

**NOWA METODA MODELOWANIA POWIERZCHNI TERENU DLA POTRZEB  
ANALIZ I SYMULACJI PRZESTRZENNYCH**

**A NEW METHOD FOR TERRAIN SURFACE MODELING FOR SPATIAL  
ANALYSES AND SIMULATIONS**

**Ireneusz Wyczalek**

Zakład Geodezji, Politechnika Poznańska

SŁOWA KLUCZOWE: Automaty Komórkowe, modelowanie przestrzenne, symulacje przestrzenne

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono ideę i podstawy teoretyczne nowej metody modelowania terenu w oparciu o rozproszone punkty pomiarowe. Metoda wykorzystuje Interaktywne Automaty Komórkowe (IAK) jako narzędzie do sterowania procesem modelowania i wygładzania powierzchni. Pokazano wyniki modelowania wykonanego za pomocą programu realizującego omawianą metodę.

## **1. WPROWADZENIE**

Choć dynamiczny rozwój techniki stworzył nowe horyzonty w zakresie pozyskiwania i przetwarzania masowych danych wysokościowych (Gomez *et al.*, 2005), to wiele aplikacji wciąż bazuje na zbiorach ograniczonych ilościowo, w których rozpoznawalne są niegeometryczne cechy mierzonych punktów. W szczególności są one powszechnie stosowane do analiz i projektowania, w tym także do symulacji zjawisk rozpatrywanych w związku z planowaniem i projektowaniem obiektów inżynierskich. Tradycyjne metody tworzenia numerycznych modeli terenu w oparciu o rozproszone punkty pomiarowe charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem co do formy jak i dokładności (Droy, 2008; Wyczalek, 2009). W większości też nie dają możliwości odrębnego modelowania powierzchni sztucznie uformowanych. Dla potrzeb analiz wodno-gruntowych stosowane są algorytmy dostosowujące model tak, aby można było poprawnie symulować spływ wody (Duke *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2006). Również w programach wspomagających projektowanie 3D używa się różnych metod poprawiających kształt modelu, na przykład poprzez wygładzanie go wielomianami lub funkcjami radialnymi (Pang *et al.*, 2006). Jednocześnie kontynuowane są badania naukowe w celu podniesienia stopnia wiarygodności tworzonego NMT (Hejmanowska *et al.*, 2008). Poprawność ukształtowania powierzchni NMT ma bowiem istotne znaczenie w odniesieniu do jakości wykonywanych analiz lub symulacji zjawisk przestrzennych. Niepoprawnie wyznaczone parametry ekspozycji dają bowiem mylny obraz efektywności upraw lub kierunków spływu wody na danym terenie, zaś niezbyt dokładnie wymodelowana dolina rzeki nie pozwala wiarygodnie ustalić terenów zalewowych (Hejmanowska, 2006).

W pracy zaprezentowano nowe podejście do tworzenia NMT stosujące metodę zbliżoną do stosowanej w tworzeniu mapy warstwicznej, a więc uwzględniającą linie strukturalne, interpolację wzdłuż linii największego spadku, a także wygładzanie powierzchni wewnątrz trójkątów. Istotą proponowanej metody jest algorytm warunkowy, realizowany na rastrowej strukturze NMT w zakresie wynikającym z aktualnego stanu danej komórki modelu oraz jej otoczenia. Zadania tego typu są domeną nowego rodzaju matematyki, jak to określił S. Wolfram (2002) mając na myśli teorię automatów komórkowych. Podstawą działania automatów jest sekwencyjne ustalanie stanu danej komórki takiego, jaki wynika z jej stanu dotychczasowego, a także stanu komórek leżących w jej najbliższym sąsiedztwie. Badacze automatów zauważyli, że takie lokalne zmiany stanów prowadzą do powstawania wzorów, które mogą odzwierciedlać globalny charakter danego zbioru komórek i jego zachowania względem istniejących warunków brzegowych (Wolfram, 2002). Modyfikacja techniki automatów komórkowych dokonana pod kątem generowania numerycznego modelu terenu polega na interakcji automatów z ich otoczeniem, w tym przypadku z odpowiednimi elementami powierzchni NMT. Pojedynczy automat ma umiejętność odczytywania stanu skojarzonych z nim komórek modelu, ale także oddziaływania na nie w taki sposób, by skorygować ich stan. W praktyce przestrzeń NMT jest prostokątną macierzą, której jedynym atrybutem komórek jest wysokość (nad poziomem morza), zatem stan tych komórek wyrażony jest w jednostkach wysokości. Automaty komórkowe są rozciągnięte nad przestrzenią modelu, mają wymiar pokrywający się z komórkami NMT oraz regułę zmian uwzględniającą przede wszystkim stan zaawansowania budowy modelu. Ten „stan zaawansowania” jest realizacją stanu danej komórki rozumianego zgodnie z teorią automatów.

