

## PORÓWNANIE NUMERYCZNYCH MODELI TERENU OPRACOWANYCH PRZY WYKORZYSTANIU TECHNOLOGII SMART STATION

Marcin Uradziński, Adam Duskocz

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Streszczenie.** Tworzenie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) jest istotnym zadaniem, podejmowanym podczas opracowywania systemów informacji przestrzennej. Wykorzystanie zaawansowanego zestawu Smart Station firmy Leica, zapewniającego integrację technik satelitarnych z klasyczną tachimetrią, dostarcza szerokich możliwości pomiarowych (zarówno pozyskiwania danych przestrzennych, jak i niezależnie danych sytuacyjnych oraz wysokościowych). Obecnie NMT staje się standardowym produktem geoprzestrzennym i jest podstawową warstwą informacyjną wykorzystywaną przez systemy informacji geograficznej.

W pracy odniesiono się do procesów związanych z pozyskiwaniem i aktualizacją danych przestrzennych technikami satelitarnymi RTK GNSS, które dają możliwość łatwej i szybkiej rejestracji danych, jak również do innowacyjnej technologii wyznaczania współrzędnych stanowiska za pomocą technologii Leica Smart Station. Zaprezentowano wyniki pomiarów tachimetrycznych i RTK, na podstawie których utworzono NMT typu GRID w oprogramowaniu Surfer 9 oraz przeprowadzono analizy porównawcze w zakresie uzyskanych efektów. Stwierdzono, że wyniki otrzymane z pomiarów satelitarnych są zbliżone do rezultatów z pomiaru tachimetrycznego. Dane z pomiaru RTK GNSS pozwoliły na wierne odtworzenie Numerycznego Modelu Terenu. W porównaniu z modelem opracowanym z danych pozyskanych tachimetrycznie, dla powierzchni utworzonych jako siatka GRID, stwierdzono średnią różnicę wysokości rzędu 0,05 m.

**Słowa kluczowe:** Numeryczny Model Terenu, GNSS, RTK, ASG-EUPOS, Smart Station

## WSTĘP

Współczesna geodezja coraz częściej szuka nowych rozwiązań, które pozwalałyby na szybkie wyznaczenie pozycji. Jednym z nich jest technologia GNSS. Wprowadzenie do geodezji pomiarów satelitarnych wykorzystujących tę technologię efektywnie wsparło i uzupełniło dotychczas wykorzystywane metody pomiarowe. Wykorzystanie technik satelitarnych umożliwiło pozyskiwanie danych przestrzennych oraz niezależnie danych sytuacyjnych i wysokościowych. Dane uzyskane z pomiarów znajdują szerokie zastosowanie do zobrazowania i modelowania zjawisk zachodzących na powierzchni Ziemi, w projektowaniu inżynierskim i planowaniu przestrzennym, są też niezbędnym elementem w procesie tworzenia Numerycznego Modelu Terenu (NMT).

Zgodnie ze stanowiskiem Komisji ds. Geowizualizacji Międzynarodowej Asocjacji Kartograficznej (ICA) geowizualizacja powinna być zaliczana do zaawansowanych analiz przestrzennych [ICA 2016]. Ponadto, geowizualizacja dotyczy obszaru badań zajmujących się teorią, metodami i rozwiązaniami technicznymi wizualnego poznania, analizy, syntezy oraz prezentacji danych przestrzennych [Baranowski 2006]. Czynności powiązane z wykonaniem geowizualizacji obejmują: tworzenie, interpretację i operowanie wykresami, diagramami, mapami i obrazami, w tym obrazami satelitarnymi oraz modelami trójwymiarowymi statycznymi i dynamicznymi. W ciągu ostatnich kilku lat pojawiły się nowe możliwości w pozyskiwaniu danych i generowaniu NMT, który jest obecnie standardowym produktem geoprzestrzennym [Borkowski i in. 2006, Hejmanowska i Warchoń 2010, Pająk i in. 2011, Pyka i in. 2012, Milinković i in. 2014].

Numeryczny Model Terenu może być wykorzystywany w wielu dziedzinach nauki i gospodarki, gdyż dostarcza informacji o rzeźbie terenu. Może być elementem samodzielnym, jak również stanowić warstwę systemu informacji geograficznej. Służy on również do opracowania produktów pochodnych [Świątek 2000], takich jak mapy wysokościowe, mapy spadków, wystawy zboczy i wiele innych. Zatem jego dokładność ma ogromny wpływ na jakość produktów końcowych [Paszotta i Szumiło 2006, Gołuch i in. 2008, Gumus i Sen 2013, Suchocki i in. 2013, Gościewski 2014].

W niniejszej pracy przedstawiono analizę porównawczą NMT opracowanych na podstawie danych pozyskanych poprzez zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarów terenowych. Dane te wykorzystano do opracowania, analizy oraz wygenerowania Numerycznego Modelu Terenu. W obecnej praktyce bezpośrednich pomiarów terenowych [Rozporządzenie 2011], obok technik niwelacyjnych (tj. niwelacji: punktów rozproszonych, profilów i siatkowej), wyróżniamy trzy główne metody pomiaru ukształtowania rzeźby terenu: metodę tachimetryczną (która jest aktualnie najdokładniejsza), metodę pomiarów satelitarnych RTK GNSS oraz metody wykorzystujące zintegrowany zestaw pomiarowy (np. Leica Smart Station, który wykorzystano w zrealizowanym eksperymencie pomiarowym). W zestawie Leica Smart Station zrealizowano pełne połączenie tachimetrii z technologią GNSS, poprzez integrację tachimetru TS15 z odbiornikiem GS15 wraz z kontrolerem polowym CS15 [Leica 2016]. Tachimetr współpracuje z odbiornikiem GNSS, co pozwala na zmianę techniki wykonywania prac i uniezależnienie się od klasycznej (stabilizowanej) osnowy geodezyjnej. Wystarczy ustawić i sponiomować tachimetr w dowolnym punkcie, a wyznaczenie położenia stanowiska zrealizować poprzez pomiary odbiornikiem GNSS [Mikołajczyk 2011, Duskocz i Łyszkowicz 2011, Milinković i in. 2014].

