

## **PORÓWNANIE JAKOŚCIOWYCH METOD ANALITYCZNYCH I FIZYCZNEGO MODELOWANIA CYFROWEGO W BADANIACH EROZJI WODNEJ POWIERZCHNIOWEJ**

*Eugeniusz Nowocień, Rafał Wawer*

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów,  
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach

### **Wstęp**

Analizy przestrzennych zjawisk zachodzących w środowisku, w tym erozji są jednymi z najtrudniejszych zadań badawczych. Oprócz fizycznej relacji między badanymi cechami środowiska i zmiennymi należy uwzględnić przestrzenne relacje między nimi zachodzące w trzech, a uwzględniając wpływ czasu, w czterech wymiarach. Do niedawna badania tego typu były żmudne i czasochłonne. Dzięki wprowadzeniu cyfrowych narzędzi analitycznych oraz oprogramowania GIS zmniejszyła się czasochłonność etapu zbierania danych i samych analiz. Powstało szereg modeli empirycznych i fizycznych, dynamicznych i statycznych. Jednym z modeli dynamicznych bazujących na fizycznych właściwościach środowiska jest model EROSION 3D.

Model EROSION 3D został opracowany przez J. Schmidt'a i M. von Wernera na podstawie modelu EROSION 2D [SCHMIDT 1991; SCHMIDT 2000; VON WERNER 1996].

Opiera się on na podstawowej zależności: impulsywne strumienie wywołane przez energię uderzających kropli deszczu i spływu powierzchniowego są porównywane z krytyczną wartością strumienia impulsywnego, który jest charakteryzowany wskaźnikiem odporności gleby na erozję  $E$  ( $N \cdot m^{-2}$ ). Wynikiem tego porównania jest wyróżnik, który poprzez równanie korelacji daje wielkość wynoszenia cząstek glebowych poza profil [VON WERNER 1996].

Model został zaimplementowany do platformy MS-Windows i posiada interfejs graficzny z menu i oknami dialogowymi. Ponadto system umożliwia import i export danych w postaci plików ASCII z innymi systemami GIS.

### **Metoda badań**

#### **Analiza jakościowa erozji wodnej powierzchniowej**

Analizę zagrożenia erozją wodną potencjalną oraz występowanie erozji wodnej aktualnej określono w sposób cyfrowy według metodyki A i Cz. Józefaciuków [JÓZEFACIUK, JÓZEFACIUK 1995, 1996] w oparciu o warstwy informacji przestrzennej z Cyfrowego Modelu Zlewni wykonanego dla zlewni potoku Grodarz.

Analizę zagrożenia erozją wodną potencjalną wykonano poprzez nałożenie na warstwę rastrową mapy spadków uzyskaną w programie ArcView 3.2 z rozszerzeniem Spatial Analyst w oparciu o Cyfrowy Model Terenu (DEM), na warstwę wektorową informacji o glebach pozyskaną poprzez digitalizację mapy glebowo-rolniczej IUNG w skali 1 : 25 000. W wyniku nanoszenia warstw uzyskano sześć klas zagrożenia erozją wodną potencjalną.

Analizę występowania erozji wodnej aktualnej określono poprzez naniesienie na warstwę rastrową informacji o zagrożeniu erozją wodną potencjalną informacji o użytkowaniu terenu uzyskanej poprzez klasyfikację nadzorowaną w programie ERDAS Imagine 8.4 ortofotomapy lotniczej utworzonej również w programie ERDAS Imagine 8.4 ze zdjęć lotniczych w skali 1 : 26 000 z nalogu z 1996 r. Ortorektyfikacja zdjęć lotniczych została poprzedzona pomiarami punktów kontrolnych w terenie przy pomocy odbiornika GPS Trimble PathFinder 1400 II przy dokładności rzędu 50 cm dla pomiaru fazowego z uwzględnieniem poprawki z satelity Omni Star przy założonym maksymalnym błędzie PDOP równym 2,5. W wyniku klasyfikacji otrzymano warstwę wektorową informacji i użytkowaniu terenu w rozbiciu na cztery klasy: grunty orne, użytki zielone, sady oraz lasy. Na podstawie analizy pokrycia otrzymano warstwę rastrową informacji przestrzennej o występowaniu erozji wodnej aktualnej w podziale na sześć klas.

