

## ZASTOSOWANIE WYBRANYCH MODELI HYDROLOGICZNYCH DO OKREŚLANIA WIELKOŚCI SPŁYWU POWIERZCHNIOWEGO

### APPLICATION OF SELECTED HYDROLOGICAL MODELS FOR THE CALCULATION OF OVERLAND FLOW

Tymoteusz Zydrón, Andrzej Wałęga

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Witold Bochenek

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyńskiego  
PAN, Zakład Badań Geośrodowiska w Krakowie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki obliczeń wielkości spływu powierzchniowego z wykorzystaniem jednowymiarowych modeli infiltracji Green-Ampta, Diskina-Nazimowa oraz metodą NRCS-CN. W celu weryfikacji poprawności zastosowanych metod obliczeniowych wyniki obliczeń porównano z pomiarami spływu powierzchniowego z dwóch zdarzeń opadowych zarejestrowanych na jednym z poletek doświadczalnych Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Szymbarku k. Gorlic (Beskid Niski). Wyniki obliczeń wykazały, że model Green-Ampta dał najbardziej zbliżone wyniki obliczeń do danych pomiarowych. Nieco gorsze wyniki obliczeń uzyskano z modelu Diskina-Nazimowa, przy czym model ten dał wyniki porównywalne do danych pomiarowych w przypadku drugiego zdarzenia opadowego charakteryzującego się znaczną intensywnością, a zaniżał wyraźnie wielkość spływu w przypadku pierwszego zdarzenia opadowego. Natomiast wyniki obliczeń otrzymane z modelu NRCS-CN wykazały znaczną rozbieżność w stosunku do wyników pomiarów, co wskazuje, że model ten wymaga kalibracji uwzględniającej warunki klimatyczne naszego kraju.

**Abstract.** Results of overland flow (rainfall excess) obtained using one-dimensional infiltration models (Green-Ampt, Diskin-Nazimow and NRCS-CN models) are presented in the paper.

---

Adresy do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Tymoteusz Zydrón, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl; dr hab. inż. Andrzej Wałęga, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, awalega@wp.pl, dr Witold Bochenek, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyńskiego PAN, Zakład Badań Geośrodowiska w Krakowie, Stacja Badawcza w Szymbarku, e-mail: Witold.Bochenek@zg.pan.krakow.pl.

The calculation results obtained for two rainfall scenarios were compared with overland flow measured in experimental plot of Research Station of Institute of Geography and Spatial Organization of Polish Academy of Science in Szymbark (Beskid Niski Mts.). The comparison of simulated and measured values of overland flow revealed that the best results were obtained using Green-Ampt model. Insignificantly worse simulation results were calculated by Diskin-Nazimow model. Overland flow value obtained by the model for the second rainfall scenario was similar to measurement, and simulation result in case of the first rainfall scenario was significantly smaller than measurement result. In turn, overland flow results obtained using NRCS-CN model gave significant differences in comparison to measurements. It indicates that the model needs calibration procedure which will consider Polish climate condition.

**Słowa kluczowe:** spływ powierzchniowy, modele hydrologiczne

**Keywords:** overland flow, hydrological models

## WPROWADZENIE

Jednym ze składników obiegu wody w przyrodzie jest opad, który w formie deszczu lub śniegu dociera do powierzchni terenu, a następnie jest transponowany w formie spływu po jej powierzchni, infiltruje w głąb profilu gruntowego, paruje lub jest wykorzystywany przez rośliny do prowadzenia procesów życiowych. W obliczeniach hydrologicznych istotne znaczenie ma określenie wielkości spływu powierzchniowego, który powstaje w okresie występowania intensywnych opadów, przyczyniając się do powstania wezbrań w dolinach rzecznych [Florek i in. 2007, Wałęga i in. 2011, Wałęga i Cupak 2012]. W takim przypadku wielkość spływu jest silnie związana z wielkością infiltracji, a w mniejszym stopniu zależy od wielkości pozostałych czynników bilansu wodnego. Podstawowymi metodami określania wielkości spływu powierzchniowego są pomiary terenowe oraz obliczenia hydrologiczne, które stanowią empiryczny lub uproszczony fizyczny sposób opisu infiltracji wody opadowej w gruncie. Wśród podstawowych modeli hydrologicznych służących do obliczeń infiltracji dominują przede wszystkim modele jednowymiarowe, m.in. propozycje Greena i Ampta [1911], Kostiakova [1932], Hortona [1933, 1939, 1940], Philipa [1957], Holtona [1961], Morel-Seytoux i Khanji [1974] czy też Smitha i Parlange [1978]. Powszechnie na świecie stosowana jest również metoda NRCS-CN (*National Resources Conservation Services – Curve Number*), umożliwiająca określenie tzw. opadu efektywnego (skutecznego), który uwzględnia straty opadu głównie w wyniku procesu infiltracji [NEH 1972, Ignar 1988, Ven Te Chow i in. 1988, Maidment 1993, Wałęga i in. 2012, Krzanowski i in. 2013].