Przeprowadzone badania miały na celu porównanie modeli wysokościowych opracowanych z danych pozyskanych dwiema różnymi technikami pomiarowymi: tachymetryczną oraz RTK GNSS. Jak wiadomo, dla jednego obiektu można uzyskać różne wyniki zobrazowania ukształtowania rzeźby terenu (NMT), w zależności od sposobu wykonania samego pomiaru terenowego. W wyniku przeprowadzonych prac wygenerowano Numeryczny Model Terenu w postaci regularnej siatki GRID, niezależnie z wyników obu pomiarów, oraz porównano uzyskane efekty w oprogramowaniu Surfer 9 [Surfer 2011].

## NUMERYCZNY MODEL TERENU (NMT)

Numeryczny Model Terenu (DTM, ang. Digital Terrain Model) stanowi reprezentację fizycznej powierzchni Ziemi utworzoną przez zbiór odpowiednio wybranych punktów powierzchni terenu oraz algorytmy służące do aproksymacji ich położenia na podstawie współrzędnych płaskich [Gaździcki 2001]. NMT tworzony jest najczęściej w postaci regularnej siatki kwadratów lub prostokątów (ang. GRID) lub w postaci nieregularnej siatki trójkątów (TIN, ang. Triangulated Irregular Network) [Wytyczne 2001]. Model GRID jest siatką kwadratów, której każdy punkt węzłowy posiada określoną wysokość terenową. Jakość modelu GRID zależy w dużym stopniu od gęstości siatki punktów. Wpływa ona bezpośrednio na szczegółowość modelu. Jednakże, rozpatrując sytuację, w której na tym samym zbiorze punktów pomiarowych wygenerujemy siatkę NMT GRID o mniejszej i większej gęstości – to gęstsza interpolacja siatki zapewni wyższą dokładność modelu. Spotykanym rozwiązaniem jest zastosowanie siatki o strukturze hierarchicznej dostosowującej gęstość do stopnia skomplikowania rzeźby terenu. Wówczas wysokość węzłów siatki może pochodzić bezpośrednio z pomiaru lub może być wyznaczana z innego modelu powierzchni [Wood 1996].

W przypadku modelu TIN sieć nieregularnych trójkątów powstaje z pomiarów terenowych i daje możliwość wypełnienia całego pomierzonego obszaru trójkątami opartymi o punkty pomiarowe. Do tworzenia siatki TIN często posługujemy się triangulacją Delaunay'a [Delaunay 1934, Lee i Schachter 1980]. Trójkąty tworzone są w ten sposób, aby żaden z punktów nienależących do niego nie był położony wewnątrz okręgu opisanego na trójkącie. Istotą tego modelu jest przechowywanie oryginalnych danych pomiarowych, podczas gdy w modelu GRID wysokości w punktach węzłowych dotychczas były interpolowane [Gotlib i Olszewski 2006, Gisplay 2016]. Jednakże najnowsze zalecenia techniczne w tym zakresie wskazują na potrzebę wykonywania niwelacji siatkowej w przypadku generowania NMT GRID [Rozporządzenie 2011, § 38].

## METODY POMIAROWE I OBSZAR EKSPERYMENTU

Prace pomiarowe wykonano w czerwcu 2011 r., w zakresie prac badawczych zespołu autorów niniejszego artykułu i ich dyplomantów [Mackun 2011, Szczygłowski 2011]. Wykorzystaną aparaturę zakupiono w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007–2013.

Głównym celem pracy był pomiar rzeźby terenu techniką RTK oraz tachimetrem zintegrowanym z systemem GNSS. Uzyskanie dokładnych współrzędnych pikiet umożli-

wiło opracowanie Numerycznego Model Terenu. Stanowisko pomiarowe wyznaczono techniką RTK (przy wykorzystaniu serwisu czasu rzeczywistego ogólnopolskiego systemu ASG-EUPOS). Najdokładniejszym z tych serwisów jest NAWGEO, który udostępnia poprawki do pomiarów RTK. W przypadku zastosowania dwuczęstotliwościowych odbiorników RTK serwis NAWGEO pozwala na pomiar z dokładnością 0,03 m dla współrzędnych płaskich oraz 0,05 m dla wysokości [ASG-EUPOS 2016]. Najwyższe dokładności w pomiarach satelitarnych w czasie rzeczywistym można uzyskać, wykorzystując dostępne w serwisie NAWGEO sieciowe poprawki VRS (ang. Virtual Reference Station). Ich przewaga nad poprawkami z pojedynczej stacji referencyjnej jest zauważalna w przypadku, kiedy miejsce wykonywania pomiaru jest znacznie oddalone od pojedynczej stacji referencyjnej. Wynika to z możliwości lepszego modelowania systematycznych błędów związanych m.in. z pracą zegarów atomowych wykorzystywanych w satelitach oraz opóźnień związanych z propagacją sygnału w atmosferze [Uradziński i in. 2008]. Co za tym idzie, wykorzystanie powierzchniowych poprawek RTK umożliwia powtarzalność wyznaczeń współrzędnych bez względu na odległość odbiornika od fizycznej stacji referencyjnej. Pomiary wykonywane na podstawie pojedynczej stacji referencyjnej uzależnione są od odległości odbiornika ruchomego od stacji referencyjnej – błąd wyznaczenia współrzędnych wzrasta wraz ze wzrostem odległości odbiornika od stacji, z której pochodzą poprawki. Przyjmuje się, że w przypadku odległości do 5 km można wykonywać pomiary bez znacznej utraty dokładności, a do 15 km jeśli wykorzystujemy poprawki sieciowe z systemu ASG-EUPOS. Zaleca się jednak stosowanie poprawek sieciowych w pomiarach RTK, jeżeli jest to możliwe [McKessock 2007, Bosa i in. 2008, Uradziński i Doskocz 2010].

