

Analiza i porównanie aplikacji komputerowych do obliczania objętości mas ziemnych i materiałów sypkich

Arkadiusz Kampczyk, Krzysztof Malach



dr inż. Arkadiusz Kampczyk

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa

kampczyk@agh.edu.pl



inż. Krzysztof Malach

absolwent AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

krzysiek_malach@o2.pl

Inwestycje z zakresu budownictwa komunikacyjnego oraz towarzyszących im innych elementów infrastrukturalnych stanowią bardzo złożony proces, obejmujący długi horyzont czasowy. W zakresie inwestycji infrastruktury transportowej, oprócz takich materiałów jak: ortofotomapy, mapy topograficzne, rastry map zasadniczych i opracowanie map do celów projektowych, w ostatnim okresie wielu projektantów zajmujących się budowlanym procesem inwestycyjnym wspomaga się i pracuje na numerycznych modelach terenu NMT. Znaczenie dla realizacji inwestycji ma nie tylko mapa do celów projektowych, ale i NMT [8] [9]. Systemy komputerowe z zaawansowanymi aplikacjami programowymi najczęściej tworzą dwa podstawowe typy NMT:

- regularny w postaci prostokątnej siatki punktów (GRID, model pseudorastrowy, postać regularnej siatki, na której przypisano atrybuty w miejscu przecięcia się linii),
- nieregularny w postaci siatki trójkątów (TIN, model trójkątowy, ang. Triangular Irregular Network).

Cechy geometryczne siatek typu TIN i GRID posiadają wpływ na dokładność tworzonych NMT. Prace geodezyjne, kartograficzne dotyczące infrastruktury budownictwa komunikacyjnego odnoszą się również do tematyki infrastruktury przestrzennej. Zawierają się one w ustawie z dnia 4 marca 2010 roku o infrastrukturze informacji przestrzennej [3], która bezpośrednio wynika z europejskiej dyrektywy INSPIRE z 2007 roku, dotycząca infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej [1]. Z ustawy tej wynika, że infrastruktura informacji przestrzennej stanowi zbiory danych przestrzennych, które są opisa-

ne za pomocą metadanych oraz dotyczące ich usługi, środki techniczne, procesy i procedury, stosowane i udostępniane przez różne organy [3]. Zbiory danych przestrzennych dotyczą różnych tematów tym ukształtowanie terenu. Tematy danych przestrzennych przynależą do jednej z trzech grup tematycznych, przy czym ranga jaka jest przypisana danej grupie wiąże się z ważnością tematów, które obejmuje. Wśród nich są sieci transportowe, które są rozumiane jako sieci transportu: drogowego, kolejowego, lotniczego i wodnego (w tym morskiego), wraz z powiązaną z nimi infrastrukturą, obejmującą również połączenia między różnymi sieciami, łącznie z transeuropejską siecią transportową w rozumieniu decyzji Nr 1692/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 czerwca 1996 r. w sprawie wspólnotowych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej [2]. Problematyka obliczenia objętości mas ziemnych i materiałów sypkich dotyczy wielu dziedzin, np.:

- budownictwa,
- ochrony środowiska,
- górnictwa,
- składowania odpadów.

Wraz z postępem techniki powstało wiele programów oferujących skrócenie czasu w procesie obliczenia objętości. W pracach geodezyjnych dotyczących obiektów powierzchniowych proces ten odgrywa ważną rolę. Duży wpływ na wynik prac ma proces tworzenia NMT. Należy zauważyć, że tematyce obliczenia objętości mas ziemnych i materiałów sypkich nie poświęca się zbyt dużej uwagi w regulacjach prawnych, nie znaczy to jednak, że nie jest to ważne zagadnienie. Informacje dotyczące obliczenia objętości zawarte są m.in. w Instrukcji Geodezyjnej Resortu Przemysłu Ciężkiego [5] oraz w Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej [4]. Wybór stosownej techniki obliczenia objętości mas ma bardzo duży wpływ na otrzymany wynik końcowy.

Numeryczny model terenu

J. Gaździcki w opracowaniu [7], numeryczny model terenu definiuje jako „numeryczną reprezentację powierzchni terenowej, utworzonej poprzez zbiór odpowiednio wybranych punktów leżących na tej powierzchni oraz algorytmów interpolacyjnych umożliwiających jej odtworzenie w określonym obszarze”. Odzwierciedlenie takiej powierzchni w idealny sposób nie jest możliwe między innymi ze względów ekonomicznych, czasowych i wiel-

kości danych.

Podstawowymi problemami związanymi z NMT są [12]:

- odpowiedni dobór charakterystycznych punktów powierzchni,
- odtworzenie powierzchni na podstawie istniejących danych.