## 2. WYMAGANIA STAWIANE MODELOWI STOSOWANEMU W ANALIZACH WODNO-GRUNTOWYCH

Jedną z najbardziej popularnych dziedzin numerycznych analiz przestrzennych są symulacje spływu wody powierzchniowej, często w powiązaniu z wodami gruntowymi i urządzeniami hydraulicznymi (Duke *et al.*, 2003). Symulacje spływu wody wykonywane są przede wszystkim pod kątem analiz hydro-geologicznych lub hydraulicznych, szczególnie w terenach mniej zasobnych w wodę (Jolly i Rassam, 2009). Modelowanie spływu na rozległych terenach zlewni rzek natrafia na szereg trudności, spośród których pierwsze miejsce zajmują błędy modelu powierzchni terenu. Choć wśród źródeł tych błędów wymienia się pomiary, wstępne opracowanie, przechowywanie i przetwarzanie danych pomiarowych, to realnie największe znaczenie ma sposób wymodelowania powierzchni. Modele generowane z warstw mają często pofalowaną formę i płaskie wierzchołki (Dakowicz i Gold, 2007), NMT utworzone metodą fotogrametryczną obciążone są licznymi lukami spowodowanymi brakiem widoczności, podobnie jak chmury punktów LiDAR. Większe nadzieje pokładane są w rejestracji radarowej, która jednak nadal obciążona jest wieloma utrudnieniami technicznymi (Lantz *et al.*, 2003). W celu zaradzenia większości z wymienionych problemów proponuje się nawet kompilację danych z różnych źródeł (Mrisc, Clegg, Jones, 2005).

Nadal jednak użytkownicy modeli terenu zauważają błędy analiz spowodowanych wadami w nich ukrytymi. Z powodu tychże wad programy do modelowania wody wyposażone są w narzędzia do wypełniania luk w modelach, ścinania nienaturalnych szczytów oraz „wypalania” (zagłębiania) śladów cieków. Rozpatrując te mankamenty można

skonstatować, że w celu uzyskania poprawnego wyniku analiz należy zadbać o to, aby model jak najwierniej odwzorowywał powierzchnię terenu, a w szczególności:

- powinien zawierać wszystkie linie strukturalne – grzbiety i doliny, linie załamania i uskoki oraz granice obszarów płaskich,
- na terenach naturalnych forma powinna mieć płynnie zmieniający się kształt,
- ciekі powinny przebiegać zgodnie z ich naturalnym biegiem,
- na terenach zurbanizowanych powinny być ściśle wydzielone granice obszarów nie przepuszczających wody (dachów, placów, sztucznych boisk),
- pozostała powierzchnia terenu powinna mieć określone warunki retencji i infiltracji,
- jeśli na rozpatrywanym obszarze istnieją urządzenia kanalizacyjne, to i one powinny zostać wskazane na modelu.

Aby te cele uzyskać niezbędna jest terenowa interpretacja posiadanych zbiorów danych, w tym też danych wysokościowych, oraz obrazów terenu.

Mimo niezaprzeczalnych zalet zdalnych metod pomiaru wysokości, nie można do końca zrezygnować z pomiarów bezpośrednich, które nadal są najdokładniejsze a jednocześnie zawierają ważną niekiedy informację semantyczną. Wysokości terenu mierzy się wraz ze szczegółami sytuacyjnymi, które w projektowaniu i planowaniu przestrzennym stanowią niezbędną informację o aktualnym stanie terenu. Pomiary wykonuje się głównie metodami tachimetrii elektronicznej lub nawigacji satelitarnej. W efekcie uzyskuje się zbiór punktów wraz z ich cechami jakościowymi oraz wzajemnymi powiązaniem.

Informacja wysokościowa zawarta w tych danych służy do szczegółowego modelowania terenu. W procesie projektowania obiektów inżynierskich model wykonywany jest zwykle za pomocą procedur zawartych w programie do wspomagania projektowania. Najczęściej jest to reprezentacja TIN, która jest szczególnie użyteczna w programach bazujących na danych wektorowych. Standardowy sposób tworzenia TIN nie uwzględnia linii strukturalnych, dlatego tworzenie modelu wymaga ich wcześniejszej, ręcznej definicji. Często na tym etapie aktywny udział mają geodeci wykonujący pomiary. Model TIN utworzony tym sposobem stanowi zwykle podstawę do analiz spływów wody i projektowania rozwiązań hydraulicznych.