Do pozyskiwania danych w technologii klasycznej tachimetrii użyto tachimetru TS15 firmy Leica. Instrument współpracował z przyzmatem 360° GRZ4 (rys. 1). Nominalna dokładność pomiaru kąta tym instrumentem wynosi 1", natomiast odległości z wykorzystaniem wspomnianego przyzmatu – 1 mm + 1,5 ppm. Tachimetr umożliwia również pomiar odległości bez zastosowania reflektora (bezlustrowy). W tym trybie dokładność pomiaru odległości wynosi 2 mm + 2 ppm.



Rys. 1. Tachimetr TS15 i Leica Viva SmartPole wraz z kontrolerem CS15 i przyzmatem 360° GRZ4 [Leica 2016]

Fig. 1. Leica TS15 tacheometer and Leica Viva SmartPole with the CS15 controller and prism 360° GRZ4

Tachimetr zintegrowany ze SmartAnteną tworzy zestaw Smart Station. Funkcjonalność Smart Station opiera się na wykorzystaniu pomiarów GNSS i funkcjonalności instrumentów z wcześniejszej serii 1200+, a obecnie m.in. Leica Viva 15. SmartAntena oprócz możliwości umieszczenia jej w osi pionowej instrumentu może być również stosowana niezależnie na tyczce, z odbiornikiem GNSS i zdalnym kontrolerem.

Do przeprowadzenia porównań w zakresie opracowania modeli rzeźby terenu wybrano fragment łąki na terenie miasteczka akademickiego Kortowo, znajdującej się przy budynku Centrum Konferencyjnego UWM w Olsztynie (rys. 2).

Eksperyment polegał na pomiarze równocześnie tych samych punktów dwiema różnymi technikami pomiarowymi. Współrzędne stanowiska wyznaczono przy użyciu techniki Smart Station dla 30 epok w odstępach jednosekundowych i przetransformowano do układu PL-2000 w oprogramowaniu wewnętrznym kontrolera. Smart Station ustawiono w dowolnie wybranym punkcie i spoziomowano. Pomiarów wysokości anten nad punktem wykonywano przymiarem milimetrowym, w celu zrealizowania równoczesnego klasycznego pomiaru tachimetrycznego na tym samym stanowisku wraz z realizowanym pomiarem RTK. Czas inicjalizacji odbiornika GNSS na stanowisku pomiarowym wyniósł kilkanaście sekund. Współrzędne wyznaczono z dokładnością określoną poprzez średni błąd kwadratowy (RMS – Root Mean Square), poziomą: 10 mm + 1 ppm oraz pionową: 20 mm + 1 ppm.



Rys. 2. Lokalizacja eksperymentu pomiarowego (Zumi, opracowanie własne)

Fig. 2. Location of experiment (Zumi, own elaboration)

W drugim etapie pomiarów zdjęto z tachimetru SmartAntenę i założono ją na tyczkę oraz wykorzystano w konfiguracji SmartPole wraz z kontrolerem CS15 do pomiaru techniką RTK.

Po zorientowaniu tachimetru przystąpiono do równoczesnego pomiaru tych samych punktów terenowych. Podczas pracy metodą RTK uzyskiwano współrzędne w czasie rzeczywistym. Pomiarowi podlegały punkty rozproszone (pikiety) zlokalizowane w charakterystycznych miejscach, pozwalających na wierną prezentację rzeźby terenu (lokalne ekstrema, pikiety wysokościowe). Jako minimalną liczbę satelitów podczas obserwacji przyjęto 4, minimalną wysokość satelitów nad horyzontem  $15^\circ$ , współczynnik PDOP  $< 6$ . Wyniki pomiarów wyeksportowano do pliku przy wykorzystaniu oprogramowania zainstalowanego w kontrolerze i tachimetrze. Każdą techniką (tachimetria, RTK) pomierzono 224 punkty, z których wygenerowano NMT w postaci siatki GRID.

