



**WERYFIKACJA WZORU PUNZETA DO WYZNACZANIA
PRZEPIŹYWÓW MAKSYMALNYCH
PRAWDOPODOBNYCH W RZECIE GÓRSKIEJ I RÓWNINGNEJ
W DORZECZU GÓRNEJ WISŁY**

Andrzej Wałęga, Dariusz Młyński
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kolltąja w Krakowie

**VERIFICATION OF PUNZET EQUATION TO CALCULATE
FLOOD FREQUENCY IN MOUNTAIN AND HIGH LAND RIVER
IN UPPER BASIN VISTULA**

Streszczenie

W pracy dokonano weryfikacji wzoru Punzeta do wyznaczania przepłyów maksymalnych prawdopodobnych ($Q_{max\%}$) w dwóch rzekach: Lepietnicy w przekroju Ludźmierz oraz Koprzywianki w przekroju Koprzywnica. Celem weryfikacji była ocena możliwości stosowania formuł Punzeta w obliczeniach hydrologicznych, w odniesieniu do aktualnych danych hydrometrycznych. Dane do obliczeń, w postaci serii obserwacyjnej przepłyów maksymalnych rocznych (Q_{max}) z wielolecia 1980-2013, pozyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB w Warszawie. Otrzymane dane zostały poddane analizie jednorodności i niezależności testem Manna-Kendalla-Sneyersa. Obliczono $Q_{max\%}$ metodą statystyczną – przy użyciu rozkładu Pearsona typ III z estymacją parametrów rozkładu metodą największej wiarygodności.

Obliczenia $Q_{max\%}$ przeprowadzone dla rzeki Lepietnica metodą statystyczną oraz wzorem Punzeta, w którym $Q_{max50\%}$ wyznaczono formułą karpacką, wykazały że różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami są niewielkie. Natomiast dla rzeki Koprzywianka, gdzie $Q_{max50\%}$ wyznaczono metodą Punzeta przy użyciu wzoru dla pozakarpackich zlewni równinnych, obliczenia wykazały znaczne róż-

nice pomiędzy metodą empiryczną a statystyczną. Uzasadnia to potrzebę weryfikacji oraz uaktualnienia wzoru Punzeta do obliczania $Q_{max\%}$ w pozakarpaccich zlewniach równinnych dorzecza Górnej Wisły.

Słowa kluczowe: przepływ maksymalny prawdopodobny, wzór Punzeta, dorzecze górnej Wisły

Summary

The study was aimed to verify the Punzet formula to flood frequency ($Q_{max\%}$) in two rivers: Lepietnica in cross-section Ludźmierz and Koprzywianka in cross-section Koprzywnica. The verification was aimed to assess the usefulness of the Punzet formula in hydrological calculations, in relation to current hydrometric data. The data – the long-term observation records of the annual maximum floods (Q_{max}) from the period 1980-2013 – were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute in Warsaw. The obtained data were evaluated considering their homogeneity and independence using Mann-Kendall-Sneyers test. $Q_{max\%}$ was calculated using the statistic method of the Pearson III type distribution with maximum likelihood method of estimating the parameters of distribution.

The calculations $Q_{max\%}$ for the Lepietnica River obtained with statistical methods and the Punzet equation, where Q_{max50} was calculated with the Carpathian formula, have shown that differences between the results were insignificant. However, the calculations for the Koprzywianka, where Q_{max50} was calculated with the Punzet formula for non-Carpathian plain catchments, have shown substantial differences between the results obtained through empirical and statistical methods. This justifies the need for verification and updating the Punzet formula to calculate $Q_{max\%}$ in non-Carpathian plain catchments of the upper Vistula basin.

Key words: probable maximum flow, Punzet formula, the upper Vistula basin

WSTĘP

Przepływy i stany maksymalne zajmują szczególne miejsce w charakterystyce reżimu hydrologicznego rzeki. Określenie tych wielkości stanowią podstawę prawidłowego wymiarowania budowli hydrotechnicznych – wszystkie obiekty inżynierskie takie jak mosty, przepusty, zapory, jazy itp. muszą być zaprojektowane w taki sposób aby ich normalna praca nie uległa zaburzeniu, w przypadku pojawienia się przepływów wyższych od miarodajnego. Prawidłowe określenie wielkości przepływów i stanów maksymalnych jest ściśle zwią-

zane z ochroną przed niszczycielskim działaniem wód, wywołanym tymi zjawiskami (Stachy J. i in., 1986).

