ŚRODOWISKO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-Ś/2012
ZESZYT 23
ROK 109
ISSUE 23
YEAR 109

ELŻBIETA JAROSIŃSKA*, BARBARA KRĘGIEL, MIROSŁAW JANKIEWICZ, PATRYK KOZŁOWSKI**

WPŁYW DOKŁADNOŚCI ODWZOROWANIA SIECI RZECZNEJ NA SYMULOWANY MODELEM GEOM HYDROGRAM ODPŁYWU NA PRZYKŁADZIE ZLEWNI KARPACKICH

INFLUENCE OF RIVER NETWORK MAPPING ACCURACY ON RUNNOF HYDROGRAPH SIMULATED BY THE GEOM MODEL APPLIED IN CARPATHIAN CATCHMENTS

Streszczenie

Korzystając z map topograficznych w małej skali, należy zawsze uwzględniać fakt, że są one mapami niedokładnymi, a parametry wyznaczone na ich podstawie mogą być obarczone dużymi błędami. Niniejszy artykuł pozwala na analizę wielkości różnic występujących przy wyznaczaniu hydrogramów odpływu w zlewniach niekontrolowanych, uzależnionych od parametrów hydrograficznych zlewni, wyznaczonych na bazie map topograficznych w skali 1:50 000.

Słowa kluczowe: *zlewnia, sieć rzeczna, opad efektywny*, *parametry hydrograficzne zlewni*, *prawa Hortona*, *hydrogram odpływu, dokładność*

Abstract

In using small-scale topographic maps, we always have to bear in mind their inaccuracy, and that the parameters estimated on their basis may be burdened with significant differences. The following work allows for an analysis of error size occurring when estimating runoff hydrographs for uncontrolled catchments that are dependent on catchment hydrograph parameters, estimated based on topographic maps in 1:50 000 scale.

Keywords: *catchment, river network*, *effective precipitation*, *hydrographic parameters of catchment*, *Horton laws*, *runoff hydrograph*, *accuracy*

* Dr inż. Elżbieta Jarosińska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Barbara Kręgiel, mgr inż. Mirosław Jankiewicz, mgr inż. Patryk Kozłowski, studenci studiów podyplomowych Zarządzanie Ryzkiem Popowodziowym, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Źródłem danych do modeli hydrologicznych są często mapy topograficzne. W przypadku powierzchni zlewni do 10 km^2 wykorzystywane są mapy topograficzne w dużej skali, np.: 1:10 000. Natomiast, gdy badana zlewnia ma powierzchnię większą niż 10 km^2, korzysta się z map w małej skali, np. 1:50 000. Niestety mapy takie są mniej dokładne, a liczba zaznaczonych na nich cieków, zwłaszcza odcinków źródłowych, jest mniej liczna lub bardzo niewyraźna. Problemem staje się więc wyznaczenie dla nich zlewni, co często prowadzi do pomijania tych najkrótszych odcinków cieków, dla których wyznaczenie zlewni cząstkowych jest zbyt utrudnione lub wręcz niemożliwe ze względu na większy poziom generalizacji, także w odniesieniu do informacji o ukształtowaniu wysokościowym (poziomic). Aktualne jest w związku z tym pytanie, jaki błąd popełnia się, korzystając z mniej dokładnych danych lub stosując uproszczenia w wykorzystanej w oszacowaniu parametrów modelu sieci rzecznej.

2. Cel i zakres badań

Celem niniejszego artykułu jest zbadanie wpływu dokładności odwzorowania sieci rzecznej na parametry hydrogramu odpływu, tj. kulminację wezbrania w Q_{max}, czas wznoszenia, czas bazowy i objętość wezbrania w zlewniach niekontrolowanych. Do zasymulowania hydrogramu odpływu wykorzystano: do wyznaczenia opadu efektywnego metodę *SCS*, a do przekształcenia opadu efektywnego w hydrogram odpływu – geomorfologiczny model odpływu *GEOM* [3, 16, 17]. Jedynym zmiennym parametrem była gęstość sieci rzecznej, w szczególności cieków pierwszego rzędu, co ma bezpośredni wpływ na wartość wskaźników praw Hortona, będących parametrami modelu *GEOM*.

Do realizacji postawionego celu wybrano trzy zlewnie o zbliżonej wielkości powierzchni, posiadające gęstą sieć rzeczną, a w szczególności znaczną liczbę cieków 1. rzędu. W kolejno rozpatrywanych przypadkach (P0-P4) transformowano opad w odpływ, uwzględniając wpływ pominięcia cieków 1. rzędu o długości odpowiednio mniejszych od: 200 m (P1), 300 m (P2), 500 m (P3) i 1000 m (P4) na wielkość odpływu ze zlewni. Uwzględniono jedynie te cieki, które nie miały wpływu na zmianę rzędowości cieków w kolejnych węzłach. Za przypadek P0, stanowiący tło opracowania, przyjęto wszystkie cieki 1. rzędu znajdujące się na mapie w obrębie badanej zlewni, względem której dokonano porównania zmian parametrów hydrogramów odpływu w końcowym etapie pracy. Transformacji opadu w odpływ dokonano dla dwóch przyjętych rozkładów opadu.

