



Piotr Gołuch

**NUMERYCZNY MODEL TERENU, NUMERYCZNY MODEL
POKRYCIA TERENU I ORTOFOTOMAPA JAKO ŹRÓDŁO
DANYCH DLA PRZEPROWADZENIA MODELOWANIA
HYDRODYNAMICZNEGO**

**DIGITAL TERRAIN MODEL, DIGITAL TERRAIN'S COVER
MODEL AND DIGITAL ORTHOPHOTO AS SOURCES DATA
TO HYDRODYNAMIC MODELING**

*Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Katedra Geodezji i Fotogrametrii
Agricultural University of Wrocław, Department of Geodesy and Photogrammetry*

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono sposób wykorzystania produktów geodezyjno-kartograficzno-fotogrametrycznych, jakimi są Numeryczny Model Terenu (NMT), Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMP) i ortofotomapa, do opisu cech hydraulicznych doliny rzeki.

Podstawowym sprzętem wykorzystanym do budowy NMT, NMP i tworzenia ortofotomapy była fotogrametryczna stacja cyfrowa *ImageStation ZIV*.

NMT posłużył do zdefiniowania geometrii obszaru przepływu wody w dwuwymiarowym modelu hydrodynamicznym *RMA2* z pakietu *SMS (Surface-water Modeling System)*, zaś ortofotomapa i NMP wykorzystano do wyznaczenia obszarów form użytkowania terenu – z formami tymi związane są współczynniki hydrologicznej szorstkości terenu.

SŁOWA KLUCZOWE: NMT, Numeryczny Model Rzeźby Terenu, Numeryczny Model Pokrycia Terenu, fotogrametria cyfrowa, ortofotomapa, dwuwymiarowe modelowanie hydrodynamiczne

WSTĘP

Przepływ wody w rzekach to proces złożony, w swej naturze trójwymiarowy, zmienny w czasie i przestrzeni – równocześnie jest jednym z ważniejszych zagadnień w hydromechanice i hydraulice. Aby opisać tę trudną i złożoną rzeczywistość stosuje się modele matematyczne. W wielu pracach inżynierskich wystarcza znajomość jedynie niektórych średnich wartości przepływu, dlatego wykorzystuje się modele matematyczne, które przedstawiają stan rzeczy w sposób uproszczony. W publikacjach (Przedwojski, 1998; Radczuk i in., 2001) zaprezentowano ogólną ideę powszechnie stosowanych matematycznych modeli hydraulicznych (model jednowymiarowy, model dwuwymiarowy w planie, model trójwymiarowy).

Opis ukształtowania doliny rzeki jest zasadniczym elementem w modelowaniu hydraulicznym. W zależności od zastosowanego modelu matematycznego geometrię obszaru, przez który przepływa woda, określają:

- w modelach jednowymiarowych przekroje poprzeczne; podaje się miarę bieżącą (D) i rzędną (H) punktów oraz położenie przekroju w kilometrze biegu rzeki;
- w modelach dwu- i trójwymiarowych punkty rozproszone, dla których znamy współrzędne XYH.

Podstawową zasadą powinno być, aby dane, opisujące geometrię obszaru przepływu wody, wykorzystywane do modelowania, wiernie odzwierciedlały ukształtowanie (poprzeczne lub powierzchniowe) terenu. Informacje o geometrii doliny rzeki można zgromadzić na podstawie następujących technologii pomiaru:

- geodezyjnej (bezpośredni pomiar w terenie),
- fotogrametrycznej (pomiar na modelu stereoskopowym lub metoda skaningu laserowego),
- kartograficznej (digitalizacja istniejących map).

Dane te są również ujęte w Numerycznym Modelu Rzeźby Terenu (NMT).

W ostatnim czasie w Polsce prowadzone są prace związane z tworzeniem Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu. Jest to podyktowane zapotrzebowaniem na tego rodzaju produkt geodezyjny. Znajomość NMT jest wręcz niezbędna w wielu dziedzinach życia gospodarczego i społecznego. Powódź z lipca 1997 roku wykazała oraz uświadomiła wielu osobom, jak niedostatecznie jesteśmy przygotowani do zapobiegania tego rodzaju klęskom żywiołowym. Ogromne zniszczenia były m.in. skutkiem braku dla obszaru Polski danych odnośnie rzeźby terenu, w postaci numerycznej. Od września 1997 roku, po katastrofalnej powodzi, Główny Urząd Geodezji i Kartografii zintensyfikował prace nad tworzeniem NMT dla obszaru całego kraju. Z inicjatywy Wiceprezesa GUGiK J. Albina powołany został zespół ekspertów, pod kierownictwem prof. Z. Adamczewskiego. Zadaniem tego zespołu było opracowanie programu budowy NMT dla całej Polski (Albin, 1998).

