

KSZTAŁTOWANIE SIĘ WSPÓŁCZYNNIKA WILGOTNOŚCI GLEBY W ZLEWNI POTOKU MĄTNY W GORCACH

Edyta Kruk¹, Marek Ryczek¹, Magdalena Malec¹, Sławomir Klatka¹

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: e.kruk@ur.krakow.pl, rmryczek@cyf-kr.edu.pl, m.malec@ur.krakow.pl, rmklatka@cyf-kr.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki oznaczeń współczynnika wilgotności gleby, zdefiniowanego jako stosunek zawartości wody w dowolnym punkcie zlewni w stosunku do zawartości wody w poziomie bazowym, zlokalizowanym na wierzchołku zlewni, przeprowadzonych według modelu zaproponowanego przez Svetlitchnyi i in. Uzyskane wyniki porównano z wynikami oznaczeń empirycznych, przeprowadzonych w różnych warunkach wilgotności gleby. Rozkład przestrzenny wilgotności gleby opracowano metodą *krigingu* na podstawie pomiarów objętościowej zawartości wody wyznaczonej za pomocą urządzenia TDR HH2 przeprowadzonych w trzech okresach o AMC (*Antedescendent Moisture Conditions*). Badania przeprowadzono w zlewni potoku Mątny, o powierzchni 1,47 km² położonej w na granicy Gorców i Beskidu Wyspowego. Analiza porównawcza pokazała dość słabe dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych uzyskanych dla badanej zlewni. Model zaproponowany przez Svetlitchnyi i in. wymaga analizy wpływu innych czynników na kształtowanie się tego współczynnika na obszarze zlewni.

Słowa kluczowe: współczynnik wilgotności gleby, parametry fizjograficzne, GIS

SHAPING OF THE WETNESS COEFFICIENT IN THE MĄTNY STREAM BASIN IN THE GORCE MOUNTAINS

ABSTRACT

In the work presentsd results of investigations of wetness coefficient defined as ratio of water content in an any point of a basin to comparative point located on the Surface of a basin, carried out according to model proposed by Svetlitchnyi et al. (2003). The obtained research results were compared with the empirical ones carried out during various soil humidity periods AMC (*Antedescendent Moisture Conditions*). Investigations were carried out in the Mątny stream basin, of area 1.47 km², located between Gorce and Beskid Wyspowy. Comparative analysis showed very low fitting for the experimental results. The model proposed by Svetlitchnyi et al. requires the analysis of influence of another factors oh distribution of this parameter on the area of a basin.

Keywords: wetness coefficient, physiological parameters, GIS

WPROWADZENIE

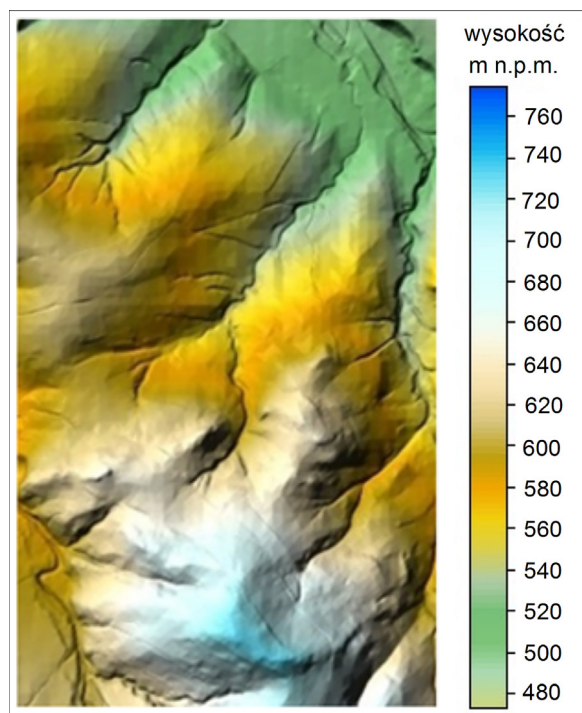
Zagadnienie wpływu wilgotności początkowej gleby, mimo wskazywania przez różnych autorów jako znaczącego czynnika erozyjnego, rzadko było podejmowane w pracach naukowych [Wei in. 2008]. Wilgotność gleby jest czynnikiem zmiennym w czasie i przestrzeni. Stan wilgotności gleby determinuje początek rozpoczęcia odpływu powierzchniowego. Odpływ powierzchniowy jest kształtowany przez wiele mechanizmów, między innymi przekroczenie stanu pełnego nasycenia, przekroczenie możliwości infiltracyjnych, od-

