INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr III/1/2014, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 971–983
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

DOI: http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2014.3.1.072

WERYFIKACJA WSPÓŁCZYNNIKÓW REDUKCJI PRZEPŁYWÓW MAKSYMALNYCH ROCZNYCH O OKREŚLONYM PRAWDOPODOBIEŃSTWIE PRZEWYŻSZENIA W WYBRANYCH RZEKACH KARPACKIEGO DORZECZA GÓRNEJ WISŁY

Marek Sygut[1], Andrzej Wałęga[2], Agnieszka Cupak[2], Bogusław Michalec[2]
[1]Śląski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Katowicach,
[2]Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie

VERIFICATION OF COEFFICIENTS OF REDUCTION OF MAXIMUM FLOWS WITH PROBABILITY OF EXCEED IN CHOSEN RIVERS OF CARPATIAN UPPER VISTULA BASIN

Streszczenie

W artykule dokonano analizy wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni Sanu, Wisłoki i Wisłoka. Podstawą przeprowadzonej analizy były dane o przepływach maksymalnych rocznych z wielolecia 1984-2009 pozyskane z IMGW PIB w Warszawie. Dane pomiarowe zostały zweryfikowane pod kątem niejednorodności, a następnie obliczono wartości przepływów maksymalnych prawdopodobnych w oparciu o rozkład Pearsona III typu z szacowaniem parametrów metodą największej wiarygodności. Wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych obliczoną metodami: wartości odcinkowych, korelacyjną i wykresów bezwymiarowych. Analiza wykazała, że wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych istotnie różnią się w zależności od zastosowanej metody obliczeń (najwyższe wartości uzyskano z metody wartości odstających). Wartości współczynników redukcji są uzależnione od prawdopodobieństwa przepływów (rosną wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa). W praktycz-

nych obliczeniach hydrologicznych w badanym regionie powinno się stosować współczynniki redukcji przepływów maksymalnych obliczone metodą wartości odcinkowych, a także powinno się zaniechać przyjmowania wartości współczynnika n = 2/3 podawanego przez Dębskiego.

Słowa kluczowe: przepływy maksymalne, współczynnik redukcji przepływu, ekstrapolacja przepływu

Summary

In the article, analysis coefficient of reduction of annual maximum flows for San, Wisłok and Wisłoka catchments was made. Basis of executed analysis was data about annual maximum flows from years 1984-2009 got from IMGW PIB in Warsaw. Data were verified in view of its homogeneity and then, values of maximum flows with probability of exceed were calculated, based on Pearson III type distribution with use maximum likelihood method of parameters calculation. Values of coefficient of reduction of maximum flows were calculated with use following methods: segment values, correlation and dimensionless charts.

Analysis showed, that values of coefficient of reduction of maximum flows were statistically significant depending on used method (the highest values were got for method of outliers values). Value of coefficient of reduction depends on the probability of flows –increases with probability increasing. In practical hydrologic calculation, in analyzed area, coefficient of reduction of maximum flow calculated with use method of segment values should be used, also it should not be taken values of n coefficient amounting 2/3 given by Dębski.

Key words: *maximum flows, coefficients of flow reduction, extrapolation of flow*

WPROWADZENIE

Wezbrania rzek są częstym zjawiskiem i mogą występować kilka razy w roku, przybierając niekiedy rozmiary katastrofalne, wywołujące powodzie. Poprawna ocena wielkości wezbrań jest podstawą oceny ryzyka powstania strat powodziowych i daje szanse na zminimalizowanie tych szkód, dlatego doskonalenie metod obliczania przepływów maksymalnych jest całkowicie uzasadnione. W praktyce inżynierskiej przepływy maksymalne roczne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia są podstawową charakterystyką hydrologiczną. W metodach określania wartości tych przepływów wykorzystuje się ciągi wartości liczbowych przepływów maksymalnych rocznych z wielolecia. Dokładność