### **Modelowanie cyfrowe erozji wodnej potencjalnej**

Modelowanie cyfrowe zostało wykonane w modelu EROSION 3D w oparciu o dane wejściowe (tab. 1, 2, 3) [VON WERNER 1996]:

- parametry rzeźby: DEM (Cyfrowy Model Terenu) o rozdzielczości 10m;
- parametry gleb: gęstość objętościowa w  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , początkowa wilgotność w %, zawartość węgla organicznego w %, podatność na erozję  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ , współczynnik szorstkości Manning'a w  $\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ , stopień pokrycia terenu (szata roślinna, kamienie, martwe części roślinne itp.) w % oraz skład granulometryczny rozłożony na 9 przedziałów (od drobnego iłu do grubego piasku, wg klasyfikacji DIN) w %;
- parametry opadu: czas trwania, intensywność opadu.

Niektóre z właściwości gleb, tj. zawartość węgla organicznego i skład granulometryczny, przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych próbek glebowych pobranych przy pomocy sondy glebowej w punktach lokalizowanych przy pomocy odbiornika GPS Trimble PathFinder pracującego w trybie nawigacji według cyfrowej mapy glebowej. Punkty pobrania próbek określono z uwzględnieniem rzeźby i gatunków gleb. Wilgotność przyjęto według krzywej pF dla poszczególnych typów gleb dla wartości pF na poziomie  $pF = 2,5$ . Pozostałe parametry gleb przyjęto w oparciu o zestawienia tabelaryczne parametrów wejściowych zamieszczone przez autorów modelu [VON WERNER 1996] przyporządkowanych do bazy danych warstw informacji przestrzennej o glebach i użytkowaniu terenu.

Parametry opadu przyjęto dla dwóch scenariuszy:

1. Opad burzowy o średnim natężeniu, wynoszącym  $0,16 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) i czasie opadu wynoszącym jedną godzinę;
2. Opad burzowy o dużym natężeniu średnim, wynoszącym  $0,66 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

Tabela 1; Table 1

Wartości parametrów wejściowych właściwości gleb do modelu EROSION 3D  
Soil properties as input parameters for EROSION 3D model

Gatunek gleby Soil type	Gęstość objętościowa Bulk density (kg·m <sup>-3</sup> )	Element rzeźby Relief element	Skład granulometryczny wg DIN (%) Particle content according to DIN (%)									Wskaźnik podatności na erozję Erosion susceptibility factor (N·m <sup>-2</sup> )	Zawartość węgla organicznego Organic carbon content (%)
			FT	MT	GT	FU	MU	GU	FS	MS	GS		
/c/	1270	wierzchowina top of the slope	0	5	5	3	5	5	22	56	5	0,000210	0,86
/c/	1270	stok; mid-slope	0	5	5	3	5	5	22	56	5	0,000210	0,86
/d/	1570	wierzchowina top of the slope	0	2	3	4	7	19	16	48	3	0,000210	0,88
/d/	1570	stok; mid-slope	0	2	3	4	7	19	16	48	3	0,000210	0,88
gl	1530	stok; mid-slope	0	1	6	8	12	14	29	26	5	0,002300	1,26
gl	1530	wierzchowina top of the slope	0	1	10	8	12	15	25	24	6	0,002300	0,74
gs	1570	wierzchowina top of the slope	0	4	5	2	6	8	18	55	4	0,002300	1,05
gs	1570	stok; mid-slope	0	4	8	7	15	15	23	28	3	0,002300	1,32
l	1470	stok; mid-slope	0	0	12	5	17	37	24	3	2	0,000210	1,32
l	1470	wierzchowina top of the slope	0	0	6	6	22	47	19	0	0	0,000210	0,94
l	1470	dolina; foot slope	0	0	7	4	14	45	26	4	1	0,000210	1,15
li	1300	stok; mid-slope	0	0	11	6	19	45	18	1	0	0,000210	1,26
li	1300	wierzchowina top of the slope	0	0	7	6	20	43	19	1	0	0,000210	1,00
plz	1220	stok; mid-slope	0	0	7	5	11	33	23	21	1	0,000210	0,94
plz	1220	wierzchowina top of the slope	0	0	4	3	9	25	22	35	2	0,000210	0,69
pgl	1400	wierzchowina top of the slope	0	0	3	4	7	19	16	48	3	0,001000	0,88
pglp	1350	wierzchowina top of the slope	0	2	3	4	7	19	16	48	3	0,000250	0,88
pgm	1430	stok; mid-slope	0	4	6	8	11	13	22	34	6	0,001000	1,04
pgm	1430	wierzchowina top of the slope	0	4	5	6	9	14	22	39	5	0,001000	1,12
pgmp	1360	wierzchowina top of the slope	0	4	5	8	11	19	22	32	3	0,000250	0,97
pl	1350	wierzchowina top of the slope	0	0	1	2	5	8	28	46	10	0,001000	0,62
ps	1430	wierzchowina top of the slope	0	0	3	3	2	4	14	69	5	0,001000	0,71