pływ podpowierzchniowy i filtracja wody gruntowej [Nikolopoulos in. 2011, Santra i in. 2012]. Rozkład przestrzenny wilgotności w zależności od parametrów rzeźby terenu był przedmiotem prac m.in. Gómez-Plazy i in. [2001], przedstawionych poniżej. Autorzy wskazują w nich różne właściwości kształtujące wilgotność gleby, w tym topografię terenu, Svetlitchnyi i in. [2003], Tombul [2007], Zhang i in. [2008], Merdun i in. [2008], Penna i in. [2009], Temimi i in. [2010], Fan i in. [2010], Nikolopoulos i in. [2011], Jia i in. [2013], Liang i Uchida [2014].

Cel pracy stanowiło porównanie wyników rozkładu współczynnika wilgotności uzyskanych z bezpośrednich pomiarów terenowych z wynikami wygenerowanymi w oparciu o model zaproponowany przez Svetlitchnyi i in. [2003] oraz zbadanie przydatności wybranego modelu do wyznaczenia współczynnika wilgotności gleby w analizowanej zlewni.

OBIEKT BADAŃ

Obszar badanej zlewni cechuje charakter gór niskich i średnich, w których szczyty mają wysokość od 617,6 m n.p.m. do 732,0 m n.p.m. Najniższy punkt położony jest na wysokości 490,0 m n.p.m (rys. 1). Średnia wysokość zlewni nad poziomem morza wynosi 582,66 m n.p.m, natomiast przeciętny spadek – 16,28%. W granicznych częściach zlewni przeważają łańcuchy górskie o stokach w większości porośniętych roślinnością trawiastą oraz w niewielkim stopniu zalesione. Są to głównie lasy mieszane, stanowiące 9,5% powierzchni ogólnej. W strukturze użytkowania zlewni dominują użytki rolne, które zajmują 1,29 km², w których udział użytków zielonych, wykorzystywanych jako łąki i pastwiska, stanowi 73,5%. Pozostały obszar z 1,47 km² powierzchni, przypada na tereny osiedlowe oraz komunikację.



Rys. 1. Rzeźba terenu potoku Mątny opracowana na podstawie Numerycznego Modelu Terenu

W omawianej zlewni prawie 28% powierzchni przypada na tereny o wystawie północnej. Ponad 21% powierzchni zajmują obszary o wystawie północno-zachodniej i prawie 20% zajmują tereny o wystawie wschodniej. Najmniejszy udział stanowią niecały 1% powierzchni ogólnej zajmują obszary o wystawie południowo-zachodniej (tab. 1).

Procentowy udział wyróżnionych kształtów stoku na obszarze zlewni przedstawiono w tabeli 2. W zlewni przeważają tereny o kształcie wypukłym, stanowiące blisko 57% powierzchni. Najmniejszy udział stanowiący ok 5% powierzchni ogólnej przypada na obszary o kształcie płaskim.

Opracowane mapy ekspozycji terenu oraz kształtu stoku badanego obszaru przedstawia rysunek 2.

Warunki pedologiczne obiektu badań określono według normy BN/78/9180–11. Na obszarze zlewni występują wyłącznie gleby gliniaste, w rodzaju: gliny ciężkiej (udział 4,08%), gliny ciężkiej pylastej (udział 23,13%), gliny lekkiej (udział 0,69%), gliny średniej oraz gliny średniej pylastej (udział 36,05%).