oszacowania zależy od długości okresu, z którego pochodzą dane pomiarowe, ponieważ błędy oszacowania wartości przepływów maksymalnych maleją wraz ze zwiększeniem się liczebności ciągów. Dla zlewni, w których istnieją wieloletnie ciągi obserwacyjne, przepływy te określa się z zastosowaniem ogólnie przyjętych metod, opartych na analizie krzywych prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych. Dyskusyjne mogą być zagadnienia doboru właściwego typu rozkładu prawdopodobieństwa oraz metody szacowania parametrów tego rozkładu. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku zlewni, w których nie są prowadzone wieloletnie obserwacje stanów wody oraz pomiary przepływu. Wówczas stosuje się metody pośrednie, charakteryzujące się znacznie większym stopniem niepewności. Są to metody analogii hydrologicznej, regionalne zależności regresyjne, czy też modele hydrologiczne zlewni. Metody te są powszechnie stosowane na całym świecie m.in. Application [2005], Highway [1993], Mannual [2009], czy FLOOFFREQ [2013]. W polskiej praktyce inżynierskiej bardzo popularne jest przenoszenie informacji hydrologicznej z przekrojów wodowskazowych do niekontrolowanych położonych na tej samej rzece lub sąsiedniej. W tym celu stosuje sie metodę ekstrapolacji opisaną wzorem [Fal B., Stachỳ J. 1986, SHP 2009]:

$$Q_x = Q_w \left(\frac{A_x}{A_w}\right)^n \tag{1}$$

gdzie:

Q_x – przepływy w przekroju niekontrolowanym w $m^3 \cdot s^{-1}$,

Q_w – przepływy w przekroju wodowskazowym cieku analoga w $m^3 \cdot s^{-1}$,

A_x – powierzchnia zlewni do przekroju niekontrolowanego w km^2,

A_w – powierzchnia zlewni do przekroju wodowskazowego w km^2,

n – parametry równania ekstrapolacyjnego.

Przy czym najczęściej w praktyce przyjmuje się upraszczające założenie o równości odpływów jednostkowych w przekroju obliczeniowym i kontrolowanym (tzw. analogu). Założenie to nie uwzględnia zmian zagospodarowania przestrzennego, które może wpływać na warunki formowania się odpływu oraz zmienność przepływu w strefie przepływów wysokich Istotną rolę może odgrywać nie tylko powierzchnia zasilania cieku, ale także spadki i szorstkość terenu. Wcześniejsze badania [Stachỳ J. 1976] wykazały, że przepływy maksymalne można ekstrapolować do przekroju zamykającego zlewnię o powierzchni większej niż połowa powierzchni zlewni w profilu wodowskazowym. Wzór (1) otrzymuje się wówczas zależności:

$$Q_x = CA^n \tag{2}$$

Stała C we wzorze 2 określa wpływ wszystkich czynników fizycznogeograficznych, z wyjątkiem powierzchni zlewni, na wielkość przepływu maksymalnego. Największą trudnością we wzorach 1 i 2 jest przyjęcie właściwej wartości współczynnika *n*. Określa on wielkość spłaszczenia fali w trakcie

przejścia wezbrania. Współczynnik ten jest zależny od rodzaju przepływu charakterystycznego. Przez projektantów powszechnie przyjmuje się jego wartość przeciętną, która dla naszego kraju została określona przez Dębskiego [1957] i wynosi 2/3. Należy jednak pamiętać, że w zależności od wielkości wezbrania może być różna. Dlatego konieczne jest przyjęcie wartości tego współczynnika dla przepływów o różnym prawdopodobieństwie przewyższenia. Takie podejście może przyczynić się do szacowania przepływów maksymalnych prawdopodobnych w przekrojach niekontrolowanych obarczonych mniejszym błędem w porównaniu do sytuacji, gdy n przyjmowane jest wg Dębskiego. Taka analiza została opisana w pracy Fal i Stachy [1984], a dotyczyła zlewni różnych regionów Polski Autorzy Ci, dla dostępnych danych hydrometrycznych, określili wartości współczynników n dla prawdopodobieństw p = 1% i p = 50%.