Niekorzystną cechą TIN jest jego surowa, płaskościenna struktura. Korzystając z rastrowych metod i algorytmów analitycznych można podjąć starania, aby tę strukturę uplastyczyć co najmniej tam, gdzie teren ukształtowany jest w sposób naturalny. Stosowane są takie metody wygładzania, które albo bazują na wykorzystaniu z klasycznych rastrowych metod budowy NMT, albo model TIN zaokrąglają przy użyciu funkcji radialnych (Pang *et al.*, 2006). Często przed lub w trakcie wygładzania dokonuje się zagęszczenia siatki trójkątów (Pfeifer 2005). Jak już stwierdzono (Wyczałek, 2009a), do celów inżynierskich nie nadają się modele rastrowe implementowane w systemach informacji geograficznej. Znacznie lepszych wyników należy spodziewać się ze strony drugiej grupy zastosowań, choć i w nich zbyt widoczne są nienaturalne formy wynikające z użycia funkcji geometrycznych. Jako własną propozycję rozwiązania problemu uplastyczniania formy opracowałem algorytm TeMCA. Bazuje on na idei interaktywnych automatów komórkowych (ang. *Interactive Cellular Automata* – ICA), czyli automatów, które zarówno swój stan jak i stan otoczenia zmieniają stosownie do informacji pochodzącej z obu źródeł.

### 3. NOWA METODA MODELOWANIA TERENU

Proponowany tu sposób tworzenia rastrowego NMT zakłada jako źródło danych zbiór pomierzonych punktów terenowych (pikiet), których gęstość i rozmieszczenie obrazują ukształtowanie powierzchni danego terenu. Zakłada się, że wzdłuż linii łączących te punkty teren jest jednostajnie pochylony. Część linii ma szczególny charakter, odzwierciedlający stwierdzone w terenie grzbiety i ciekі lub sztuczne formy ukształtowania terenu (załamania, uskoki, granice powierzchni płaskich).

Tworząc klasyczną mapę warstwicową, po naniesieniu na nią pikiet odtwarza się przebieg tych linii, zaznaczając ich charakter, a pozostałe punkty łączy ze sobą w celu utworzenia siatki trójkątów, starając się wskazać wśród nich linie największego spadku terenu. Na tych liniach wyznacza się drogą interpolacji punkty odpowiadające cięciu warstwicowemu, a następnie łączy się te punkty zachowując następujące warunki:

- warstwice krzyżują się z liniami szkieletowymi pod kątem prostym,
- na liniach nieciągłości bieg warstwic jest przerwany lub ulega widocznemu załamaniu,
- rowy, skarpy i inne powierzchnie płaskie wydziela się granicami i oznacza symbolem powierzchniowym lub pozostawia się puste,
- na pozostałych terenach warstwice bieżną krzywoliniowo a tam, gdzie spadek terenu jest w miarę równomierny – zachowuje się zbliżony kształt warstwic (współkształtność).

W zasadzie żadna z metod generowania numerycznego modelu terenu nie zachowuje powyższych reguł, czego skutkiem jest występowanie znacznych rozbieżności między nimi a modelem powstałym na bazie mapy warstwicowej. Nadal taka mapa stanowi niedościgły wzór do naśladowania przez twórców metod modelowania.

Jako cel prezentowanego rozwiązania postawiono spełnienie powyższych reguł. Użytkoano to w następujący sposób:

- 1) Podczas wczytywania punktów tworzona jest siatka trójkątów typu TIN – według sztywnych reguł określonych dla tej metody;
- 2) Kartograf wskazuje na tej siatce linie szkieletowe (grzbiety lub ciekі), krawędzie lub uskoki, redefiniując w razie potrzeby podział na trójkąty;
- 3) Zgodnie ze swoją wiedzą (pozyskaną z dokumentów pomiarowych) kartograf może określić stopień zmienności formy (do wyboru: ostre, umiarkowane, łagodne lub płaskie załamania)
- 4) Metodą interpolacji liniowej obliczane są wysokości komórek zawierających boki trójkątów;
- 5) Wysokości pozostałych komórek rastrowej struktury modelu wyznacza się wierszami w sposób spełniający powyższe reguły tworzenia mapy warstwicowej (załamania, poziomy, płaskości i płynność formy);
- 6) W celu globalnego uplastycznienia formy dokonuje się operacji wygładzenia modelu w stopniu wskazanym przez kartografa.

Podstawą powyższego algorytmu jest kontrola relacji przestrzennych między sąsiadującymi ze sobą komórkami modelu, mająca na celu ich wzajemne zestrojenie. Z tego też względu jako narzędzie nadzorujące proces formowania NMT użyto wspomniane już interaktywne automaty komórkowe.