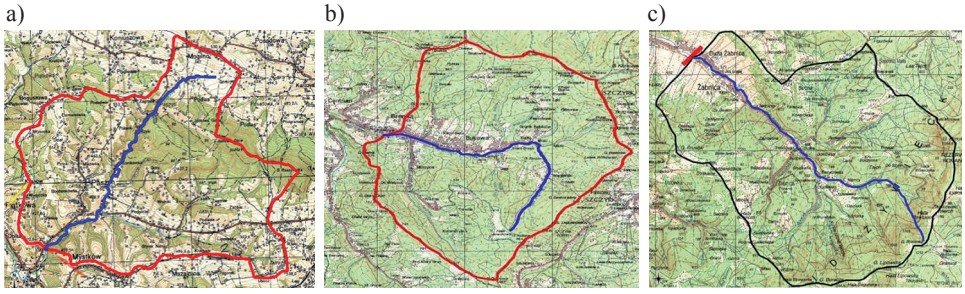
Dla każdej analizowanej zlewni wyznaczono: maksymalną sumę dobową opadu w zadanym czasie t i o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia p, parametry do metody *SCS*, parametry fizjograficzne zlewni oraz wskaźniki praw Hortona.

Dla każdego scenariusza opadowego zestawiono wyniki obliczeń oraz utworzono hydrogramy odpływu. Na ich podstawie dokonano porównania otrzymanych parametrów fal wezbraniowych w badanych zlewniach.

3. Charakterystyka analizowanych zlewni

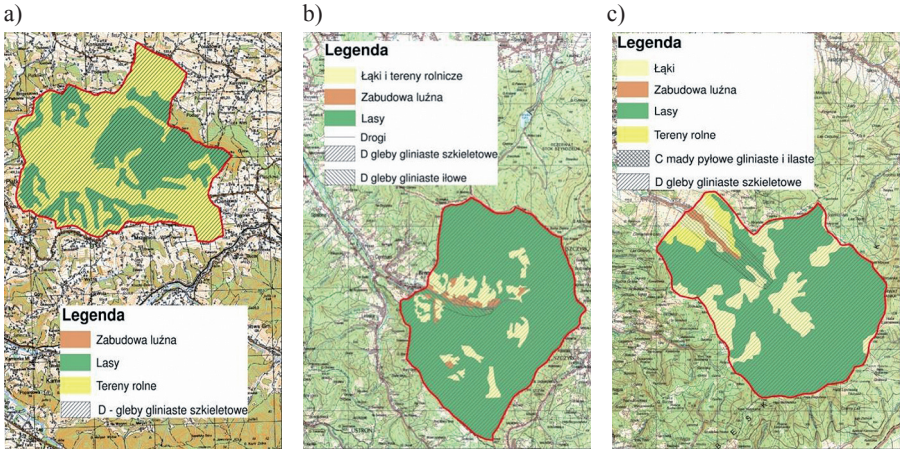
Do badań wybrano trzy zlewnie o powierzchniach około 30 km^2 do przekrojów obliczeniowych.

Łubinka jest prawym dopływem Dunajca. Przekrój zamykający jej zlewnię znajduje się między Mystkowem a Obłazami na wysokości 340 m n.p.m. Do przekroju obliczeniowego zlewnia Łubinki ma powierzchnię równą 26,66 km^2, a długość cieku głównego wynosi 7,27 km (rys. 1a). Brennica jest prawym dopływem Wisły. Źródła Brennicy znajdują się w Brennej na wysokości ok. 790 m n.p.m. Do przekroju obliczeniowego zlewnia Brennicy ma powierzchnię równą 29,691 km^2, a długość cieku głównego wynosi 7,128 km (rys. 1b). Żabnica jest prawym dopływem Soły. Do przekroju obliczeniowego zlewnia Żabnicy ma powierzchnię równą 31,456 km^2, a długość cieku głównego wynosi 8,592 km (rys. 1c).



Rys. 1. Lokalizacja zlewni: a) Łubinki (źródło: [9]), b) Brennicy (źródło: [8]), c) Żabnicy (źródło: [7]) do przekroju obliczeniowego na mapie topograficznej w skali 1:50 000

Fig. 1. a) Łubinka (source: [9]), b) Brennica (source: [8]), c) Żabnica (source: [7]) catchment location for control cross-section on a topographic map drawn to a scale of 1:50 000



Rys. 2. Mapy gleb i pokrycia terenu dla zlewni: a) Łubinki (źródło: [9]), b) Brennicy (źródło: [8]), c) Żabnicy (źródło: [7])

Fig. 2. Soil maps and terrain cover for catchments: a) Łubinka (source: [9]), b) Brennica (source: [8]), c) Żabnica (source: [7])

Według klasyfikacji Ignara [6] we wszystkich badanych zlewniach (rys. 2), występujące gleby gliniaste (o bardzo niskiej przepuszczalności i małym współczynniku filtracji) należą do grupy D metody *SCS*, a dodatkowo w zlewni Żabnicy wydzielono mały obszar przynależny do grupy C, charakteryzującej się przepuszczalnością gleb poniżej średniej i nieco większym współczynnikiem infiltracji niż w grupie D.