Wykonawcami numerycznego modelu rzeźby terenu są fotogrametry i geodeci. Do głównych użytkowników NMT należą m.in. hydrołodzy i hydrotechnicy wykonujący modelowanie hydrauliczne. Specjaliści ci są zarazem najbardziej wymagającymi użytkownikami, jeśli chodzi o dokładność NMT (poza geodetami i fotogrametrami), gdyż dla nich ważnym jest określenie konfiguracji rzeźby terenu z dokładnością do kilku decymetrów, szczególnie dla obszarów narażonych na działanie fali powodziowej (Baranowski, 1998).

Technologia budowania numerycznego modelu rzeźby terenu oraz ocena jego dokładności to zagadnienia opisane w literaturze (m.in. Ackermann, 1996; Flotron i Koelbl, 2000; Kurczyński, 1998). Jest to zagadnienie aktualne, szczególnie w kontekście bieżąco realizowanych w naszym kraju prac w zakresie wykorzystania NMT w symulacjach przepływu wody w dolinie rzeki.

Zasadniczym wynikiem cyfrowego przetworzenia zdjęć pomiarowych jest ortofotomapa (Kaczyński i in., 1999). W procesie ortorektyfikacji, na zeskanowanym zdjęciu lotniczym, eliminowane są zniekształcenia geometryczne spowodowane kątem nachylenia zdjęcia i deniwelacją terenu. Utworzony ortoobraz jest kartometryczną informacją o terenie, aktualną w dacie wykonania zdjęcia.

Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMP) jest to model różnic wysokości pomiędzy modelem powierzchni, rozpiętym po elementach pokrycia terenu (np. po wierzchołkach drzew w obszarze leśnym) a numerycznym modelem rzeźby terenu.

W pracy zaproponowano wykorzystanie NMT, NMP oraz ortofotomapy (produkty geodezyjno-kartograficzno-fotogrametryczne) do opisu hydraulicznych cech doliny rzeki. NMT posłużył do zdefiniowania geometrii obszaru przepływu wody w dwuwymiarowym modelu hydrodynamicznym, zaś ortofotomapa i NMP wykorzystano do określenia obszarów form użytkowania terenu – z formami tymi związane są współczynniki hydrologicznej szorstkości terenu.

OBIEKT, MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Obiektem, na którym przeprowadzono badania (Gołuch, 2002A; Gołuch, 2002B), jest środkowy odcinek biegu rzeki Odry (fragment doliny rzeki poniżej Wrocławia, pomiędzy stopniem wodnym Brzeg Dolny a budowanym stopniem wodnym Malczyce) – rysunek 1.

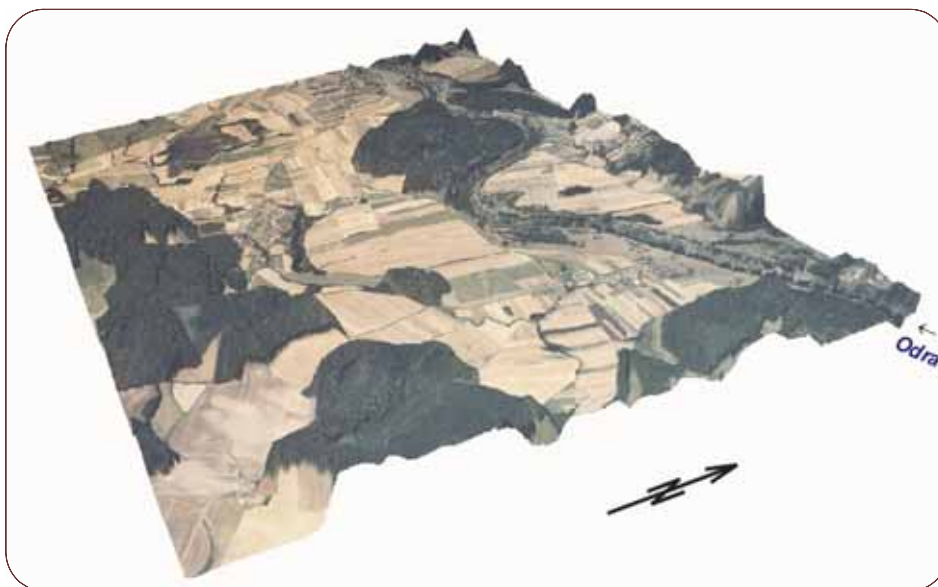
W celu przeprowadzenia badań zgromadzono następujące materiały:

- Fotogrametryczne zdjęcia lotnicze w skali 1:26 000 wykonane w ramach programu PHARE w sierpniu 1996 r., kamerą RC20, przy średniej wysokości fotografowania 4000 m. Diapozytywy zdjęć zeskanowano w CODGiK w Warszawie fotogrametrycznym skanerem PhotoScan TD firmy Z/I Imaging w formacie RGB z rozdzielczością 14 μm .
- Fotopunkty, których położenie wyznaczono techniką GPS.
- Zdjęcia nie miały sygnalizowanych i wyznaczanych fotopunktów, dlatego też wybrano 12 fotopunktów naturalnych. Pomiar przeprowadził zespół pracowników Katedry Geodezji i Fotogrametrii AR we Wrocławiu odbiornikami będącymi w posiadaniu Katedry. Średni błąd pomiaru fotopunktu wyniósł $mX = mY = mZ = \pm 0.12$ m.
- Mapy sytuacyjno-wysokościowe w skali 1:2 000 sporządzone w ramach prac projektowych pod stopień wodny Malczyce. Są to mapy o podwyższonej dokładności wysokościowej – przyjęte zasadnicze cięcie warstwicowe wynosi 1.0 m, pomocnicze -0.5 m i uzupełniające -0.25 m. Punkty terenowe, tzw. „koty”, są pomierzone i podane na mapie z dokładnością do centymetra.
- Przekroje dolinowe – obejmujące obszar międzywała (z częścią korytową rzeki); pomiar przeprowadzono w 1996 r. Średnia odległość między przekrojami to 80 m. Pomiarzy lądowe wykonano tachymetrem elektronicznym. Wzdłuż przekroju mierzone były charakterystyczne elementy rzeźby terenu tak, aby według zasad generalizacji błąd wysokości nie przekraczał $\pm 0.15\div 0.20$ m dla naturalnych elementów rzeźby terenu, a ± 0.05 m dla wałów przeciwpowodziowych i ostróg. Sondowanie koryta Odry prowadzono z łódki przy rozciągniętej linie, z zastosowaniem echosondy (dokładność pomiaru głębokości ± 0.10 m). Gęstość pomiaru punktów przeprowadzono co 1 m przy brzegach i co 2 m w części środkowej koryta.

Szczegółowe analizy przeprowadzono w obszarze testowym o powierzchni 0.8 km². Dla tego terenu utworzono numeryczne modele rzeźby terenu różnymi metodami:

wykorzystane zostały wyniki z pomiaru bezpośredniego, przeprowadzono digitalizację map oraz wykonano pomiar metodą fotogrametryczną na stacji cyfrowej.

Podstawowym sprzętem, wykorzystanym podczas realizacji pracy, była fotogrametryczna stacja cyfrowa *ImageStation ZIV*, firmy Z/I Imaging, którą posiadamy w Katedrze Geodezji i Fotogrametrii AR we Wrocławiu. *ImageStation* to jeden z najwyższej zaawansowanych, pod względem technologicznym, fotogrametrycznych systemów profesjonalnie wykorzystywanych w skali światowej.



Rys. 1. Widok w perspektywie na obiekt badawczy (ortoobraz nałożony na NMT)
Fig. 1. The perspective view on the researched object (draped orthophoto over the DTM)

NMT budowano przy wykorzystaniu następującego oprogramowania: *ImageStation DTM Collection* i *ImageStation Match-T* (firmy Z/I Imaging) oraz *MGE Terrain Analyst*, firmy Intergraph. Są to pakiety oprogramowania, wzajemnie się uzupełniające (wszystkie bazują na środowisku graficznym *MicroStation*, firmy Bentley). W programach tych NMT może być:

- tworzony na podstawie elementów graficznych (punktów, linii, powierzchni), które zostały zarejestrowane w środowisku *MicroStation*;
- importowany z innych programów;
- tworzony na podstawie punktów importowanych z pliku tekstowego lub binarnego (XYZ);
- wygenerowany w sposób automatyczny (technologia fotogrametryczna – program *ImageStation Match-T*), a w środowisku *MicroStation* edytowany.