### 3.1. Interaktywne automaty komórkowe w zastosowaniu do modelowania terenu

Jako sposób realizacji numerycznego modelu terenu wybrano iteracyjną metodę wygładzania powierzchni wielościanu utworzonego przez trójkąty. Podstawą wygładzania jest zapewnienie ciągłości na granicach trójkątów (równe pierwsze pochodne funkcji po obu stronach krawędzi styku) oraz poziomości terenu na liniach szkieletowych (zerowa druga pochodna). Pozostałe krzywizny powstają wewnątrz trójkątów poprzez płynną zmianę kątów pochylenia kolejnych elementów (komórek) rastra. Automaty opracowane pod kątem realizacji tych zadań mają następującą strukturę:

$$TeMCA = (\alpha, E, S, N, f). \quad (1)$$

gdzie:

- $\alpha$  określa sposób podziału i uporządkowania przestrzeni na  $c$  jednostek siatki rastrowej,
- $E$  jest otoczeniem automatu, w którym budowany jest numeryczny model terenu,
- $S$  obejmuje skończony zbiór możliwych stanów, jakie może przyjąć każda komórka
- $N$  ustala reguły sąsiedztwa, które ma postać ważonego sąsiedztwa von Neumana,
- reguła przejścia  $f: S^m \rightarrow S$ , która działa na dwóch zbiorach danych – stanów automatu oraz wartości komórek NMT.

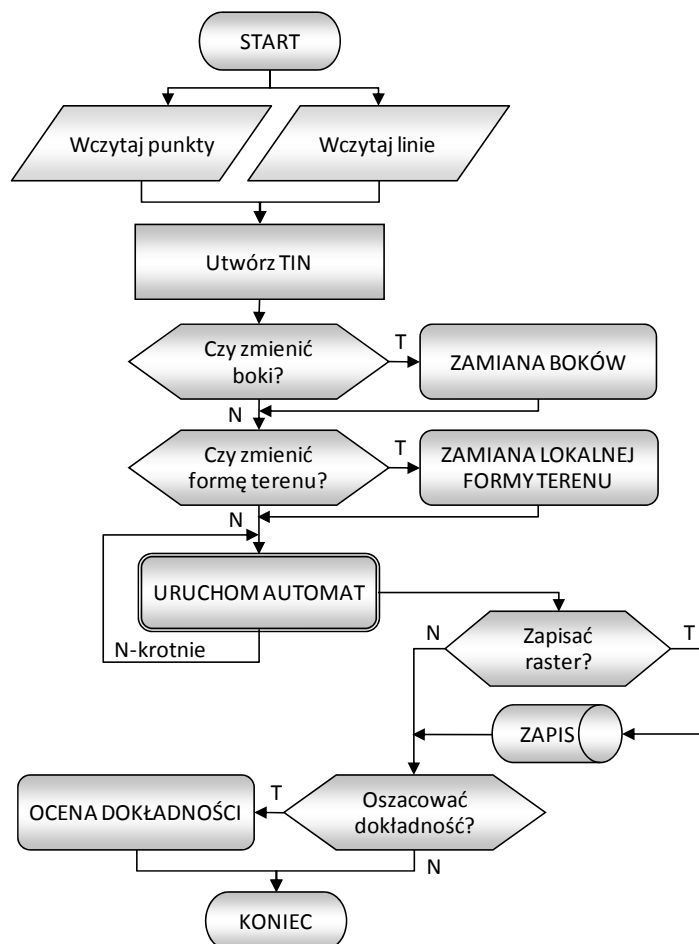
Skrót nazwy automatów, TeMCA, bazuje na angielskim określeniu Terrain Modeling Cellular Automata. Zakłada się, że przestrzeń automatów rozciąga się nad przestrzenią NMT (uznaną przez TeMCA jako otoczenie lub środowisko). Automat potrafi rozpoznać stan środowiska (w zasięgu zdolności oddziaływania) i wpływać na jego zmianę w zakresie określonym przez swój stan. W momencie uruchamiania procesu elementy środowiska  $E$  zawierające piksety i punkty na bokach trójkątów przejmują ich wartości. Podstawowe działanie rozpoznaje stany danej komórki i komórek otaczających i oblicza nowy stan. Ustalony stan komórki stanowi sygnał do wykonania określonego działania matematycznego na NMT. Aby poprawnie wykonać swoje zadanie TeMCA wymaga informacji o przestrzennym rozmieszczeniu pomierzonych punktów terenowych, uzupełnionych w miarę możliwości o charakter punktu oraz precyzję określenia jego wysokości. Ponadto niezbędne są zbiory linii szkieletowych i krawędziowych oraz powierzchni płaskich, a także ich atrybuty i zakres oddziaływania. Zakres działań TeMCA zilustrowano na rysunku 1. Wszystkie opisane wyżej czynności formujące NMT zawarte są w bloku „URUCHOM AUTOMAT”.