Objaśnienia skrótów; Commentary:

FT – il drobny; fine clay

GT – il gruby; coarse clay

MU – pył średni; medium dust

FS – piasek drobny; fine sand

GS – piasek gruby; coarse sand

MT – il średni; medium clay

FU – pył drobny; fine dust

GU – pył gruby; coarse dust

MS – piasek średni; medium sand

Dla obu scenariuszy opadu założono te same warunki wilgotnościowe i pozostałe parametry gleb.

Przestrzenną analizę porównawczą wykonano w programie Arc View 3.2 z rozszerzeniem Spatial Analyst poleceniem „Histogram by Zone”, które opracowuje histogram częstości występowania klas wielkości erozji i depozycji w klasach nasilenia erozji wodnej aktualnej. Histogram wyników poddano obróbce w programie MS Excel dzieląc otrzymaną częstość przez powierzchnie poszczególnych klas nasilenia erozji wodnej aktualnej.

Tabela 2; Table 2

Wartości parametrów wejściowych właściwości pokrycia terenu do modelu EROSION 3D.

Land cover properties as input parameters for EROSION 3D model

Rodzaj użytku Land use	Szorstkość według Manninga Mannings roughness coefficient ( $s \cdot m^{-1/3}$ )	Stopień pokrycia terenu okrywą roślinną Plant land cover rate
Orny; Plough	0,10	86
Użytek zielony; Grassland	0,20	100
Sadownicze; Orchard	0,70	100
Las; Forest	1,00	100
Zabudowa zwarta; Buildings	0,01	100

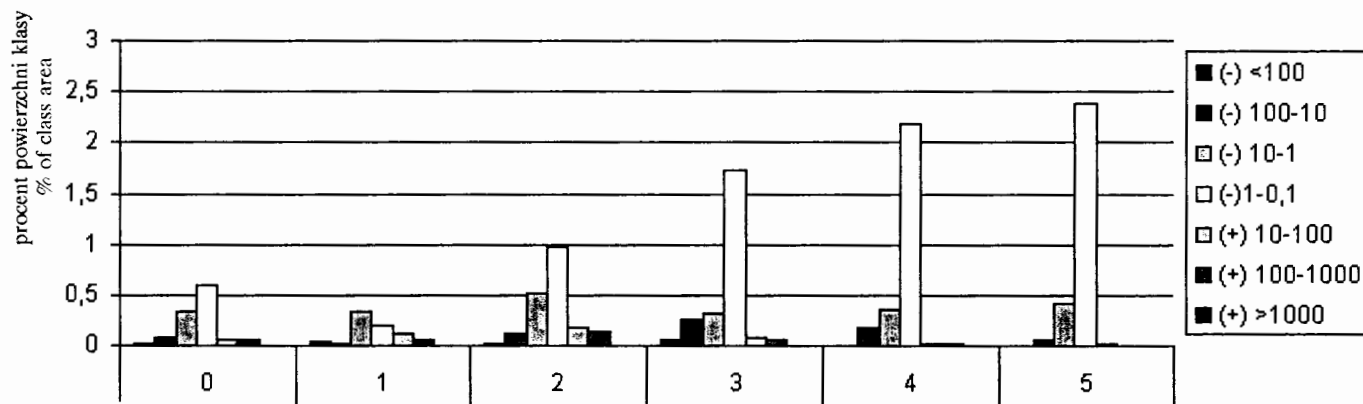
Tabela 3; Table 3

Wartości parametrów wejściowych opadu do modelu EROSION 3D dla dwóch scenariuszy opadu

Precipitation properties as input parameters for EROSION 3D model for two scenarios

Krok opadu Precipitation step	Natężenie opadu dla scenariusza I Precipitation for scenario No. 1 ( $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Natężenie opadu dla scenariusza II Precipitation for scenario No. 2 ( $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
1	0,25	1,20
2	0,18	0,80
3	0,15	0,50
4	0,15	0,50
5	0,12	0,33

Ostateczny histogram przedstawia częstość wystąpienia poszczególnych klas wielkości erozji i depozycji otrzymanych w wyniku modelowania w EROSION 3D w odniesieniu do powierzchni jednostkowej klas nasilenia erozji wodnej aktualnej.



