

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 72, 2016: 186–194
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 72, 2016)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 72, 2016: 186–194
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 72, 2016)

**Paweł Grzegorz GILEWSKI, Maria GRODZKA-ŁUKASZEWSKA,
Grzegorz SINICYN**

Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, Politechnika Warszawska
Department of Environmental Protection, Warsaw University of Technology

Analiza metod scalania arkuszy numerycznego modelu terenu na przykładzie zlewni rzek Kamiennej i Iłzanki Methods analysis of merging the digital terrain model files based on the Kamienna and Iłzanka rivers basins

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu (NMT), TIN, raster, scalanie arkuszy NMT
Key words: digital terrain model (DTM), Triangulated Irregular Network (TIN), raster, merging of DTM files

Wprowadzenie

Za pomocą numerycznego modelu terenu (NMT) można cyfrowo odwzorować wysokość topograficzną powierzchni terenu. Coraz większa dostępność i dokładność NMT sprawia, iż zaczyna on być powszechnie wykorzystywany do prowadzenia analiz w inżynierii środowiska, coraz częściej zastępuje tradycyjne źródła odniesienia wykorzystywane w zagadnieniach wysokościowych, takie jak na przykład mapy topograficzne. Numeryczny model terenu umożliwia większe spektrum prowadzenia złożonych analiz, a także pozwala na skrócenie czasu ich trwania.

Numeryczny model terenu jest wykorzystywany w różnych zagadnieniach związanych z inżynierią środowiska. Przykładem mogą być takie zastosowania, jak: tworzenie leśnych map numerycznych (Wężyk i Świąder, 2004), wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego (Kostecki i Twaróg, 2003), wykorzystanie w pracach i badaniach hydrologicznych czy przy analizach w zakresie meteorologii i klimatologii, geomorfologii oraz gleboznawstwie (Urbański, 2012).

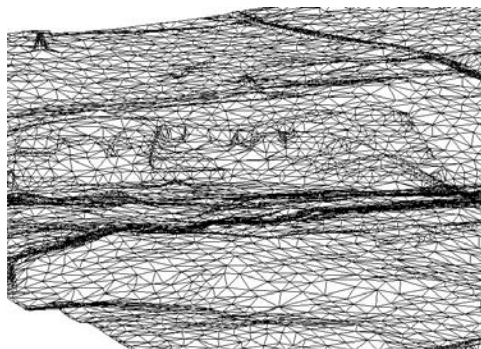
Celem pracy jest analiza dostępnych (w programie ArcGIS 9.3) metod scalania arkuszy NMT w formacie GRID oraz próba wskazania metody, która najdokładniej oddaje rzeczywiste wysokości terenu w miejscach nakładania się arkuszy na ich brzegach. Należy jednak zaznaczyć, iż w ogólnym przypadku rastery mogą zachodzić na siebie nie tylko na brzegach.

Rodzaje NMT

Numeryczny Model Terenu jest to „numeryczna reprezentacja powierzchni terenowej, utworzona poprzez zbiór odpowiednio dobranych punktów leżących na tej powierzchni oraz algorytmów interpolacyjnych umożliwiających jej odtworzenie w określonym obszarze” (Gaździcki, 1990). Pokazuje on relacje topologiczne łączące poszczególne elementy strukturalne rzeźby terenu.

Do najbardziej powszechnych rodzajów NMT należą:

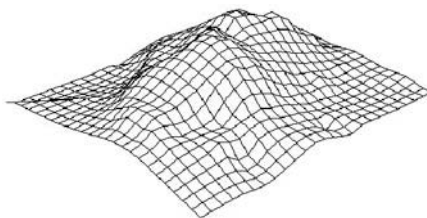
- model TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*) – zbudowany z nieregularnej siatki trójkątów powstałych w wyniku triangulacji Delaunaya (rys. 1). Powstaje bezpośrednio na podstawie punktów pomiarowych. Przy opracowywaniu NMT w formacie TIN należy uwzględnić linie strukturalne rzeźby terenu (m.in. linie nieciągłości, granice wyłączeń obszarów poziomych, lokalne ekstrema);
- model rastrowy – składający się z regularnej, prostokątnej siatki elementów (rys. 2). W punktach węzłowych siatki



RYSUNEK 1. NMT w strukturze TIN (opracowanie własne)

FIGURE 1. DTM in TIN structure (own elaboration)

określona jest wysokość powierzchni terenu. Może ona pochodzić z pomiarów bezpośrednich lub być wyznaczona na podstawie innych modeli powierzchniowych. Najczęściej wysokości w punktach węzłowych modelu rastrowego są interpolowane i to odróżnia je od modelu TIN, który zachowuje w tych punktach wejściowe dane pomiarowe.