W trakcie budowania NMT komórki przyjmują jeden z pięciu stanów. Aby osiągnąć zakładane cele TeMCA ma zdolność do podejmowania decyzji co do przyjęcia określonego stanu. Możliwe są następujące decyzje automatu:

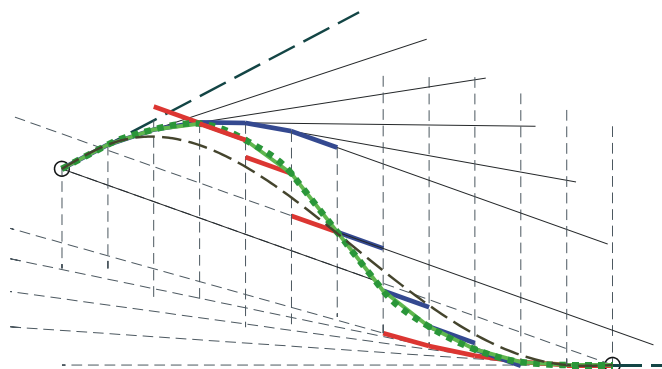
- a) jeśli  $s_{i,j} = 0$  i ( $s_{i-1,j} > 0$  lub  $s_{i+1,j} > 0$ ) to  $s_{i,j} = 1$ ,
- b) jeśli  $s_{i,j} = 0$  i ( $s_{i-1,j} > 0$  i  $s_{i+1,j} > 0$ ) to  $s_{i,j} = 2$ ,
- c) jeśli  $s_{i,j} = 2$  i ( $s_{i-1,j} > 0$  i  $s_{i+1,j} > 0$  i  $s_{i,j-1} > 0$  i  $s_{i,j+1} > 0$ ) to  $s_{i,j} = 3$ ,
- d) jeśli  $s_{i,j} = 3$  i ( $s_{i-1,j} > 2$  i  $s_{i+1,j} > 2$  i  $s_{i,j-1} > 2$  i  $s_{i,j+1} > 2$ ) oraz spełniony jest warunek minimalnego przyrostu wysokości NMT to  $s_{i,j} = 4$ .

Wyznaczanie krzywizny terenu przez kolejne automaty w danym wierszu podobne jest do zasady tworzenia krzywej Beziery, z tą różnicą, że całość odbywa się między komórkami sąsiadującymi bezpośrednio ze sobą a jedynym zewnętrznym parametrem procedury jest spadek terenu. Przebieg i końcowy efekt etapów 1 i 2 przedstawia rysunek 2,

na którym kółka oznaczają punkty o znanych wysokościach, długo-przerywane odcinki – kierunki styczne do terenu w tych punktach, krótko-przerywane linie pionowe wskazują rozmieszczenie kolejnych komórek a linie rozchodzące się promieniście (z lewej strony ciągle a przerywane z prawej) – zmieniające się kąty nachylenia terenu. Etap 1 to kolejne – komórka za komórką – formowanie krzywizny. Przebiega ono równocześnie z prawej i lewej strony i dochodzi do środka odcinka. Odpowiada to opisanej wyżej fazie (a) automatów. W momencie zejścia się dwóch ciągów komórek wyznaczonych różnymi drogami, zaczyna się faza (b) polegająca na uśrednianiu wyników kolejnych obliczeń – do końca odcinka. Efektem tego etapu obliczeń jest krzywa (łamana) oznaczona na rysunku linią ciągłą z nakładającymi się kropkami. Po zakończeniu tej czynności na danym odcinku komórki automatu uzyskują stan „2”, a po sprawdzeniu, zgodnie z czynnością (c), czy wszystkie komórki w otoczeniu mają wyznaczone wysokości – stan „3”. Po osiągnięciu tego stanu następuje proces wygładzania modelu (czynność d).



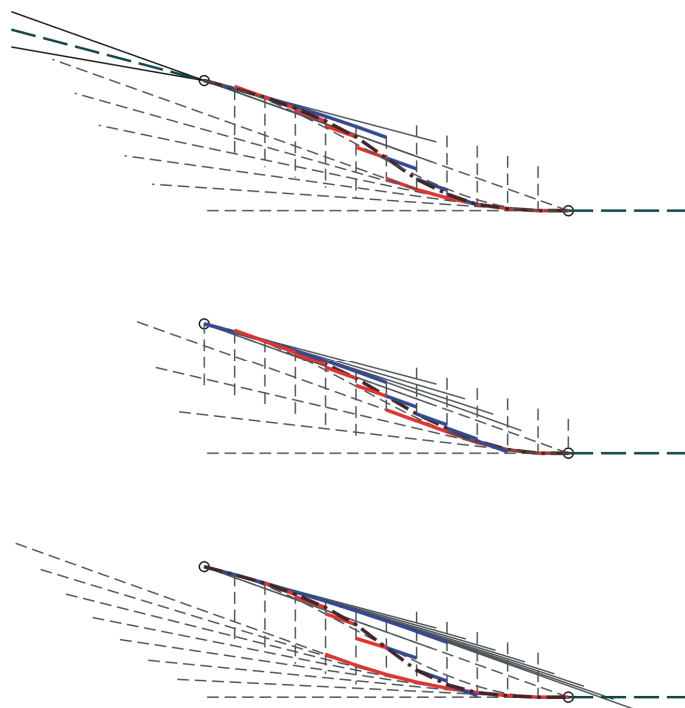
Rys. 1. Ogólny schemat blokowy działania automatu komórkowego modelującego teren