Celem pracy były porównanie wyników obliczeń spływu powierzchniowego otrzymanych na podstawie wybranych jednowymiarowych modeli hydrologicznych oraz ich weryfikacja względem wyników pomiarów na polletku doświadczalnym.

## METODY PRACY

Do obliczeń infiltracji wykorzystano model Green-Ampta, który oprócz hydrologii, jest również stosowany w geologii inżynierskiej do analiz przepływu wody w gruncie nienasyconym [Pradel i Raad 1993, Fuchu i in. 1998, Fourie i in. 1999, Cho i Lee 2002,

Zydroń i Demczuk 2013]. Model ten w postaci pierwotnej stosowany jest zasadniczo do opisu przepływu wody w ośrodku jednorodnym przy opadzie ustalonym [Mein i Larson 1973], ale obecnie można spotkać wiele jego modyfikacji [Chu 1978, Chow i in. 1988, Chu i Marino 2005, Chen i Young 2006, Liu i in. 2008, Cho 2009] umożliwiających wykorzystanie go do obliczeń infiltracji w warunkach opadu nieustalonego dla ośrodków niejednorodnych. W ramach obliczeń określa się wartość chłonności gruntu (potencjalną prędkość infiltracji wody w grunt), korzystając z następującego równania:

$$f = k_s \cdot i = k_s \frac{z_f + \Psi_f + H_p}{z_f} \quad (1)$$

gdzie:

- $k_s$  – współczynnik filtracji gruntu przy jego pełnym nasyceniu,  $m \cdot s^{-1}$ ,
- $i$  – spadek hydrauliczny,
- $H_p$  – wysokość zatopienia powierzchni gruntu,  $m$  (często zakładana jako równa 0, gdyż zatopienie powierzchni terenu uruchamia sływ powierzchniowy),
- $z_f$  – głębokość położenia frontu zwilżania,  $m$ ,
- $\Psi_f$  – wysokość ciśnienia ssania gruntu na froncie zwilżania,  $m$ , określona z następującej formuły [Hydrology handbook 1996]:

$$= \exp \left[ \begin{array}{l} 6,53 - 7,326 \cdot n + 0,00158 Cl^2 + 3,809 \cdot n^2 + 0,000344 \cdot Sa \cdot Cl \\ -0,04989 \cdot Sa \cdot n + 0,0016 \cdot Sa^2 \cdot n^2 + 0,0016 \cdot Cl^2 \cdot n^2 \\ -0,0000136 \cdot Sa^2 \cdot f_c - 0,00348 \cdot Cl_i^2 \cdot n \\ -0,000799 \cdot Sa^2 \cdot n \end{array} \right] [cm] \quad (2)$$

przy czym:

- $n$  – porowatość gruntu,
- $Sa$  – zawartość frakcji piaskowej, %,
- $Cl$  – zawartość frakcji ilowej, %.

Określenie wielkości spływu powierzchniowego polega na porównywaniu w kolejnych krokach czasowych wartości chłonności gruntu z intensywnością opadu, co w praktyce sprowadza się do określenia ilości wody zakumulowanej w profilu gruntowym.

Kolejnym modelem zastosowanym w pracy była propozycja Diskina i Nazimowa [1995]. W ogólnym zarysie w metodzie rozpatrywany jest przepływ wody opadowej przez warstwę gruntu o stałej miąższości. Odpływ wody z warstwy gruntu oraz prędkość infiltracji opisane są następującymi równaniami liniowymi:

$$g(t) = f_c \cdot \frac{S(t)}{S_m} \quad (3)$$

$$f(t) = f_0 - \frac{f_0 - f_c}{S_m} \quad (4)$$

gdzie:

- $g(t)$  – odpływ wody z warstwy gruntu,
- $f(t)$  – prędkość infiltracji,
- $S(t)$  – wilgotność gruntu przeliczona na m słupa wody,
- $S_m$  – wilgotność gruntu przy pełnym nasyceniu,
- $f_0$  – początkowa wartość współczynnika infiltracji,
- $f_c$  – minimalna wartość współczynnika infiltracji.

Rzeczywisty dopływ wody opadowej do warstwy gruntu ( $q(t)$ ) w danym czasie jest regulowany przez chłonność gruntu –  $f(t)$  oraz intensywność opadu –  $J(t)$  w następującym zakresie:

$$- \text{jeżeli } J(t) < f(t) \text{ to } q(t) = J(t) \text{ oraz } y(t) = 0 \quad (5)$$

$$- \text{jeżeli } J(t) \geq f(t) \text{ to } q(t) = f(t) \text{ oraz } y(t) = J(t) - f(t) \quad (6)$$

Zależność pomiędzy dopływem i odpływem wody z warstwy gruntu wynika z prawa zachowania masy i jest opisana następującym równaniem:

$$q(t) - g(t) = \frac{dS}{dt} \quad (7)$$

Podstawowym problemem w modelu jest dobór wartości początkowego i minimalnego współczynnika infiltracji. Drugi z tych parametrów można interpretować jako współczynnik filtracji, natomiast dobór pierwszego parametru wydaje się dosyć arbitralny i jest zależny przede wszystkim od początkowego stanu wilgotności gruntu. Podobnie jak w przypadku modelu Green-Ampt, obliczenia infiltracji polegają na porównaniu wartości chłonności gruntu z intensywnością opadu.