Obecnie, w praktyce hydrologicznej, do wyznaczania przepływów maksymalnych o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia, stosuje się metody bezpośrednie, pośrednie oraz empiryczne. Sposób ich wykorzystania warunkowany jest dostępnością informacji hydrometrycznej. Metody bezpośrednie – statystyczne stosowane są w zlewniach kontrolowanych, posiadające długie ciągi obserwacyjne ($N \geq 30$ lat) (Więzik B. i in., 2013). Do wyznaczania kwantyli $Q_{maxp\%}$ najczęściej wykorzystuje się rozkład statystyczny Pearsona typu III, z estymacją parametrów rozkładu metodą największej wiarygodności (Metodyka..., 2009). Metody pośrednie – analogii hydrologicznej znajdują zastosowanie w przypadku posiadania niekompletnych informacji hydrometrycznych lub ich całkowitym braku. Wówczas przepływy maksymalne wyznaczane są w oparciu o określone wartości tych przepływów dla innych przekrojów na tej samej rzece bądź zamykających zlewnię o podobnym reżimie hydrologicznym (Byczkowski A., 1999). W przypadku zlewni niekontrolowanych, gdy niemożliwe jest zastosowanie metod analogii hydrologicznej, obliczenie przepływów maksymalnych jest jednym z trudniejszych zagadnień hydrologii inżynierskiej (Stachy J., 1976). Wówczas stosowane są m.in. metody empiryczne, które dzieli się na trzy grupy: wzory empiryczne, mapy obszarowego rozkładu odpływu oraz normy odpływu (Dębski K., 1956).

Najczęściej stosowanymi metodami empirycznymi do obliczania przepływów maksymalnych są wzory, stanowiące uogólnienie informacji o przepływach zebranych dla większej liczby profili wodowskazowych, drogą powiązania wartości przepływów z czynnikami klimatycznymi oraz geograficznymi, wpływającymi na kształtowanie się przepływu (Byczkowski A., 1999).

Zazwyczaj wzory empiryczne posiadają charakter regionalny aczkolwiek istnieją także o zasięgu ogólnokrajowym.

W przypadku zlewni niekontrolowanych górnej i środkowej Odry do wyznaczania $Q_{maxp\%}$ zastosowanie znajdują wzory Wołoszyna (Rogala R. i in., 1973), w dorzeczu środkowej Wisły dla zlewni niekontrolowanych przepływy maksymalne oblicza się obszarowym równaniem regresji (Stachy J. i in. 1998) natomiast w zlewniach niekontrolowanych o powierzchni powyżej 50 km² położonych w środkowej i północnej części Polski przepływy maksymalne wyznacza się w oparciu o formułę roztopową (Stachy J. i in. 1998). Uniwersalnym równaniem do obliczania przepływów maksymalnych prawdopodobnych, w zlewniach o powierzchni do 50 km², na obszarze całej Polski jest formuła opadowa (Ciepielowski A. i in. 2006). Natomiast wzory Punzeta do obliczania przepływów maksymalnych prawdopodobnych znajdują zastosowanie w zlewniach dorzecza górnej Wisły (Metodyka...2009).

Wzory Punzeta, które oparte są na materiale statystycznym z lat 1921 – 1970, zostały wyprowadzone i sprawdzone na danych pochodzących z 94

profilu wodowskazowych zamykających zlewnie o powierzchniach mniejszych od 600 km² w obszarze Karpat i od 800 km² w obszarach pozakarpaccich. Obliczenia przepływów maksymalnych prawdopodobnych ($Q_{max\%}$) wzorami Punzeta sprowadzają się do określenia na drodze empirycznej wielkości współczynnika zmienności C_v oraz zwyczajnej wielkiej wody $Q_{50\%}$ (Punzet J., 1978).

Ponieważ w chwili obecnej dostępny jest znacznie dłuższy i aktualny ciąg danych hydrologicznych, wzory Punzeta powinny zostać poddane weryfikacji oraz uaktualnieniu. Jest to ważne zwłaszcza w świetle zmian klimatycznych oraz użytkowania zlewni, przez co, stosowanie wzorów opartych na danych zebranych w poprzednim stuleciu może budzić słuszne wątpliwości.

