błędnych punktów. W celu wizualizacji wyników wykazano błędy powyżej 5 metrów dla NMPT o rozmiarze oczka siatki 1 m (rys. 9) oraz fragment NMPT (rys. 10).



Rys. 10. Fragment Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu  
Fig. 10. Fragment of Digital Surface Model

Tabela 3. Wyniki analiz dokładności dla NMT i NMPT  
Table 3. Results of accuracy analysis for DSM and DTM

Numeryczne Modele Pokrycia Terenu					Numeryczne Modele Terenu				
Rozmiar siatki	Parametr, jednostka: m	Metoda interpolacji			Rozmiar siatki	Parametr, jednostka: m	Metoda interpolacji		
		Najbliższego sąsiada	IDW	Triangulacja z interpolacją liniową			Najbliższego sąsiada	IDW	Triangulacja z interpolacją liniową
<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-3-1-4 - obszar zalesiony</b>					<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-3-2-2 - urozmaicona rzeźba terenu</b>				
0.125 m	max	15.97	14.02	6.92	0.125 m	max	0.31	0.36	0.37
	średnia	-0.000843	-0.001158	-0.002687		średnia	-0.000063	-0.000065	0.000451
	odchylenie std.	0.080709	0.112612	0.253908		odchylenie std.	0.009832	0.009026	0.010266
1 m	max	16.55	18.73	17.2	1 m	max	0.82	0.85	0.96
	średnia	-0.009688	0.049709	0.020639		średnia	-0.00055	-0.000288	-0.00055
	odchylenie std.	0.642736	1.438792	0.883877		odchylenie std.	0.028028	0.024679	0.02586
5 m	max	20.98	25.72	21.4	5 m	max	2.27	2.00	2.25
	średnia	-0.032697	0.024387	0.03047		średnia	-0.001503	0.000635	-0.001452
	odchylenie std.	2.185641	2.99732	2.354747		odchylenie std.	0.096127	0.095245	0.0947
<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-4-4-4 - zawiera wszystkie klasy pokrycia terenu</b>					<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-4-4-4 - zawiera wszystkie klasy pokrycia terenu</b>				
0.125 m	max	12.1	13.1	7.9	0.125 m	max	0.15	0.11	0.12
	średnia	-0.000235	-0.000345	-0.000377		średnia	-0.000066	-0.000063	0.000388
	odchylenie std.	0.050901	0.067906	0.155306		odchylenie std.	0.012039	0.010979	0.012364
1 m	max	35.5	33.9	34.6	1 m	max	0.77	0.8	0.76
	średnia	0.00731	0.030548	0.014015		średnia	-0.000686	-0.000273	-0.000677
	odchylenie std.	0.39118	0.755258	0.506364		odchylenie std.	0.031829	0.027841	0.029888
5 m	max	35.6	35.6	35.6	5 m	max	3.00	2.6	2.65
	średnia	0.087966	0.045731	0.107197		średnia	-0.002301	-0.00014	-0.002522
	odchylenie std.	1.425037	1.815278	1.495781		odchylenie std.	0.114894	0.109179	0.112082
<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-3-2-2 - niska zabudowa</b>					<b>Arkusz M-34-64-D-d-1-3-2-2 - niska zabudowa</b>				
0.125 m	max	5.55	5.53	5.57	0.125 m	max	0.21	0.20	0.16
	średnia	-0.000275	-0.000521	-0.000938		średnia	-0.000073	-0.000072	0.000366
	odchylenie std.	0.054201	0.071072	0.148498		odchylenie std.	0.011926	0.010906	0.012231
1 m	max	9.27	9.86	8.66	1 m	max	0.68	0.60	0.63
	średnia	0.008377	0.019367	0.014373		średnia	-0.00111	-0.000533	-0.001355
	odchylenie std.	0.399602	0.667512	0.487659		odchylenie std.	0.034496	0.03048	0.032367
5 m	max	12.71	14.96	13.15	5 m	max	1.86	1.66	1.60
	średnia	0.09717	0.018317	0.100702		średnia	-0.006331	-0.001713	-0.00667
	odchylenie std.	1.462171	1.654027	1.478292		odchylenie std.	0.10918	0.101642	0.106858