Celem niniejszej pracy była weryfikacja wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych dla wybranych rzek zlokalizowanych w karpackim dorzeczu Górnej Wisły. Na podstawie analiz opisanych w niniejszej pracy zweryfikowano wartości współczynnika *n* dla przepływów prawdopodobnych, w oparciu o aktualne dane hydrometryczne (wykorzystano przepływy maksymalne roczne z wielolecia 1984-2009) w stosunku do podawanych przez innych autorów. Rozszerzono także zakres prawdopodobieństw, dla których obliczano wartość współczynnika n, co umożliwi obliczenia przepływów $Q_{maxp\%}$ w szerszym niż dotychczas zakresie.

MATERIAŁ I METODY

Dane, na których opierają się obliczenia zostały udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB w Warszawie. Zawierają one przepływy maksymalne roczne z wielolecia 1984 – 2009 dla rzeki San z wodowskazów: Dynów, Przemyśl, Jarosław i Lesko, dla rzeki Wisłok z wodowskazów: Krosno, Żarnowa, Rzeszów i Tryńcza, a dla rzeki Wisłoki z wodowskazów: Żółków, Krajowice i Mielec 1.

Przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia zostały zweryfikowane testem sumy rang, którym sprawdzono jednorodność danych. Za pomocą rozkładu Pearsone'a III typu z szacowaniem parametrów metodą największej wiarygodności [SHP 2009] obliczono przepływy maksymalne prawdopodobne, natomiast zgodność przyjętych rozkładów teoretycznych z rozkładem empirycznym zbadano testem Kołmogorowa.

Wskaźnik stopnia redukcji przepływów maksymalnych *n* zbadano trzema metodami:

1. Wartości odcinkowych.
2. Regionalnych związków korelacyjnych.
3. Wykresów bezwymiarowych.

Odcinkowe wartości wskaźnika stopnia redukcji przepływów maksymalnych między dwoma profilami wodowskazowymi, w których znane są przepływy maksymalne, mogą być wyznaczony ze wzoru:

$$n = \frac{\log Q_d - \log Q_g}{\log A_d - \log A_g} \tag{3}$$

gdzie:

indeksy *d* i *g* oznaczają odpowiednio dolny i górny profil wodowskazowy.

Metoda korelacyjna polega na wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów wartości *n* i *C* obliczonych ze zlogarytmowanego wzoru (2) czyli:

$$logQ = logC + nlogA \tag{4}$$

Współczynnik *n* obliczono ze wzoru:

$$n = \frac{\sum(logA - \overline{logA})(\log Q_p - \overline{\log Q_p})}{\sum(logA - \overline{\log A})^2} \tag{5}$$

a stałą *C* z zależności:

$$C = 10^{\overline{\log Q_p} - n\overline{logA}} \tag{6}$$

Metoda wykresów bezwymiarowych opiera się na założeniu, że wielkość stała C ze wzoru (2) jest niezmienna wzdłuż brzegów rzeki. Jeśli na rzece znajduje się kilka posterunków wodowskazowych (i=1, 2, …, z) to dla każdego z nich można obliczyć pary wartości Q_i/Q_z i A_i/A_z, które wyznaczają przebieg krzywej potęgowej n – tego stopnia o równaniu:

$$Q_i/Q_z = (A_i/A_z)^n \tag{7}$$

Stopień krzywej potęgowej n wyznacza się metodą najmniejszych kwadratów z równania:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{z} \log\left(\frac{Q_i}{Q_z}\right) \log\left(\frac{A_i}{A_z}\right)}{\sum_{i=1}^{z} [\log\left(\frac{A_i}{A_z}\right)]^2} \tag{8}$$