Spśród najczęściej wykorzystywanych metod do reprezentacji powierzchni terenu wyróżnić można następujące modele:

- GRID – oparty jest na siatce kwadratów, której punkty węzłowe posiadają określone wysokości powierzchni terenowej,
- TIN – nieregularna sieć trójkątów, powstaje głównie jako efekt bezpośrednich pomiarów terenowych, gdzie cały zakres opracowania zapełnia się trójkątami opartymi o punkty pomiarowe,
- reprezentacja za pomocą linii łączących punkty o tych samych wartościach (izolinie).

Dane o powierzchni terenu niezbędne do stworzenia NMT uzyskuje się poprzez:

- bezpośrednie pomiary terenowe,
- pomiary i opracowania fotogrametryczne,
- metody kartograficzne,
- interferometrię radarową, InSAR (ang. Interferometric synthetic aperture radar),
- skaning laserowy,
- zawansowane aparaty telefonii komórkowej (aplikacje na iPhone'a),
- drony.

Dokładność NMT wyraża średni błąd wysokości punktu wyznaczonego z powstałego modelu. Na dokładność modelu mają wpływ przede wszystkim błędy pomiarowe danych wejściowych, odległości punktów pomiarowych, a także rzeźba terenu. Dokładność NMT określa wzór (1) Ackermanna [11]:

$$m_{NMT}^2 = m_z^2 + (a \cdot d)^2 \quad (1)$$

gdzie:

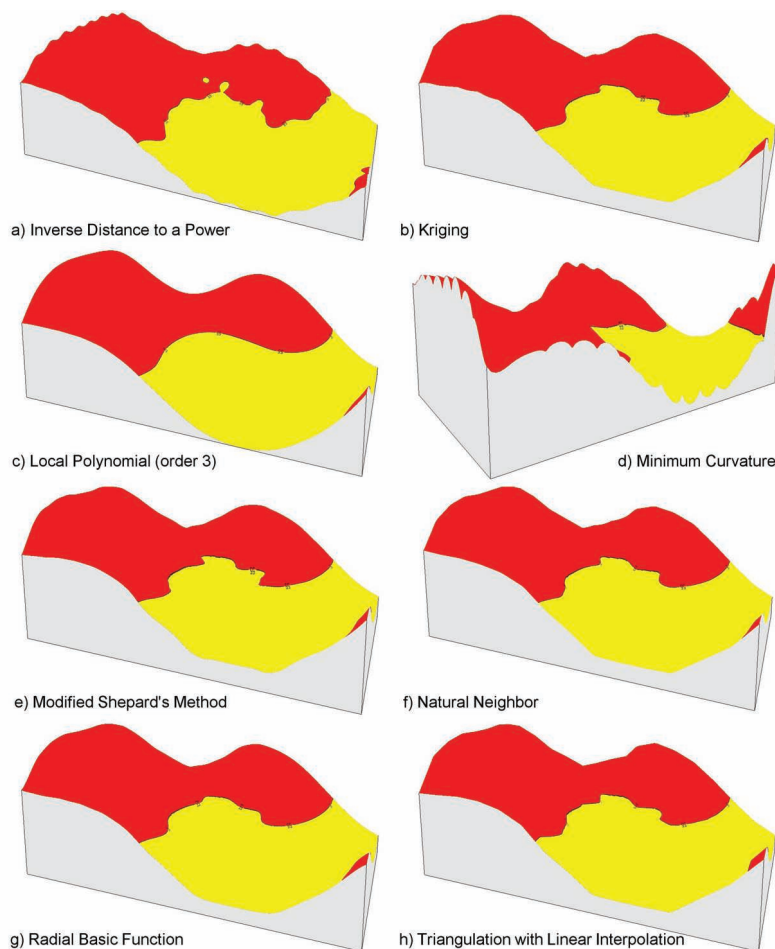
- m_{NMT} – średni błąd wysokości,
- m_z – średni błąd określenia wysokości punktu,
- a – współczynnik opisujący charakter rzeźby terenu,
- d – średnia odległość punktów pomiarowych.

Spśród typowych zadań NMT możemy wyróżnić:

- wizualizację trójwymiarową,
- obliczanie objętości oraz bilansowanie robót ziemnych,
- określanie wysokości punktów,
- wyznaczanie spadków pomiędzy punktami,