Na początku prac pomiarowych zbudowano „wzorcowy” NMT, który posłużył do wszelkich analiz prowadzonych na pozostałych wygenerowanych modelach terenu.

Do zbudowania „wzorcowego” NMT wykorzystano wyniki prac terenowych (przekroje dolinowe rzeki – część lądowa i wodna), wyniki digitalizacji mapy sytuacyjno-wysokościowej w skali 1:2 000 (punkty oraz linie nieciągłości terenu – wały przeciwpowodziowe, skarpy, ostrogi) – digitalizację przeprowadzono w środowisku *MicroStation* w sposób manualny, na zeskanowanych i skalibrowanych mapach. Uzyskany NMT przyjęto za „wzorcowy”, gdyż został skonstruowany na podstawie danych o wysokiej dokładności.

W następnej kolejności poddano opracowaniu zdjęcia lotnicze w skali 1:26 000:

- przeprowadzono orientację zdjęć: tzn. orientację wewnętrzną i aerotriangulację bloku zdjęć metodą automatyczną (wykorzystano program *ImageStation Match-AT* – błąd średni po wyrównaniu wyniósł $m_0 = \pm 5.8 \mu\text{m}$);
- utworzono 9 numerycznych modeli terenu metodą automatyczną – program *ImageStation Match-T* (z różną wielkością oczka „wtórnej” siatki kwadratów, a także stosując różny stopień wygładzania generowanej powierzchni), a następnie poddano je edycji;
- zbudowano także Numeryczny Model Pokrycia Terenu, jako różnicę pomiędzy numerycznym modelem powierzchni (z elementami pokrycia terenu – źródłowy model wygenerowany metodą automatyczną) a numerycznym modelem rzeźby terenu;
- dokonano ortorektyfikację zdjęć, tworząc ortoobrazy cyfrowe z pikselem o wielkości w terenie 0.5 m (zastosowano oprogramowanie *ImageStation Base Rectifier – ISBR*).

Przeprowadzono także analizę dokładności zbudowanych NMT.

WYNIKI

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie symulacji przepływu wody – wykorzystano w tym celu pakiet programów *Surface-water Modeling System (SMS)* (SMS 2000). *SMS* to platforma dla jedno-, dwu- i trzywymiarowych modeli hydraulicznych. Program ten jest rozwijany przez Laboratorium Środowiskowych Badań Modelowych z Brigham Young University we współpracy z Laboratorium Hydrauliki (placówką badawczą Korpusu Armii Amerykańskiej) i Amerykańską Federalną Administracją Autostrad.

SMS, jako graficzny interfejs, jest środowiskiem dla wielu programów do modelowania hydraulicznego. W niniejszej pracy wykorzystano program *RMA2*, który jest matematycznym, dwuwymiarowym modelem hydrodynamicznym do obliczeń, metodą elementów skończonych, rzędnej zwierciadła wody – H_w i prędkości jej przepływu – v_x i v_y . Model ten utworzony został w *Resource Management Associates (RMA)*, a obecnie jest rozwijany i rozpowszechniany przez *USACE-WES-Hydraulics Laboratory* (główną agencję Korpusu Armii Amerykańskiej, zajmującą się pracami badawczymi z zakresu hydrauliki i hydrodynamiki, a zarazem jedno z największych hydraulicznych laboratoriów na świecie).

Konstrukcję siatki elementów skończonych przeprowadza się w module *Mesh* programu *SMS*. Siatka ta składa się z punktów i elementów (tzw. „oczek”). W pracy punkty tworzące siatkę elementów skończonych importowano z utworzonego wcześniej

NMT – omija się w ten sposób powtórna interpolację wysokości dla tych punktów. Kształt siatki ma, w metodzie elementów skończonych, bardzo duży wpływ na jakość uzyskanego rozwiązania (SMS 2000). Zbudowaną siatkę należy poddać weryfikacji – program *SMS* posiada odpowiednie funkcje przeznaczone do tego celu.