RYSUNEK 2. NMT w strukturze rastrowej (Kurczyński, 2015)

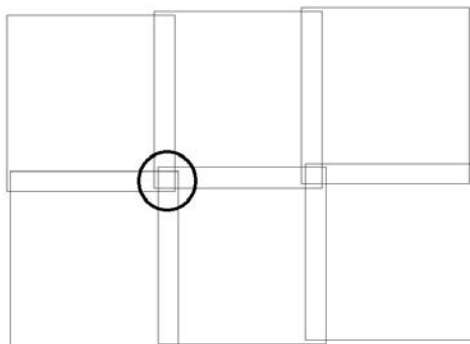
FIGURE 2. DTM in raster structure (Kurczyński, 2015)

Istnieje możliwość zamiany modelu TIN na GRID, jednakże jest ona związana z pewnym uśrednieniem, a w konsekwencji prowadzi do utraty dokładności danych. Tematyka jakości NMT została poruszona między innymi w publikacji Hejmanowskiej i innych (2008). Jednakże biorąc pod uwagę to, iż struktura TIN jest zdecydowanie bardziej skomplikowana niż struktura rastra, to często w analizach przestrzennych wykorzystuje się prostszą formę rastrową, która może być interpretowana jako macierz wysokości.

Jedną z form opracowywania NMT są tzw. arkusze, czyli obszary prostokątne o powierzchni kilku kilometrów kwadratowych. W analizach z wykorzystaniem NMT często wykorzystuje się więcej niż jeden arkusz i w takim przypadku niezbędne jest ich scalenie (integracja).

Integracja arkuszy NMT

Jedną z możliwości agregacji arkuszy NMT w formacie rastrowym jest operacja nazywana mozaikowaniem (ang. *mosaicking*). Specyfiką wykorzystanych w pracy arkuszy NMT jest powstawanie części wspólnej (rys. 3) z nakładających się arkuszy (ang. *overlapping areas*) o szerokości kilkuset metrów (w analizowanym przypadku). Problematyka jest poruszona między innymi w opracowaniu Knöplego i inni (1998).



RYSUNEK 3. Obrisy arkuszy NMT pokazujące miejsca ich nakładania się (opracowanie własne)
FIGURE 3. Contours of DTM files showing the overlapping areas (own elaboration)

Arkusze NMT opracowywane są indywidualnie (w analizowanym przypadku z wykorzystaniem tej samej metodologii), ale z uwagi na to, iż występują miejsca wspólne, to dla tych samych geograficznie obszarów otrzymuje się kilka różnych wartości wysokości terenu. Na etapie mozaikowania arkuszy należy wybrać metodę obliczania wysokości na obszarach wspólnych. W artykule poddano analizie sześć metod mozaikowania dostępnych w programie ArcGIS 9.3:

- FIRST – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się

przyjmowana jest jako wartość komórki z **pierwszej** bazy danych rastrowych na liście;

- LAST – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się przyjmowana jest jako wartość komórki z **ostatniej** bazy danych rastrowych na liście; jest to metoda domyślnie wybierana przez program i jednocześnie najszybsza metoda mozaikowania;
- BLEND – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się to **średnia ważona wartości** na tych obszarach; współczynniki wagowe obliczane są na podstawie odległości pomiędzy danym pikselem a krawędzią obszaru nakładania się arkuszy;
- MEAN – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się to **średnia arytmetyczna** z nakładających się komórek;
- MINIMUM – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się to **najmniejsza** wartość z nakładających się komórek;
- MAXIMUM – wyjściowa wartość komórki na obszarach nakładających się to **największa** wartość z nakładających się komórek.