Na podstawie danych z bazy CORINE LAND COVER 2000 (dane wektorowe pokrycia terenu z 2000 roku), określony został rodzaj oraz wielkość powierzchni pokrycia badanych zlewni. Dla każdego rodzaju pokrycia danej zlewni oraz wyznaczonej grupy gleby określone zostały średnie ważone parametry *CN* (tab. 1).

Tabela 1

Zestawienie rodzaju gleb, zagospodarowania terenu wg CLC, średniej wartości parametru *CN* w zlewniach Łubinki (źródło: [9]), Brennicy (źródło: [8]) i Żabnicy (źródło: [7])

Rodzaj zagospodarowania	ZLEWNIA ŁUBINKI			ZLEWNIA BRENNICY			ZLEWNIA ŻABNICY		
	[km^2]	[%]	CN dla gleby klasy D	[km^2]	[%]	CN dla gleby klasy D	[km^2]	[%]	CN dla gleby klasy C i D
Lasy	10,794	40,49		26,320	88.65		23,308	74,10	
Zabudowa luźna	0,012	0,05		0,669	2,26		0,429	1,36	
Drogi	–		**91,91**	0,062	0,20	**92,39**	–		**88,17**
Tereny rolne	15,851	59,46		2,640	8,89		6,393	20,32	
Łąki	–						1,326	4,22	
SUMA	**26,657**	**100**		**29,691**	**100**		**31,456**	**100**	

4. Opad maksymalny i efektywny

Do analizy odpływu z badanych zlewni przyjęto maksymalny opad P o prawdopodobieństwie przewyższenia p = 1% i czasie trwania t = 24 h. Wartości $P_{1\%,24h}$ dla poszczególnych zlewni zostały odczytane z Atlasu hydrologicznego Polski [14] i wynoszą: dla Łubinki $P_{1\%,24h}$ = 118 mm, dla Brennicy $P_{1\%,24h}$ = 200 mm i dla Żabnicy $P_{1\%,24h}$ = 120 mm.

Znaczny wpływ na wielkość wezbrania w zlewni, oprócz sumy opadu i czasu jego trwania, ma zmienność czasowa natężenia deszczu. Wg zaleceń DVWK (1984) jako rozkład natężenia deszczu należy przyjmować deszcz z maksymalnym natężeniem w połowie czasu jego trwania [2]. Bazując na tych zaleceniach, w artykule przyjęto dwa scenariusze tego typu, tj.: scenariusz trójkątny (trójkąt równoramienny) i optymalny (tzw. DVWK). W scenariuszu DVWK rozkład sumy opadu w czasie jego trwania rozkłada się następująco: w początkowym czasie, który wynosi 30% trwania opadu t, spada 20% całkowitej sumy opadu. W kolejnych 20% czasu t spada 50% deszczu, a w jego końcowym etapie, czyli 50% czasu t spada 30% całkowitej sumy opadu.

Do obliczeń opadu efektywnego wykorzystano metodę *SCS CN* (*Soil Conservation Service* – obecnie *Natural Resources Conversation Service*), która opiera się na znajomości wielkości opadu całkowitego, rodzaju gleb, sposobu pokrycia terenu oraz uwilgotnienia gleb

na początku opadu. Te wszystkie czynniki uwzględnia tzw. parametr *CN – curve number* (numer krzywej) [4]. *CN* to parametr przyjmujący wartości z przedziału 0–100, określany na podstawie przepuszczalności gleb w zlewni, rodzajów upraw lub użytkowania oraz ich uwilgotnienia w okresie poprzedzającym opad tzw. *PWW* – początkowe warunki wilgotności. W artykule przyjęto trzeci stopień uwilgotnienia gleb (*PWW III)* oznaczający, że istnieje znaczne prawdopodobieństwo wystąpienia odpływu powierzchniowego w zlewni ze względu na to, że ziemia została już nasycona wodą z poprzednich opadów.

5. Geomorfologiczny model odpływu

Na kształtowanie się odpływu w zlewni znaczny wpływ ma jej geomorfologia, stąd w geomorfologicznym modelu odpływu zastosowano koncepcję transformacji opadu efektywnego (zasilającego cieki 1-go rzędu) w hydrogram odpływu w badanej zlewni. Bazując na takim założeniu, Rodriguez-Iturbe i Valdes [12] przedstawili teorię geomorfologicznego hydrogramu jednostkowego, w której połączyli ilościową analizę geomorfologiczną zlewni z parametrami chwilowego hydrogramu jednostkowego [3, 13].