Obliczenia współczynników *n* przeprowadzono dla prawdopodobieństw p = 0,1; 1; 2; 5; 10; 20 i 50%. W celu wyboru metody, z której uzyskano najbardziej odpowiednie wartości współczynnika redukcji *n* obliczono średnie błędy i średnie błędy względne przepływów dla analizowanych przekroi. Przy czym, przepływy w analizowanych przekrojach obliczono ze wzoru (1) dla współczynników *n* ustalonych w niniejszej pracy, a następnie porównano je z przepływami maksymalnymi prawdopodobnymi określonymi metodą bezpośrednią. Obliczono także istotność różnic między wartościami wyznaczonych współczynników redukcji przepływów maksymalnych a wartością podawaną przez Dębskiego (n=2/3). W tym celu testowano hipotezę zerową, że średnia wartości współczynników redukcji jest równa wartości 2/3 H_0: $\mu = 2/3$, wobec alternatywnej, że obie średnie są różne H_A: $\mu \neq 2/3$. Hipotezę tą testowano testem t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Określono także istotność różnic między średnimi wartościami współczynnika *n* uzyskanymi z analizowanych metod z wykorzy-

staniem analizy ANOVA. Obliczenia statystyczne przeprowadzono w programie Statistica for Windows wersja 10.0.

Tabela 1. Wartości przepływów maksymalnych prawdopodobnych określone w oparciu o rozkład Pearsona III typu w analizowanych przekrojach wodowskazowych
Table 1. Values of maximum flow with probability of exceed calculated with use Pearson III type distribution in analyzed gauging section

Prawdopodobieństwo	**Rzeka/Przekrój**			
	Mielec1 A = 3887,8 km^2	Krajowice A = 2094,3 km^2	Żółków A = 582,1 km^2	Krempna A = 163,6 km^2
	Wisłoka			
0,1	1955,1	1897,5	1301,7	533,2
1	1401,9	1429,1	924,2	353,9
2	1234,8	1281,3	808,9	300,9
5	1011,0	1079,3	653,9	230,1
10	839,5	918,3	534,0	177,1
20	665,5	746,6	410,7	124,6
50	400,9	484,8	235,9	56,2
	Tryńcza A = 3523,7 km^2	Rzeszów A = 2080,9 km^2	Żarnowa A = 1433,0 km^2	Krosno A = 592,4 km^2
	Wisłok			
0,1	919,6	1171	1294	609,8
1	668	829,9	879,1	416,7
2	591,5	726,2	755,1	359,1
5	488	587	590,4	282,2
10	407,3	479,9	465,7	224
20	323,4	370,2	340,9	165,6
50	201,8	216,8	175,2	87,6
	Jarosław A = 7028,8 km^2	Przemyśl A = 3688,8km^2	Dynów A = 2944,5 km^2	Lesko A = 1616,8 km^2
	San			
0,1	2643,8	3034,6	1275,9	1409,4
1	1855,2	2054,7	935,4	997,3
2	1616,8	1762,2	830,9	871,7
5	1298	1374,1	690,1	703
10	1054	1080,3	580,6	572,5
20	806,3	786,1	467,3	438,7
50	465,3	398,2	304,9	249,5