W niniejszej pracy dokonano analizy porównawczej przepływów maksymalnych prawdopodobnych wyznaczonych wzorami Punzeta z $Q_{max\%}$ określoną metodą bezpośrednią przy wykorzystaniu rozkładu Pearsona typu III (PIII), z estymacją parametrów rozkładu metodą największej wiarygodności.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch zlewni rzek: Lepietnica (przekrój Ludźmierz) oraz Koprzywianka (przekrój Koprzywnica).

METODYKA BADAŃ

Dane w postaci serii Q_{max} z wielolecia 1980–2013 zostały pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowego Instytut Badawczy w Warszawie, dla następujących zlewni rzek: Lepietnica w przekroju Ludźmierz ($A = 50,7$ km²) – lewobrzeżny dopływ Czarnego Dunajca oraz Koprzywianka w przekroju Koprzywnica ($A = 501,0$ km²) – lewostronny dopływ Wisły.

Dokonano statystycznej weryfikacji danych pod kątem ich jednorodności i niezależności, przy wykorzystaniu testu Manna-Kendalla-Sneyersa (Kendall, M.G., Stuart, A., 1968; Sneyers R., 1975, Sneyers R. i in., 1998)

Dla obserwowanych ciągów maksymalnych przepływów rocznych w obu przekrojach wodowskazowych wyznaczono przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia metodą statystyczną – przy użyciu rozkładu Pearsona typu III (Kaczmarek Z., 1970). $Q_{max\%}$ obliczono wg wzoru:

$$Q_{max\%} = \varepsilon + \frac{t_p(\lambda)}{\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

ε – dolne ograniczenie przepływów w m³·s⁻¹,

α – parametr skali w m³·s⁻¹,

λ – parametr kształtu,

$t_p(\lambda)$ – zmienna standaryzowana.

Wartość ε określono metodą graficzną natomiast parametry α i λ estymowano metodą największej wiarygodności.

Dla zlewni Lepietnica w przekroju Ludźmierz oraz Koprzywianka w przekroju Koprzywnica przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia określono empirycznym wzorem Punzeta (Punzet J., 1978):

$$Q_{maxp\%} = \Phi_{p\%} \cdot Q_{max50\%} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{maxp\%}$ – przepływ maksymalny o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia [$m^3 \cdot s^{-1}$],

$\Phi_{p\%}$ – funkcja prawdopodobieństwa rozkładu odzwierciedlająca stosunek ,

$Q_{max50\%}$ – zwyczajna wielka woda [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Funkcję prawdopodobieństwa rozkładu $\Phi_{p\%}$ szacuje się ze wzoru:

$$\Phi_{p\%} = \alpha_{p\%} \cdot C_v^{W_{p\%}} + 1 \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha_{p\%}$, $W_{p\%}$ – współczynniki wyrażane w zależności od odległości podziałki prawdopodobieństwa t dla normalnego prawa błędów, liczone odpowiednio wg wzoru następujących wzorów:

$$\alpha_{p\%} = 0,944 \cdot t^{1,48} \quad (4)$$

$$W_{p\%} = 0,144 \cdot t^{1,48} + 1 \quad (5)$$

C_v – empiryczny współczynnik zmienności obliczany ze wzoru:

$$C_v = 3,027 \cdot \Delta W^{0,173} \cdot A^{-0,102} \cdot L^{-0,066} \quad (6)$$

gdzie:

ΔW – różnica wzniesień pomiędzy najwyżej położonymi źródłami w cieku a badanym profilem [km],

A – powierzchnia zlewni [km^2],

L – długość cieku od najdalej położonego źródła w dorzeczu badanej zlewni [km].

Do określenia wielkości $Q_{max50\%}$ posłużono się wzorami Punzeta dla zlewni wyżynnych i karpaccich w następującej postaci:

zlewnie równinne:

$$Q_{max50\%} = 0,0138 \cdot A^{0,757} \cdot P^{0,372} \cdot N^{0,561} \cdot J^{0,302} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

zlewnie karpaccie:

$$Q_{max50\%} = 0,00166 \cdot A^{0,747} \cdot P^{0,536} \cdot N^{0,603} \cdot J^{0,075} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

gdzie:

P – opad normalny roczny [mm]

N – wskaźnik stopnia nieprzepuszczalności gleb [%],

J – umowny wskaźnik spadku [%] obliczany ze wzoru:

$$J = \frac{W_{zmax} - W_{pr}}{L_{max}} [\%] \quad (9)$$

gdzie:

W_{zmax} – najwyżej położone źródła w zlewni [m n.p.m.],

W_{pr} – wysokość badanego profilu [m n.p.m.],

L_{\max} – maksymalna długość ciek do profilu badawczego [km].