Przygotowanie danych i metodyka analizy

Obszar poddany analizie to zlewnia rzek Kamiennej i Iłżanki, zlokalizowany w południowo-wschodniej Polsce. Południowo-zachodnia część zlewni to obszar górzysty (obejmujący góry Świętokrzyskie) nachylony w kierunku północno-wschodnim (rys. 3). Pozostała część analizowanego obszaru ma charakter ni-

zinny. Łącznie na obszar zlewni składało się 258 arkuszy, z czego każdy z nich o powierzchni około 25 km² (rys. 4).

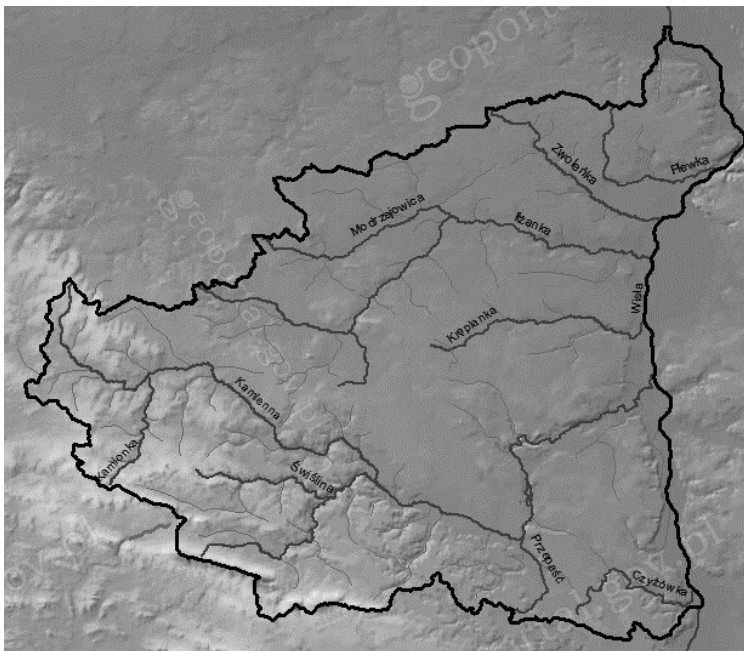
Wschodnia granica analizowanej zlewni usytuowana jest wzdłuż rzeki Wisły. Dwie największe rzeki na terenie analizowanej zlewni to Kamienna i Iłzanka. Obydwie są lewobrzeżnymi dopływami Wisły. Powierzchnia dorzecza Kamiennej wynosi około 2018 km², a długość rzeki wynosi 138 km. Dorzecze Iłzanki zajmuje mniejszą powierzchnię, wynoszącą około 1113 km², a długość rzeki wynosi 77 km. Łączna powierzchnia zlewni to około 6450 km².

Do analiz wykorzystano NMT w formacie ESRI TIN w skali 1 : 10 000, opracowany przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartogra-

ficznej. Podstawowa charakterystyka danych:

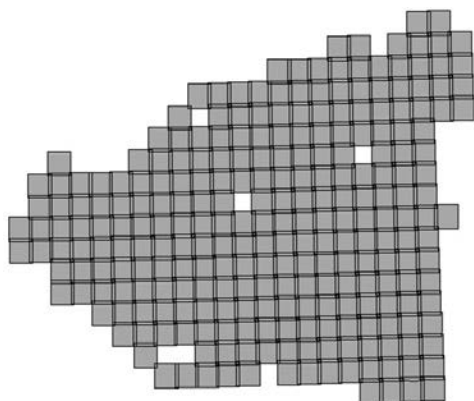
- rok opracowania: 2007 lub 2009;
- układ współrzędnych: PUWG 1992;
- podstawę opracowania NMT stanowiły cyfrowe zdjęcia lotnicze wykonane kamerą DMC o rozmiarze piksela 0,2 m oraz dane z areotriangulacji;
- kontrola na podstawie kot kontrolnych pozyskanych niezależnie z modelu stereoskopowego; uzyskano średni błąd rzędu kilkudziesięciu centymetrów (inny dla każdego z arkuszy).