METODYKA

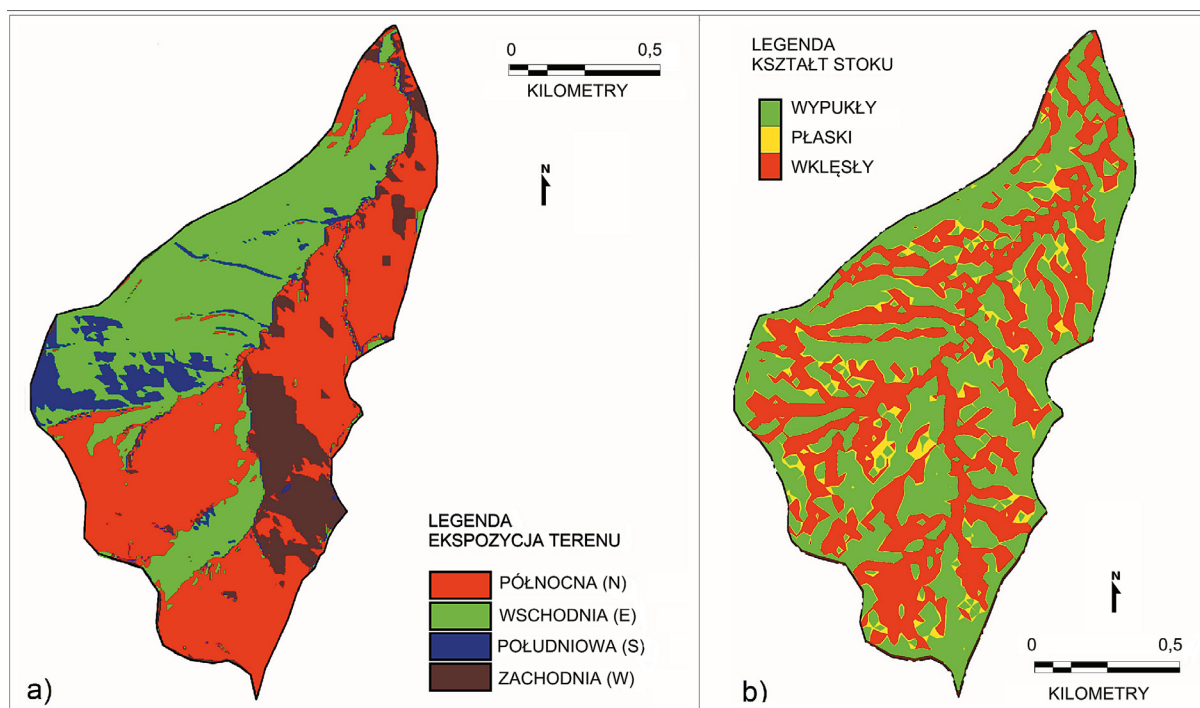
Badania wilgotności przeprowadzono za pomocą wilgotnościomierza typu TDR HH2, wyposażonego w sondę do pomiarów objętościowej zawartości wody. Badania przeprowadzono w 2014 roku na obszarze zlewni potoku Mątny położonej

Tabela 1. Procentowy udział klas ekspozycji terenu w zlewni potoku Mątny

Ekspozycja terenu	Powierzchnia [km ²]	% udział w badanej zlewni
N	0,63	42,86
E	0,47	31,97
S	0,13	8,84
W	0,24	16,33
Suma	1,47	100,00

Tabela 2. Procentowy udział kształtu stoku na terenie w zlewni potoku Mątny

Kształt stoku	Powierzchnia [km ²]	% udział w badanej zlewni
Wypukły	0,83	56,56
Płaski	0,06	4,21
Wklęsły	0,58	39,23
Suma	1,47	100,00



Rys. 2. Mapa ekspozycji terenu a) oraz mapa kształtu stoku b) zlewni potoku Mątny

w Beskidzie Wyspowym, w trzech okresach: suchym, średnim i wilgotnym AMC (*Antedescent Moisture Conditions*), wyróżnianych na podstawie sumy opadów z 5-ciu poprzedzających dni (tab. 3) [Soczyńska 1997]. Wysokość opadu atmosferycznego w dniach poprzedzających pomiary terenowe wyznaczono za pomocą deszczomierza umieszczonego na obszarze badań w gospodarstwie rolnym. Rozkład przestrzenny wilgotności gleby został opracowany metodą *kriingu*, w programie Surfer8.