## MODELOWANIE POWIERZCHNI TERENU

Na podstawie opracowanych NMT w postaci siatki GRID (zastosowano interpolację metodą odwrotnych odległości) wykonano analizy dotyczące uzyskanych modeli MNT GRID. Zbadano różnice wysokości oraz współrzędnych poziomych w punktach węzłowych siatki powierzchniowej GRID (opracowanej z danych pozyskanych poszczególnymi metodami). Następnie przeanalizowano średnie błędy kwadratowe (RMS) oraz wektory przesunięcia pomiędzy współrzędnymi uzyskanymi z równoczesnych pomiarów tachimetrem i pomiarów RTK. Wszystkie te obliczenia wykonano w programie Microsoft Excel, natomiast NMT opracowano w programie Surfer 9. Jest to program służący do opracowywania geowizualizacji, m.in. numerycznego modelu terenu lub rozkładu wartości w układzie trójwymiarowym. Dzięki rozbudowanym procedurom interpolacji i zaimplementowanym wielu algorytmom tworzenia regularnej siatki wartości dla nieregularnie rozłożonych punktów Surfer stał się standardem w wizualizacjach. Program dokonuje m.in. modelowania powierzchni poprzez tworzenie regularnej siatki wartości, o gęstości ustalonej przez użytkownika.

Generowanie siatki interpolacyjnej wykonano metodą odwrotnych odległości od punktu węzłowego. W metodzie tej przyjmuje się, że wpływ punktów pomiarowych maleje wraz z odległością podniesioną do potęgi. Im większy wykładnik, tym mniejsze znaczenie mają dalej położone punkty pomiarowe [Magnuszewski 1999].

W metodzie odwrotnych odległości punkt w węźle siatki regularnej obliczany jest na podstawie poniższego wzoru [Krumbein 1959]:

$$z_r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^M \frac{z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{d_i^p}}$$

gdzie:  $z_r(x, y)$  – współrzędna  $z$  w punkcie  $S(x, y)$  w siatce regularnej,

$x, y$  – współrzędne  $x$  i  $y$  w siatce regularnej,

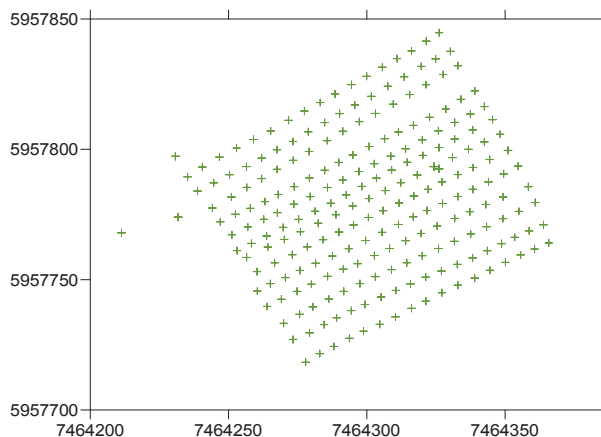
$p$  – współczynnik potęgowy,

$d_i$  – odległość pomiędzy punktem o współrzędnych  $x, y$  w siatce regularnej a punktem  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  w siatce nieregularnej,

$x_i, y_i, z_i$  – współrzędne w siatce nieregularnej,

$M$  – liczba punktów w siatce nieregularnej branych pod uwagę w punkcie  $S(x, y)$ .

Na potrzeby analiz wygenerowano mapy punktowe. Są to mapy, na których dla punktów o określonych współrzędnych XY wyświetlone są wartości Z. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład punktów pomierzonych tachimetrycznie i w technologii RTK.



Rys. 3. Rozkład przestrzenny pomierzonych punktów  
Fig. 3. The spatial distribution of measured points

W dalszym etapie badań przeanalizowano różnice wysokości w węzłach siatek GRID utworzonych na podstawie danych pozyskanych z obu metod pomiarowych, z których generowano NMT. Do statystycznej oceny rozproszenia różnic wysokości w węzłach siatek GRID przyjęto estymator odchylenia standardowego ( $s$ ), który określił, jak bardzo wielkości różnic wysokości są rozproszone wokół stwierdzonej różnicy średniej. Im większa wartość oszacowanego odchylenia standardowego, tym dane są bardziej oddalone od wartości średniej.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dh_i - dh_{sr})^2}{n-1}}$$

gdzie:  $dh_i = (H_{RTKi} - H_{TACHi})$  – wartości kolejnych różnic pomiędzy wysokościami siatki GRID uzyskanymi z pomiarów satelitarnych a wysokościami siatki GRID uzyskanymi z pomiarów tachimetrycznych,

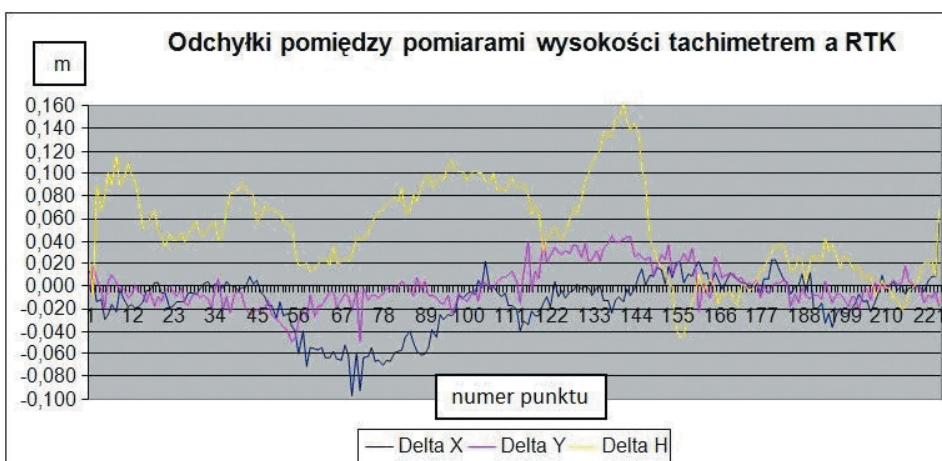
$dh_{sr} = [(H_{RTKi} - H_{TACHi})/n]$  – średnia wartość różnic pomiędzy wysokościami siatki GRID uzyskanymi z pomiarów satelitarnych a wysokościami siatki GRID uzyskanymi z pomiarów tachimetrycznych,

$n$  – liczba punktów.