Kolejną metodą obliczeniową zastosowaną w pracy był model opadu efektywnego NRCS-CN. W metodzie tej wysokość odpływu bezpośredniego jest funkcją całkowitej wysokości opadu i strat początkowych, określanych przez zbiorczy parametr zwany *CN* (*CurveNumber*) [Wałęga i in. 2013]. Wielkość strat początkowych jest uzależniona od intercepcji szaty roślinnej, retencji powierzchniowej i infiltracji przed rozpoczęciem odpływu powierzchniowego. Wartości parametru *CN* zawierają się w przedziale od 0 do 100 i są funkcją typu gleb w zlewni, pokrycia terenu i stanu uwilgotnienia gleby przed wystąpieniem danego opadu. Przy wartości parametru równej 100 praktycznie nie występują straty opadu, a wysokość odpływu bezpośredniego jest równa wysokości opadu, natomiast w przypadku gdy  $CN = 1$ , praktycznie cały opad jest zatrzymywany w zlewni i odpływ nie występuje. Metoda ta została opracowana w oparciu o zarejestrowane relacje opad-odpływ o czasie trwania 24 godzin. Sumowana retencja po rozpoczęciu odpływu powierzchniowego, kształtowana jest głównie przez infiltrację i oznaczana przez  $R$ . Wartość ta rośnie wraz z upływem czasu do tzw. maksymalnej retencji  $S$ . Opad efektywny  $PE$ , równy odpływowi powierzchniowemu, również rośnie wraz ze wzrostem wysokości opadu całkowitego  $P$ . Stosunek aktualnej sumowanej retencji  $R$  do maksymalnej retencji  $S$  jest równy stosunkowi wysokości opadu efektywnego  $PE$  do wysokości opadu całkowitego  $P$  pomniejszonego o straty początkowe  $Ia$ :

$$\frac{PE}{P - Ia} = \frac{R}{S} \quad (8)$$

Równocześnie spełnione jest równanie bilansowe:

$$P = Ia + R = PE \quad (9)$$

Wszystkie wartości w równaniach (8) i (9) podane są w mm.

Rozwiązując równanie (8) i (9) dla  $PE$ , przy założeniu że  $P > Ia$ , otrzymujemy:

$$PE = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (10)$$

Przy  $P < Ia$  opad efektywny jest równy 0. W równaniu (10) można wprowadzić wyrażenie:

$$Ia = 0,2 S \quad (11)$$

Występująca w wyrażeniu (11) stała wielkość równa 0,2 jest dość subiektywna, ale szeroko badana. Przykładowo Ponce [1989] podaje, że w małych zlewniach klimatu wilgotnego i umiarkowanie suchego wartość stałej  $Ia$  wahała się od 0 do 0,26. Niemniej do praktycznego stosowania SCS zaleca wartość 0,2.

Ostatecznie wzór na ustalenie skumulowanego opadu efektywnego  $PE$  przyjmuje postać:

$$PE = \frac{(P - 0,25)^2}{P + 0,8S} \quad (12)$$

Występująca we wzorze wartość maksymalnej retencji  $S$  obliczana jest z zależności:

$$S = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (13)$$

## CHARAKTERYSTYKA POLETKA DOŚWIADCZALNEGO

Na potrzeby obliczeń wielkości spływu powierzchniowego określono właściwości fizyczne gruntów zalegających na fragmencie stoku Bystrzyca w Szymbarku k. Gorlic. Analizowany fragment zbocza znajduje się na terenie Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk i charakteryzuje się przeciętnym nachyleniem ok. 10,5°. Na zboczu tym usytuowane są cztery poletka doświadczalne pokryte roślinnością trawiastą, które wykorzystywane są do pomiarów wielkości spływu powierzchniowego i erozji gleb. Na potrzeby niniejszej pracy do porównań wykorzystano wyniki obserwacji spływu powierzchniowego z poletka o wymiarach 40 × 6 m (długość × szerokość).