Po przygotowaniu sieci elementów skończonych należy zdefiniować parametry modelu hydrodynamicznego. Wymaganymi informacjami są:

- warunki brzegowe i wejściowe modelu;
- dane dodatkowe: ilość iteracji, kryteria zbieżności obliczeń, sposób rozwiązania (model przepływu ustalony czy nieustalony), określenie czasu obliczeń (interwał i ilość kroków);
- formy użytkownika terenu oraz charakterystyki dla tych form (współczynniki szorstkości).

W pracy formy użytkownika terenu wyznaczono na podstawie ortobrazu wczytanego do *SMS* (rys. 2.). Natomiast wartości charakterystyk dla tych form (współczynniki szorstkości) podano z tabel, dodatkowo posilując się informacjami zawartymi w NMP.

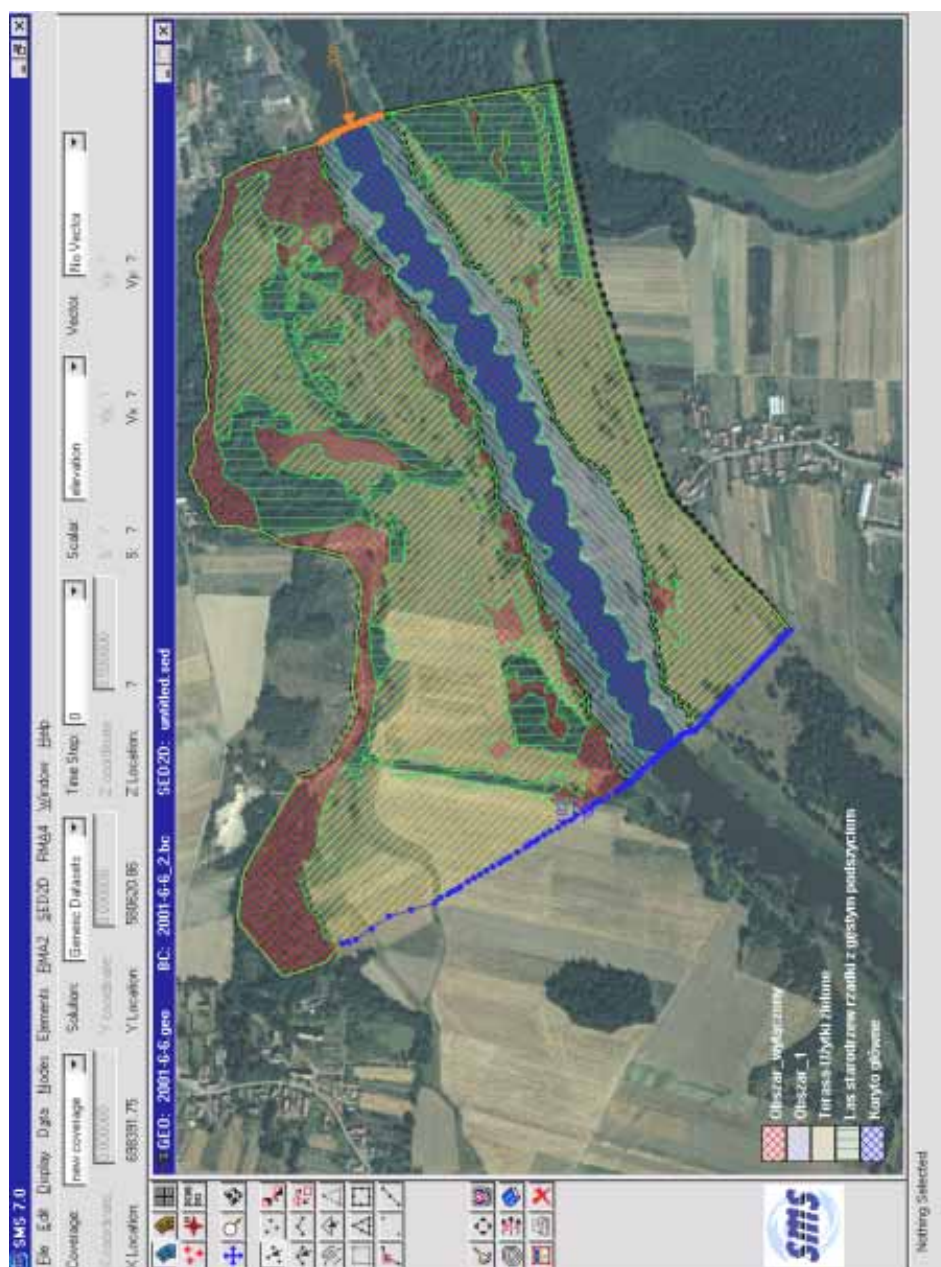
Symulacje przepływu wody wykonano w wielu wariantach. W pracy przedstawiono wyniki dwóch stanów. Pierwszy stan, gdy woda mieści się w korycie (natężenie przepływu $Q = 100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, rzędna zwierciadła wody na wyjściu 100.38 m). Drugi przypadek, gdy woda występuje z koryta i płynie w obszarze międzywała ($Q = 700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, rzędna zwierciadła wody na wyjściu 102.50 m). Przykładem tych stanów są rys. 3. i rys. 4. Przedstawiają one obszary z obliczoną prędkością przepływu wraz z wektorami, mówiącymi o kierunku przepływu wody.