Hydrogram jednostkowy jest schematycznie przedstawioną reakcją zlewni na jednostkowy opad efektywny o wysokości 1 mm trwający 1 h, którego kształt jest zbliżony do trójkąta. Jego podstawowe parametry można obliczyć, stosując wzory [10–12, 16]:

a) wysokość kulminacji q_p, [mm/h]:

$$q_p = 1{,}31 \cdot R_L^{0{,}43} \cdot \frac{v_n}{L_c} \tag{1}$$

gdzie:

R_L – wskaźnik długości cieków [–],
v_n – prędkość przepływu [m/s],
L_c – długość cieku głównego [km].

Prędkość przepływu v_n można obliczyć wzorem:

$$v_n = 0{,}665 \cdot \alpha_n^{0{,}6} \cdot (0{,}1 \cdot P_{ef.} \cdot A_{zl.})^{0{,}4} \tag{2}$$

gdzie:

α_n – współczynnik fali kinematycznej,
$P_{ef.}$ – natężenie opadu efektywnego [mm/h],
$A_{zl.}$ – powierzchnia zlewni [km^2].

Współczynnik fali kinematycznej można obliczyć ze wzoru:

$$\alpha_n = \frac{s_0^{1/2}}{n \cdot B^{2/3}} \tag{3}$$

gdzie:

s_0 – spadek cieku najwyższego rzędu [–],
n – współczynnik szorstkości Manninga,
B – szerokość prostokątnego koryta zastępczego [m].

b) czas wznoszenia fali t_p [h]:

$$t_p = 0,44 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0,55} R_L^{-0,38} \frac{L_c}{v_n} \tag{4}$$

gdzie:

R_A – wskaźnik powierzchni zlewni [–],
R_B – wskaźnik bifurkacji [–].

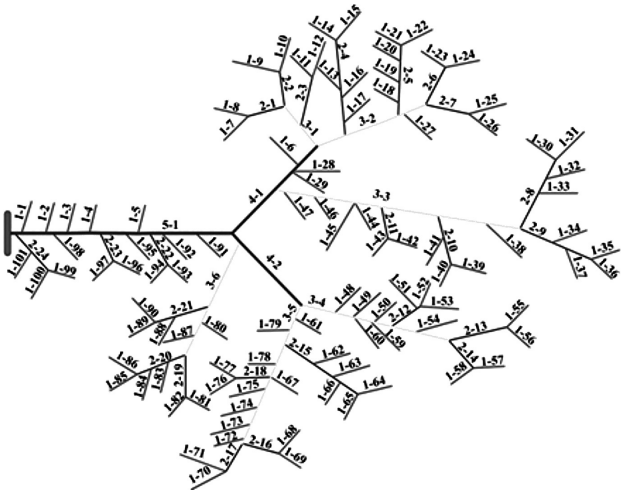
6. Parametry fizjologiczne zlewni

Bazując na mapach topograficznych w skali 1:50 000 dla każdej z badanych zlewni wyznaczono podstawowe parametry fizjograficzne (tab. 2).

Tabela 2

Zestawienie wartości parametrów fizjograficznych badanych zlewni (źródło: opracowanie własne na bazie [7–9])

Wybrane zlewnie		ZLEWNIA ŁUBINKI	ZLEWNIA BRENNICY	ZLEWNIA ŻABNICY
Powierzchnia zlewni *A*	**[km²]**	26,66	29,691	31,456
Długość cieku głównego *L*c	**[km]**	7,270	7,128	8,592
Szerokość prostokątnego koryta zastępczego cieku *B*	**[m]**	8,500	2,160	9,582
Spadek cieku najwyższego rzędu s_0	**[–]**	0,008	0,021	0,023
Spadek cieku głównego *I*	**[–]**	0,022	0,065	0,081



Rys. 3. Przykładowy schemat zlewni cieku Żabnica 5. rzędu (źródło: [7])
Fig. 3. Example of Żabnica catchment fifth row river (source: [7])

Podstawowym parametrem topologicznym zlewni jest rząd cieku, stąd zgodnie z klasyfikacją Hortona-Strahlera wszystkie odcinki sieci rzecznej, mające punkty źródłowe, nazywane są ciekami 1. rzędu [1, 5, 11, 13]. Gdy w punkcie węzłowym spotkają się dwa cieki tego samego rzędu, rząd cieku wychodzącego z węzła zwiększa się o 1 (np. 1 rząd + 1 rząd = 2 rząd). Natomiast, gdy w punkcie węzłowym spotkają się dwa cieki różnego rzędu, rząd cieku wychodzącego z węzła jest równy wyższemu z nich (np. 1 rząd + 2 rząd = 2 rząd) (rys. 3).