Pomiary wilgotności objętościowej dla poszczególnych okresów AMC wykonano: 25 lipca 2014 r., przy sumie opadów z poprzednich 5-ciu dni wynoszącej 21,2 mm (w okresie wegetacyjnym); 25 września 2014 r., przy sumie opadów z poprzednich 5-ciu dni wynoszącej 34,8 mm (w okresie pozawegetacyjnym); 4 października 2014 r., przy sumie opadów z poprzednich 5-ciu dni wynoszącej 21,7 mm (w okresie pozawegetacyjnym). Liczba punktów, w których wykona-

no pomiary wyniosła: 153 dla okresu I, 100 dla okresu II i 126 dla okresu III. Liczebność pomiaru jest zgodna z Normą PN-R-04031:1997, według której powierzchnia użytku przypadająca na próbkę ogólną, przy wyrównanej pod względem glebowym powierzchni, zbliżonym ukształtowaniu terenu, powinna wynosić na gruntach ornych i użytkach zielonych do 4 ha. Minimalna ilość próbek dla analizowanego obszaru wyniosła 37. Ze względu na różny sposób zagospodarowania i użytkowania terenu w ciągu roku, zdecydowano się na losowy sposób określenia miejsc pomiaru wilgotności.

Oznaczenia parametrów topograficznych zlewni przeprowadzono na podstawie mapy sytuacyjno-wysokościowej w skali 1:5000 oraz Numerycznego Modelu Terenu o rozdzielczości komórki rastra 5 m, za pomocą programu ArcGIS 10.3.1, MapInfo Professional 11.5 oraz Surfer 8.

Wyznaczono następujące parametry: ekspozycję – E , kształt stoku – C , A – kąt zbocza – A , α , średni kąt zbocza – α_p , odległość od granicy stoku – l , ogólną długość stoku – l_{max} .

Ekspozycję określono w 4-stopniowej skali, jako jeden z kierunków geograficznych (E – wschodni, W – zachodni, N – północny i S – południowy). Kształty stoków określano jako: wklęsły, płaski (prostoliniowy) lub wypukły.

Do oceny potencjalnego rozkładu wilgotności w zależności od parametrów topograficznych

Tabela 3. Określenie wartości AMC

Okres AMC	Suma opadów z 5-ciu poprzedzających dni [mm]	
	Okres pozawegetacyjny	Okres wegetacyjny
I – suchy	<13	<35
II – średni	13–28	35–53
III – mokry	>28	>53

i fizjograficznych zlewni zastosowano koncepcję współczynnika wilgotności gleby [Svetlitchnyi i in.2003]. Współczynnik wilgotności gleby zdefiniowano jako:

$$K_w = \frac{\theta_v}{\theta_{v,b}} \quad (1)$$

gdzie: θ_v – objętościowa zawartość wody w dowolnym miejscu na stoku,
 $\theta_{v,b}$ – objętościowa zawartość wody bazowa, określana na wododziale

Model ten określa współczynnik wilgotności K_w następująco:

Dla stoków prostych i wklęsłych:

$$K_w = (a + 0,1 \cdot \cos A + 0,09 \cdot \sin A) \cdot K_a \quad (2)$$

gdzie:

$$a = 1 - 0,2 \cdot \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{0,5} \quad \text{jeśli } 0 < \frac{l}{l_{max}} \leq 0,167$$

$$a = 0,77 + 0,43 \cdot \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{1,47} \quad \text{jeśli } 0,167 < \frac{l}{l_{max}} \leq 0,833$$

$$a = 0,77 + 0,70 \cdot \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{4,0} \quad \text{jeśli } 0,833 < \frac{l}{l_{max}} \leq 1,000$$

