

UKD 622.333: 622.624.044: 622.624.044

Dokładność Numerycznego Modelu Terenu tworzono- go w oparciu o satelitarny pomiar GPS

Accuracy of the Digital Terrain Model developed on the basis of the GPS satellite measurements



*Dr hab. inż. Zygmunt Niedojadło
prof. AGH**



*Dr inż. Paweł Sopata***



*Dr inż. Tomasz Stoch***



*Mgr inż. Wojciech Kołtyś****



*Mgr inż. Michał Niemczyk****

Treść: Informacje o przebiegu rzeźby terenu, szczególnie na obszarach podlegających przekształceniom w skutek szeroko pojętej działalności górniczej, umożliwiają przestrzenne monitorowanie procesów i zjawisk związanych z deformacjami powierzchni. W artykule opisano generowanie oraz wynikające z tego procesu dokładności Numerycznego Modelu Terenu, stanowiącego jedną z metod graficznego opracowania pomiaru. Jako dane źródłowe do tworzenia NMT wykorzystano wyniki pomiaru GPS-RTK otrzymane z kilku niezależnych serii obserwacyjnych. Zrealizowano je w odpowiednio dobranym do tego celu testowym obszarze badań, charakteryzującym się zróżnicowaną morfologią i zagospodarowaniem.

Abstract: Data on land relief, particularly in areas which undergo transformations due to the broadly-defined mining activities, enables the spatial monitoring of processes and phenomena connected with surface deformations. This paper presents the development and accuracy of the Digital Terrain Model (DTM), one of the methods of graphical measurements preparation. The results of GPS-RTK measurements obtained from several independent series of observations were used as the source data for DTM preparation. They were implemented in a carefully selected research area with diverse morphology and land development.

Słowa kluczowe:

numeryczny Model Terenu (NMT), metoda GPS-RTK, niecka obniżeniowa

Key words:

Digital Terrain Model (DTM), GPS-RTK method, subsidence trough

*) AGH w Krakowie **) STAL-SURV. ***) Geosat Kraków sp. z o.o.

1. Wprowadzenie

Jednym z narzędzi, które można wykorzystać do pozyskiwania informacji o rzeźbie terenu są satelitarne systemy GNSS. Wspomagane poprzez rozwój sieci stacji permanentnych (np. ASG-EUPOS) stają się one obecnie bardziej ekonomiczne i ergonomiczne. Wyniki pomiarów współrzędnych przestrzennych punktów terenowych, o odpowiednio dobranym do potrzeb zagęszczeniu, mogą stanowić podstawę tworzenia Numerycznych Modeli Terenu (NMT). Znajomość morfologii danego rejonu umożliwia projektowanie i realizację wielu zadań inżynierskich, obejmujących duże spektrum rozmaitych dziedzin życia, nauki i techniki. Wykorzystuje się ją również w aspekcie monitorowania i zapobiegania zagrożeniom towarzyszącym górnictwu [3], które w Polsce ma wielowiekowe tradycje. Eksploatacji złóż kopalin użytecznych towarzyszą bowiem przekształcenia powierzchni terenu, wskutek jej obniżenia. Możliwość wykorzystania danych pozyskiwanych w oparciu o systemy GNSS do tworzenia, jak również późniejszej aktualizacji NMT [2], warunkuje dokładność wykonywanych na ich podstawie modeli. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące przeciętnych różnic przebiegu utworzonych kilku NMT tego samego, specjalnie dobranego obszaru testowego. Założona stałość powierzchni terenu w czasie (umożliwiająca analizy porównawcze) wynikała z braku zewnętrznych przyczyn, które mogłyby spowodować zmiany w jej morfologii. Stanowiło to w efekcie podstawę wnioskowania o szacunkowej dokładności wykonywania modeli terenu w zaprezentowanej metodyce z użyciem wybranych technik komputerowych.

2. Numeryczny Model Terenu

Numeryczny Model Terenu (NMT) definiuje się jako „numeryczną reprezentację powierzchni terenowej, utworzonej poprzez zbiór odpowiednio wybranych punktów leżących na tej powierzchni oraz algorytmów interpolacyjnych umożliwiających jej odtworzenie w określonym obszarze” [1].