Pod względem hydrograficznym rozpatrywane zlewnie charakteryzują tzw. wskaźniki praw Hortona-Strahlera, tj. wskaźnik liczby cieków (bifurkacji) R_B, wskaźnik długości cieków R_L oraz wskaźnik powierzchni zlewni R_A [10].

Rozpatrując kolejne przypadki (P0–P4) dla każdej z badanych zlewni wyznaczono wartości liczbowe tych wskaźników (tab. 3–5).

Tabela 3

Wyniki praw Hortona dla zlewni Łubinki (źródło: opracowanie własne na bazie [9])

Przypadek (P0,…,P4)	**P0**	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
Liczba pominiętych cieków 1. rzędu	**0**	**2**	**10**	**23**	**39**
Wskaźnik liczby cieków R_B	4,6667	4,6190	4,4286	4,1190	3,7381
Wskaźnik długości cieków R_L	2,7020	2,6931	2,6637	2,6253	2,6327
Wskaźnik powierzchni zlewni R_A	5,1442	5,1178	4,9954	4,8332	4,7564

Tabela 4

Wyniki praw Hortona dla zlewni Brennicy (źródło: opracowanie własne na bazie [8])

Przypadek (P0,…,P4)	**P0**	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
Liczba pominiętych cieków 1. rzędu	**0**	**5**	**19**	**33**	**42**
Wskaźnik liczby cieków R_B	3,1747	3,1203	2,9682	2,8160	2,7182
Wskaźnik długości cieków R_L	2,5149	2,5036	2,4794	2,4673	2,4901
Wskaźnik powierzchni zlewni R_A	4,4218	4,3704	4,2551	4,1893	4,2364

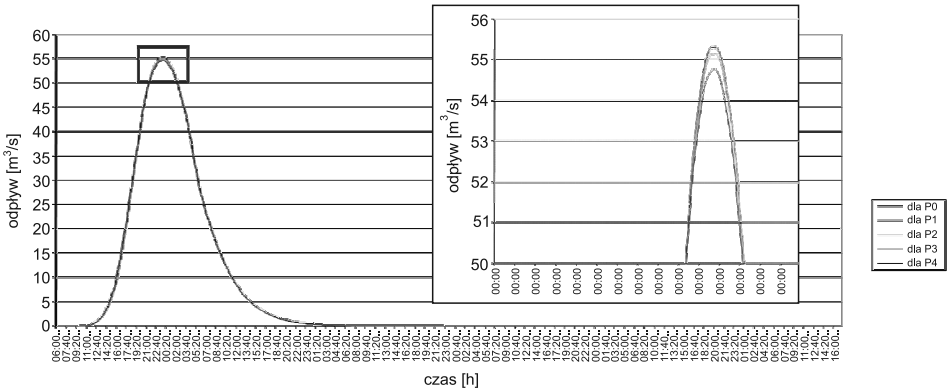
Tabela 5

Wyniki praw Hortona dla zlewni Żabnicy (źródło: opracowanie własne na bazie [7])

Przypadek (P0,…,P4)	**P0**	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
Liczba pominiętych cieków 1. rzędu	**0**	**1**	**7**	**29**	**46**
Wskaźnik liczby cieków R_B	3,3021	3,2917	3,2292	3,0000	2,8229
Wskaźnik długości cieków R_L	1,8894	1,8879	1,8803	1,8633	1,8693
Wskaźnik powierzchni zlewni R_A	3,8257	3,8193	3,7813	3,6574	3,6248

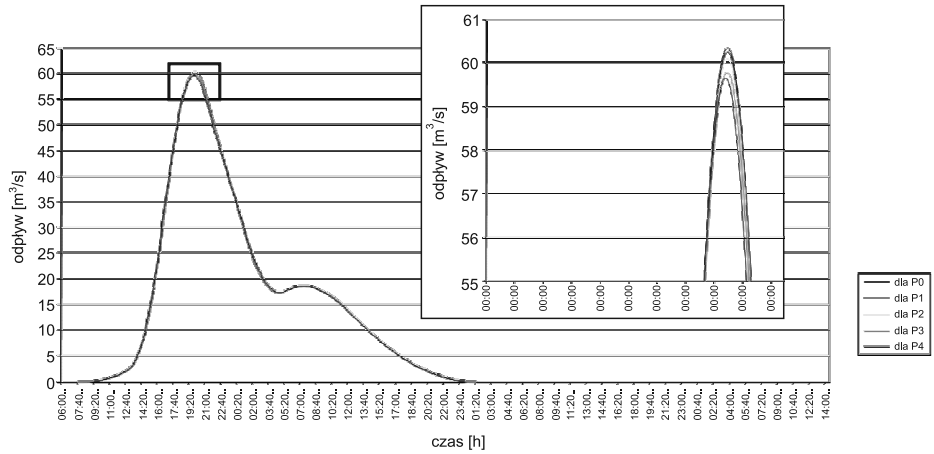
7. Wyznaczenie hydrogramów odpływu modelem *GEOM*

Dla wszystkich trzech badanych zlewni, dla obu przyjętych rozkładów opadu oraz dla wszystkich rozpatrywanych przypadków P0-P4 obliczono wartości parametrów charakteryzujących hydrogramy odpływu (tab. 6–8) oraz wyznaczono ich wykresy. Ograniczono się jedynie do zobrazowania hydrogramów ze zlewni Łubinki, w której wartości błędów względnych kulminacji fali Q_{max} były największe spośród wszystkich analizowanych zlewni (rys. 4, 5).