Wszystkie analizy wykonano za pomocą programu ArcGIS 9.3 oraz aplikacji ModelBuilder, która stanowi integralny element programu ArcGIS.



RYSUNEK 4. Obszar analizowanej zlewni (czarny obrys) na tle mapy hipsometrycznej Polski (Geoportal, 2014)

FIGURE 4. Localization of the analyzed river basin (black contour) with the hypsometric map in the background (Geoportal, 2014)



RYSUNEK 5. Obrys zlewni za pomocą analizowanych arkuszy NMT (opracowanie własne)
 FIGURE 5. The river basin contour determined by the analyzed DTM files (own elaboration)

Początkowym etapem była analiza jakościowa posiadanych danych. W jej rezultacie wyłączono z dalszych analiz pięć arkuszy z uwagi na błędy, takie jak zniekształcenie (zaburzona geometria) lub uszkodzenie (niemożliwe było otwarcie arkusza).

Dalsze etapy postępowania można przedstawić schematem pokazanym na rysunku 6.

Analizie poddano dwie metody interpolacji (dostępne w funkcji Tin To Raster w programie ArcGIS 9.3) stosowane przy transformacji NMT w formacie TIN na model rastrowy: metodę liniową (ang. *linear*) i najbliższe sąsiedztwo (ang. *natural neighbour*). Obliczenia przeprowadzono dla domyślnej rozdzielczości

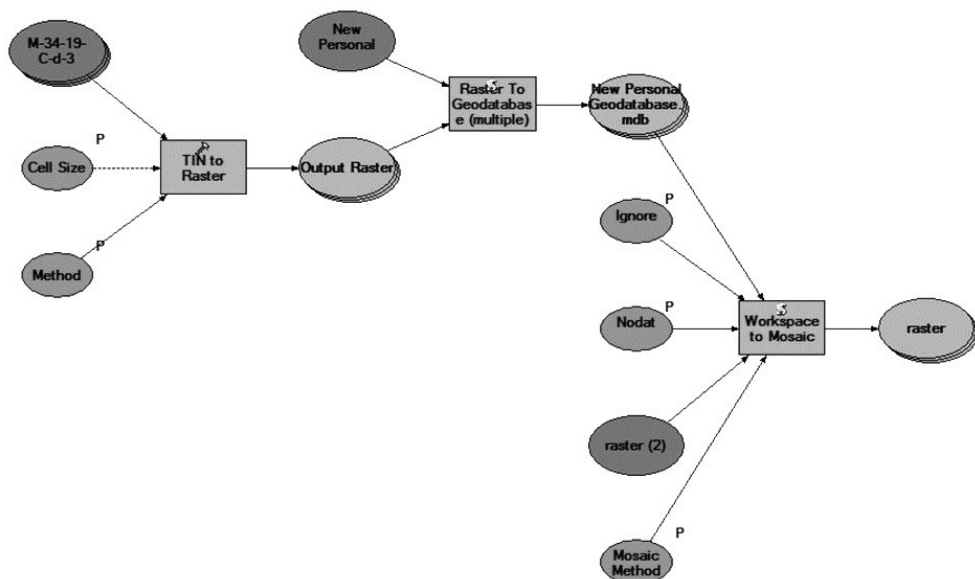
równej 21 m oraz dla 3 innych, to jest 5, 50 i 100 m. Łącznie poprzez kombinacje wymienionych parametrów wygenerowano 48 modeli rastrowych. W celu zautomatyzowania procesu utworzono model iteracyjny (rys. 7) za pomocą aplikacji ModelBuilder.

Wysokości terenu wygenerowane w modelach rastrowych odniesiono do wysokości w kotach wysokościowych – w lokalizacjach opisanych rzędną wysokościową zlokalizowaną najczęściej w charakterystycznych miejscach ukształtowania terenu. Punkty te zostały pozyskane niezależnie od utworzonego NMT na podstawie modelu stereoskopowego i zostały wykorzystane jako jeden z elementów do kontroli jakości NMT przez producenta. W odniesieniu do tych danych uzyskiwano najmniejszy błąd średni kontroli jakości danych. Przyjęto zatem, iż wartości te stanowią rzeczywistą wysokość terenu w analizowanym miejscu. Wykorzystane koty wysokościowe wyodrębniono ze zbioru danych pomiarowych ASCII_TBD zakupionego równoległe do ESRI TIN.