Średnia różnica w wysokościach pomiędzy metodami pomiaru – klasyczną tachimetryczną i satelitarną RTK wyniosła 0,053 m, natomiast odchylenie standardowe obliczone z próby ( $s$ ) wyniosło 0,046 m (rys. 4).

Z uzyskanych danych pomiarowych wygenerowano NMT GRID o bokach 1 m × 1 m, 4 m × 4 m, 8 m × 8 m i następnie je przeanalizowano. Natomiast z raportu charakteryzującego modele (opracowanego w programie Surfer) odczytano informacje dotyczące róż-

nic wyinterpolowanych siatek GRID i ich własności, takie jak: odchylenie standardowe, wariancja, minimalna i maksymalna wysokość czy średnia wysokość powierzchni terenu (tab. 1).



Rys. 4. Różnice pomiędzy współzrędnymi pikiet obliczone z wyników par pomiarów RTK i tachimetrycznego (RTK-TACH)

Fig. 4. Coordinate differences calculated from the pairs of measurements conducted by RTK and Total Station

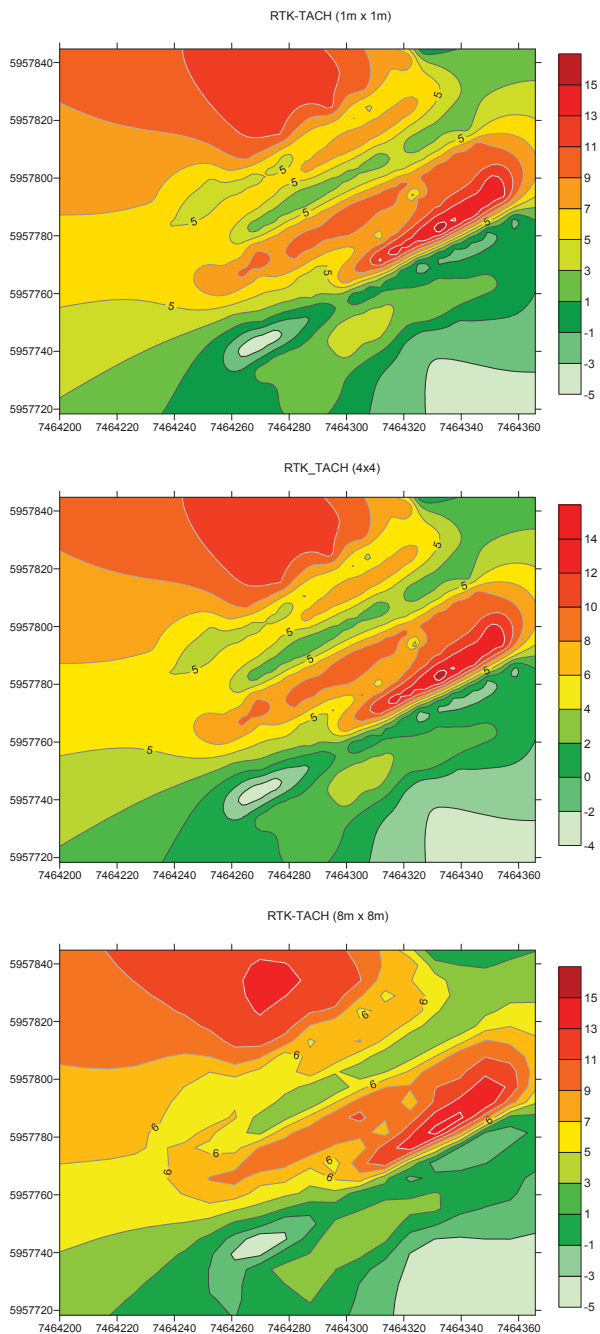
Tabela 1. Podstawowe wskaźniki statystyczne dotyczące wygenerowanych NMT GRID

Table 1. Basic statistical indicators of DTM GRID

Charakterystyka różnicy wysokości [m] Characteristics of height difference	1 m × 1 m	4 m × 4 m	8 m × 8 m
Odchylenie standardowe Standard deviation	0,044	0,042	0,041
Minimalna Minimum	-0,043	-0,036	-0,035
Średnia Average	0,050	0,049	0,047
Maksymalna Maximum	0,158	0,148	0,126

Stwierdzone różnice wysokości przedstawiono graficznie (rys. 5). Szczegółowa analiza izolinii zawierających różnice wysokości zauważone po porównaniu modeli MNT GRID uzyskanych z danych RTK i tachimetrycznych wskazuje na istniejące rozbieżności opracowanych NMT. W związku z tym, biorąc pod uwagę przyszłe wykorzystanie opracowanych modeli wysokościowych [Świątek 2000], potwierdzono, że NMT GRID o wyższej rozdzielczości zapewnia wyższą dokładność opracowania izolinii (np. warstwic odzwierciedlających ukształtowanie rzeźby terenu). Ponadto, wysokości uzyskane z poszczególnych technologii pomiarowych (RTK-TACH) wykazują dużą zgodność w zakresie  $\pm 5$  cm, choć wystąpiły także nieliczne punkty z różnicą wysokości rzędu kilkunastu centymetrów (rys. 5).