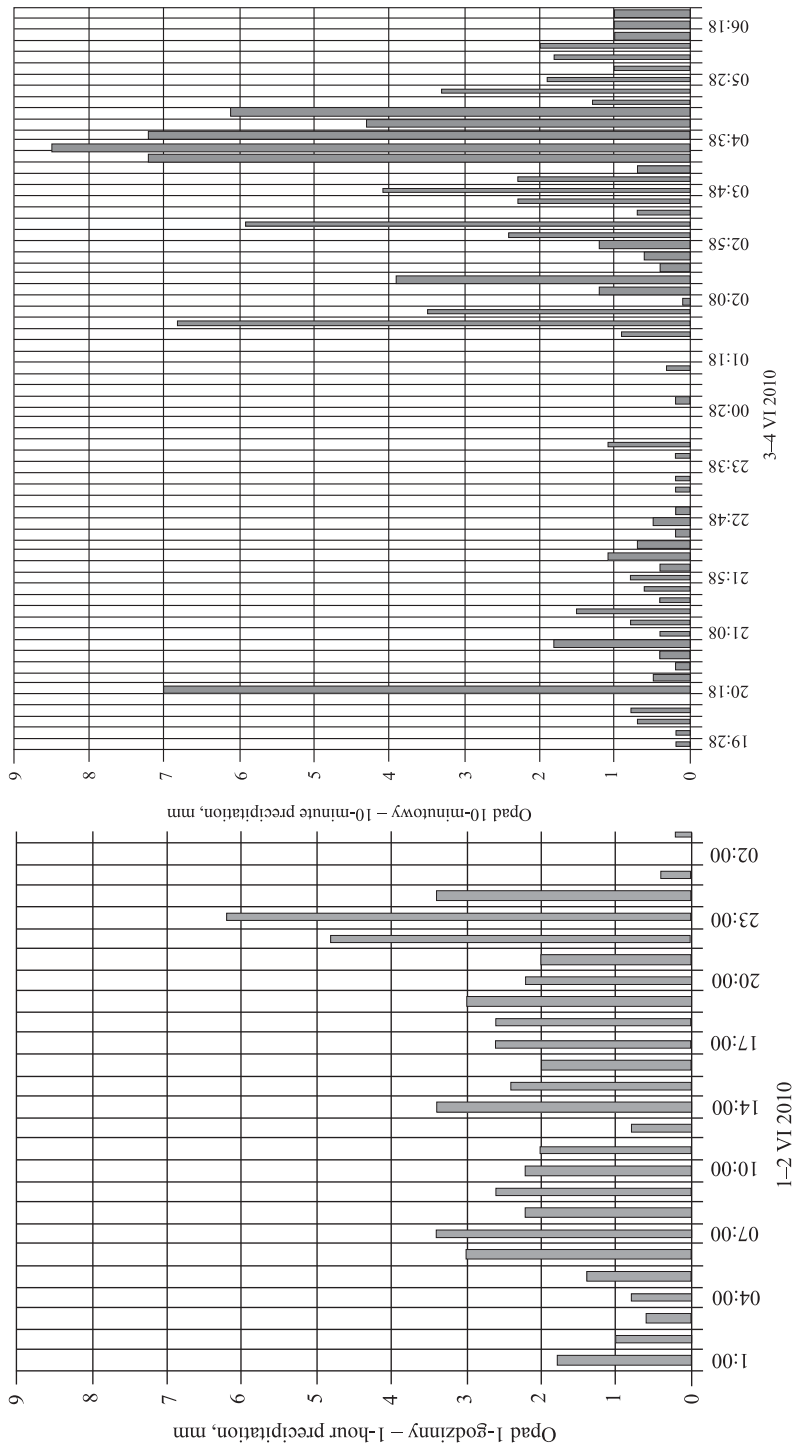
Na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych określono właściwości fizyczne próbek gruntów z sąsiedztwa poletka zalegających na głębokości 0,1, 0,3 oraz 0,6 m p.p.t. (tab. 1). Właściwości hydrauliczne gruntów określono na podstawie pomiarów polowych metodą infiltrometru dwupierścieniowego oraz na podstawie badań laboratoryjnych w edometrze. Jako parametry wyjściowe do obliczeń przyjęto wyniki badań uzyskane dla gruntu pochodzącego z głębokości 0,1 m p.p.t., przy czym zgodnie z zaleceniami Morel-

Seytoux i Khanji [1974] wartość wodoprzepuszczalności przyjęto jako równą połowie wartości współczynnika filtracji określonej z badań terenowych.

Tabela 1. Właściwości fizyczne gruntów z poletka doświadczalnego  
Table 1. Geotechnical parameters of soils from experimental plot