Wartości poszczególnych parametrów fizyczno-geograficznych przyjętych do wyznaczenia $Q_{\max p\%}$ zlewni Lepietnicy i Koprzywianki podano w tab. 1.

Tabela 1. Parametry charakterystyczne zlewni i koryta rzeki Lepietnica w przekroju Ludźmierz i Koprzywianka w przekroju Koprzywnica

Table 1. Characteristic parameters for catchment and riverbed Lepietnica in cross-section Ludźmierz and Koprzywianka in cross-section Koprzywnica

Parametry fizyczno-geograficzne	Lepietnica	Koprzywianka
A [km ²]	50,7	501,0
L [km]	19,1	60,0
J [‰]	33,56	3,83
ΔW [km]	0,641	0,230
N [%]	90	70
P [mm]	1100	650

źródło/souroe: opracowanie własne/own elaboration

Alternatywnie dla zlewni Koprzywianka w przekroju Koprzywnica wyznaczono wartości przepływów maksymalnych prawdopodobnych za pomocą obszarowego równania regresji (ORR), wg formuły (Stachy J. i in. 1998):

$$Q_{\max p\%} = \lambda_p \cdot Q_{\max 1\%} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

gdzie:

λ_p – kwantyl rozkładu zmiennej, ustalony dla bezwymiarowych krzywych regionalnych przepływów maksymalnych,

$Q_{\max 1\%}$ – przepływ maksymalny roczny o prawdopodobieństwie $p = 1\%$ [$m^3 \cdot s^{-1}$], liczony ze wzoru:

$$Q_{\max 1\%} = \alpha_{\text{obszar}} \cdot A^{0,92} \cdot H_1^{1,11} \cdot \Phi^{1,07} \cdot I_r^{0,10} \cdot \Psi^{0,35} \cdot (1 + Jez)^{-2,11} \cdot (1+B)^{-0,47} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (11)$$

gdzie:

α_{obszar} – parametr równania przyjmowany w zależności od obszaru kraju,

A – powierzchnia zlewni [km²],

H_1 – maksymalny opad dobowy o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ [mm],

Φ – współczynnik odpływu,

I_r – spadek ciek [‰],

Ψ – średni spadek zlewni [‰],

Jez – wskaźnik jeziorności zlewni,

B – wskaźnik zabagnienia zlewni.

Wartości charakterystycznych parametrów fizjograficznych i wskaźników hydromorfologicznych dla zlewni rzeki Koprzywianka w przekroju Koprzywnica zestawiono w tab. 2.

Tabela 2. Wartości parametrów fizjograficznych i wskaźników hydromorfologicznych dla zlewni rzeki Koprzywianka w przekroju Koprzywnica
[źródło: opracowanie własne]

Table 2. Values of the physiographic parameters and hydromorphological indicators for Koprzywianka in cross-section Koprzywnica [source: own elaboration]

Parametry i wskaźniki	Wartości
I_r [‰]	5,98
Ψ [‰]	17,43
B [-]	0
Jez [-]	0
H_1 [mm]	100
Φ [-]	0,35

źródło/souroe: opracowanie własne/own elaboration

Wysokość średniego rocznego opadu oraz maksymalnego opadu dobowego o $p = 1\%$ w analizowanych zlewniach ustalono w oparciu o „Atlas Klimatu Polski” (Lorenc H., 2005), średnie wzniesienia zlewni wyznaczono na podstawie map topograficznych udostępnionych przez portal internetowy www.geoportal.gov. Do określenia długości cieków i powierzchni zlewni zamkniętych poszczególnymi przekrojami wodowskazowymi posłużono się „Atlasem hydrologicznym Polski” (Stachy J., 1986;1987). Wartość wskaźnika nieprzepuszczalności gleb Bołdakowa (Wokroj J., 1967) ustalono na podstawie mapy gleb Polski w skali 1 : 500 000.