Tab. 1. Charakterystyka metod griddingu oferowanych przez programu SURFER v9 [5]

| Metoda | Krótką charakterystyka |
|---|--|
| Inverse Distance to a Power | Metoda szybka, ale ma tendencje do generowania „byczego oka” – koncentryczne kontury wokół punktów pomiarowych. |
| Kriging | Najbardziej elastyczna i użyteczna metoda dla szerokiego zakresu problemów. Metoda ta jest rekomendowana dla większości zastosowań. |
| Minimum Curvature | Generuje wygładzone powierzchnie, jest dość efektywna, ale ma tendencje do dużych błędów w obszarach gdzie znajduje się mała liczba danych. |
| Natural Neighbor | Daje dobre wyniki dla powierzchni ubogich w dane oraz nierównomiernie rozłożonych, w których występują obszary o dużej gęstości punktów wejściowych. |
| Nearest Neighbor | Metoda użyteczna dla równomiernie lub prawie równomiernie rozłożonych danych XYZ. Stosowana, gdy w regularnie rozłożonych punktach brak jest pewnych danych, gdyż szybko je uzupełnia. |
| Polynomial Regression | Metoda bardzo szybka nawet dla dużych zestawów danych, ale lokalne detale ukształtowania powierzchni są tracone. Gubi szczegóły. Bardzo silne właściwości wygładzające. |
| Radial Basic Function | Bardzo elastyczna metoda o jakości porównywalnej do Kriging, ale nieco wolniejsza. |
| Modified Shepard's Method | Metoda poprawia wady metody odwrotnej odległości, daje zbliżone do niej wyniki, ale nie ma jej wady, czyli generowania „byczego oka”. |
| Triangulation with Linear Interpolation | Metoda bardzo szybka, ale do specyficznych zastosowań. Dla małych zbiorów danych metoda generuje wyraźne, trójkątne obszary pomiędzy punktami. |
| Moving Average | Stosowana dla dużych i bardzo dużych zestawów danych (ponad 1000 punktów). Ma zdolności uśredniające, przez co bywa stosowana dla danych obciążonych dużym błędem. Dla dużych plików danych stanowi alternatywę dla metody Natural Neighbor. |
| Data Metrics | Specyficzny rodzaj procedury griddingu. Generuje informacje o danych wejściowych w formie siatki. |
| Local Polynomial | Produkuje siatki wartości lokalnie wygładzone, poprzez lokalne dopasowanie wielomianów do danych liczbowych w oparciu o kryterium średniego błędu kwadratowego. |



1. Numeryczne Modele Terenu metod analizowanych w aplikacji SURFER v9 (kolor czerwony – nasyp, żółty – wykop)

- kontrola widoczności pomiędzy poszczególnymi punktami,
- określanie obszarów narażonych na zalanie.

Obliczanie objętości w programie SURFER v9

Oprogramowanie SURFER v9 jest aplikacją firmy GOLDEN SOFTWARE, INC. Umożliwia on tworzenie odwzorowania powierzchni, tworzenie map izolinii, a także złożonych obrazów mapowych oraz modeli trójwymiarowych. Posiada bogate możliwości obliczeniowe. Większość z nich oparta jest na regularnej siatce wartości GRID. Program oferuje aż 12 metod griddingu, czyli tworzenia regularnej siatki kwadratów z danych wejściowych. Wśród nich wyróżnia się:

- Inverse Distance to a Power,
- Kriging,
- Minimum Curvature,
- Natural Neighbor,
- Nearest Neighbor,
- Polynomial Regression,
- Radial Basic Function,
- Modified Shepard's Method,
- Triangulation with Linear Interpolation,
- Moving Average,
- Data Metrics,
- Local Polynomials.

Procesem interpolacji sterują parametry griddingu. Każda z metod charakteryzuje się własnymi cechami. Bardzo ważny jest wybór metody interpolacji, ponieważ ma on ogromny wpływ na otrzymane wyniki. W tabeli 1 zaprezentowano krótką charakterystykę dostępnych metod interpolacyjnych. Do analizy wybrano następujące metody oferowane przez program:

- Inverse Distance to a Power,
- Kriging,
- Local Polynomial,
- Minimum Curvature,
- Modified Shepard's Method,
- Natural Neighbor,
- Radial Basic Function,
- Triangulation with Linear Interpolation.

Przebieg obliczeń w programie dla wszystkich metod zachodzi w bardzo analogiczny sposób. Program w dużej mierze nastawiony jest na tworzenie modeli i różnego rodzaju map na podstawie stworzonej siatki GRID. Posiada możliwość tworzenia raportów z obliczania objętości, w którym zawarte są informacje m.in. o:

- objętości,
- nasypie,
- wykopie,
- odchyleniu standardowym,
- wariancji,
- błędzie średnim.

W tabeli 2 wyróżniono wartości wybranych parametrów otrzymane z obliczeń dla poszczególnych metod.