Kryterium porównawczym w przeprowadzanych analizach była procentowa różnica wysokości między wysokością terenu w kocie wysokościowej (ET_Z) a wysokością NMT w formacie rastrowym (Rastervalue) w miejscu koty wysokościowej:



RYSUNEK 6. Schemat przygotowania danych do dalszych analiz (opracowanie własne)
 FIGURE 6. Scheme of data preparations for further analysis (own elaboration)



RYSUNEK 7. Aplikacja utworzona w trakcie prowadzonych analiz (opracowanie własne)
 FIGURE 7. Application model created during the project development (own elaboration)

$$\Delta = \frac{ET_Z - Rastervalue}{ET_Z} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

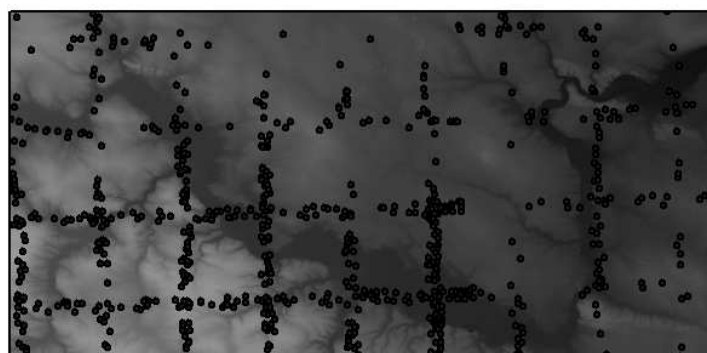
Na rysunku 8 przedstawiono fragment jednego z utworzonych modeli rastrowych zlewni wraz z lokalizacją kotw wysokościowych w miejscach nakładania się arkuszy.

Wyniki analizy

Rezultaty pogrupowano w trzy zakresy procentowe błędów: ujemny („-”), dodatni („+”) oraz brak błędu. Wyrażają one różnicę procentową między wysokością terenu otrzymaną z NMT a wysokością terenu z koty wysokościowej. Wartością graniczną dla braku błędu stanowi różnica w przedziale od -1% do +1%. W przypadku błędu dodatnie-

go są to wartości powyżej +1%, a błędów ujemnych są to wartości -1%. Wartość błędów, nawet dla tej samej wartości procentowej, jest różna w każdym rastrze, gdyż zależy bezpośrednio od wysokości terenu. Informacja o tym, czy w danym modelu przeważa błąd ujemny, czy dodatni może być istotna ze względu na cel zastosowania NMT.

Rezultaty przeprowadzonych analiz przedstawiono w tabeli. Wyniki przedstawiono w podziale na analizowane metody interpolacji, a w ich obrębie w podziale na różne rozdzielczości NMT. Następnie dla każdej z analizowanych metod mozaikowania przedstawiono udział procentowy występowania każdego z trzech typów błędów. Błędy obliczono na podstawie wzoru (1). Przyjęto, iż im większa wartość błędów zerowych, tym większa dokładność analizowane-



LEGENDA

- Koty wysokościowe
- Wysokość terenu [m.n.p.m]**
- █ Maksymalna: 609
 - █ Minimalna: 104

RYSUNEK 8. Fragment modelu rastrowego analizowanej zlewni i lokalizacja kot wysokościowych w miejscach nakładania się arkuszy (opracowanie własne)

FIGURE 8. Part of the raster model of analyzed river basin and location of spots height in the overlapping areas (own elaboration)

TABELA. Zestawienie uzyskanych wyników analizowanych NMT [%] (opracowanie własne)

TABLE. Results for the analyzed DTMs [%] (own elaboration)