Rys. 2. Sposób modelowania krzywizny terenu między liniami podziału na trójkąty

W fazie (d) oprócz stanu komórki rozpatruje się też zmiany wartości leżącej bezpośrednio pod nią komórki NMT. Odpowiednio mały przyrost między kolejnymi iteracjami stanowi sygnał do zakończenia tej fazy w danej komórce, przypisując jej wartość stanu równą „4”. Funkcja uśredniająca może być wywoływana wielokrotnie, lecz efektem kolejnych iteracji jest spłaszczanie modelu. Ponadto, proces zmian wysokości komórek w kolejnych iteracjach ma charakter malejący, zatem można ustalić kryterium dolnego progu ilościowego lub procentowego zmian, poniżej którego proces uśredniania zostaje zatrzymany (stany komórek AK uzyskują wartość „4”). Ustalenie dwóch wartości progowych – lokalnej i globalnej umożliwia takie pokierowanie procesem obliczeniowym, aby kolejne komórki modelu kończyły samodzielnie swoje przekształcenia albo proces ustanie jednocześnie dla wszystkich komórek będących w trakcie przekształcania. Osiągnięcie stanu „4” przez wszystkie komórki kończy działanie automatu. Warto zwrócić uwagę na fakt, że wartość „4” uzyskują od razu komórki leżące nad pikietami oraz liniami nie ulegającymi modyfikacji, na przykład krawędziami obiektów sztucznie uformowanych, i te w procesie uśredniania pozostają niezmiennie. Stan „4” uzyskują też komórki obejmujące płaskie z definicji sztucznie uformowane powierzchnie. Komórki automatu nad pozostałymi krawędziami trójkątów od razu uzyskują stan „3”, dzięki czemu pozostają niezmiennie aż do momentu uśredniania. Konsekwencją tego jest nieznaczne ugięcie krawędzi styku, co z jednej strony nieco modyfikuje wstępne założenie o jednostajnych spadkach między pikietami, a z drugiej – jeszcze lepiej uplastycznia powierzchnię modelu.

Omawiana procedura posiada jeszcze jeden parametr, który odpowiada za stopień zakrzywienia powierzchni modelu. Opisany jest on liczbą kroków zaginania krzywizny, wyrażoną w funkcji liczby komórek między punktami danymi. Rysunek 3 przedstawia trzy warianty zakrzywania wzdłuż danego boku – wyjściowy, obejmujący 5 kroków, ostry, realizowany w 3 krokach i łagodny – w 7 krokach. Rysunek 3 przedstawia bardziej realistyczną sytuację terenową niż rysunek 2, gdyż pochylenie stycznej do powierzchni terenu w punkcie po lewej (ukośna przerywana linia między dwiema ciągłymi reprezentującymi średnie spadki po obu stronach punktu) jest zbliżone do wyznaczonego spadku terenu. Mocne, niepoprawne merytorycznie, wygięcie przedstawione z lewej strony rysunku 2 miało na celu bardziej czytelne przedstawienie idei kształtowania krzywizny terenu (niż rysunek 3). Prawa strona obu rysunków odpowiada linii cieku (doliny), którą warstwy muszą przecinać pod kątem prostym, a model ma być w tym miejscu poziomy (ilustruje to pozioma przerywana linia).



Rys. 3. Efekt użycia zmiennych parametrów wygięcia powierzchni w zależności od zadeklarowanego typu formy terenowej