Oprogramowanie to posiada 12 algorytm-

mów interpolacyjnych, jednak większość z nich wymaga wiedzy w zakresie tworzenia NMT. Zaawansowanym użytkownikom daje możliwość zmiany parametrów interpolacyjnych. Dla mniej zaawansowanych użytkowników są one dobierane automatycznie przed rozpoczęciem interpolacji. NMT tworzony jest w postaci siatki GRID. Podczas obliczania objętości jest możliwość wyboru górnej (Upper Surface) oraz dolnej (Lower Surface) powierzchni jako:

- górna i dolna powierzchnia jako utworzona wcześniej siatka GRID,
- jedna z powierzchni jako siatka GRID, druga jako płaszczyzna o stałej wysokości,
- jedna powierzchnia jako siatka GRID, druga jako inny model.

Aplikacja nastawiona jest na graficzną wizualizację danych. Zatem utworzone modele można w różnoraki sposób przedstawiać, edytować, tworzyć prezentację. Stworzone NMT dla danych wejściowych przedstawione zostały na rys. 1.

Obliczanie objętości w programie C-GEO v8

Wśród najważniejszych cech oprogramowania C-GEO wymienić można [13]:

- współpraca z tachymetrami, niwelatorami kodowymi, kontrolerami GPS,
- kodowywanie najważniejszych zadań obliczeniowych spotykanych w geodezji, nieograniczona baza współrzędnych geodezyjnych z bazą szkiców geodezyjnych,
- zintegrowana mapa numeryczna z bazą współrzędnych i modułami obliczeniowymi,
- tworzenie i obsługa własnych baz danych SQL powiązanych z obiektami na mapie,
- eksplorator projektów.

W programie C-GEO istnieje możliwość korzystania z dwóch metod tworzenia numerycznego modelu terenu. Poprzez siatkę kwadratów (GRID) lub siatkę trójkątów (TIN). Przy wykorzystaniu siatki kwadratów, jest możliwość wyboru funkcji „sklejanej” lub funkcji „odwrotności odległości do potęgi”. Pierwsza z nich określana jest jako jedna z lepszych metod interpolacyjnych dla terenu o niezbyt skomplikowanej rzeźbie terenu. Siatka tworzona jest na podstawie punktów pomiarowych, które sąsiadują z węzłem, natomiast ich liczba określana jest przez użytkownika. Funkcja „sklejana” realizuje ideę interpolacji lokalnej wielomianowej niskiego stopnia z połączeniem (sklejeniem) poszczególnych wielomianów lokalnych [13]. Natomiast metoda „odwrotności odległości do potęgi” bazuje na założeniu, że wartość cechy badanej w danym punkcie jest zależna od wartości tej cechy w najbliższych punktach bazowych. Wartości mierzone w odległych punktach bazowych mają znaczenie mniejsze lub w ogóle go nie mają. Siatka trójkątów tworzy model triangulacyjny. Powierzchnia podzielona jest na trójkąty, w których wierzchołki to punkty wysokościowe. Możliwa jest modyfika-

cja połączeń pomiędzy wierzchołkami trójkątów. Poprzez wykorzystanie tej metody można dokładnie wyznaczyć objętości brył regularnych powstałych w wyniku prac budowlanych (nasypy, wykopy). W takim przypadku wykorzystanie funkcji sklejanych mogłoby spowodować nadmierne uproszczenie w NMT.

Można dokonać zadeklarowania rozmiaru boku kwadratu przy tworzeniu NMT za pomocą siatki GRID. Zmiana wielkości boku siatki wydłuża lub skraca proces obliczeniowy. Jednak należy zauważyć, że zmniejszając bok siatki użytkownik otrzymuje dokładniej stworzony NMT, a co za tym idzie dokładniejszy wynik przy obliczaniu objętości. Pozytywną cechą programu jest możliwość tworzenia linii szkieletowych (linii nieciągłości) podczas generowania NMT. Po stworzeniu NMT program umożliwia obliczenie objętości w odniesieniu do:

- płaszczyzny poziomej na podstawie podanej wysokości,
- innego stworzonego NMT,
- określonej płaszczyzny.

W przeciwieństwie do innych aplikacji program umożliwi obliczenie objętości pomiędzy przekrojami trasy. Wyniki obliczeń zapisywane są w raporcie z informacjami o objętości (z po-

działem na nasypy i wykopy), powierzchni zajmowanej przez poszczególne obszary, a także współrzędne punktów wchodzące w skład obszaru objętego pracami związanymi z obliczeniem objętości i współrzędnych granicy tego obszaru.

Obliczanie objętości w programie MicroStation v8i (nakładka InRoads)

Program MicroStation to aplikacja amerykańskiej firmy Bentley System. Aplikacja ta wspiera projektowanie 2D oraz 3D, a także modelowanie informacji. Program przeznaczony w szczególności do stosowania w architekturze i w geodezji, z ukierunkowaniem na infrastrukturę transportu. Oprogramowanie to jest wydajne w modelowaniu, generowaniu rysunków oraz przy tworzeniu map. Głównymi zaletami omawianego oprogramowania są [14]:

- dojrzała, innowacyjna platforma,
- sprawdzony, stabilny oraz wydajny produkt CAD,
- narzędzia 2D do kreślenia oraz tworzenia rysunków,
- narzędzia 3D do modelowania oraz analizy.