Metoda interpolacji	Rozdzielczość rastra [m]	Typ błędu	Metoda mozaikowania					
			MINIUMUM	MEAN	MAXIMUM	LAST	FIRST	BLEND
Liniowa	5	-	6,56	10,31	13,15	6,32	6,50	6,38
		brak błędu	75,22	76,56	77,85	84,73	83,79	85,82
		+	18,22	13,13	9,01	8,96	9,72	8,34
	21	-	6,62	5,85	13,37	6,17	6,48	6,15
		brak błędu	75,15	85,32	77,69	84,79	83,48	85,11
		+	18,32	8,85	8,94	9,06	10,06	8,74
	50	-	9,12	12,21	15,34	8,64	9,18	8,94
		brak błędu	70,02	70,99	72,93	78,45	77,32	79,11
		+	20,85	16,81	11,73	12,91	13,51	11,95
	100	-	13,08	16,55	19,32	13,81	14,01	14,28
		brak błędu	60,11	61,28	66,21	66,21	65,92	66,52
		+	26,81	22,17	19,98	19,98	20,07	19,20
Naturalne sąsiedztwo	5	-	6,56	6,20	13,02	8,92	9,99	6,07
		brak błędu	76,00	84,82	77,95	79,38	75,82	85,13
		+	17,35	8,98	9,03	11,70	14,19	8,80
	21	-	6,47	6,08	13,29	8,94	10,21	5,96
		brak błędu	75,95	84,19	77,75	79,16	75,60	85,25
		+	17,52	9,01	8,96	11,90	14,19	8,79
	50	-	8,56	8,75	15,27	11,17	12,63	8,80
		brak błędu	69,84	78,84	72,93	73,88	70,24	78,90
		+	21,60	12,41	11,79	14,95	17,13	12,30
	100	-	13,00	13,70	19,27	15,63	16,24	14,09
		brak błędu	60,64	67,15	65,62	63,15	60,68	66,81
		+	26,36	19,15	18,11	21,21	23,08	19,10

go modelu. Szarym kolorem w tabeli 1 wskazano model, dla którego otrzymano najdokładniejsze wyniki.

Podsumowanie i dyskusja

Przeprowadzone analizy dokładności NMT w miejscach nakładania się arkuszy pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

1. Największą dokładność NMT (brak błędu na poziomie 85,82%) otrzymano dla modelu o rozdzielczości 5 m, którego wysokości interpolowano metodą liniową, a arkusze NMT scalone za pomocą metody BLEND.
2. Spośród wszystkich analizowanych metod mozaikowania, metoda BLEND najdokładniej odwzoruje wysokości NMT w miejscach nakładania się arkuszy. Tylko w jednym przypadku model uzyskany inną metodą mozaikowania miał brak błędu na wyższym poziomie, niż metoda BLEND: model o rozdzielczości 100 m, uzyskany metodą interpolacji naturalne sąsiedztwo i metodą mozaikowania MEAN.
3. Zwiększenie rozdzielczości modelu wyjściowego (o rozdzielczości 21 m) do 5 m nie wpływa istotnie na zwiększenie dokładności modelu, dopiero zwiększenie rozdzielczości ponad 17-krotnie zwiększyło rozmiar NMT.
4. Zmniejszenie rozdzielczości modelu z wartości domyślnej (21 m) do 50 lub 100 m wpływa na coraz mniejszą dokładność NMT.
5. Metoda mozaikowania MINIMUM znacząco wpływa na zwiększenie błędu dodatniego (zaniżenie wysokości terenu).

6. Metoda mozaikowania MAXIMUM znacząco wpływa na zwiększenie błędu ujemnego (zawyżenie wysokości terenu).

Dalszym badaniom należałoby podać analizę lokalizacji występowania miejsc o największych błędach lub na przykład o błędach o szukanej wartości. Na podstawie przeprowadzonych analiz zauważono, iż często największe błędy występują w górzystym obszarze zlewni. Gęstsze występowanie kot wysokościowych na terenie górzystym zlewni niż w jej pozostałej części wynika z tego, iż NMT opracowywany dla obszarów górzystych ma kilkukrotnie mniejszą dokładność niż dla obszarów nizinnych, stąd konieczność większej ilości punktów walidacyjnych.

W skali całej zlewni dla różnych modeli NMT objętych analizą stwierdzono, iż lokalizacja miejsc występowania największych błędów jest nieusystematyzowana. W dalszych pracach należałoby poszukać innych czynników wpływających na wielkość błędy, na przykład takiego parametru jak spadek terenu.