Parametr – Parameter	Jednostka Units	Głębokość poboru – Depth		
		0,1 m p.p.t. below ground surface level	0,3 m p.p.t. below ground surface level	0,6 m p.p.t. below ground surface level
Zawartość frakcji / Fraction content:				
– piaskowa – sand (2–0,063 mm)	%	44,0	31,0	31,5
– pyłowa – silt (0,063–0,002 mm)	%	45,2	55,3	56,4
– ilowa – clay (< 0,002 mm)	%	10,8	13,7	12,1
Nazwa gruntu wg PN-EN ISO 14688-2 Name acc. to PN-EN ISO 14688-2		saclSi	saclSi	saclSi
Granice konsystencji Consistency limits				
– plastyczności – plasticity limit	%	–	17,0	–
– płynności – liquid limit	%	–	31,5	–
Gęstość objętościowa Density of soil	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,82	1,99	2,05
Wilgotność naturalna Natural moisture content	%	19,25	20,44	20,65
Porowatość Porosity	–	0,434	0,389	0,370
Współczynnik filtracji Coefficient of permeability				
– pomiary terenowe – insitu tests	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$ – $4,2 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$ – $8,1 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$ – $8,6 \cdot 10^{-8}$
		( $2,9 \cdot 10^{-6}$ średnia – average)	( $8,0 \cdot 10^{-8}$ średnia – average)	( $6,4 \cdot 10^{-8}$ średnia – average)
– pomiary laboratoryjne – laboratory tests		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	–	$6,9 \cdot 10^{-10}$ – $9,8 \cdot 10^{-9}$
Wielkość ciśnienia ssania u frontu zwilżenia Suction height at wetting front	m	0,191	0,379	0,415

Jako dane referencyjne dla wykonanych obliczeń infiltracji wykorzystano dwa następujące po sobie scenariusze opadowe z czerwca 2010 roku. W pierwszym przypadku analizowano 28-godzinny ciągły opad z okresu 1–2 czerwca (rys. 1a) charakteryzujący się sumaryczną wysokością 58 mm. Z kolei w drugim wariancie wykonano obliczenia dla 11,5-godzinnego opadu o wysokości 107,0 mm, który wystąpił w nocy z 3 na 4 czerwca 2010 roku (rys. 1b) i stanowił drugi pod względem wielkości opad w kilkudziesięcioletniej historii stacji naukowej w Szymbarku. Pomiary wilgotności



Ryc. 1. Scenariusze opadowe przyjęte do analiz  
Fig. 1. Rainfall scenarios used in analysis

w okresie poprzedzającym pierwsze zdarzenie opadowe przeprowadzone z wykorzystaniem sondy TDR wykazały, że wilgotność objętościowa gruntu w powierzchniowej strefie profilu wynosiła 0,366.

## WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na poletku doświadczalnym wykazały, że w okresie 1–2 czerwca 2010 roku (scenariusz opadowy 1) wielkość spływu powierzchniowego wyniosła 7,2 mm, stanowiąc 12,4% opadu. Z kolei bezpośrednie pomiary wielkości odpływu wody z poletka dla drugiego okresu opadowego (3–4 czerwca 2010 roku) wykazały, że był znacznie większy i wyniósł 100,4 mm, stanowiąc tym samym aż 94% wielkości opadu. Analiza przebiegu opadu oraz zmian wielkości spływu wykazały, że w trakcie trwania opadu pojawiły się okresy w których ilość wody dopływającej do zbiornika pomiarowego przewyższała znacznie wielkość opadu. Wielkość opadu zanotowana przez deszczomierz w końcowej fazie trwania opadu od godziny 2:48 do 4:18 (460–540. minuta trwania opadu) wyniosła 34,1 mm natomiast wielkość spływu określono jako równą 66,4 mm. Co prawda znane są w hydrologii przypadki występowania spływu powrotnego [Scherrer i in. 2007], natomiast ze względu na brak możliwości jednoznacznego określenia przyczyn tego zjawiska pominięte ono zostało w analizie wyników badań.

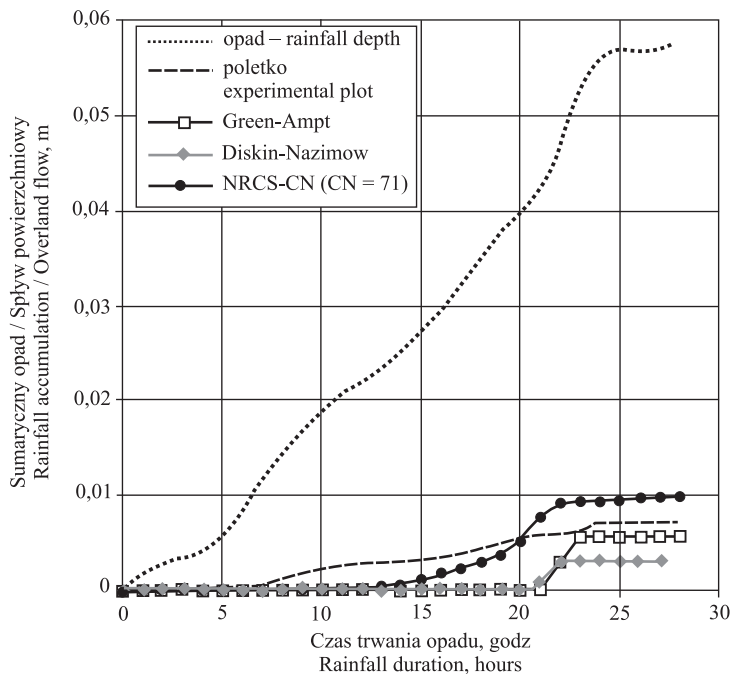
Na ryc. 2 i 3 przedstawiono wyniki zmian wielkości spływu powierzchniowego w czasie trwania rozważanych okresów opadowych. W przypadku pierwszego scenariusza opadowego zauważalne jest, że spływ powierzchniowy odnotowano już w początkowej fazie trwania opadu (7. godzina) i sukcesywnie był obserwowany praktycznie do końca trwania opadu. Z kolei obliczenia wykazały, że spływ powierzchniowy generowany jest najwcześniej ok. 14. godziny trwania opadu, a w przypadku metod Green-Ampt oraz Diskina-Nazimowa spływ powierzchniowy występował jedynie w krótkim okresie, pomiędzy 20. a 23 godziną trwania opadu. W celu określenia opadu efektywnego wg metody NRCS-CN przyjęto wg metody oryginalnej wartość parametru CN wynoszącą 71 (dla podłoża pokrytego trawą).