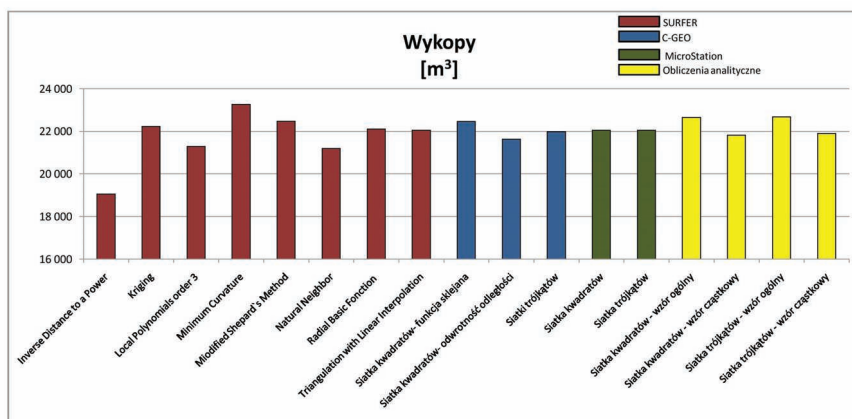
Nakładka InRoads programu MicroStation v8i

Tab. 2. Wartość parametrów dla poszczególnych metod obliczeń poddanej próbkce jednolitych danych

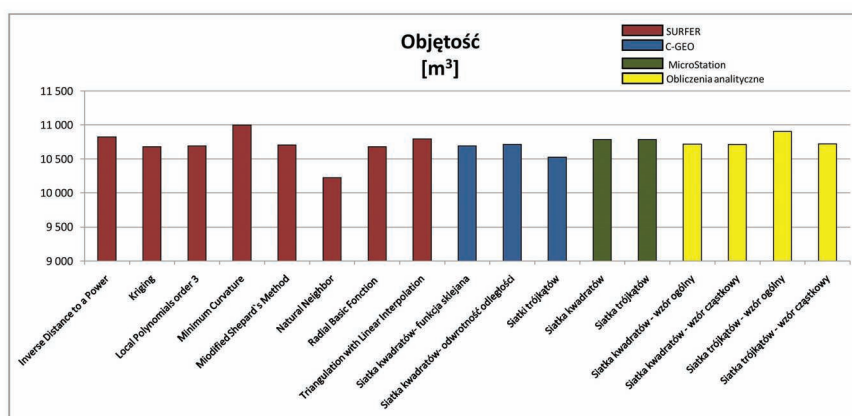
| Metoda / Parametr | Inverse Distance to a Power | Kriging | Local Polynomial | Minimum Curvature | Modified Shepard's Method | Natural Neighbor | Radial Basis Function | Triangulation with Linear Interpolation |
|------------------------|-----------------------------|---------|------------------|-------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---|
| Wartość średnia błędów | -0.052 | 0.002 | 0.001 | 0.257 | 0.054 | 0.021 | 0.004 | -0.007 |
| Odchylenie standardowe | 1.658 | 0.834 | 1.002 | 1.691 | 1.036 | 0.921 | 0.820 | 0.925 |
| Wariancja | 2.748 | 0.696 | 1.004 | 2.860 | 1.074 | 0.848 | 0.672 | 0.855 |

Tab. 3. Tabelaryczne zestawienie wyników w zależności od aplikacji oraz zastosowanej metody obliczeń mas ziemnych