Literatura

- Gaździcki, J. (1990). *Systemy Informacji Przestrzennej*. Warszawa-Wrocław: Wydawnictwo PPWK.
- Geoportal. *Numeryczny Model Terenu ISOK – Hipsometria*. Pobrano z lokalizacji: http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/wmsimg/guest/isok_hipsodyn/imageserver/wmsserver (22.01.2014).
- Hejmanowska, B., Drzewiecki, W. i Kulesza, Ł. (2008). Zagadnienie jakości numerycznych modeli terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 163-175. Pobrano z lokalizacji: http://home.agh.edu.pl/~galia/papers/Hejmanowska%20Drzewiecki%20Kulesza%20PTFIT%202008_wersja_ostateczna.pdf.

- Knöple, W., Strunz, G. i Roth, A. (1998). Mosaicking of digital elevation models derived by SAR interferometry. *ISPRS Commission IV Symposium on GIS - Between Visions and Applications*, 32, 306-313. Pobrano z lokalizacji: https://www.researchgate.net/publication/224000360_Mosaicking_of_Digital_Elevation_Models_derived_by_SAR_Interferometry.
- Kostecki, S. i Twaróg, B. (2003). Zastosowanie numerycznego modelu terenu do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego. *Gospodarka Wodna*, 14, 198-203. Pobrano z lokalizacji: http://bt.wis.pk.edu.pl/fileadmin/projekty/artykuly/NMT_GW.pdf.
- Kurczyński, Z. (2015). *Numeryczny model terenu*. Pobrano z lokalizacji Geoforum: http://geoforum.pl/menu=46816,46858,46959&link=teledetekcja-krotki-wyklad-teledetekcja-numeryczny-model-terenu#page_top.
- Urbański, J. (2012). Zastosowanie GIS w badaniach naukowych. W J. Urbański, *GIS w badaniach przyrodniczych*. Gdańsk: Centrum GIS, Uniwersytet Gdański.
- Wężyk, P. i Świąder, A. (2004). Wykorzystanie numerycznych modeli terenu w aplikacjach z zakresu leśnictwa i ochrony przyrody. *Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe Fotogrametria, teledetekcja i GIS w świetle XX kongresu ISPRS*, 14, 515-526. Pobrano z lokalizacji: https://www.researchgate.net/publication/233924290_Wykorzystanie_numerycznych_modeli_terenu_w_aplikacjach_z_zakresu_lenictwa_i_ochrony_przyrody.

Streszczenie

Analiza metod scalania arkuszy numerycznego modelu terenu na przykładzie zlewni rzek Kamiennej i Ilzanki. Numeryczny model terenu (NMT) znajduje coraz

częstsze zastosowanie w inżynierii środowiska. Zaprezentowano aplikację pozwalającą na zamianę arkusza NMT w formacie TIN na rastrowy, a następnie połączenie wielu rastrów w jeden (mozaikowanie). Analizie poddano dokładność uzyskiwanych modeli w miejscach nakładania się arkuszy NMT. Łącznie analizie poddano 48 modeli rastrowych uzyskanych dwoma metodami interpolacji, o czterech różnych rozdzielczościach i połączonymi za pomocą sześciu metod mozaikowania.

Summary

Methods analysis of merging the digital terrain model files based on the Kamienna and Ilzanka rivers basins. Digital terrain model (DTM) is being increasingly used in environmental engineering issues. The presented application allows conversion of DTM files from TIN to raster format and combine multiple DTM files (mosaicking) into one. The precision of DTMs in overlapping areas were analyzed. In total 48 models were analyzed using two interpolation methods, four different DTM resolution and six mosaicking methods.

Authors' address:

Paweł Grzegorz Gilewski,
 Maria Grodzka-Łukaszewska, Grzegorz Sinicyn
 Politechnika Warszawska
 Wydział Instalacji Budowlanych,
 Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska
 00-653 Warszawa, ul. Nowowiejska 20, Poland
 e-mail: pawel.gilewski@is.pw.edu.pl
maria.grodzka@is.pw.edu.pl
grzegorz.sinicyn@is.pw.edu.pl