Nieco inaczej prezentują się wyniki pomiarów dla drugiego okresu obserwacji, gdzie odnotowano znacznie bardziej intensywny opad niż w przypadku pierwszego scenariusza opadowego. Wyniki pomiarów wykazały, że już po ok. 100 minutach trwania opadu generowany jest spływ powierzchniowy, który kulminację osiągnął w końcowej fazie trwającej od 480. do 610. minuty. Przy porównaniu wyników obliczeń z danymi pomiarowymi da się zauważyć, że bardzo podobny przebieg zmian wielkości akumulacji spływu powierzchniowego otrzymano z obliczeń modelem Green-Ampt. Z kolei wyniki obliczeń metodą Diskina-Nazimowa wykazały w początkowej fazie opadu ok. dwukrotnie większe wartości spływu niż wyniki pomiarów, natomiast od ok. 380. minuty trwania opadu wielkości przyrostu akumulacji spływu określonej z obliczeń i pomierzonych przebiegają podobnie. Interesujące wyniki obliczeń uzyskano z modelu NRCS-CN (CN = 71), gdzie zauważalne jest, że ok. 520. minuty trwania opadu wyliczona wartość przyrostu akumulacji spływu jest wyraźnie większa niż akumulacja opadu.

Zbioreze wyniki obliczeń zestawione w tabeli 2 wskazują, że w pierwszym z analizowanych przypadków wielkość spływu powierzchniowego pomierzona na poletku różni



się wyraźnie od wyników obliczeń. W przypadku tym wielkość sływu określona z obliczeń jest z reguły mniejsza niż wartości uzyskane z pomiarów terenowych. Najlepsze dopasowanie wyników obliczeń do wartości pomiarowych wykazał jednowymiarowy model Green-Ampta, gdzie różnica obu wyników wynosiła ok. 28%. Z kolei wyniki obliczeń modelem Diskina-Nazimowa były bardzo zbliżone i były one ponad dwukrotnie mniejsze od wartości pomierzonych.

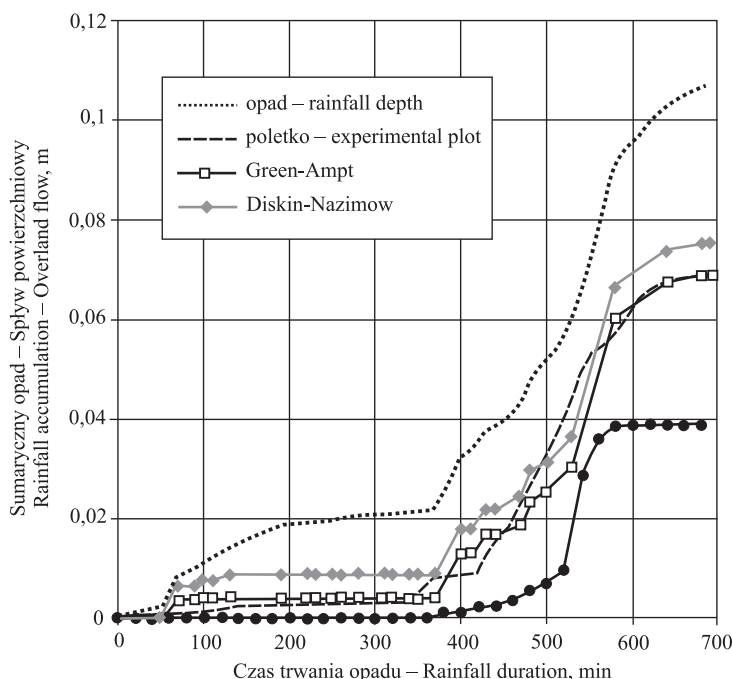


Ryc. 2. Porównawcze zestawienie wyników pomiarów oraz obliczeń wielkości sływu powierzchniowego na poletku doświadczalnych IGiPZ PAN w Szymbarku dla opadu z 1–2 czerwca 2010