W celu dokonania szczegółowej analizy porównawczej pomiędzy wartościami $Q_{maxp\%}$ otrzymanymi z metody bezpośredniej oraz wzorów empirycznych – Punzeta oraz dodatkowo w zlewni Koprzywianki obszarowym równaniem regresji wyznaczono tzw. błąd względny (Banasik K. i in. 2012):

$$\sigma = \Delta Q_{maxp\%} \cdot Q_{maxp\%(s)}^{-1} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

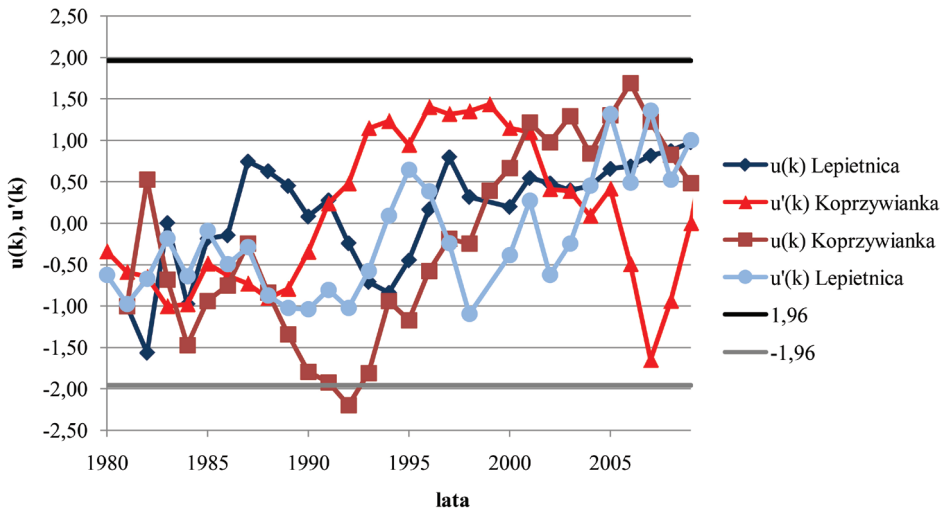
gdzie:

$\Delta Q_{maxp\%}$ – różnica pomiędzy $Q_{maxp\%}$ wyznaczonymi metodami statystycznymi i empirycznymi [$m^3 \cdot s^{-1}$]

$Q_{maxp\%(s)}$ – wartość przepływu maksymalnego prawdopodobnego, wyznaczona metodą statystyczną [$m^3 \cdot s^{-1}$].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Podstawą przeprowadzonej analizy jednorodności i niezależności danych była seria czasowa wystąpienia przepływów maksymalnych, obejmująca lata 1980 – 2013. Weryfikacji dokonano przy zastosowaniu testu MKS zakładającym hipotezę H_0 o jednorodności danych, tzn. przepływy te są niezależne i mają ten sam rozkład prawdopodobieństwa. Analizę przeprowadzono dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki testu przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Wyniki testu MKS z 95% przedziałem akceptacji dla przepływów maksymalnych w zlewniach Lepietnica i Koprzywianka [źródło: opracowanie własne]

Figure 1. MKS test results with a 95% acceptance range and time course of maximum flow for catchments Lepietnica and Koprzywianka [source: own elaboration]

Na podstawie otrzymanych wyników analizy jednorodności stwierdzono, że wartości obliczonej statystyki $u(k)$ oraz statystyki dla serii czasowej o porządku odwróconym $u'(k)$ znajdują się w przedziale $(-1,96; 1,96)$, z wyjątkiem jednej wartości podciągu progresywnego serii Q_{max} dla zlewni Koprzywianka, w roku 1992. Przebieg statystyki $u(k)$ nie stanowi podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, że dane Q_{max} z przekrojów wodowskazowych Ludźmierz dla Lepietnicy oraz Koprzywianka dla Koprzywianki są niezależne i pochodzą z jednej próby.

Do oszacowania wartości przepływów maksymalnych dla zlewni Lepietnicy w przekroju Ludźmierz posłużono się wzorem Punzeta, w którym przepływ $Q_{max50\%}$ oszacowano wzorem karpackim. Otrzymane wartości odniesiono do wyników obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu rozkładu Pearsona typ III. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 3.