Analizy dokładności wygenerowanych NMT przeprowadzono w programie *MGE Terrain Analyst* – skorzystano z funkcji *Assess Accuracy of Model*, która umożliwia dla podanych punktów kontrolnych wyznaczyć różnice wysokości (raport obliczeń jest zapisywany w pliku na dysku).

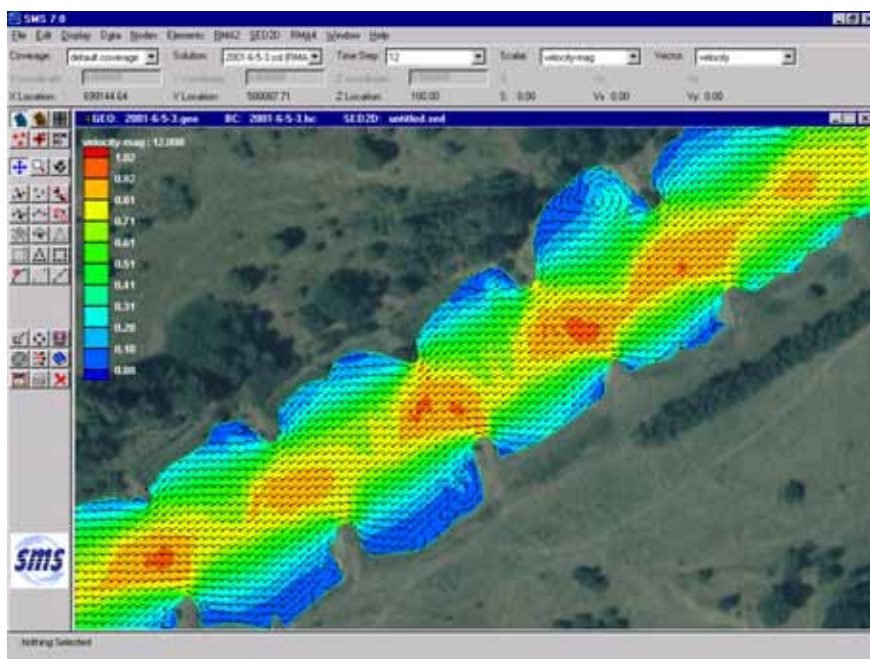
Dokładności NMT, zbudowanych technologią fotogrametryczną ze zdjęć lotniczych w skali 1:26 000, określono na podstawie punktów kontrolnych pozyskanych z modelu „wzorcowego”. Dokładność zbudowanych NMT jest na poziomie $\pm 0.8\div 0.9 \text{ m}$, co stanowi 0.2‰ W (W – wysokość lotu). Najmniejsze błędy uzyskano dla NMT, w których zastosowano filtr wygładzający *medium*, a wielkość oczka wtórnej siatki kwadratów 10 i 15 m.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdza się możliwość bezpośredniego wykorzystania NMT do opisu geometrii obszaru przepływu wody w dwuwymiarowym matematycznym modelu hydrodynamicznym *RMA2*. NMT, zbudowany technologią fotogrametryczną i uzupełniony danymi z pomiaru bezpośredniego (koryto rzeki, wały przeciwpowodziowe) oraz z digitalizacji map, został wykorzystany w module *Mesh* pakietu *SMS*, do budowy siatki elementów skończonych. Tak skonstruowana siatka posłużyła do modelowania prędkości przepływu v_x i v_y oraz rzędnej zwierciadła wody programem *RMA2*.