Fig. 2. Comparison of measured and calculated overland flow on experimental plot of IGiPZ PAS in Szymbark – the first rainfall scenario (1–2 June 2010)

W przypadku drugiego scenariusza opadowego obliczone wielkości sływu powierzchniowego dla większości zastosowanych metod były podobne do wyników pomiarów. Stwierdzono, że podobnie jak w przypadku scenariusza 1 najlepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych uzyskano, stosując jednowymiarowy model Green-Ampta, gdzie wyniki uzyskane z modelu były o 0,6 mm większe, niż otrzymano z pomiarów. Wyniki obliczeń otrzymane za pomocą modelu Diskina-Nazimowa dały wartości sływu powierzchniowego nieznacznie zawyżone (o 4%). Natomiast model NRCS-CN uwzględniający straty glebowe dał zaniżoną wartość sływu powierzchniowego o ok. 41%. Te znaczne różnice w wynikach dla metody NRCS-CN w przypadku obu scenariuszy wynikają z tego, że w oryginalnej metodzie do kalibracji parametru CN przyjęto maksymalne roczne wysokości opadu, a więc analizowano tylko ekstremalne przypadki, a badania

proawodono wyłącznie w zlewniach płaskich o rolniczym charakterze. Stąd stosując oryginalną metodę w praktyce uzyskuje się wyniki opadu efektywnego, a zarazem wielkości odpływu powierzchniowego znacznie odbiegające od rzeczywistych. Potwierdzeniem tego są liczne badania opisane m.in. w pracach: Banasik i Woodward [2010], Miler [2012], Voullieme i in. [2012], de Paola i in. [2013], Krzanowski i in. [2013].



Ryc. 3. Porównawcze zestawienie wyników pomiarów oraz obliczeń wielkości spływu powierzchniowego na poletku doświadczalnych IGiPZ PAN w Szymbarku dla opadu z 3–4 czerwca 2010

Fig. 3. Comparison of measured and calculated overland flow on experimental plot of IGiPZ PAS in Szymbark – the second rainfall scenario (3–4 June 2010).

Tabela 2. Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości spływu powierzchniowego na poletku doświadczalnym

Table 2. Calculation and measurement results of overland flow in experimental plot

Metoda badań Estimation method	Wielkość spływu powierzchniowego, mm Overland flow value, mm	
	Zdarzenie opadowe nr 1 Rainfall scenario no 1	Zdarzenie opadowe nr 2 Rainfall scenario no 2
	Pomiary z poletka – Measured from plot	7,2
Green-Ampta	5,6	68,7
Diskin-Nazimow	3,0	75,2
NRCS-CN (CN = 71)	9,9	38,9

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono porównanie pomiarów wielkości spływu powierzchniowego na jednym z poletek doświadczalnych Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Szymbarku k. Gorlic z wynikami obliczeń za pomocą wybranych jednowymiarowych modeli hydrologicznych. Do analiz wykorzystano dwa zdarzenia opadowe, które wystąpiły w okresie 1–4 czerwca 2010 roku i charakteryzowały się zróżnicowaną wielkością oraz intensywnością opadu, generując spływ powierzchniowy. Obliczenia dały zróżnicowane wartości spływu powierzchniowego w zależności od zastosowanej metody, jak i w stosunku do wartości pomierzonych na poletku. Ogólnie wyniki obliczeń najbardziej zbliżone do danych pomiarowych uzyskano, stosując model Green-Ampta. Nieco gorszych wyników dostarczył model Diskina-Nazimowa, przy czym model ten dał wyniki obliczeń porównywalne do danych pomiarowych w przypadku drugiego zdarzenia opadowego, charakteryzującego się znaczną intensywnością, a zaniżał wyraźnie wielkość spływu w przypadku pierwszego zdarzenia opadowego. Natomiast wyniki obliczeń otrzymane dzięki modelowi NRCS-CN wykazały znaczną rozbieżność w stosunku do wyników pomiarów, co wskazuje, że model ten wymaga kalibracji uwzględniającej warunki fizjograficzne zlewni. Podsumowując wyniki analiz, można stwierdzić, że analizowane w pracy jednowymiarowe modele infiltracji Green-Ampta i Diskina-Nazimowa obrazujące uproszczony fizyczny przepływ wody przez grunt stanowią wartościowe narzędzie analizy do szacowania wielkości spływu, przy czym kluczowe znaczenia dla poprawności wyników obliczeń ma przede wszystkim właściwe rozpoznanie właściwości hydraulicznych gruntów.