WYNIKI I DYSKUSJA

Ciągi przepływów maksymalnych rocznych z analizowanych przekrojów wodowskazowych zostały poddane analizie jednorodności statystycznej. W tym celu zastosowano nieparametryczny test sumy rang Kruskala-Wallisa oparty na rozkładzie χ^2. Szczegółowy opis tego testu znaleźć można w pracy Ozgi-Zielińskiej [1987], Ozgi-Zielińskiej i Brzezińskiego [1997]. Spośród przeanalizowanych 12 przekrojów wodowskazowych, w trzech (przekrój Jarosław na Sanie, Tryńcza na Wisłoku i Żółków na Wisłoce) wykazano brak jednorodności ciągów przepływów maksymalnych rocznych. W tych przekrojach widoczny jest wzrost przepływów maksymalnych rocznych od połowy lat 90 ubiegłego wieku. Brak jednorodności zanotowany w przekrojach zamykających zlewnie Wisłoku może wynikać z wpływu recypienta na reżim przepływów badanych cieków (w przekroju Jarosław na Sanie, poniżej którego uchodzi Wisłok do Sanu także widoczny jest brak jednorodności przepływów). Z kolei w przypadku przekroju Żółków na Wisłoce na zaburzenie jednorodności może mieć wpływ jego sąsiedztwo w pobliżu węzła Wisłoka-Jasiołka-Ropa, co może odgrywać rolę w zakłóceniu reżimu hydrologicznego tego fragmentu Wisłoki. Wprawdzie analiza nie wykazała braku jednorodności przepływów w przekroju Krempna (pierwszy przekrój poniżej zbiornika), ale ciągi przepływów także wykazują tendencję wzrostową po 1995 roku ubiegłego wieku, tyle że nieistotną statystycznie. Ogólnie można stwierdzić, że w każdym z analizowanych przekrojów widać tendencję wzrostową przepływów maksymalnych w II połowie ubiegłego wieku lecz nie jest ona istotna statystycznie. Może to być spowodowane wzrostem ilości opadów na tym obszarze, zwłaszcza w okresie wiosennym, co dowodzą badania prowadzone przez [Cebulak E. i in. 2010]. W tabeli 1 zestawiono wartości przepływów $Q_{maxp\%}$ obliczone za pomocą rozkładu Pearsona III typu dla analizowanych przekrojów wodowskazowych z wielolecia 1984-2009. W każdym z analizowanych przypadków nie było podstaw do odrzucenia przyjętego rozkładu, co wykazano za pomocą testu Kołmogorowa. Analizując wartości przepływów w poszczególnych przekrojach na ciekach można zauważyć prawidłowość polegającą na wzroście wartości $Q_{maxp\%}$ wraz z przyrostem powierzchni zlewni, ale w odcinkach górskich badanych rzek. Wąska dolina i górski charakter rzeki sprzyja powstawaniu opisanej zależności. W przypadku gdy zlewnia zmienia swój charakter (zmniejsza sie spadek cieku, zwiększa szerokość doliny) przepływy maksymalne ulegają zmniejszaniu mimo, że powierzchnia zlewni ulega przyrostowi. Istotną rolę odgrywa tu efekt spłaszczenia fali na obszarze szerokich dolin zalewowych. W przypadku rzeki San opisana prawidłowość jest zaburzona w górskim jej odcinku pomiędzy wodowskazem Lesko a Dynów. Na tym odcinku obserwuje się zmniejszanie wraz z przyrostem powierzchni zlewni przepływów ekstremalnych o prawdopodobieństwach od 0,1 do 5%. Natomiast

przepływy $Q_{maxp\%}$ o prawdopodobieństwie powyżej 5% ulegają przyrostowi. To zjawisko można tłumaczyć gospodarką wodną kaskady zbiorników Solina--Myczkowce przejawiającą się redukcją ekstremalnych przepływów w wyniku wypełnienia rezerwy przeciwpowodziowej [Krzanowski S. 2000]. W dalszych obliczeniach wykorzystano informację o kształtowaniu się przepływów maksymalnych wyłącznie z tych odcinków rzek, gdzie zachowany jest przyrost przepływów maksymalnych wraz z przyrostem powierzchni zlewni. Podyktowane to było koniecznością uwzględnienia w analizie regionów o zbliżonych warunkach formowania sie odpływu i transformacji fali w korycie.

Tabela 2. Średnie wartości współczynników redukcyjnych w analizowanym obszarze
Table 2. Average values of coefficients of reduction in analyzed area

Prawdopodobieństwo [%]	Metoda		
	Wartości odcinkowych	Korelacyjna	Wykresów bezwymiarowych
0,1	0,68	0,49	0,52
1	0,70	0,50	0,54
2	0,71	0,51	0,55
5	0,72	0,52	0,56
10	0,74	0,53	0,57
20	0,76	0,54	0,59
50	0,82	0,58	0,65

Tabela 3. Wyniki testu F istotności różnic między średnimi wartościami współczynników redukcji z analizowanych metod
Table 3. Results of F test of statistic significance between average values of coefficients of reduction got from analyzed methods

	SS	MS	F	p
Wyraz wolny	7,787660	7,787660	4702,063	0,000000
metoda	0,160983	0,080492	48,600	0,000000