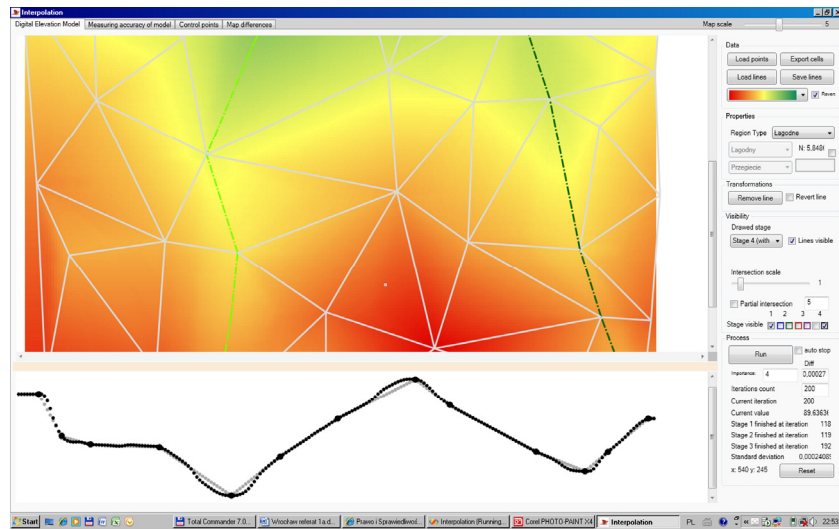
#### 4. PRACE TESTOWE I PORÓWNAWCZE

Implementacja informatyczna przedstawionej wyżej metody umożliwia wykonanie NMT w oparciu o dowolny rozproszony zbiór punktów terenowych. Na rysunku 4 widać model terenu wygenerowany na bazie punktów z pracy (Wyczałek 2009b). Ukazany jest on w oknie wchodzącym w skład interfejsu użytkownika programu TeMCA, którego prawa strona zawiera wszystkie omawiane funkcje, rozszerzone o dobór skali barwnej i inne użyteczne działania. Przekrój u dołu rysunku odnosi się do wskazanego wiersza komórek, ilustrując sposób ukształtowania powierzchni.

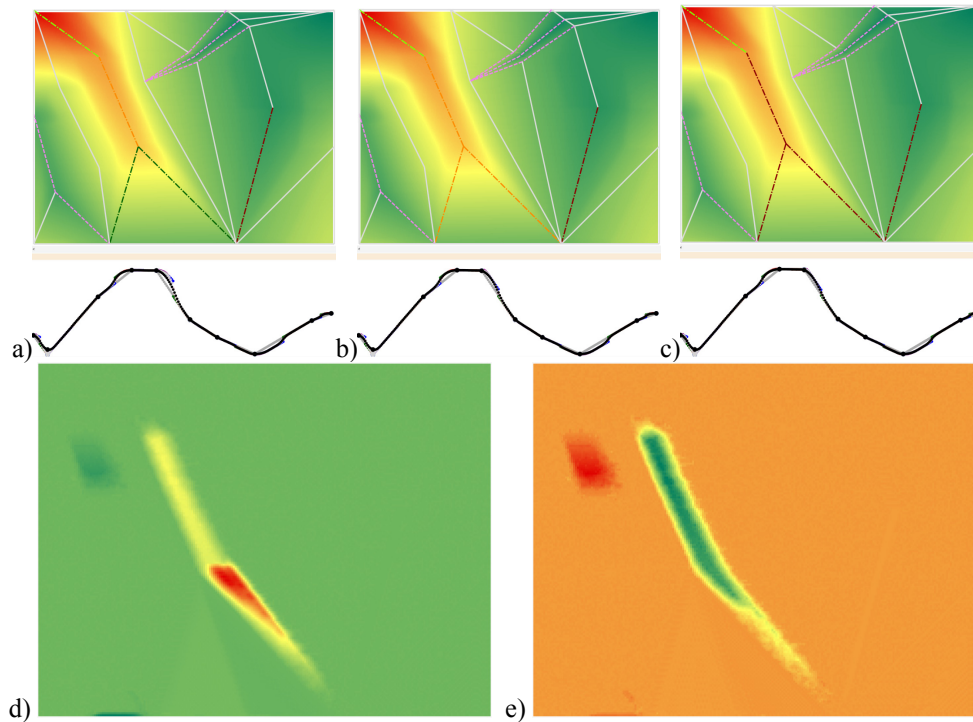
Widoczny w dolnym oknie przekrój poprzeczny przez teren (w wierszu zawierającego kropkę pośrodku rysunku) uwidacznia efekt wygładzania w dwóch dolinach i jednym grzbiecie – czarne kropki na tle szarych linii odpowiadających ukształtowaniu TIN. Model Davisa nie obejmuje innych linii strukturalnych.

Widoki zamieszczone na rysunku 5 przedstawiają trzy wersje modelu dla tego samego obszaru, ale różnych parametrów – płaskiego (a), umiarkowanego (b) i ostrego (c). Poniżej (d, e) widoczne są mapy różnic, porównujące wyniki poszczególnych wariantów.





Rys. 4. Interfejs programu TeMCA z widokiem modelu wygenerowanego na podstawie danych Davisa (Gold, 1988)



Rys. 5. Wyniki modelowania powierzchni przykładowego obszaru dla wariantów typu terenu wzdłuż grzbietu – a) płaskiego, b) umiarkowanego i c) ostrego, a także różnice między d) płaskim a ostrym oraz e) ostrym a umiarkowanym

## 5. WNIOSKI

Prezentowana tu nowa metoda tworzenia numerycznych modeli w oparciu terenu o rozproszone punkty terenowe realizuje sposób podobny do sprawdzonej i wielokrotnie wychwalanej metody tworzenia mapy warstwicznej. Specyfiką metody jest zastosowanie Interaktywnych Automatów Komórkowych, nowatorskiego rozwiązania AK pozwalającego na jego oddziaływanie na inne warstwy rozpatrywanej przestrzeni – w tym przypadku warstwy wysokościowej. Metoda daje plastyczny efekt modelu jedynie w oparciu o Interakcje w bezpośrednim wzajemnym sąsiedztwie poszczególnych komórek. Liczne testy wykazały zróżnicowane możliwości modelowania wskutek różnej definicji podziału terenu na trójkaty oraz doboru różnych parametrów modelowania.