Dla stoków wypukłych:

$$K_w = \left(\frac{b + 0,14 \cdot \cos A + 0,10 \cdot \sin A - 0,02 \cdot \cos 2A}{+} \right) \cdot K_a \quad (3)$$

gdzie:

$$b = 1,04 - 0,22 \cdot \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{0,93} \quad \text{jeśli } 0 < \frac{l}{l_{max}} \leq 0,833$$

$$b = 0,86 + 18,0 \cdot \left(\frac{l}{l_{max}} - 0,833\right)^{2,0} \quad \text{jeśli } 0,833 < \frac{l}{l_{max}} \leq 1,000$$

$$K_a = \frac{(1 - k_e \cdot \alpha)}{1 - k_e \cdot \alpha_0}$$

gdzie: A – kąt zbocza [°],
 α_0 – średni kąt zbocza,
 k_e – współczynnik zależny od ekspozycji (dla północnej $k_e = -0,01$, dla wschodniej $k_e = 0,002$, dla południowej $k_e = 0,005$, dla zachodniej $k_e = -0,003$),

l – odległość od granicy stoku,

l_{max} – ogólna długość stoku, a , b – parametry modelu

Ocenę zgodności danych wilgotności objętościowej pomierzonych w poszczególnych trzech okresach pomiarowych, z rozkładem normalnym przeprowadzono w oparciu o test Kołmogorowa-Smirnowa, którego parametry obliczono w programie Statistica 12.0.

Ocenę dopasowania modelu do danych pomierzonych w terenie dokonano przy użyciu następujących miar: średniego błędu prognozy (MEP), pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE), średniego błędu procentowego (MPE) [Rahnama i Barani 2005], oraz efektywności modelu (ME) [Nash i Sutcliffe 1970, Tiwari in. 2000].

WYNIKI

Rozkład wilgotności gleby na terenie zlewni wygenerowano w programie Surfer 8 metodą *krikingu* dla trzech okresów, odpowiednio: suchego, średniego i mokrego ustalonych w oparciu o AMT. Wartości wilgotności kształtowały się w zakresie 10,1–23,2% obj. dla okresu suchego, 17,2–35,9% obj. dla średniego oraz od 31,2 do 74,3% obj. dla mokrego. Rozkłady pomierzonych w poszczególnych trzech okresach pomiarowych wilgotności zostały sprawdzone testem Kołmogorowa-Smirnowa, i w przypadku wszystkich 3 okresów są większe od krytycznych, odczytanych z tablic rozkładu teoretycznego (tab. 4). Oszacowane wartości współczynnika wilgotności wyznaczonego na podstawie pomiarów terenowych, kształtował się w przedziale wartości o 0,75 do 1,75.

Parametry wejściowe do modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003] przedstawiono na ryc. 5. Najniższe wartości wskaźnika l/l_{max} z przedziału do 0,167, wystąpiły w centralnej części zlewni, w obrębie ciekę; obszary z drugiego przedziału (0,167–0,833) zlokalizowane były w przewa-

Tabela 4. Wartości obliczone i krytyczne testu Kołmogorowa-Smirnowa dla wilgotności objętościowej

Okres	Wartości testu Kołmogorowa-Smirnowa	
	d obliczone	d krytyczne ($\alpha=0,05$, $n=153$ dla okresu suchego, 100 mokrego, 126 wilgotnego)
Suchy	0,143	0,110
Średni	0,153	0,136
Mokry	0,127	0,121

żającej części zlewni na stokach, o większym nachyleniu; natomiast obszary z przedziału trzeciego ($\geq 0,833$) zajmowały szczytowe partie zlewni. Oszacowany współczynnik wilgotności K_w znajdował się w przedziale wartości od 0,75 do 1,55.