Drugi etap badań miał za zadanie potwierdzić wnioski z pierwszego etapu. W tym celu do analiz dokładności wybrano trzy rozmiary siatki - 0,125 m, 1 m i 5 m oraz (ze względu na podobne wyniki uzyskiwane przez obie metody triangulacji) badaniom poddano jedynie metodę triangulacji z interpolacją liniową. Wyniki analiz dla badanych arkuszy zaprezentowano w tabeli 3. Potwierdzają one słuszność rezultatów pierwszego etapu.

## Podsumowanie i wnioski

Ze względu na ciągły rozwój dostępnego oprogramowania oraz postęp technologiczny problem dokładności generowania modeli terenu w zastosowaniu do inżynierii i ochrony środowiska jest bardzo aktualny i istotny. Dokładniejsze modele mogą być podstawą do wykrywania nawet niewielkich zmian w ukształtowaniu i zagospodarowaniu terenu [5], a także w rekultywacji terenów zdegradowanych [3]. Dodatkowo poprawiają wiarygodność analiz geomorfologicznych, hydrologicznych i biologicznych. W związku z tym ważny jest odpowiedni dobór metody interpolacji w celu zminimalizowania strat informacji na etapie przetwarzania chmury punktów.

Na podstawie wyników analiz dokładności dla Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu zaprezentowanych w tabelach 2 i 3 stwierdzono, że:

- Metoda najbliższego sąsiada jest najbardziej dokładna dla wszystkich analizowanych przypadków.
- Metoda wagowanej odwrotnej odległości jest najmniej dokładna dla wszystkich analizowanych przypadków.
- Dla największych rozmiarów siatek (2,5 m i 5 m) odchylenie standardowe dla metody najbliższego sąsiada jest zbliżone do odchylenia standardowego metody triangulacji z interpolacją liniową.

Na podstawie wyników analiz dokładności dla Numerycznych Modeli Terenu, zawartych w tabelach 1 i 3, stwierdzono:

- Najmniejsze odchylenia standardowe uzyskuje metoda wagowanej odwrotnej odległości.
- Odchylenia standardowe są zbliżone dla wszystkich metod i rozmiarów siatek (różnice na poziomie kilku milimetrów).
- Najmniej dokładne wyniki uzyskano metodą najbliższego sąsiada.

Przedstawione wyniki badań stanowią podstawę wyboru optymalnej metody interpretacji danych wysokościowych do celów badań nad środowiskiem.

## Literatura

- [1] Urbański J., GIS w badaniach przyrodniczych, Domena Publiczna 2012, 47-58.
- [2] Moore I., Grayson R., Ladson A., Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, Hydrological Process 1991, 15, 1, 3-30.