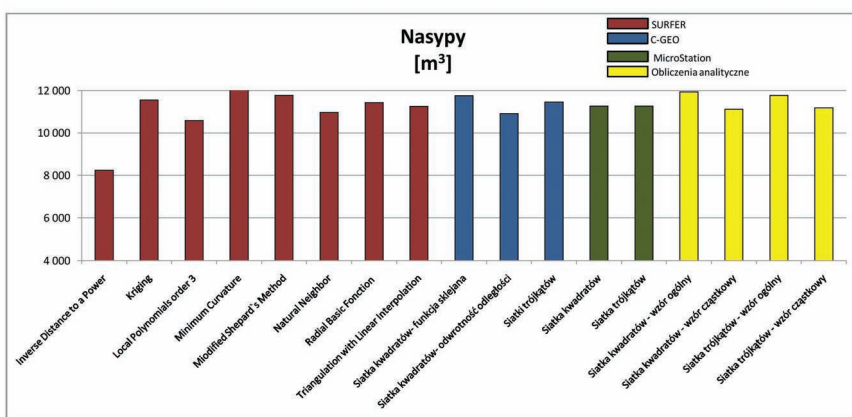
| Program | Metoda | Nasyp | Wykop | Objętość |
|---------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | | [m3] | [m3] | [m3] |
| SURFER v9 | Inverse Distance to a Power | 8 237,10 | 19 062,57 | 10 825,47 |
| | Kriging | 11 551,71 | 22 232,93 | 10 681,22 |
| | Local Polynomials order 3 | 10 593,79 | 21 288,16 | 10 694,37 |
| | Minimum Curvature | 12 267,07 | 23 267,94 | 11 000,87 |
| | Modified Shepard's Method | 11 769,17 | 22 472,39 | 10 703,22 |
| | Natural Neighbor | 10 972,04 | 21 194,67 | 10 222,63 |
| | Radial Basic Function | 11 430,33 | 22 108,27 | 10 677,94 |
| | Triangulation with Linear Interpolation | 11 259,83 | 22 054,30 | 10 794,47 |
| C-GEO v8 | Siatka kwadratów - funkcja sklejana | 11 766,01 | 22 460,50 | 10 694,49 |
| | Siatka kwadratów - odwrotność odległości | 10 916,36 | 21 630,47 | 10 714,11 |
| | Siatki trójkątów | 11 454,39 | 21 981,64 | 10 527,25 |
| MicroStation v8i | Siatka kwadratów | 11 270,51 | 22 056,13 | 10 785,62 |
| | Siatka trójkątów | 11 271,21 | 22 056,99 | 10 785,78 |
| Obliczenia manualne | Siatka kwadratów - wzór ogólny | 11 937,53 | 22 656,83 | 10 719,30 |
| | Siatka kwadratów - wzór cząstkowy | 11 113,94 | 21 827,59 | 10 713,65 |
| | Siatka trójkątów - wzór ogólny | 11 777,07 | 22 683,50 | 10 906,43 |
| | Siatka trójkątów - wzór cząstkowy | 11 190,34 | 21 911,31 | 10 720,97 |



3. Wartość wykopów w zależności od zastosowanej metody



4. Ostateczna wartość objętości w zależności od zastosowanej metody



2. Wartość nasyпów w zależności od zastosowanej metody

w swojej ofercie posiada możliwość obliczania objętości za pomocą siatki kwadratów oraz siatki trójkątów. Jednak w przeciwieństwie do wcześniej omawianych aplikacji do obliczenia objętości konieczne jest stworzenie osobnych powierzchni. Jedną z tych powierzchni jest powierzchnią terenu, która podlega obliczeniu objętości, natomiast druga stworzy powierzchnię odniesienia. Jest to dodatkowo utrudnienie, gdy użytkownik potrzebuje obliczyć objętość od zadanej rzędnej terenu. Po wprowadzeniu danych program umożliwia wyświetlanie między innymi granicy obszaru, siatki trójkątów, siatki kwadratów, a także wygenerowanej mapy warstwicowej o zadanym cięciu. Użytkownik w sposób ciągły może otrzymywać informacje o wysokości dowolnego punktu na NMT poprzez polece-

nia „Tracking”. MicroStation posiada możliwość wprowadzania linii nieciągłości. Program automatycznie łączy punkty tworząc siatkę, w której w sposób ręczny możliwa jest modyfikacja połączeń pomiędzy punktami.

Opcją, która wyróżnia ten program jest możliwość korzystania z współczynnika pulchności wydobywanego i składowanego materiału. Domyślny współczynnik wynosi 1. Jeśli masy ziemne ulegają skurczeniu podczas składowania lub wydobywania, współczynnik ten jest mniejszy od 1. W przypadku gdy ulegają one pulchnieniu (zwiększenie objętości) współczynnik jest odpowiednio większy od 1. Program umożliwia ustawienie wielkości boku kwadratu przy korzystaniu z opcji obliczania objętości za pomocą siatki GRID. MicroStation generuje raport z procesu obliczeniowego z

informacją o obliczonej objętości a także podział na wkopy i nasypy. InRoads to jedna z najbardziej popularnych nakładek wykorzystywanych w programie MicroStation. Wygenerowany NMT umożliwia przedstawienie m.in.:

- granic,
- punktów wykorzystanych do stworzenia NMT,
- linii nieciągłości,
- warstwic,
- siatki kwadratów,
- siatki trójkątów,
- barwną mapę wysokości terenu,
- wektorów pochyleń.