Praca została wykonana w ramach tematu badawczego nr N N526 134834 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2008–2010. Przegląd bibliograficzny w Internecie dokonano za pomocą Google search engine.

## 6. LITERATURA

Baker M., Weller D., Jordan T., 2006, Comparison of automated watershed delineations: effects on land cover areas, percentages, and relationships to nutrient discharge. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72 (2), s. 159–168.

Dakowicz M., Gold Ch., 2009, Finite difference method runoff modelling using Voronoi cells. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/4-W54/papers/55-60%20Maciej%20Dakowicz.pdf>

Droy G., 2008, Improving the accuracy of Digital Terrain Models. *Studia Univ. Babeş-Bolyai, INFORMATICA*, LIII, 1, s. 65–72.

Duke G.D., Kienzle S.W., Johnson D.L., Byrne J.M., 2003, Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into Digital Elevation Models. *Journal of Spatial Hydrology*, 3 (2). <http://www.spatialhydrology.com/journal/paper/DEM/dem.pdf>

Gold Ch., 1988: Point and area interpolation and the digital terrain model. *Trends and concerns of spatial sciences*. [http://www.voronoi.com/wiki/images/d/dd/Point\\_and\\_area\\_interpolation.pdf](http://www.voronoi.com/wiki/images/d/dd/Point_and_area_interpolation.pdf)

Gomez A., Serrano J., Casalprim D., 2005, Generation of a DTM based on LiDAR data for the definition of hydraulic models. *XXII Int. Cartographic Conference (ICC2005)*, A Coruña, Spain, 11-16 July 2005 (CD)

Hejmanowska B., 2006, Wpływ jakości danych na modelowanie stref zagrożenia powodziowego. *Roczniki Geomatyki*, IV (1), s. 145–150.

Hejmanowska B., Drzewiecki W., Kulesza Ł., 2008, Zagadnienie jakości numerycznych modeli terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, s. 163–176.

Jolly I.D., Rassam D.W., 2009, A review of modelling of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid floodplains. *18th World IMACS / MODSIM Congress*, Cairns, Australia 13-17 July 2009. <http://mssanz.org.au/modsim09>

Lantz F., Jungert E., Sjövall M., 2003, Determination of terrain features in a terrain model from laser radar data. [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W13/papers/Lantz\\_ALSDD2003.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W13/papers/Lantz_ALSDD2003.pdf)

Mrics S.W., Clegg P., Jones R., 2005, Combining terrestrial laser scanning, RTK GPS and 3D visualisation: application of optical 3D measurement in geological exploration. 7<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Vienna, 3-5.10.2005, [http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG\\_web/pdf/publications/waggot.pdf](http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG_web/pdf/publications/waggot.pdf)

- Pang M., Ma W., Pan Z., Zhang F., 2006, Smooth Approximation to Surface Meshes of Arbitrary Topology with Locally Blended Radial Basis Functions. *Computer-Aided Design i Applications*, 3 (5), s. 587–596.
- Pfeifer N., 2005, A subdivision algorithm for smooth 3D terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, s. 115–127.
- Wolfram S., 2002, A New Kind of Science. <http://www.wolframscience.com/>
- Wyczalek I., 2009a, Badania wrażliwości numerycznego modelu terenu na wpływ otoczenia. *Konferencja Naukowo-Techniczna „Współczesne technologie geoinformacyjne”*. AGH, Kraków, 28-29.05.2009 r.
- Wyczalek I., 2009b, Using a cellular automaton for terrain modeling. *Proc. International Cartographic Conference ICC2009*, Santiago, Chile, 15-21.11.2009 (CD)
- XiaoPing L., Li X., Yeh A.G.O., JinQiang H., Ja T., 2007, Discovery of transition rules for geographical cellular automata by using ant colony optimization. *Science in China, D: Earth Sciences*, 50 (10), s. 1578–1588.

#### **A NEW METHOD FOR TERRAIN SURFACE MODELING FOR SPATIAL ANALYSES AND SIMULATIONS**

KEY WORDS: Cellular Automata, spatial modeling, spatial simulations

SUMMARY: The paper presents the concept and theoretical basis of a new method of terrain modeling based on scattered sampling points. The method uses the Interactive Cellular Automata (ICA) as a tool for control of the modeling process and smoothing the surface. The results of modeling a sample terrain by a program implementing the described method are presented.

dr inż. Ireneusz Wyczalek  
e-mail: Ireneusz.Wyczalek@put.poznan.pl  
telefon: 61 6652 420  
fax: 61 6652 432