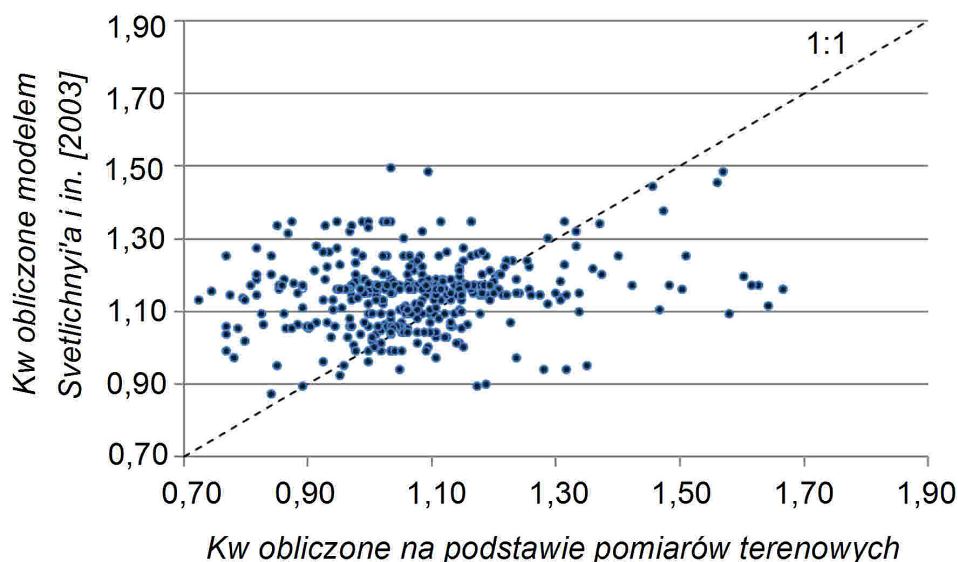
Porównanie wyników uzyskanych za pomocą modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003] z wynikami uzyskanymi z bezpośrednich pomiarów terenowych przedstawiono na rysunku 3. Natomiast analizę dopasowania danych modelowych do danych obliczonych w tabeli 5.

Jak wynika z analizy tabeli, w przypadku badanej zlewni model ma tendencję do przeszacowywania symulowanych wartości. Ujemne wartości średniego błędu prognozy, średniego błędu procentowego i efektywność modelu oraz współczynnik korelacji znajdujący się na bardzo niskim poziomie, aczkolwiek wartości te są wartościami istotnie statystycznymi.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład wartości współczynnika wilgotności gleby K_w wyznaczonego na podstawie badań terenowych (a) oraz za pomocą modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003] (b).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