NMT tworzy się na podstawie punktów rozłożonych regularnie lub nieregularnie na powierzchni terenu. Punkty reprezentujące NMT porządkuje się w jednej z dwóch struktur:

- TIN (Triangular Irregular Network) - jest to nieregularna sieć trójkątów wraz z topologią, trójkąty są oparte na punktach pomiarowych,
- GRID (regularne sieci trójkątów lub kwadratów) – uzupełnionych dodatkowo punktami opisującymi charakterystyczne formy terenu takie jak:
 - linie szkieletowe (linia ciekowa, linia grzbietowa),
 - linie nieciągłości (osuwiska, skarpy),
 - powierzchnie wyłączone (budynki, wody stojące, rzeki).

Sieci regularne zazwyczaj powstają poprzez interpolację pomiędzy rozproszonymi punktami pomiarowymi. Taki rodzaj sieci określa się mianem sieci wtórnej lub sieci wynikowej.

Doskonałe odtworzenie powierzchni terenu przez model nie jest praktycznie możliwe, ze względu na ograniczenia wielkości zbioru danych, czasowe oraz ekonomiczne. Oznacza to, że w praktyce w zasadzie nie można pomierzyć ani wyrazić całej złożoności powierzchni terenu.

Dane do tworzenia i aktualizacji Numerycznego Modelu Terenu można pozyskiwać wieloma metodami, z pomiarów bezpośrednich w terenie, metodami fotogrametrycznymi i teledetekcyjnymi czy coraz częściej wdrażanym lotniczym skanowaniem laserowym. Jedną z metod pomiaru bezpośredniego, którą wykorzystano na potrzeby tej pracy, oparta jest na satelitarnej technice GPS-RTK.

W technice GPS-RTK dane, w formie współrzędnych przestrzennych (x, y, z), pozyskuje się w wyniku pomiaru punktów rozproszonych. Dodatkowo wykonywany jest pomiar przebiegu nieciągłości terenu (skarpy, rowy itp.). Dane te mają relatywnie wysoką dokładność (subcentymetrową), lecz ich pozyskanie jest pracochłonne, dlatego metoda ta wykorzystywana jest głównie dla niewielkich obszarów (kilka, kilkadziesiąt ha), dla których istotna jest wysoka dokładność. Przykładowo można ją zastosować do pomiarów tworzących się, pojedynczych niecek obniżeniowych nad postępującą eksploatacją górnictwa. Dodatkowe utrudnienie przy jej stosowaniu stanowi niekorzystny rodzaj zagospodarowania terenu, polegający na zasłonięciu linii horyzontu przez wysokie obiekty czy zalesienie terenu. W większości przypadków powoduje to utratę łączności odbiorników GPS z satelitami systemu, a także stacjami referencyjnymi, generującymi poprawki korygujące na bieżąco wyznaczaną pozycję.

3. Rejon badań

Przedstawiony w artykule, podstawowy cel pracy, stanowiący utworzenie i ocenę dokładności NMT na podstawie obserwacji przeprowadzonych z wykorzystaniem satelitarnej techniki GPS-RTK, zrealizowano w oparciu o wybrany fragment powierzchni terenu, traktowany z założenia jako pole testowe o relatywnie niedużej powierzchni. Podstawowe kryteria wyboru rejonu badań stanowiły odpowiednie warunki terenowe, w których możliwe było (dodatkowo) wykonanie oceny wykorzystanej techniki pomiarowej pod względem jej przydatności do tworzenia NMT. W tym aspekcie stanowiły je przede wszystkim urozmaicona rzeźba terenu oraz sposób jego zagospodarowania. Obszar testowy zlokalizowany był w województwie małopolskim, we wsi Krasieniec Zakupny, gmina Iwanowice, powiat krakowski.