Tabela 3. Wyniki obliczeń $Q_{maxp\%}$ rozkładem Pearsona (PIII) oraz wzorem Punzeta dla rzeki Lepietnica w przekroju Ludźmierz

Table 3. Results of calculations Q_{maxp} by Pearson III distribution, Punzet equation for river Lepietnica in cross-section Ludźmierz

p%	$Q_{maxp\%}$ PIII [m ³ ·s ⁻¹]	$Q_{maxp\%}$ Punzet [m ³ ·s ⁻¹]	$\Delta Q_{maxp\%}$ [m ³ ·s ⁻¹]	σ [%]
0,01	272,23	207,64	64,59	23,7
0,1	199,63	157,27	42,37	21,2
0,5	149,59	120,89	28,70	19,2
1	128,32	105,08	23,24	18,1
2	107,28	88,94	18,33	17,1
3	95,11	79,50	15,61	16,4
5	79,96	67,24	12,73	15,9
10	59,86	50,56	9,30	15,5
20	40,55	33,80	6,75	16,6
25	34,58	28,53	6,05	17,5
30	29,83	24,35	5,48	18,4
40	22,64	18,42	4,22	18,6
50	17,41	15,41	2,00	11,5

źródło/souroe: opracowanie własne/own elaboration

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej stwierdzono, że wyższe wartości $Q_{maxp\%}$ otrzymano przy zastosowaniu rozkładu Pearsona. Różnice w przepływach maleją wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa przekroczenia w przedziale (0,01%; 10%) gdzie błąd względny przyjmuje wartości od 23,7 do 15,5%. W przedziale prawdopodobieństwa przewyższenia (20%; 40%) zaobserwowano wzrost dysproporcji pomiędzy analizowanymi przepływami, wyrażający się błędem względnym wynoszącym od 16,6 do 18,6. Natomiast w przypadku $Q_{max50\%}$ odchylenie znów maleje dla którego błąd względny to 11,5%. Średnia wielkość błędu względnego wyniosła 18,0%.

Dla zlewni Koprzywianka w przekroju Koprzywnica dokonano podobnych obliczeń. Dodatkowo wyniki uzyskane z metody statystycznej porównano z wartościami otrzymanymi z obszarowego równania regresji. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 4.

Dokonując porównania pomiędzy wynikami otrzymanymi po zastosowaniu metody statystycznej oraz wzoru Punzeta stwierdzono, że zdecydowanie wyższe wartości $Q_{maxp\%}$ dała metoda Punzeta. Różnice pomiędzy otrzymanymi wynikami maleją wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa przewyższenia, natomiast obliczone wartości błędu względnego rosną wraz ze wzrostem prawdo-

podobieństwa przewyższenia. Zjawisko takie można zauważyć także w innych pracach np. w (Banasik K. i in., 2012). Najmniejszą różnicę pomiędzy $Q_{maxp\%}$ zauważono dla $p = 50\%$. Natomiast dla tego samego prawdopodobieństwa błąd względny osiąga największą wartość – 1136,4%. Wraz ze zmniejszeniem prawdopodobieństwa przekroczenia dysproporcje między $Q_{maxp\%}$ otrzymanymi z metody bezpośredniej i wzoru Punzeta systematycznie wzrastały, aż do różnicy wynoszącej aż 1387,92 $m^3 \cdot s^{-1}$ dla $p = 0,1\%$. Natomiast należy zwrócić uwagę na to, że błąd względny dla tego samego prawdopodobieństwa osiąga najmniejszą spośród wszystkich wartości i wynosi 777,1%.

Tabela 4. Wyniki obliczeń $Q_{maxp\%}$ rozkładem Pearsona (PIII) oraz wzorem Punzeta i obszarowym równaniem regresji (ORR) dla rzeki Koprzywnica w przekroju Koprzywnica [

Table 4. Results of calculations Q_{maxp} by Pearson III distribution, Punzet equation and area regression equation in cross-section Koprzywnica

p%	$Q_{maxp\%}$ PIII [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$Q_{maxp\%}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]		Δ [$m^3 \cdot s^{-1}$]		σ [%]	
		Punzet	ORR	Punzet	ORR	Punzet	ORR
0,1	178,59	1566,51	235,13	1387,92	56,54	777,1	31,7
0,5	138,75	1263,57	177,71	1124,81	38,95	810,7	28,1
1	121,53	1127,54	185,80	1006,00	64,27	827,8	52,9
2	104,26	985,26	142,56	881,00	38,30	845,0	36,7
3	94,13	900,50	135,82	806,37	41,69	856,7	44,3
5	81,32	787,99	122,83	706,67	41,51	869,0	51,0
10	63,85	631,02	103,75	567,17	39,90	888,3	62,5
20	46,20	466,92	84,68	420,72	38,48	910,6	83,3
30	35,75	370,87	73,00	335,12	37,25	937,3	104,2
50	22,34	276,24	68,23	253,90	45,88	1136,4	205,4