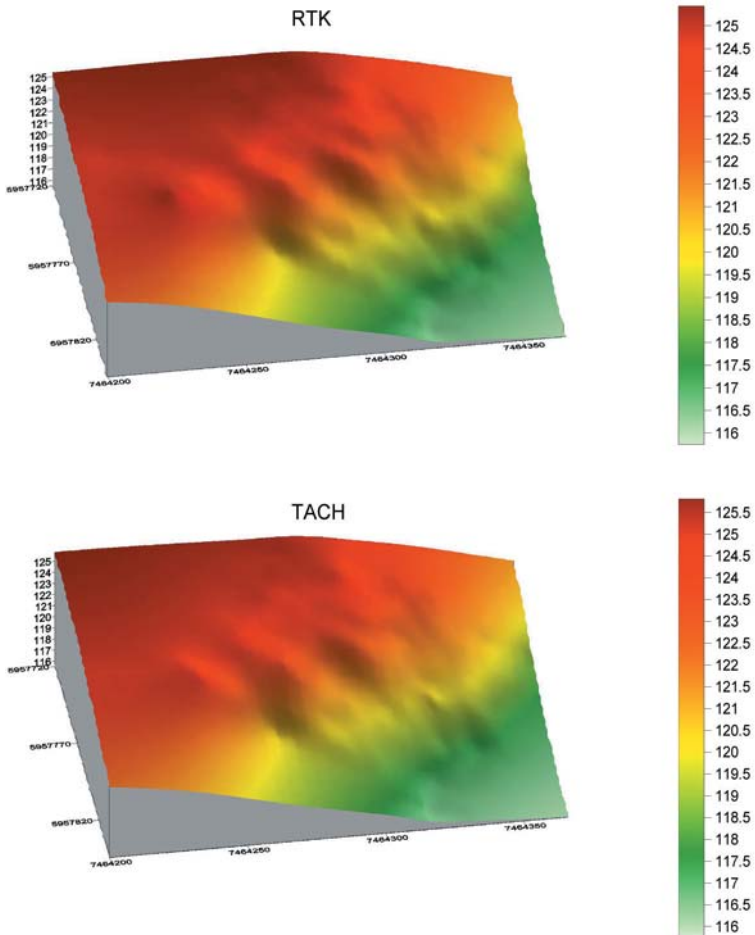


Rys. 5. Izolinie przedstawiające różnice wysokości pomiędzy NMT utworzonymi z danych RTK i tachimetrycznych (RTK-TACH)

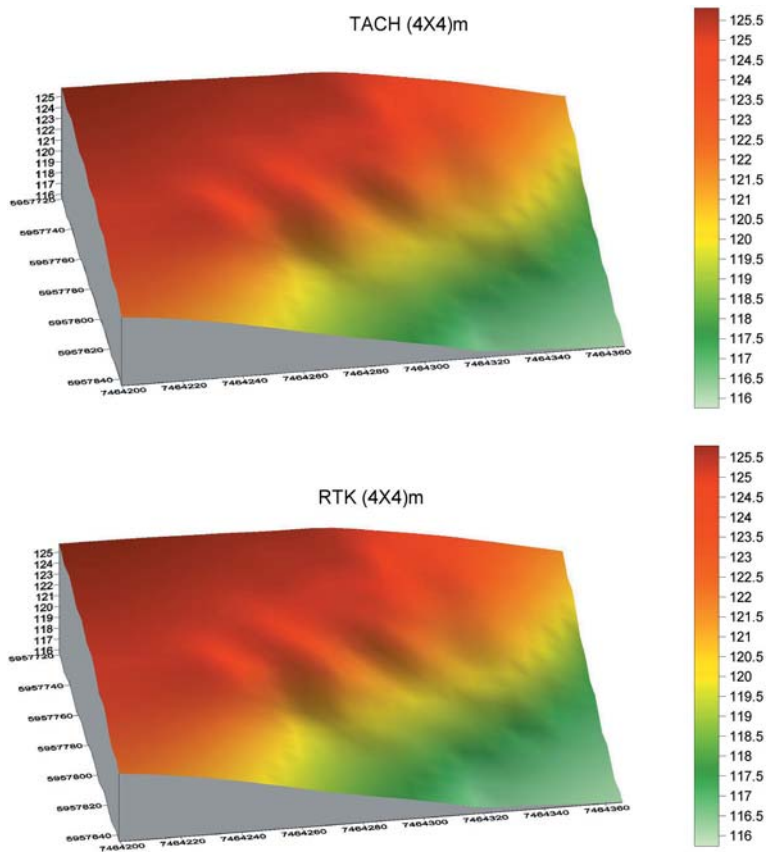
Fig. 5. Isolines showing differences in height between the DTM created from RTK data and Total Station data

Wygenerowane Numeryczne Modele Terenu GRID przedstawiono na kolejnych rysunkach. NMT GRID opracowano dwukrotnie: dla siatki o bokach  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  (rys. 6) oraz dla siatki o bokach  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  (rys. 7). Niestety, obszar pomiarów terenowych był zbyt mały, żeby właściwie przedstawić przestrzenną prezentację NMT dla siatki o bokach  $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ . Analizując graficzne przedstawienie NMT, widać, że nie ma rozbieżności przestrzennego rozmieszczenia punktów badanego obszaru zarówno z danych pozyskanych z pomiarów satelitarnych (RTK), jak i z pomiarów tachymetrycznych (TACH).