0 – brak erozji; no erosion  
3 – erozja średnia; average erosion

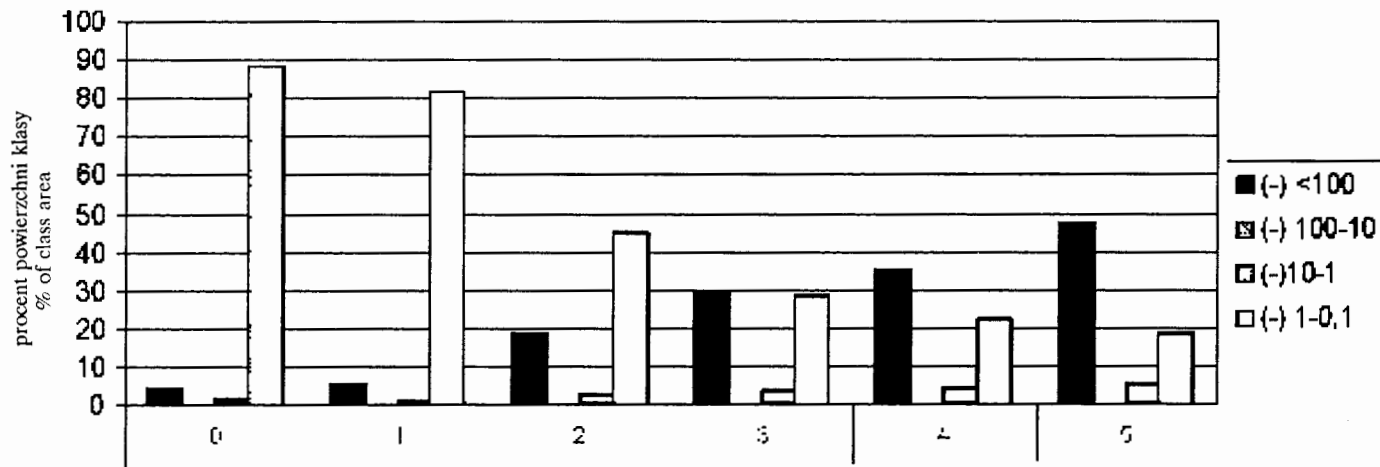
1 – erozja słaba; weak erosion  
4 – erozja silna; strong erosion

2 – erozja umiarkowana; moderate erosion  
5 – erozja bardzo silna; very strong erosion

Stopień nasilenia erozji wodnej aktualnej; Degree of actual water erosion

Rys. 1. Histogram struktury przestrzennej wyników symulacji cyfrowej w klasach nasilenia erozji wodnej aktualnej dla scenariusza 10 mm·h<sup>-1</sup>

Fig. 1. Histogram of digital modeling results in actual value classes for scenario with precipitation of 10 mm·h<sup>-1</sup>



0 – brak erozji; no erosion  
3 – erozja średnia; average erosion

1 – erozja słaba; weak erosion  
4 – erozja silna; strong erosion

2 – erozja umiarkowana; moderate erosion  
5 – erozja bardzo silna; very strong erosion

Stopień nasilenia erozji wodnej aktualnej; Degree of actual water erosion

Rys. 2. Histogram struktury przestrzennej wyników symulacji cyfrowej w klasach nasilenia erozji wodnej aktualnej dla scenariusza 40 mm·h<sup>-1</sup>

Fig. 2. Histogram of digital modeling results in actual erosion value classes for scenario with precipitation of 40 mm·h<sup>-1</sup>

## Wyniki

Wyniki porównania wskaźnika jakościowego nasilenia erozji wodnej aktualnej wskazują na liniową korelację z wynikami symulacji cyfrowej dla pojedynczych zdarzeń opadu, przy czym występują następujące zależności:

1. Rozkład przestrzenny wartości erozji i depozycji dla opadu o średnim natężeniu  $0,166 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  i czasie trwania 1 godz. odpowiada rozkładowi klas wskaźnika erozji wodnej aktualnej. Pewne rozbieżności występują tylko dla stopnia nasilenia erozji wodnej aktualnej wynoszącego 0, tj. dla braku erozji (rys. 1). W przypadku analizy dla opadu o intensywności  $0,666 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  i czasie trwania 1 godz. rozkład przestrzenny wyników symulacji jest w znacznej mierze rozbieżny ze wskaźnikiem erozji wodnej aktualnej (rys. 2), przy czym klasy erozji i depozycji wykazują następujące trendy:
  - a. dla klas niskiego natężenia procesów erozyjnych ( $0,1-1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) udział powierzchni objętej tymi klasami maleje wraz ze wzrostem klasy wskaźnika erozji wodnej aktualnej;
  - b. dla klas wysokiego natężenia procesów erozyjnych ( $> 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) udział powierzchni terenu objętej tymi klasami przyjmuje trend zbliżony do proporcjonalnej zależności w stosunku do klas wskaźnika erozji wodnej aktualnej;
  - c. nie zaobserwowano depozycji.

## Wnioski

W przypadku opadów o stosunkowo niskim natężeniu zgodność wskaźnika jakościowego erozji wodnej aktualnej jest silnie skorelowana z wynikami analiz cyfrowych przeprowadzonych w programie EROSION 3D, przy czym klasa wskaźnika erozji wodnej aktualnej wynosząca 0 (brak erozji) wykazuje odchylenia od trendu. Wynika to prawdopodobnie z innej niż założona w metodzie ochronnej roli użytkowania leśnego i sadowniczego. W przypadku opadów o wyższym natężeniu korelacja dodatnia występuje dla erozji o wyższym natężeniu, natomiast natężenia niższe wykazują korelację ujemną co świadczy o zróżnicowaniu przestrzennym wewnątrz klas erozji wodnej aktualnej.

Wielkość depozycji jest słabo skorelowana z klasą wskaźnika nasilenia erozji wodnej aktualnej.

Modelowanie cyfrowe oparte na fizycznych właściwościach środowiska w nawiązaniu do pojedynczych zdarzeń opadu pozwala rozszerzyć zakres analiz erozji wodnej powierzchniowej, a przede wszystkim uwzględnić ilościowe skutki opadów ekstremalnych oraz wielkość i przestrzenny rozkład depozycji, czego nie uwzględnia metodyka analizy jakościowej.

## Literatura

JÓZEFACIUK A., JÓZEFACIUK Cz. 1996. *Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji*. Bibliot. Monit. Środ. Warszawa: 148.

JÓZEFACIUK A., JÓZEFACIUK Cz. 1995. *Erozja agroekosystemów*. Bibliot. Monit. Środ. Warszawa: 168.

SCHMIDT J. 1991. *A mathematical model to simulate rainfall erosion. Erosion, transport and deposition processes – theory and models*. Catena Suppl 19: 101–109.

SCHMIDT J. 2000. *Soil Erosion – Application of Physically Based Erosion Models*. Springer-Verlag, Berlin: 307.

WERNER M. VON 1996. *GIS – Orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten*. Dissertation, FU Berlin: 125.

**Słowa kluczowe:** erozja wodna powierzchniowa, metody analityczne, modelowanie cyfrowe, zlewnia wyżynna

### Streszczenie

W pracy przedstawiono porównanie wyników analizy jakościowej erozji wodnej powierzchniowej z wynikami modelowania dwóch scenariuszy opadu przy pomocy modelu fizycznego EROSION 3D na przykładzie zlewni potoku Grodarz na Wyżynie Lubelskiej. Wyniki badań, przedstawione w formie histogramów wskazują na silną korelację między wymienionymi metodami analitycznymi. Analizy wykonano w oparciu o cyfrowy model obszaru zlewni w systemach GIS.

## COMPARISON OF QUALITATIVE ANALYTIC METHODS AND PHYSICAL DIGITAL MODELING IN RESEARCH OF WATER SURFACE EROSION

*Eugeniusz Nowocień, Rafał Wawer*

Department of Soil Science Erosion and Ground Protection,  
Institute of Soil Science and Plant Cultivation, Puławy

**Key words:** surface water erosion, analytical modelling, digital modelling, upland watershed

### Summary

The article presents a comparison of the results of the qualitative water surface erosion with the results of digital modelling, with the use of EROSION 3D model for Grodarz stream watershed on Lublin Upland. The results of investigations presented in the form of histograms indicate strong correlation between these analytic methods. Analysis were based on digital watershed model built in GIS system.

Prof. dr hab. Eugeniusz Nowocień

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa

ul. Czartoryskich 8

24-100 PUŁAWY

e-mail: nowcien@iung.pulawy.pl; e-mail: huwer@iung.pulawy.pl