Rys. 4. Hydrogramy odpływu w zlewni Łubinki dla przypadków P0–P4 (scenariusz opadu: trójkąt) (źródło: [9])

Fig. 4. Runoff hydrograph in Łubinka catchment for P0–P4 cases (distribution of precipitation: triangle (source: [9])



Rys. 5. Hydrogramy odpływu w zlewni Łubinki dla przypadków P0–P4 (scenariusz opadu: DVWK) (źródło: [9])

Fig. 5. Runoff hydrograph in Łubinka catchment for P0–P4 cases (distribution of precipitation: DVWK) (source: [9])

Tabela 6

Porównanie wartości parametrów hydrogramu odpływu ze zlewni Łubinki dla scenariuszy opadu: trójkątnego i DVWK (źródło: opracowanie własne na bazie [9]

Przypadek (P0,…,P4)	**P0**		**P1**		**P2**		**P3**		**P4**	
Scenariusz opadowy	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**
Wartość kulminacji Q_{max} [m^3/s]	**55,3**	**60,3**	**55,2**	**60,2**	**55,1**	**60,0**	**54,9**	**59,7**	**54,7**	**59,6**
Błąd względny ($X1^*$/ $Q_{max,P0}$) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(1,8)**	**(1,6)**	**(3,6)**	**(5,0)**	**(7,2)**	**(10,0)**	**(11,0)**	**(12,0)**
Czas wznoszenia fali t_p [h]	17 h 50 min	14 h	17 h 50 min	14 h	17 h 50 min	14 h	17 h 50 min	14 h	17 h 50 min	13 h 50 min
Czas bazowy fali t_b [h]	60 h 40 min	41 h 30 min	60 h 50 min	41 h 30 min	60 h 50 min	41 h 30 min	61 h 10 min	41 h 40 min	61 h 20 min	41 h 40 min
Objętość fali V [tys. m^3]	2601,6	2600,8	2601,0	2600,8	2601,0	2600,8	2601,0	2600,9	2600,9	2600,7
Błąd względny ($X2^{**}$/V_{P0}) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,04)**	**(0,3)**	**(0,04)**

* $X1 = |\, Q_{max,P0} - Q_{max,Pi}\,|$, $i = 1, \ldots, 4$,
** $X2 = |\, V_{P0} - V_{Pi}\,|$, $i = 1, \ldots, 4$.

Tabela 7

Porównanie wartości parametrów hydrogramu odpływu ze zlewni Brennicy dla scenariuszy opadu: trójkątnego i DVWK (źródło: opracowanie własne na bazie [8]

Przypadek (P0,…,P4)	**P0**		**P1**		**P2**		**P3**		**P4**	
Scenariusz opadowy	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**
Wartość kulminacji Q_{max} [m^3/s]	**129,9**	**170,2**	**129,9**	**170,2**	**129,9**	**170,2**	**129,9**	**170,0**	**130,0**	**169,9**
Błąd względny ($X1^*$/$Q_{max,P0}$) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(1,1)**	**(1,2)**	**(1,8)**
Czas wznoszenia fali t_p [h]	13 h 10 min	10 h 40 min	13 h 10 min	10 h 40 min	13 h 10 min	10 h 40 min	13 h 10 min	10 h 40 min	13 h 10 min	10 h 40 min
Czas bazowy fali t_b [h]	36 h 30 min	30 h	36 h 33 min	30 h	36 h 30 min	30 h	36 h 30 min	30 h	36 h 33 min	30 h
Objętość fali V [tys. m^3]	5331,0	5326,7	5331,1	5326,8	5331,3	5325,7	5331,4	5323,8	5332,7	5321,9
Błąd względny ($X2^{**}$/V_{P0}) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,02)**	**(0,02)**	**(0,06)**	**(0,1)**	**(0,08)**	**(0,5)**	**(0,5)**	**(0,9)**

* $X1 = |\, Q_{max,P0} - Q_{max,Pi}\,|$, $i = 1, \ldots, 4$,
** $X2 = |\, V_{P0} - V_{Pi}\,|$, $i = 1, \ldots, 4$.