Przyglądając się opracowanym modelom, można zauważyć znaczące różnice w przedstawieniu rzeźby terenu w grafice 2.5D. Zgodnie z przewidywaniami przy zwiększonej liczbie boków (węzłów siatki NMT GRID) w profilu terenu graficzna forma jego przedstawienia jest bardziej czytelna.



Rys. 6. NMT GRID wygenerowane dla siatki  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$   
 Fig. 6. DTM GRID generated for  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  grid



Rys. 7. NMT GRID wygenerowane dla siatki  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$   
 Fig. 7. DTM GRID generated for  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  grid

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy wykonano numeryczne modele powierzchni terenu w postaci siatki GRID i ich geowizualizacje oraz przeprowadzono ich analizy porównawcze. Wizualizacja trzeciego wymiaru, nazywana także wizualizacją 2.5D (lub 2D+1D), opiera się na jednym z modeli pozwalających na zapis trzech współrzędnych obiektów przestrzennych (najbardziej rozpowszechnione są modele TIN i GRID).

Przeprowadzone badania miały na celu porównanie Numerycznych Modeli Terenu opracowanych z danych pomierzonych w technologii Smart Station (integrującej metodę tachymetryczną oraz RTK). Do sprawdzenia możliwości tej technologii wykonano dwukrotny (tachymetryczny i RTK), praktycznie synchroniczny pomiar 224 punktów. Zastosowanie zintegrowanego systemu pomiarowego umożliwia dokładne i zarazem znacznie szybsze pozyskiwanie danych. Dzięki wykorzystaniu zestawu Smart Station nie było potrzeby nawiązywania do klasycznych punktów osnowy, czyli zbędne było projektowanie ciągów poligonowych czy wcięć. Zastosowanie Smart Station okazało się optymalnym

rozwiązaniem, gdyż pozwoliło na rozpoczęcie pracy w o wiele krótszym czasie. Współrzędne stanowiska Smart Station wyznaczano z centymetrową dokładnością, w zaledwie kilka sekund, co umożliwiło wykonanie pomiarów tachymetrycznych w nawiązaniu do państwowego systemu odniesień przestrzennych [Rozporządzenie 2011, Doskocz i Uradziński 2012].

Zarówno bezpośrednie pomiary satelitarne RTK GNSS oraz współczesne pomiary tachymetryczne umożliwiają pomiar wielu punktów w stosunkowo krótkim czasie. Wyniki otrzymane podczas pomiarów metodą satelitarną okazały się zbliżone do klasycznych pomiarów tachymetrycznych, co pozwoliło na wierne odtworzenie numerycznego modelu powierzchni terenu. W porównaniu z metodą tachymetryczną dla powierzchni utworzonych jako GRID średnia różnica wysokości wyniosła 5 cm. Metoda RTK umożliwiła wykonanie szybkich pomiarów w celu pozyskania danych do tworzenia NMT, a uzyskane dane spełniły wymogi dokładnościowe [Rozporządzenie 2011]. Wykonane pomiary RTK, z wykorzystaniem poprawek przesyłanych poprzez technologię GPRS z systemu ASG-EUPOS, spowodowały zdecydowane zmniejszenie nakładu pracy oraz usprawnienie zrealizowanych pomiarów. Porównanie wyników dowiodło, że NMT GRID utworzony z danych satelitarnych (RTK GNSS) może być wykorzystywany do utworzenia produktów geoprzestrzennych, w tym wizualizacji opracowań 2.5D.

## PIŚMIENNICTWO

- ASG-EUPOS, 2016. [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
- Baranowski M., 2006. Metody geowizualizacji. Roczniki Geomatyki, Tom IV, Zeszyt 2, 29–34.
- Borkowski A., Gołuch P., Wehr A., Schiele O., Thomas M., 2006. Airborne laser scanning for the purpose of hydrodynamic modelling of Widawa river valley. Reports on Geodesy, 2 (77), 85–94.
- Bosy J., Oruba A., Graszka W., Leończyk M., Ryczywolski M., 2008. ASG-EUPOS densification of EUREF Permanent Network on the territory of Poland. Reports on Geodesy, 2 (85), 105–111.
- Delaunay B., 1934. Sur la sphère vide. Bull. Acad. Science USSR, VII: Class. Sci. Mat. Nat., 793–800.
- Doskocz A., Łyszkowicz A., 2011. The possibilities of acquisition of large-scale map data in a smart station technology. Proceedings of the 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology, presented in Poster Session, Kraków.
- Doskocz A., Uradziński M., 2012. Position determination of control network points in the Smart Station Technology using ASG-EUPOS System. Reports on Geodesy, 1 (92), 155–161.
- Hejmanowska B., Warchoń A., 2010. Analiza porównawcza wysokości terenu uzyskanej za pomocą lotniczego skaningu laserowego, pomiaru GPS oraz pomiaru na modelu stereoskopowym z kamery ADS 40. Acta Sci. Pol. Geodesia et Descriptio Terrarum, 9 (3), 13–24.
- Gaździcki J., 2001. Leksykon geomatyczny. Polskie Tow. Informacji Przestrzennej, Wydawnictwo „Wież Jutra” Sp. z o.o.
- Gisplay, 2016. <http://www.gisplay.pl/gis/numeryczny-model-terenu/rodzaje-nmt.html>
- Gołuch P., Borkowski A., Józków G., 2008. Badanie dokładności NMT interpolowanego na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. Acta Sci. Pol. Geodesia et Descriptio Terrarum, 7 (2), 37–47.
- Gościowski D., 2014. Reduction of deformations of the digital terrain model by merging interpolation algorithms. Computers & Geosciences, Volume 64, March, 61–71.