Analiza i porównanie metod

W regulacjach prawnych – krajowych, zagadnieniu dotyczącym obliczania objętości mas ziemnych i materiałów sypkich nie poświęca się zbyt wiele uwagi. Regulacje dotyczące poruszanego tematu to w szczególności:

1. Instrukcja Geodezyjna Resortu Przemysłu Ciężkiego, załącznik nr 8: Wytyczne wykonania geodezyjnych pomiarów zakładów przemysłowych [5]. Określa dopuszczalne wartości błędów względnego, które wynoszą odpowiednio:

- 3% - dla surowców hutniczych,
- 5% - dla odpadów przemysłowych.

2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej [4]. W tym akcie większą uwagę przykładają się do wielkości materiału, a nie na jego rodzaj, jak w przypadku pozycji [5]. Błąd względny pomiaru objętości zwałowisk nadkładu oraz składowisk urobku nie powinien przekraczać dla objętości:

- do 20 tys. m³ – 4% objętości,
- ponad 20 do 50 tys. m³ – 3% objętości,
- ponad 50 do 200 tys. m³ – 2% objętości,
- ponad 200 tys. m³ – 1% objętości.

Analiza porównawcza obejmowała jedną próbkę danych podczas obliczeń we wszystkich programach, obejmujących 135 punktów (współrzędne X, Y, H) tworzących siatkę kwadratów. W zestawieniach przedstawionych w tabeli 3 i 4, zawarto również wyniki obliczeń manualnych. Tabela 3 prezentuje wyniki prac z podziałem na nasypy oraz wykopy. Dodatkowo na rysunkach 2-4 w celu wizualizacji rezultatów zaprezentowano wyniki w postaci wykresów.

Analiza objęła również ocenę ze względu na wartości dopuszczalne przez regulacje prawne. Obliczenia błędów względnego wykonano w odniesieniu do średniej arytmetycznej obliczonej z wszystkich metod. Wyniosła ona 10 715.75 m³. W tabeli 4 zostały przedstawione wyniki.

Wnioski

Analiza i porównanie aplikacji komputerowych umożliwiających wykonanie obliczeń mas

Tab. 4. Analiza w zakresie regulacji prawnych

| Program | Metoda | Objętość | Błąd względny |
|---------------------|---|-----------|---------------|
| | | [m3] | [%] |
| SURFER v9 | Inverse Distance to a Power | 10 825,47 | 1,02 |
| | Kriging | 10 681,22 | 0,32 |
| | Local polynomials | 10 694,37 | 0,20 |
| | Minimum Curvature | 11 000,87 | 2,66 |
| | Modified Shepard's Method | 10 703,22 | 0,12 |
| | Natural Neighbor | 10 222,63 | 4,60 |
| | Radial Basic Function | 10 677,94 | 0,35 |
| | Triangulation with linear interpolation | 10 794,47 | 0,73 |
| C-GEO v8 | Siatka kwadratów- funkcja sklejana | 10 694,49 | 0,20 |
| | Siatka kwadratów- odwrotność odległości | 10 714,11 | 0,02 |
| | Siatki trójkątów | 10 527,25 | 1,76 |
| MicroStation v8i | Siatka kwadratów | 10 785,62 | 0,65 |
| | Siatka trójkątów | 10 785,78 | 0,65 |
| Obliczenia manualne | Siatka kwadratów - wzór ogólny | 10 719,30 | 0,03 |
| | Siatka kwadratów - wzór cząstkowy | 10 713,65 | 0,02 |
| | Siatka trójkątów - wzór ogólny | 10 906,43 | 1,78 |
| | Siatka trójkątów - wzór cząstkowy | 10 720,97 | 0,05 |
| Średnia | | 10 715,75 | |

ziemnych i materiałów sypkich poprzez posiadanie różnych metod, wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na dwie metody zasadniczo odbiegające od pozostałych wyników:

- Minimum Curvature,
- Natural Neighbor.

Metoda Natural Neighbor, przekracza dopuszczalny błąd względny zawarty w przepisach [4], [5]. Jednak zdecydowana większość metod wykazała porównywalne wartości, z błędem mieszczącym się w granicach dopuszczalnych. Wynik najbardziej odbiegający został uzyskany w programie SURFER (metoda Natural Neighbor). Wynika to z faktu, że metoda ta powinna być stosowana dla punktów nierównomiernie rozłożonych. W metodzie Inverse Distance to a Power (Odwrotności odległości do potęgi) programu SURFER ostateczna wartość objętości wprowadzonych danych nie odbiega zasadniczo od pozostałych, to dzięki zastosowaniu rozbicia na nasypy i wykopy. Widać jak bardzo wyniki różnią się od innych. Ma na to wpływ zastosowanie odwrotności odległości do potęgi 2. Zastosowanie wyższej potęgi zmniejsza te rozbieżności. Wywnioskować można z tego, że źle dobrane parametry w programie SURFER zaburzają otrzymywane wyniki. Są one zazwyczaj dobierane automatycznie, lecz użytkownik ma możliwość ich zmian, lecz należy uważać na nie aby nie zwiększyć błędów wynikających z użycia nieodpowiednich parametrów. Program C-GEO dla siatki kwadratów oraz siatki trójkątów daje odbiegające od siebie wartości. Ma na to wpływ zastosowanie próbki danych równomiernie rozłożonych. Przebieg warstw w istotny sposób różni się w obu metodach wypróbowanych w programie. Metodą najbardziej zbliżoną do średniej arytmetycznej jest metoda siatki kwadratów – odwrotność odległości programu C-GEO. Chociaż dane wprowadzane do każdego programu były identyczne, to wyniki uzyskane różnią się od siebie. Powodem tego jest fakt, że każda aplikacja korzysta z algorytmów tworzących modele zbliżone do danej powierzchni, lecz korzysta z różnych metod i algorytmów. Największą ofertę tych metod ma program SURFER, lecz w większości z nich wymagana jest od użytkownika wiedzy na ich temat.