źródło/souroe: opracowanie własne/own elaboration

Ponieważ zastosowana metoda Punzeta do szacowania $Q_{maxp\%}$ dała wyniki znacząco odbiegające od wartości otrzymanych z rozkładu Pearsona typ III, postanowiono alternatywnie sprawdzić możliwość wykorzystania obszarowego równania regresji w zlewni rzeki Koprzywnica. Równanie to zostało wybrane ze względu na wielkość powierzchni badanej zlewni. Pozostałe formuły empiryczne, znajdujące zastosowanie w dorzeczu górnej Wisły zostały opracowane dla zlewni o znacznie mniejszych powierzchniach. Dlatego zastosowanie innego wzoru jak obszarowe równanie regresji byłoby niewłaściwe. Dodatkowo należy wspomnieć, że obszarowe równanie regresji w szerszym zakresie opisane jest przez czynniki fizjograficzne zlewni, jak wzór Punzeta. Dokonując analizy

otrzymanych wyników zauważono, że $Q_{maxp\%}$ z tego równania są bardziej zbliżone do wyników z rozkładu Pearsona aniżeli jak w przypadku wzoru Punzeta. Jednakże tutaj również $Q_{maxp\%}$ przyjmują większe wartości w stosunku do wyników otrzymanych z metody bezpośredniej. Analizując wartości błędu względnego stwierdzono brak zależności pomiędzy jego wielkością a prawdopodobieństwem wystąpienia przepływu maksymalnego.

Rozpatrując powyższe wyniki obliczeń $Q_{maxp\%}$ w zlewni rzeki Lepietnica oraz Koprzywianka należy się zastanowić nad możliwością ich wykorzystania w dorzeczu górnej Wisły. O ile w przypadku zlewni Lepietnicy otrzymane wyniki są do siebie zbliżone, przy średnim błędzie względnym wynoszącym 17,7% to dla zlewni Koprzywianka w przekroju Koprzywnica rezultaty są niepokojące odmienne. Tak duże dysproporcje tłumaczy się przede wszystkim tym, że zlewnia Lepietnicy, wg podziału Punzeta to zlewnia karpacka. Dlatego do obliczenia $Q_{max50\%}$ zastosowano formułę dla tych zlewni. Odnosząc otrzymane wartości $Q_{maxp\%}$ do wyników z rozkładu Pearsona można stwierdzić, że otrzymane wartości są logiczne. Natomiast wyniki dla zlewni Koprzywianka w przekroju Koprzywnica nie dały tak pozytywnych rezultatów jak w regionie Karpat. Wg Punzeta jest to pozakarpacka zlewnia równinna. Zlewnie te nie zostały tak dobrze rozpoznane, nie dysponowano dostateczną ilością obserwacji. Po eliminacji profili wodowskazowych o zakłóconym reżimie przepływów, do opracowania formuły na $Q_{max50\%}$ dla pozakarpackich zlewni równinnych Punzet posłużył się danymi z 22 profili. Natomiast w przypadku badań prowadzonych dla zlewni karpackich oparto się na danych z aż 48 profili. Dodatkowo na otrzymane rezultaty mogła wpłynąć sama powierzchnia analizowanych zlewni. W przypadku dorzecza Lepietnicy w przekroju Ludźmierz wynosi ona tylko 50,7 km² natomiast dla Koprzywianki w przekroju Koprzywnica jest to 501,0 km². Zatem są to powierzchnie na granicy stosowalności wzorów Punzeta. Jednak otrzymane rezultaty z formuły empirycznej Punzeta będą bardziej uzasadnione dla zlewni małych ponieważ charakteryzują się one środowiskiem bardziej jednorodnym jak zlewnie o większych powierzchniach (Punzet J., 1978).

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza porównawcza wartości przepływów maksymalnych, otrzymanych za pomocą metody Punzeta i rozkładu Pearsona typu III, z estymacją parametrów rozkładu metodą największej wiarygodności pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Przepływy maksymalne prawdopodobne obliczone formułą empiryczną Punzeta są bardziej zbliżone do wartości otrzymanych metodą statystyczną w badanej zlewni karpackiej w porównaniu do pozakarpackiej zlewni dorzecza górnej Wisły, będącej przedmiotem analizy.