Tabela 8

Porównanie wartości parametrów hydrogramu odpływu ze zlewni Żabnicy dla scenariuszy opadu: trójkątnego i DVWK (źródło: opracowanie własne na bazie [7]

Przypadek (P0,…,P4)	P0		P1		P2		P3		P4	
Scenariusz opadowy	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**	**TR**	**DVWK**
Wartość kulminacji Q_{max} [m^3/s]	**61,2**	**65,3**	**61,2**	**65,3**	**61,1**	**65,2**	**60,9**	**64,9**	**60,9**	**64,9**
Błąd względny ($X1^*$/ $Q_{max,P0}$) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(1,6)**	**(1,5)**	**(4,9)**	**(6,1)**	**(4,9)**	**(6,1)**
Czas wznoszenia fali t_p [h]	14 h 40 min	12 h 40 min	14 h 40 min	12 h 40 min	14 h 40 min	12 h 40 min	14 h 40 min	12 h 40 min	14 h 40 min	12 h 30 min
Czas bazowy fali t_b [h]	66 h 10 min	56 h 30 min	66 h 10 min	56 h 30 min	66 h 10 min	56 h 40 min	66 h 20 min	56 h 30 min	66 h 10 min.	56 h 20 min
Objętość fali V [tys. m^3]	2863,4	2863,7	2863,4	2863,7	2863,4	2863,6	2863,2	2863,6	2863,4	2863,7
Błąd względny ($X2^{**}$/V_{P0}) [‰]	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,0)**	**(0,03)**	**(0,17)**	**(0,03)**	**(0,0)**	**(0,0)**

* $X1 = |\, Q_{max,P0} - Q_{max,Pi} \,|$, $i = 1, \ldots, 4$,
** $X2 = |\, V_{P0} - V_{Pi} \,|$, $i = 1, \ldots, 4$.

8. Analiza wyników

Otrzymane wyniki zanalizowano pod kątem wielkości zmian poszczególnych parametrów wezbrania, tj. wysokości kulminacji Q_{max}, czasu wznoszenia, czasu bazowego oraz objętości fali, w trzech rozpatrywanych zlewniach badawczych, dla dwóch przyjętych scenariuszy opadowych.

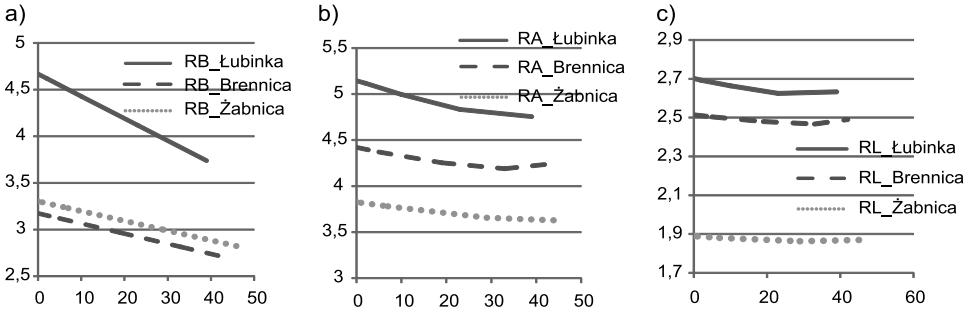
We wszystkich rozpatrywanych zlewniach występuje spadek wartości przepływu Q_{max} (lub utrzymanie jego wartości na stałym poziomie) niezależnie od zmian wartości wskaźników praw Hortona.

Wskaźniki praw Hortona, będące parametrami modelu *GEOM*, wykazały zmienny stopień czułości na zmiany gęstości sieci rzecznej w analizowanych zlewniach. Najbardziej czuły na zmiany okazał się wskaźnik liczby cieków (bifurkacji) R_B, a najmniej czuły – wskaźnik długości cieków R_L. Wskaźnik powierzchni zlewni R_A zajął pozycję pośrednią (rys. 6).

We wszystkich analizowanych zlewniach wskaźniki praw Hortona maleją w kolejnych rozpatrywanych przypadkach P1–P4 w stosunku do P0.

W przypadku zlewni Łubinki pociąga to za sobą obniżanie się wartości Q_{max} w P1–P4. Ta zależność występuje w obu przyjętych scenariuszach opadowych. Nieco inaczej wygląda sytuacja w pozostałych zlewniach.

W przypadku zlewni Brennicy wartości Q_{max} utrzymują się na stałym poziomie w P1–P3 i wykazują niewielki wzrost (o 0,1 m^3/s) w P4 (przy scenariuszu trójkątnym) oraz utrzymują się na stałym poziomie w P1–P2 i wykazują niewielki spadek w P3–P4 (przy scenariuszu DVWK).