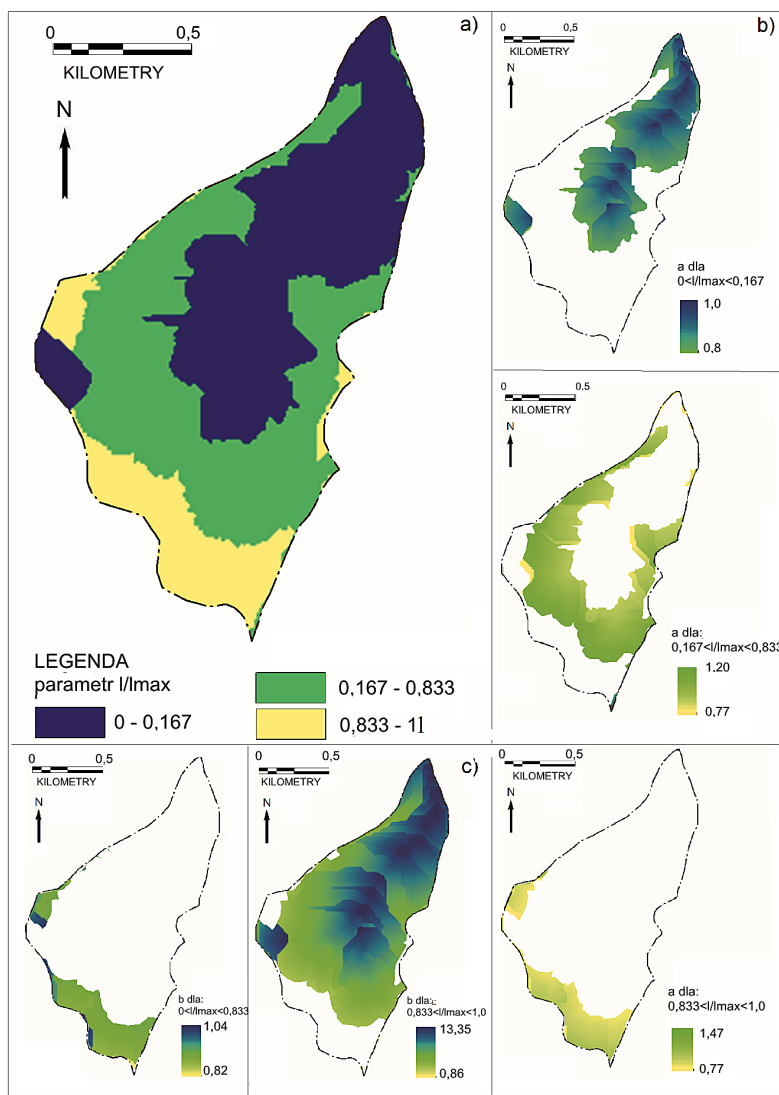
Wilgotność gleby jest jednym z najtrudniejszych do ustalenia parametrów wpływających na erozję ze względu na jej dużą zmienność czasoprzestrzenną. W niniejszej pracy oparto się na założeniu, iż stosunek wilgotności w danym miejscu na stoku, w stosunku do wartości bazowej zlokalizowanej w charakterystycznym punkcie na stoku, jest stały. Założenie to stanowiło podstawę do określenia współczynnika wilgotności w oparciu o badania terenowe. Uzyskane w ten sposób wyniki skonfrontowano z wynikami współczynnika wilgotności uzyskanymi na podstawie modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003]. Model ten charakteryzował się stosunkowo słabym dopasowaniem do wykonanych w terenie badań eksperymentalnych. Ujemna wartość efektywności modelu wynosząca -0,28, oraz wartość współczynnika korelacji wynosząca 0,198, aczkolwiek istotnie statystycznie, wskazują na ograniczoną przydatność modelu do szacowania rozkładu wilgotności w danych warunkach środowiskowych. Ponadto model ten nie uwzględnia wielu innych czynników mających wpływ



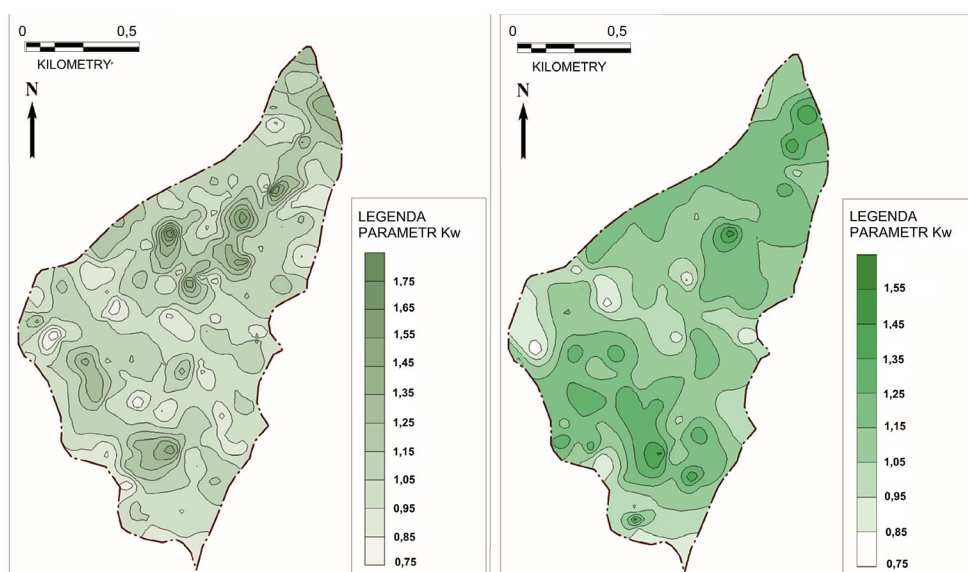
Rys. 3. Porównanie wielkości wartości współczynnika wilgotności uzyskanych w bezpośrednich pomiarach terenowych z wartościami wyznaczonymi z modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003]