Powierzchnia mierzonego terenu, w kształcie zbliżonym do prostokąta, wynosiła blisko 1,5 ha (rys.1). W obszarze badań, na niewielkiej powierzchni, można było wyodrębnić kilka rodzajów jego zagospodarowania i użytkowania. W jego obrębie występowały:

- droga gminna o nawierzchni asfaltowej,
- pole orne nieuprawiane o randze nieużytku i praktycznie płaskiej powierzchni, charakteryzuje się niewielkim zróżnicowaniem wysokości mierzonych w jego obrębie punktów,
- uprawiane pole orne, gdzie ze względu na nierówną powierzchnię wyznaczane różnice wysokości punktów wykazywały większe wartości,
- działka budowlana, z posadowionym budynkiem mieszkalnym, odrębnym budynkiem gospodarczym oraz utwardzoną drogą dojazdową, o dość równej, regularnej powierzchni bez istotnych nachyleń terenu,
- łąka o niewielkim nachyleniu (około 5÷7%),
- nieużytek, gęsto porośnięty krzewami oraz drzewami, o nachyleniu w zakresie 25÷30% w kierunku północnym, co znacząco utrudniało pomiary wykonywane w przyjętej technologii (większość satelitów występuje po południowej stronie nieba - przedstawiona morfologia skutkuje niekorzystnym przesłonięciem horyzontu w tym kierunku),
- wysoka skarpa, o średnim nachyleniu około 30% w kierunku południowym i względnej różnicy wysokości, dochodzącej do 22 metrów, gęsto zarośnięta drzewami i krzewami, które znacząco utrudniały pomiar,
- dno rowu zlokalizowane pomiędzy nieużytkiem i skarpy otoczone z dwóch stron wysokimi drzewami, w tej części terenu pomiar był szczególnie utrudniony, ograniczony w wyniku występującej znacznej deniwelacji terenu horyzont dodatkowo przesłaniały drzewa i krzewy.



Rys. 1. Pole testowe

Fig. 1. Experimental area

Opisany powyżej rejon badań ma charakter lokalny, adekwatny do wybranej techniki pomiaru, dostarczającej danych do budowy Numerycznego Modelu Terenu na relatywnie niewielkim obszarze.

4. Metodyka pozyskiwania i proces obróbki danych

Pomiary geodezyjne, dla potrzeb realizacji badań, wykonano odbiornikiem GPS firmy Trimble z wbudowanym kontrolerem - model SPS882 i anteną - model R8 GNSS/SPS88x Internal. Klasę wykorzystanego zestawu należy uznać za wysoką.

Cały cykl badań obejmował łącznie 4 niezależne serie pomiarowe, które zrealizowano w okresie od listopada 2011 roku do kwietnia 2012 roku, w zmiennych (również niesprzyjających) warunkach atmosferycznych.

Rozproszone punkty pomiarowe (punkty zbierania danych o wysokości terenu) w wypłaszczeniach częściach obszaru testowego, o odpowiednio odsłoniętej linii horyzontu, lokalizowano w siatce o gęstości wynoszącej przeciętnie 10-15 metrów. W obrębie dna rowu oraz nieużytku i wysokiej skarpy (gęsto zakrzewionych i zadrzewionych) pomiar wykonywano w miejscach odsłoniętych, w których odbiornik GPS zapewniał prawidłowe funkcjonowanie, charakteryzujące się jednak mniejszą dokładnością pomiaru. Dodatkowo, w każdej serii pomiarowej, w celu weryfikacji i kontroli danych wysokościowych pozyskiwanych w obszarze badań, dokonywano dwukrotnego pomiaru (po dwóch niezależnych inicjalizacjach odbiornika), trwale zastabilizowanego punktu osnowy szczegółowej III klasy, znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie rejonu badań.