## PIŚMIENNICTWO

- Banasik K., Woodward D.E., 2010. Empirical determination of runoff Curve Number for a small agriculture watershed in Poland. 2<sup>nd</sup> Point Federal Interagency Conference, Las Vegas June 27–July 1, 2010.
- Chen L., Young M.H., 2006. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resour. Res.* 42, W07420.
- Cho S.E., Lee S.R., 2002. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *J. Geotechn. Geoenviron. Engineer.* 128, 9, 756–763.
- Cho S.E., 2009. Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. *Engineer. Geol.* 105, 32–43.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill New York.
- Chu S.T., 1978. Infiltration during an unsteady rain. *Water Resour. Res.* 14, 3, 461–466.
- Chu X., Marino M.A., 2005. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall. *J. Hydrol.* 313, 195–207.
- de Paola F., Ranucci A., Feo A., 2013. Antecedent moisture condition (AMS) frequency assessment: a case Study in southern Italy. *Irrigat. Drainage* 62 (Suppl. 2), 61–71.
- Diskin M.H., Nazimow N., 1995. Linear reservoir with feedback inlet as a model for infiltration process. *J. Hydrol.* 172, 313–330.
- Green W.H., Ampt G.A., 1911. Studies of soils physics I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4, 1–24.

- Florek J., Strużyński A., Mucha J., 2007. Hydrodynamic effects of flood wave travel along Targaniczanka stream. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecus* 6(4), 37–48.
- Fourie A.B., Rowe D., Blight G.E., 1999. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Geotechnique* 49, 1, 1–13.
- Fuchu D., Lee C.F., Sijing W., 1998. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineer. Geol.* 51, 279–290.
- Holton H.N., 1961. A concept for infiltration estimates in watershed engineering. U.S. Dept. Agr., Agr. Res. Serv., ARS 41–51.
- Horton RE., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14: 446–460.
- Horton RE., 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Transactions, American Geophysical Union* 20, 693–711.
- Horton RE. 1940. An approach towards physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. of the Soil Science Society of America* 5, 399–417.
- Hydrology handbook. Second Edition. 1996. American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 28, 784.
- Ignar S. 1988. Metoda SCS i jej zastosowanie do wyznaczania opadu efektywnego. *Przeg. Geofiz.* 4, 451–455.
- Kostiakov A.N., 1932. On Dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions of 6<sup>th</sup> Congress of International Soil Science Society, Moscow, Part Q*, 17–21.
- Krzanowski S., Miler A.T., Wałęga A., 2013. Wpływ warunków wilgotnościowych na estymację wartości parametru CN w zlewni górskiej. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 3/4, 105–117
- Liu J., Zhang J., Feng J., 2008 Green-Ampt model for layered soils with nonuniform initial water content under unsteady infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1041–1047.
- Maidment D.R., 1993. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill New York.
- Mein R.G., Larson C.L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.* 9, 2, 384–394.
- Miler A.T., 2012. Wpływ zmian użytkowania terenu na odpływy wezbraniowe z obszarów o znacznym zalesieniu Roztocza Środkowego. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 2/1, 173–182.
- Morel-Seytoux H.J., Khanji J., 1974. Derivation of an equation of infiltration. *Water Resour. Res.* 10, 4, 795–800.
- National Engineering Handbook SCS 1972. Soil Conservation Service, Section 4, U.S. Department of Agriculture Washington D.C.
- Philip J.R., 1957. The theory of infiltration. 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83, 345–357.
- PN-EN ISO 14688-2, 2006. *Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. PKN Warszawa.
- Pradel D., Raad G., 1993. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *J. Geotech. Engineer.* 119, 2, 315–332.
- Scherrer S., Naef F., Faeh A.O., Cordery I., 2007. Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrol. Earth System Sci.* 11, 907–922.
- Smith R.E., Parlange J.-Y., 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.* 14, 3, 533–538.
- Ponce, V.M., 1989. *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall Upper Saddle River (NJ).
- Voullieme D.C., Garcia-Navarro P., Murillo J., 2012. Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCSCurve Number simulation of rainfall/runoff events. *J. Hydrol.* 448–449, 39–59
- Ven Te Chow, Maidment D.K., Mays LW., 1988. *Applied of Hydrology*. McGraw-Hill New York.

- Wałęga A., Grzebinoga M., Paluszkiewicz B., 2011. On using the Snyder and Clark unit hydrograph for calculations of flood waves in a highland catchment (the Grabinka river example). *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 10(2) 2011, 47–56.
- Wałęga A., Edyta Drożdżał E., Piórecki M., Radoń R., 2012. Wybrane problemy związane z modelowaniem odpływu ze zlewni niekontrolowanych w aspekcie projektowania stref zagrożenia powodziowego. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 11(3), 57–68.
- Wałęga A., Cupak A., 2012. Zastosowanie geomorfoklimatycznego chwilowego hydrogramu jednostkowego Clarka do symulacji wezbrań opadowych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 1(3), 69–78.
- Zydroń T., Demczuk P., 2013. Analiza ruchów masowych wywołanych ulewnym opadem na przykładzie osuwisk w Owczarach koło Gorlic. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 12(4), 107–118.

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 16.06.2014*