- [3] Koszela-Marek E., Stróżyk J., Koszela J., Budowa i zastosowanie numerycznego modelu terenu (NMT) na przykładzie byłej kopalni uranu, *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, Konferencje*, 2005, 75, 41, 317-324.
- [4] Hugenholtz C., Whitehead K., Brown O., Barchyn T., Moorman B., LeClair A., Riddell K., Hamilton T., Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model, *Geomorphology* 2013, 194, 16-24.
- [5] Iwahashi J., Kamiya I., Yamagishi H., High-resolution DEMs in the study of rainfall- and earthquake-induced landslides: Use of a variable window size method in digital terrain analysis, *Geomorphology* 2012, 153-154, 29-38.
- [6] Stereńczak K., Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego, *Czasopismo Techniczne, Środowisko* 2008, 105(2), 275-281.
- [7] Kwoczyńska B., Zastosowanie ortofotomapy i Numerycznego Modelu Terenu do przedstawiania zmian w sposobie zagospodarowania terenów rolnych, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2011, 3, 105-114.
- [8] Maślanka M., Wężyk P., Zadania GUGiK realizowane w ramach projektu ISOK, [w:] *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*, red. P. Wężyk, E. Stojek, M. Maślanka, Warszawa 2014, 21-59.
- [9] Kurczyński Z., *Fotogrametria*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2014, 241-267.
- [10] Rozpondek R., Wancisiewicz K., Analiza rozkładu zanieczyszczeń w osadach dennych z zastosowaniem GIS w przybrzeżnej strefie zbiornika wodnego Ostrowy na rzece Biała Oksza, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2016, 19, 1, 37-49.
- [11] Kurczyński Z., *Lotnicze skanowanie laserowe - podstawy teoretyczne*, [w:] *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*, red. P. Wężyk, E. Stojek, M. Maślanka, Warszawa 2014, 59-108.
- [12] Lu G., Wong D., An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, *Computer&Geosciences* 2008, 1044-1055.
- [13] Arcgis Resources - <http://help.arcgis.com>
- [14] Olivier R., Hangian C., Nearest Neighbor Value Interpolation, *International Journal of Advanced Computer Science and Application* 2012, 3, 1-6.
- [15] Sibson R., A brief description of natural neighbor interpolation, *Wyd. John Wiley & Sons, New York* 1981, 21-36.
- [16] De Floriani L., Magillo P., Triangulated Irregular Network, *Encyclopedia of Database Systems* 2009, 3178-3179.
- [17] Jurczyk T., *Generowanie niestrukturalnych siatek trójkątnych z wykorzystaniem triangulacji Delaunay'a*, Praca dyplomowa magisterska, Kraków 2000.
- [18] Hejmanowska B., *Zastosowanie rozkładu Laplace'a do określania niepewności danych przestrzennych na przykładzie NMT i systemu IACS*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.

Czestochowa University of Technology  
Faculty of Infrastructure and Environment  
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa  
e-mail: r.rozpondek@is.pcz.pl, katarzynawancisiewicz@gmail.com

## Streszczenie

**Dokładność modeli reprezentujących ukształtowanie powierzchni terenu jest istotna w badaniach środowiska. Poprawnie wykonane modele mogą być wykorzystane do wykrywania nawet niewielkich zmian w ukształtowaniu i zagospodarowaniu terenu, a także do opraco-**

wania modelu przestrzennego zanieczyszczeń wód oraz gleby. Ze względu na to, że badania nad środowiskiem prowadzone są na obszarach zróżnicowanych pod kątem zagospodarowania terenu, w niniejszej pracy wskazano odpowiednie metody generowania Numerycznych Modeli Terenu (NMT) i Numerycznych Modeli Pokrycia Terenu (NMPT). Dane, na których wykonano analizy, były pozyskane dla obszaru miasta Kraków w ramach projektu ISOK. Aby osiągnąć założony cel, wybrano cztery metody dostępne w oprogramowaniu ArcGIS: najbliższego sąsiada, wagowanej odwrotnej odległości, triangulacji z metodą interpolacji liniowej i naturalnego sąsiada. Wybrano także kilka różnych rozmiarów oczek siatki modelu (0,125 m, 0,25 m, 0,5 m, 1 m, 2,5 m, 5 m). Każdy wykonany model został poddany analizom dokładnościowym - zastosowano model Gaussa. W pierwszym etapie badań wygenerowano 48 modeli dla arkusza chmury punktów zawierającego zróżnicowane klasy pokrycia terenu. W drugim wykonano dodatkowo 54 modele dla pozostałych badanych arkuszy. Wyniki obu etapów prac były ze sobą zgodne. Stwierdzono, że metoda najbliższego sąsiada jest najbardziej dokładna w przypadku generowania modeli NMPT. Natomiast w przypadku NMT badania nie wskazały jednoznacznie najlepszej metody interpolacji danych wysokościowych terenu.

**Słowa kluczowe:** NMT, NMPT, interpolacja