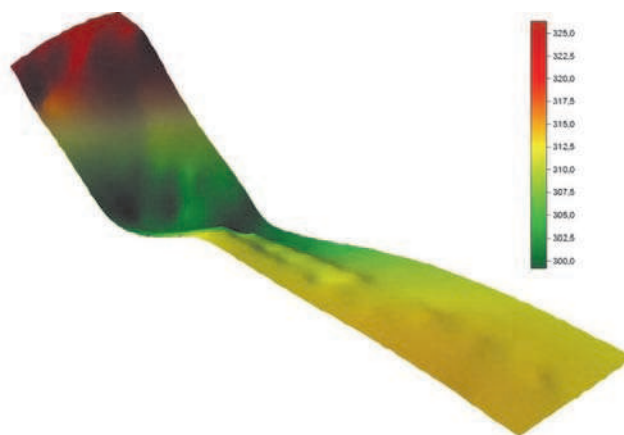
W trakcie realizacji pomiarów, w poszczególnych seriach uzyskano zmienne pokrycie terenu punktami pomiarowymi w liczbie od 98 do 112. Stanowiło to bazę do wygenerowania czterech niezależnych modeli terenu, które poddano dalszym analizom dokładnościowym.

Do wygenerowania modeli terenu użyto programu komputerowego Surfer, który został zaprojektowany m.in. do wszechstronnej wizualizacji danych przestrzennych i modelowania powierzchni terenu. Wbudowany szeroki zestaw interpolacyjnych metod generowania regularnej siatki obliczeniowej „grid”, której węzły przechowują wartości modelowe, pozwala wybrać optymalny algorytm w zależności od charakteru danych wejściowych. Program umożliwia odwzorowanie powierzchni, tworząc siatkę o gęstości ustalonej przez użytkownika. Na podstawie nieregularnie rozłożonych punktów dokonuje obliczeń wartości funkcji

w węzłach ustalonej siatki prostokątów. Jako metodę interpolacji wybrano geostatystyczną metodę krigingu. Zakłada ona istnienie autokorelacji przestrzennej, czyli zależności między odleganiem punktów a stopniem ich podobieństwa. Zgodnie z tą zależnością, wartości zmierzone w bliskich sobie punktach powinny być bardziej zbliżone, niż wartości zmierzone w punktach bardziej oddalonych. Nieznane wartości są szacowane przez ważoną kombinację wartości w punktach znanych. Dodatkowo możliwe jest określenie istotności statystycznej konstruowanej powierzchni i zarazem niepewności szacowanych danych. Możliwość określenia błędów estymacji należy do podstawowych zalet metod geostatystycznych.

5. Wyniki modelowania i ocena dokładności

Wynik modelowania (przykład - rys. 2), w postaci wspomnianych czterech niezależnych NMT tego samego, z założenia niezmiennego w czasie, terenu poddano analizom dokładnościowym. Przyjęta metoda porównawcza miała na celu sprawdzenie powtarzalności otrzymywanych rezultatów oraz oszacowanie przeciętnego odstepu (średniej różnicy wysokości) poszczególnych powierzchni terenu, który można utożsamiać z przeciętną dokładnością wygenerowania NMT w przyjętej metodyce pomiaru i opracowywania danych.



Rys. 2. Numeryczny Model Terenu pola testowego - seria pomiarowa nr 1

Fig. 2. Digital Terrain Model of the experimental area – series of measurements no. 1

Przyjęty za miarę dokładności modelu, przeciętny odstęp pomiędzy uzyskanymi powierzchniami, wyliczony został w sposób pośredni. Obliczano go na podstawie bezwzględnej wartości różnicy objętości mas ziemnych zawartych pomiędzy dwiema powierzchniami, podzielonej przez wartość powierzchni objętej analizą. Bezwzględną wartość różnicy objętości mas ziemnych pomiędzy dwiema wygenerowanymi powierzchniami stanowi suma objętości zarówno naddatku, jak i niedoboru masy pomiędzy wybraną powierzchnią a powierzchnią uznaną za bazową. Proste przyjęcie bilansu masy w przypadku dwóch powierzchni przecinających się (bilans = nadatek – niedobór) fałszuje wyniki analizy. Graficznie przedstawia ten problem rysunek 3, gdzie przy bilansie mas ziemnych równym 0 ($V1 = V2$) przeciętna odległość dwóch powierzchni (model 1 i model 2) jest różna od 0. Objętości mas ziemnych ($V1$ i $V2$) wyznaczone są od przyjętej umownie (wspólnej) powierzchni odniesienia.