Rys. 6. Zmienność wskaźników: a) bifurkacji R_B, b) powierzchni zlewni R_A, c) długości cieków R_L w zależności od zmian gęstości sieci rzecznej w analizowanych zlewniach (źródło: opracowanie własne)

Ryc. 6. a) Bifurcation R_B, b) catchment area R_A, c) stream length R_L ratio variability depending on the density of river network in the analysed catchements (source: own)

W przypadku zlewni Żabnicy wartości Q_{max} utrzymują się na stałym poziomie w P0–P1 i P3–P4 oraz wykazują niewielki spadek (o 0,1 m^3/s) w P2 (przy obu scenariuszach).

Niezależnie od powyższych zmian wartości Q_{max}, największy błąd względny, jaki można było popełnić przy wyznaczaniu kulminacji fali, wystąpił w zlewni Łubinki w P4, przyjmując wartości odpowiednio: dla scenariusza trójkątnego – 11‰, a dla scenariusza DVWK – 12‰.

Niezmienny pozostał czas wznoszenia oraz czas bazowy wezbrania we wszystkich rozpatrywanych zlewniach. Niewielka różnica wystąpiła również w wynikach objętości fali V (max błąd względny wynosi 0,9 ‰).

9. Podsumowanie i wnioski

Celem artykułu było zbadanie wpływu dokładności odwzorowania sieci rzecznej na parametry hydrogramu odpływu, tj. kulminację wezbrania w Q_{max}, czas wznoszenia, czas bazowy i objętość wezbrania w zlewniach niekontrolowanych.

W przypadku trzech badanych zlewni karpackich usuwanie kolejnych cieków 1. rzędu nie wpływa znacząco na wyniki transformacji opadu w odpływ za pomocą modelu *GEOM*. Można zatem stwierdzić, że pominięcie cieków 1. rzędu, o długości dochodzącej nawet do 1000 m, w zlewniach o powierzchni ok. 30 km^2, wyznaczonych na mapie topograficznej w małej skali (1:50 000), nie wpływa znacząco na zmianę parametrów hydrogramu odpływu.

Zgodnie z powyższym, w przypadku korzystania z map o małej skali, w celu oszacowania parametrów modelu sieci rzecznej, wielkości różnic występujących przy wyznaczaniu parametrów hydrogramów odpływu w zlewniach niekontrolowanych jest nieznaczna i zaniedbywalna przy pominięciu cieków 1. rzędu o długości nawet do 1000 m.

Literatura

[1] Bajkiewicz-Grabowska, *Hydrologia ogólna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.

[2] Banasik K., *Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2009.

[3] Baścik M., Pociask-Karteczka J., Wilk A., *Przebieg wezbrań letnich Starej Rzeki (Pogórze Wielickie)*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr. z. 100, 1995, 63-71.

[4] Ciepielowski A., Dąbkowski Sz.L., *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 2006.

[5] Chow V.T., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York 1964.

[6] Ignar S., *Metoda SCS i jej zastosowanie do wyznaczania opadu efektywnego*, Przegląd Geofizyczny, XXXII (4), 1988, 451-455.

[7] Jankiewicz M., *Analiza wpływu gęstości sieci rzecznej na charakterystyki wezbrania w zlewni Żabnicy*, praca końcowa zrealizowana w ramach Studiów Podyplomowych Zarządzanie Ryzykiem Powodziowym, edycja III (promotor: Elżbieta Jarosińska), praca niepublikowana, 2012.

[8] Kozłowski P., *Analiza wpływu gęstości sieci rzecznej na charakterystyki wezbrania w zlewni Brennicy*, praca końcowa zrealizowana w ramach Studiów Podyplomowych Zarządzanie Ryzykiem Powodziowym, edycja III (promotor: Elżbieta Jarosińska), praca niepublikowana, 2012.

[9] Kręgiel B., *Analiza wpływu gęstości sieci rzecznej na charakterystyki wezbrania w zlewni Łubinki*, praca końcowa zrealizowana w ramach Studiów Podyplomowych Zarządzanie Ryzykiem Powodziowym, edycja III (promotor: Elżbieta Jarosińska), praca niepublikowana, 2012.

[10] Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., *Hydrologia stosowana*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1994.

[11] Pociask-Karteczka J. (red.), *Zlewnia. Właściwości i procesy*, Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego, IGiGP, Kraków 2003.

[12] Rodriguez-Iturbe I., Valdes J.B., *The geomorphologic structure of hydrologic response*, Water Resour. Res., vol. 15 (6), 1979.

[13] Soczyńska U. (red.), *Hydrologia dynamiczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.

[14] Stachy J., *Atlas hydrologiczny Polski. IMGW*, Tom I, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1987.

[15] Verlag P.P., *DVWK REGELN ZUR WASSERWIRTSCHAFT*, 113, Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese, Hamburg und Berlin, 1984.

[16] Więzik B., Banach W., *Geomorfologiczny model odpływu ze zlewni – GEOM*, Seminarium Naukowe [w]: *Modelowanie matematyczne w hydrologii*, Kraków 1996.

[17] Więzik B., *Prognostyczny model odpływu ze zlewni*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Monografia 67, Kraków 1988.