Rys. 2. Określenie form użytkowania terenu na podstawie ortofotobrazu
 Fig.2. Determination of material types areas on the orthophoto's base



Rys. 3. Obszary prędkości przepływu wody wraz z wektorami prędkości dla rzędnej zwierciadła wody na wyjściu 100.38 m

Fig. 3. The velocity magnitude areas with the velocity vectors – outflow water surface elevation is 100.38 m



Rys. 4. Obszary prędkości przepływu wody wraz z wektorami prędkości dla rzędnej zwierciadła wody na wyjściu 102.50 m

Fig. 4. The velocity magnitude areas with the velocity vectors – outflow water surface elevation is 102.50 m

W pracy wykazano przydatność ortofotomapy i Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu do wyznaczenia obszaru poszczególnych form użytkowania terenu. Ortofotomapa jest aktualnym, w dacie wykonania zdjęć, obrazem terenu posiadającym cechy metryczne. Program SMS ma możliwość wczytania, jako podkładu kartometrycznego, ortofotomapy cyfrowej lub ortoobrazu, na których podstawie można dokładnie określić położenie i wielkość poszczególnych form użytkowania terenu.

PIŚMIENNICTWO

- Ackermann F., 1996: *Techniques and strategies for DEM generation*. Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry, ASPRS, s.135–141.
- Albin J., 1998: *Numeryczny model rzeźby terenu Polski – element krajowego systemu informacji geograficznej GIS*. Biuletyn Informacyjny GUGiK, Warszawa, Tom II/1, s. 3–4.
- Baranowski M., 1998: *Aspekty tworzenia numerycznego modelu rzeźby terenu dla obszaru Polski*. Biuletyn Informacyjny GUGiK, Warszawa, Tom II/1, s. 29–36.
- Flotron A., Koelbl O., 2000: *Precision terrain models for civil engineering*. OEEPE Official Publication No 38, s. 37–134.
- Gołuch P., 2002A: *Generowanie numerycznego modelu terenu dla symulacji przepływu wody w dolinie rzeki*. Praca doktorska, maszynopis, Katedra Geodezji i Fotogrametrii, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, ss. 102.
- Gołuch P., 2002B: *Numeryczny model terenu i ortofotomapa – źródło danych do określenia cech hydraulicznych doliny rzeki*. ACTA SCIENTIARUM POLONORUM, seria Geodesia et Descriptio Terrarum 1 (1–2) 2002, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, s. 33–43.
- Kaczyński R., Ziobro J., Ewiak I., 1999: *Dokładność poszczególnych etapów generowania ortofotomap cyfrowych ze zdjęć PHARE 1:26 000*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Olsztyn, Vol. 9, s. 57–60.
- Kurczyński Z., 1998: *Technologiczne uwarunkowania budowy numerycznego modelu rzeźby terenu*. Biuletyn Informacyjny GUGiK, Warszawa, Tom II/1, s. 10–16.
- Przedwojski B., 1998: *Morfologia rzek i prognozowanie procesów rzecznych*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- Radczyk L., Szymkiewicz R., Jełowicki J., Zyszkowska W., Brun J.F., 2001: *Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego*. Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, Wrocław, ss. 251.
- Surface-water Modeling System (SMS) ver. 7.0., 2000: *Tutorials*. Brigham Young University – Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham.

DIGITAL TERRAIN MODEL, DIGITAL TERRAIN'S COVER MODEL AND DIGITAL ORTHOPHOTO AS SOURCES DATA TO HYDRODYNAMIC MODELING

Summary

In the paper was presented directions for use geodesy-cartography-photogrammetry products, like are Digital Terrain Model (DTM), Digital Terrain's Cover Model and digital orthophoto, to determination of river valley hydraulic characteristics. Digital Photogrammetric Workstation *ImageStation ZIV* was the primary equipment, which was used to generation DTM and creation

digital orthophoto. DTM was used to direct description of geometry of water flow region on the two-dimensional hydrodynamic model *RMA2* from the *SMS* software package – the mesh nodes of model net were imported from DTM. Also it was found that digital orthophoto and Digital Terrain's Cover Model were useful to determination of material types areas, with which roughness values were combined.

KEYWORDS: DTM, Digital Terrain's Cover Model, digital photogrammetry, digital orthophoto

Recenzent: dr hab. Andrzej Świątkiewicz, prof. AR, Akademia Rolnicza, Wrocław