- Gotlib D., Olszewski R., 2006. Co z trzecim wymiarem? O modelowaniu rzeźby terenu w referencyjnych bazach danych. *Magazyn Geoinformacyjny GEODETA*, nr 4, 31–34.
- Gumus K., Sen A., 2013. Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a Digital Elevation Model. *Geodetski Vestnik*, Vol. 57, No. 3, 523–543.
- ICA, 2016. Commission on GeoVisualization of the International Cartographic Association, <http://geoanalytics.net/ica/>
- Leica, 2016. Leica Viva 15, [http://www.leica-geosystems.pl/pl/Leica-Viva\\_79268.htm](http://www.leica-geosystems.pl/pl/Leica-Viva_79268.htm)
- Lee D., Schachter B., 1980. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. *International Journal of Parallel Programming*, 9 (3), 219–242.
- Krumbein W.C., 1959. Trend surface analysis of contour-type maps with irregular control-point spacing. *Journal of Geophysical Research*, 64, 823–834.
- Mackun W., 2011. Analiza możliwości realizacji pomiarów szczegółowych z zastosowaniem mobilnego zestawu pomiarowego. Praca magisterska (promotor dr inż. A. Dorskocz), UWM w Olsztynie.
- McKessock G., 2007. A Comparison of local and wide area GNSS differential corrections disseminated using the Network Transport of RTCM via Internet Protocol. Ph.D. thesis, University of New Brunswick.
- Magnuszewski A., 1999. GIS w geografii fizycznej. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Mikołajczyk M., 2011. Odbiorniki i kontrolery Leica VIVA. *GEODETA*, Dodatek NAVI nr 1 (21), 14–16.
- Milinković A., Ristić K., Tucikešić S., 2014. Modern technologies of collecting and presentation of geospatial data. *Geonauka*, Vol. 2, No. 2, 19–27.
- Pajak K., Uradziński M., Dorskocz A., Biryło M., 2011. Analysis of digital terrain model technology development, while using simultaneous satellite and tacheometric measurements. *Reports on Geodesy*, No. 1 (90), 361–367.
- Paszotta Z., Szumiło M., 2006. Weryfikacja numerycznego modelu terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, 457–466.
- Pyka K., Rzepka A., Słota M., 2012. Porównanie fotogrametrii i lotniczego skaningu laserowego jako źródeł danych do opracowania NMT dla celów projektowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 24, 311–321.
- Rozporządzenie, 2011. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego, Dz.U. 2011 Nr 263, poz. 1572.
- Suchocki C., Damięcka-Suchocka M., Błoch P., Stec M., 2013. Ocena dokładności numerycznego modelu terenu zbudowanego z danych bezpośrednich. *Acta Sci. Pol. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 12 (3), 17–26.
- Surfer, 2011. [www.surfer.net.pl](http://www.surfer.net.pl)
- Szczygłowski P., 2011. Analiza dokładności numerycznego modelu terenu wyznaczonego przy wykorzystaniu techniki RTK. Praca magisterska (promotor dr inż. M. Uradziński), UWM w Olsztynie.
- Świątek B., 2000. Ocena efektywności automatycznej interpolacji warstw w aspekcie wykorzystania jej wyników. *Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej p.t. Systemy Informacji Przestrzennej*, 372–377.
- Uradziński M., Dorskocz A. 2010. Initial analysis of the accuracy of position determination using ASG-EUPOS NAVGEO (RTK VRS) service. *Geomatics and Environmental Engineering*, Vol. 4, 113–118.

- Uradziński M., Kim D., Langley R.B., 2008. The usefulness of internet-based (Ntrip) RTK for navigation and intelligent transportation systems. ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division, 16–19 September. Conference Proceedings, Savannah.
- Wood J.D., 1996. The geomorphological characterization of digital elevation models. Ph.D. thesis, University of Leicester.
- Wytyczne, 2001. Wytyczne Techniczne K-2.8: Zasady wykonywania ortofotomap w skali 1:10000. GUGiK, Warszawa.

## COMPARISON OF DIGITAL TERRAIN MODELS OBTAINED FROM SMART STATION TECHNOLOGY

**Abstract.** Creating Digital Terrain Model (DTM) is one of the most important goals, which are to be considered in Spatial Information Systems. Usefulness of satellite systems with combination of classical methods gives an opportunity of horizontal and vertical measurements. Nowadays, Digital Terrain Model becomes a standard geospatial product and is the main information layer used in Geographic Information Systems.

This paper presents the processes of acquiring and updating data using GNSS satellite techniques, which enable easy and quick automatic measurements, as well as innovative technology to determine the position coordinates using the Leica Smart Station technology. The results of measurements of Total Station and RTK are also presented. Based on these measurements, the GRID DTM was created using Surfer 9 software and comparative analysis of the results were performed. It was found that the results obtained from satellite measurements are similar to tacheometric results. Data obtained from RTK GNSS measurements allowed to reproduce DTM. Comparing to the model developed from tacheometric data, for surface mesh created as GRID, it was found that an average height coordinate difference was of the order of 0.05 m.

**Key words:** Digital Terrain Model, GNSS, RTK, ASG-EUPOS, Smart Station

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

Do cytowania – For citation: Uradziński M., Duskocz A., 2015. Porównanie numerycznych modeli terenu opracowanych przy wykorzystaniu technologii Smart Station. *Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr.*, 14 (3–4), 39–52.