Brak odpowiedniego pokrycia punktami pomiarowymi w północnej części pola testowego, obejmującego zadrzewione skarpy i rów doprowadziła do decyzji o zawężeniu obszaru porównawczego do wydzielonej powierzchni o odpowiedniej gęstości pozyskiwanych informacji wysokościowych. Obszar poddany analizie ilościowej ograniczono do prostokąta o wymiarach w przybliżeniu 40 x 130 metrów. Do porównania wyników modelowania (NMT) wykorzystano południową część terenu testowego, obejmującego grunty orne (uprawiany i nieuprawiany), działkę budowlaną oraz łąkę.

Powyższą analizę poprzedzono wyborem powierzchni bazowej, do której porównano pozostałe wyniki modelowania. W związku z dobrymi warunkami pomiarowymi, przekładającymi się na najniższe średnie błędy pomiaru współrzędnych przestrzennych obserwowanych punktów terenowych oraz największą gęstość w badanym obszarze testowym (pokrycie terenu) za powierzchnię bazową wybrano model terenu utworzony na podstawie pomiarów zrealizowanych w czwartej serii obserwacyjnej wykonanej w kwietniu 2012 r. Ilościowe wyniki analizy zestawiono w tabeli 1.

Tablica 1. Przeciętny odstęp pomiędzy wygenerowanymi NMT
Table 1. Average distance between the developed DTMs

Powierzchnia bazowa NMT_4	NMT_1	NMT_2	NMT_3
Różnica objętości [dV]	464,8 m ³	370,4 m ³	268,7 m ³
Powierzchnia analizy	5144 m ²		
Średni odstęp między powierzchniami	9,0 cm	7,2 cm	5,2 cm

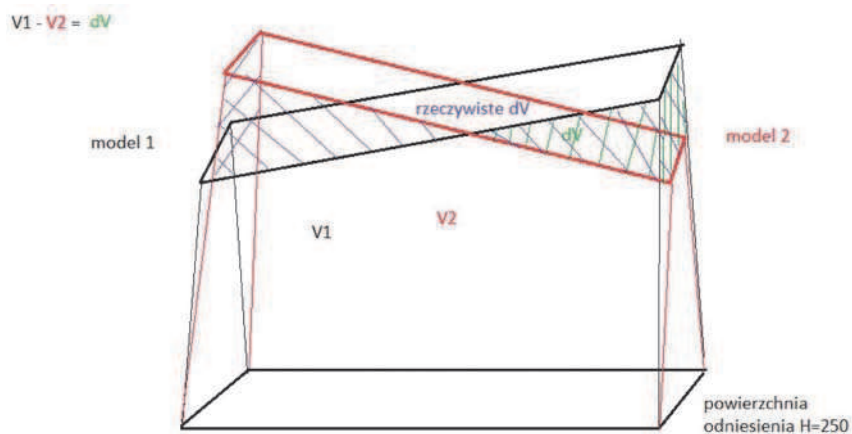
Jak wynika z danych zawartych w tabeli 1, uzyskany przeciętny odstęp pomiędzy wygenerowanymi powierzchniami NMT to około 5 cm ÷ 9 cm. W aspekcie składowych błędów mających wpływ na ten przedział (zarówno pomiarowych jak i wynikających z opracowania danych), wartości te należy traktować w kategorii wysokiej dokładności generowania NMT z punktowych pomiarów geodezyjnych, wykonanych metodą GPS-RTK.

6. Podsumowanie

Uzyskane w ramach prac terenowych wyniki pomiarów GPS-RTK zostały użyte do tworzenia numerycznych modeli terenu (NMT) w oparciu o komputerowe algorytmy interpolacyjne (geostatystyczna metoda kriginu).