Jeśli pod uwagę brać możliwości graficzne wszystkich omawianych aplikacji, zdecydowanie najlepiej prezentuje się program SURFER. Posiada możliwość tworzenia map warstwowych, wizualizacji 3D, map wektorowych, itp. Program C-GEO, który jest w pełni programem dla zastosowań geodezyjnych, prezentuje się dobrze zarówno pod względem obliczeniowym oraz wizualizacji. Nie podjęto się wskazania najlepszej metody i oprogramowania do obliczania objętości, gdyż są one wykorzystywane dla różnych powierzchni. Niektóre metody lepiej radzą sobie z równomiernie rozłożonymi punktami, inne zaś są dobre dla nierównomiernie ułożonych punktów. Duży wpływ na wynik ma także gęstość punktów. Dlatego korzystając z programów do oblicza-

nia objętości użytkownik powinien posiadać niezbędną wiedzę, aby korzystać z metod obliczeniowych najlepszych dla powierzchni objętej pomiarowi.

Aktualnie, oprócz samej mapy sytuacyjno - wysokościowej, mapy do celów projektowych, biura projektowe składają zapotrzebowanie u zespołów geodezyjnych na opracowanie modeli terenu w postaci numerycznej (NMT). Jednak należy posiadać świadomość występujących rozbieżności w zależności od zastosowanej aplikacji komputerowej oraz towarzyszącej jej metodzie. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE).
- [2] Decyzja Nr 1692/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 czerwca 1996 r. w sprawie wspólnotowych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej (Dz. Urz. UE z 1996 r. L 228, str. 1, z późn. zm.).
- [3] Ustawa z dnia 4 marca 2010 r. o infrastrukturze informacji przestrzennej. [Dz.U. 2010 nr 76 poz. 489].
- [4] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej, Dz.U. 2011 nr 291 poz. 1713.
- [5] Instrukcja Geodezyjna Resortu Przemysłu Ciężkiego, załącznik nr 8: Wytyczne wykonania geodezyjnych pomiarów zakładów przemysłowych, Ministerstwo przemysłu ciężkiego, Wydawnictwa Przemysłu Ma-

- szynowego „WEMA”, Warszawa, 1976
- [6] Galon Z. Surfer Podręcznik użytkownika; Gambit Centrum Oprogramowania i Szkoleń sp. z o.o.; Kraków 2009.
- [7] Gaździcki J. Systemy informacji przestrzennej; Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych; Warszawa 1990.
- [8] Kampczyk A. Opracowanie map do celów projektowych w aspekcie realizacji inwestycji. The preparation of maps to project aims in aspect of realization of investment. TTS. Technika Transportu Szybowego. 2015 R. 22 [nr] 3, s. 40–47.
- [9] Kampczyk A. Geodäsie im Investitionsbauprozess auf den Bahngeländen in Polen. Surveying in construction investment process in the areas of railway in Poland. Bautechnik. 2014 Jg. 91 H. 6, s. 409–413.
- [10] Wróbel A., Mierzwa W. Problemy fotogrametrycznego określania urobku w kopalniach surowców skalnych. Zeszyty Naukowe AGH Kraków, Nr 998, Geodezja z. 84, s. 183 – 190, Kraków 1984.
- [11] Ackermann F.; Technique and strategies for DEM generation; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 1996, s. 135-141.
- [12] http://www.izdebski.edu.pl/kategorie/SIT/WykladSIT_10.pdf. Dane na dzień: 21.07.2015 r. godz. 17.05
- [13] <http://softline.xgeo.pl/index.php/oferta/program-c-geo-pod-windows/opis-programu-c-geo>. Dane na dzień: 28.07.2015 r. godz. 17.15
- [14] <http://www.bentley.com/pl-PL/Products/microstation+product+line/>. Dane na dzień 30.07.2015 godz. 16.23