Tabela 5. Analiza dopasowania modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003] do danych uzyskanych w bezpośrednich pomiarach terenowych

Model	Miary dopasowania modelu				
	MEP	RMSE	MPE	ME	r
	[-]		[%]	[-]	
Model Svetlitchnyi'a i in.	-0,065	0,187	-8,2	-0,28	0,198



Rys. 4. Parametry wejściowe do modelu Svetlitchnyi'a i in. [2003]: a) parametr I/I_{max} , b) parameter modelu a , c) parameter modelu b)



Rys. 5. Rozkład współczynnika wilgotności K_w , a – bezpośrednie pomiary terenowe, b – model Svetlitchnyi'a i in. [2003]

na kształtowanie się zdefiniowanego badanego parametru współczynnika wilgotności gleby, jak np. zawartości frakcji ilowej czy też użytkowania terenu. W przytoczonym modelu kształt zbocza jest znacznym czynnikiem różnicującym wyniki symulacji, rezultat tych oznaczeń jest dość wątpliwy, wynika głównie od zastosowanego programu do zagregowania danych.

LITERATURA

1. BN/78/9180–11. Gleby I utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne.
2. Fan Y., Zhang C., Fang J., Tian L. 2010. Research on Regional Spatial Variability of Soil Moisture Based on GIS. D. Computer and Computing Technologies in Agriculture III. IFIP AICT 317, 466–470.
3. Gómez-Plaza A., Martínez-Mena M., Albaladejo J., Castillo V.M. 2001. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 253, 211–226.
4. Jia Y., Shao M., Jia X. 2013. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China. *Journal of Hydrology*, 495, 150–161.
5. Liang W., Uchida T. 2014. Effects of topography and soil depth on saturated-zone dynamics in steep hillslopes explored using the three-dimensional Richards' equation. *Journal of Hydrology*, 510, 124–136.
6. Merdun H., Meral R., RizaDemirkiran A. 2008. Effect of the Initial Soil Moisture Content on the Spatial Distribution of the Water Retention. *Eurasian Soil Science*, 41(10), 1098–1106.
7. Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
8. Nikolopoulos E.I., Anagnostou E.N., Borga M., Vivoni E.R., Papadopoulos A. 2011. Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 402, 165–178.
9. Penna D., Borga M., Norbiato D., Dalla Fontana G. 2009. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *Journal of Hydrology*, 364, 311–327.
10. PN-R-04031:1997. Instrukcja pobierania próbek glebowych z gruntów ornyczych i użytków zielonych.
11. Rahnama, M.B. i Barani G.A. 2005. Application of rainfall-runoff models to Zard river catchments. *Am. J. Environ. Sci.*, 1, 86–89.
12. Santra P., Sankar B., Chakravarty D. 2012. Spatiotemporal prediction of soil properties in a watershed scale through maximum likelihood approach, *Environ Earth Sci* 65, 2051–2061.
13. Soczyńska U. 1997. *Hydrologia dynamiczna*. PWN, Warszawa.
14. Svetlitchnyi A.A., Plotnitskiy S.V., Stepovaya O.Y. 2003. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis of topographic data. *Journal of Hydrology*, 277, 50–60.
15. Temimi M., Leconte R., Chaouch N., Sukumal P., Khanbilvardi R., Brissette F. 2010. A combination of remote sensing data and topographic attributes for the spatial and temporal monitoring of soil wetness. *Journal of Hydrology*, 388, 28–40.
16. Tiwari A.K., Risse L.M., Nearing M.A. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1129–1135.
17. Tombul M. 2007. Mapping Field Surface Soil Moisture for Hydrological Modeling, *Water Resource Manage* 21, 1865–1880.
18. Wei J., Xiao D., Zeng H., Fu Y. 2008. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. *Environ Geol*, 53, 1663–1667.
19. Zhang C., Liu S., Fang J., Tan K. 2008. Research on the spatial variability of soil moisture based on GIS. *The International Federation for Information Processing*, 258, Computer and Computing Technologies in Agriculture, 1, 719–727.