- Średnia wartość błędu względnego dla zlewni karpackiej to 17,7%, gdzie w pozakarpackiej zlewni równinnej to aż 885,9%.
2. Jako alternatywę do obliczania przepływów maksymalnych prawdopodobnych w zlewni rzeki Koprzywianka lub innych o podobnych do niej charakterystykach, w przypadku braku możliwości zastosowania metody statystycznej, można wskazać obszarowe równanie regresji, dające wyniki bardziej zbliżone do metody bezpośredniej, jak wzór Punzeta.
 3. Przedstawiona analiza stanowi przyczynek do stwierdzenia że istnieje konieczność weryfikacji wzoru Punzeta stosowanego w pozakarpackich zlewniach równinnych dorzecza górnej Wisły. Jednakże należy zwrócić uwagę na konieczność poszerzenia zakresu badań na inne zlewnie równinne dorzecza górnej Wisły. Jednakże bezsprzeczne jest stwierdzenie, że należy podjąć działania do podniesienia wiarygodności stosowanej formuły, w aspekcie niepełnego rozpoznania pozakarpackich zlewni równinnych, a także w świetle ciągłych zmian klimatycznych, powodujących występowanie hydrologicznych zjawisk ekstremalnych oraz dostępnością znacznie dłuższych i aktualnych ciągów danych hydrologicznych. Ponadto należy z całą pewnością uwzględnić coraz częstsza ingerencję człowieka w środowisko wodne, co może powodować zmiany reżimu hydrologicznego.

LITERATURA

- Banasik K., Byczkowski A., Hejduk L., Gładecki J. (2012). *Obliczanie przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małej zlewni z zastosowaniem metod statystycznych oraz metod pośrednich*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, nr 3, 17-26.
- Byczkowski A. (1999). *Hydrologia T. II*. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Ciepielowski A., Dąbkowski S. L. (2006). *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych*. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- Dębski K. (1956). *Hydrologiczne podstawy planu gospodarki wodnej w Polsce*. Państwowa Akademia Nauk, Warszawa.
- Kaczmarek Z. (1970). *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*. WKŁ, Warszawa.
- Kendall M.G., Stuart, A. (1968). *The advanced theory of statistics vol 3 – design and analysis, and time series*. Second edition, Griffin, London.
- Lorenc H. (red.) (2005). *Atlas klimatu Polski*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Punzet J. (1978). *Zasoby wodne dorzecza Górnej Wisły (przepływy maksymalne)*. Materiały badawcze IMGW. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Rogała R., Dołęga J. (1973). *Materiały pomocnicze do obliczeń z hydrologii*. Politechnika Wroclawska, Wrocław.

- Sneyers R., Tuomenvirta H., Heino R. (1998). *Observations of inhomogeneities and detection of climate change*. The case of the Oulu (Finland) air temperature series. *Geophysica*, no 34, 159-178.
- Sneyers, R. (1975). *Sur l'analyse statistique des series d'observations*. Note Technique, no. 143.
- Stachy J. (1976). *Propozycja nowej metody obliczania przepływów maksymalnych w małych zlewniach niekontrolowanych (mniejszych od 50 km²)*. *Gospodarka Wodna*, nr 8-9, 230-237.
- Stachy J. (red.) (1986 i 1987). *Atlas hydrologiczny*, IMGW, Warszawa.
- Stachy J., Fal B. (1986). *Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych*. *Prace Instytutu Badania Dróg i Mostów*, nr 3-4, 91-149.
- Stachy J., Fal B., Czarnecka H. (1998). *Obliczanie przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie*, wyd. IMGW, Warszawa.
- Stowarzyszenie Hydrologów Polskich. (2009). *Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ*. Warszawa.
- Więzik B., Madzia M. (2013). *Porównanie przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia obliczonymi metodami empirycznymi w zlewni Skawicy*, w: B. Więzik (red.), *Problemy obliczania przepływów ekstremalnych w zlewniach kontrolowanych i niekontrolowanych*. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Pan*, Warszawa.
- Wokroj J. (1967). *Zastosowanie analogii w obliczeniach hydrologicznych*. *Gospodarka Wodna*, nr 6, 209-212.

dr hab. inż. Andrzej Wałęga
mgr inż. Dariusz Młyński
Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28
tel.: (012) 662 4029; (012) 662 4123
e-mail: a.walega@ur.krakow.pl; dariusz.mlynski@gmail.pl

Wpłynęło: 2.02.2015

Akceptowano do druku: 12.10.2015