Otrzymane w wyniku analiz dokładnościowych rezultaty pozwalają stwierdzić, że wybrana metoda pomiaru z wykorzystaniem techniki satelitarnej GPS-RTK jest użyteczna i sprawdza się w terenie o odkrytym horyzoncie i umiarkowanych deniwelacjach, umożliwiając obserwacje odpowiedniej ilości satelitów i pozyskiwanie poprawek ze stacji referencyjnych korygujących wyznaczone pozycje. Znaczne rozbieżności NMT tego samego fragmentu terenu, wykonanych w oparciu o wyniki kolejnych serii obserwacyjnych, w części terenu charakteryzującej się zróżnicowaną morfologią oraz gęstym zakrzewieniem i zadrzewieniem, stanowią poważne ograniczenie dla wykorzystania pomiarów GPS-RTK w opracowaniach tego typu. Przyczyną tego są przede wszystkim ograniczenia w możliwości przeprowadzenia pomiarów o odpowiednim zagęszczeniu punktów oraz wysokie błędy współrzędnych, zwłaszcza w płaszczyźnie pionowej, powodujące małą wiarygodność pozyskiwanych danych przestrzennych.

Przyjęta w artykule metodyka pozyskiwania i opracowania danych, mająca na celu wygenerowanie numerycznego modelu terenu powierzchni przyjętego pola testowego, pozwoliła na zaprezentowanie morfologii terenu na poziomie dokładności mieszczącym się w zakresie do $\pm 0,1$ m. Wskazują na to przeprowadzone w pracy analizy porównawcze wygenerowanych modeli NMT tego samego obszaru badań (w sprzyjających warunkach terenowych dla zastosowanej techniki pomiaru). Otrzymane dokładności można uznać za satysfakcjonujące w robotach geodezyjnych z zakresu sytuacyjno-wysokościowego, jednakże nie pozwalają one na użycie technologii GPS-RTK w pomiarach



Rys.3. Bilans mas ziemnych pomiędzy przecinającymi się powierzchniami
Fig. 3. Balance of earths between the intersecting surfaces

terenowych wykorzystywanych w pracach wymagających wyższej dokładności (w zakresie pojedynczych milimetrów). Mając na uwadze czas potrzebny do wykonania pomiaru obszaru testowego oraz wygenerowania NMT w programie komputerowym, zaprezentowaną w pracy metodę (w aspekcie ekonomicznym i ergonomicznym) można uznać za optymalną dla relatywnie niewielkich obszarów (do kilkunastu, maksymalnie kilkudziesięciu ha). Przykładowo można ją z powodzeniem stosować do pomiarów pojedynczych niecek obniżeniowych nad podziemną eksploatacją górnictwem, gdzie obniżenia powierzchni terenu zazwyczaj przekraczają znacznie przedstawiony zakres dokładnościowy. Z uzyskanego w ten sposób przestrzennego obrazu niecki obniżeniowej można wyznaczyć zasięg wpływów bieżącej lub zakończonej eksploatacji górnictwem. Ma to istotne znaczenie w aspekcie zagrożeń oraz ochrony obiektów budowlanych i infrastruktury technicznej na terenach górnictwem. Równocześnie należy stwierdzić, że wyznaczenie pozostałych wskaźników

deformacji (w tym przede wszystkim nachyleń, odkształceń poziomych i krzywizn) z wymaganą dla nich precyzją, ze względów dokładnościowych pomiaru GPS-RTK, nie jest praktycznie możliwe. W aspekcie generowania NMT uzyskaną dokładność, wskazującą na powtarzalność otrzymywanych wyników w postaci przebiegu powierzchni terenu, należy uznać za wysoką.

Literatura

1. *Gaździcki J.*: Systemy informacji przestrzennej. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa 1990.
2. *Hejmanowski R., Sopata P., Stoch T., Wójcik A.*: Aktualizacja rzeźby terenu górnictwem oparta na pomiarach GPS-RTK. „Przeгляд Górnictwem” 2012, nr 8.
3. *Sopata P.*: Wykorzystanie metody GPS-RTK do pomiarów przemieszczeń powierzchni terenów górnictwem. „Przeгляд Górnictwem” 2012 nr 7..