SS – suma kwadratów pomiędzy grupami, MS – średnie kwadraty pomiędzy grupami, F – wartość testu F, p – poziom prawdopodobieństwa (przy $p < 0,05$ wartości istotne statystycznie)

W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych dla trzech analizowanych metod. Wartości te stanowią średnie arytmetyczne określone dla wszystkich przekroi spełniających wyżej opisany warunek związany z przyrostem przepływów wraz z przyrostem

powierzchni zlewni. Wyraźnie dają się zauważyć różnice pomiędzy zastosowanymi metodami. Najwyższe wartości współczynników redukcji uzyskano dla metody wartości odcinkowych. W przypadku metody korelacyjnej i wykresów bezwymiarowych różnice są nieznaczne.

Potwierdzeniem tego są wyniki przedstawione w tabeli 3 i 4, gdzie dokonano analizy istotności różnic średnich wartości współczynników uzyskanych z omawianych metod. W wyniku zastosowania testu F wykazano istotne różnice między metodami, ale dopiero analiza „post-hoc" za pomocą dwóch testów NIR (Najmniejszej Istotnej Różnicy) i Tukeya wykazała, że istotne różnice w wynikach są między metodą wartości odcinkowych a pozostałymi. Różnice w wartościach współczynników redukcji obliczone metodą korelacyjną i wykresów bezwymiarowych nie różnią się istotnie statystycznie. Różnice w wartościach współczynników redukcji pomiędzy metodami wynikają z odmiennego podejścia metodycznego. W metodzie korelacyjnej i wykresów bezwymiarowych prowadzi się analizę dla homogenicznego regionu wykorzystując zależności między przepływem a powierzchnią zlewni, natomiast w metodzie wartości odcinkowych oblicza sie współczynnik *n* dla par sąsiadujących wodowskazów. Na wysokie wartości współczynników redukcji w metodzie wartości odcinkowych wpływ miały przepływy z rzeki San (średnio były one ponad 40% wyższe w stosunku do pozostałych metod). Wysokie wartości współczynnika redukcji świadczą o małej redukcji przepływów maksymalnych na długości cieku. Jest to typowe dla rzek górskich o wąskiej dolinie, a takie warunki panują na rzece San na odcinku między wodowskazami Dynów i Przemyśl. W przypadku pozostałych rzek redukcje przepływów były znacznie większe. W odniesieniu do pozostałych metod uwzględnienie w większym stopniu zmienności obszarowej kształtowania się zależności przepływu od powierzchni zlewni wpływa na zanikanie lokalnej zmienności warunków formowania się odpływu. Natomiast potwierdzona została prawidłowości podawana w pracy Fal i Stachy [1984] o wzroście wartości współczynnika redukcji, wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych. Świadczy to o większej redukcji przepływów dla niskich prawdopodobieństw, co jest związane z efektem spłaszczenia fali na terenach zalewowych. W trakcie prowadzenia obliczeń postawiono pytanie, czy obliczone wartości współczynników redukcji przepływów istotnie różnią się od podawanej przez Dębskiego i stosowanej powszechnie przez projektantów wartości n = 2/3? W tym celu przeprowadzono wnioskowanie o wartości średniej współczynników uzyskanych z badań. Za pomocą testu t-Studenta wykonano analizę dla średniej wartości współczynnika redukcji uzyskanych z poszczególnych metod. Obliczenia wykazały, że w każdym z przypadku nie ma podstaw do przyjęcia hipotezy zerowej H_0: $\mu = 2/3$ na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$. Zatem przyjęto hipotezę alternatywną H_A: $\mu \neq 2/3$. Wyniki testu t-Studenta kształtowały się następująco: dla metody wartości odstających $t = 3{,}413$, $p = 0{,}014$, dla metody korelacyjnej

t = – 12,513, p = 0,000016 i dla metody wykresów bezwymiarowych t = – 6,118, p = 0,000871. Uzyskane wyniki dowodzą, że dla metody wartości odcinkowych średnia wartość współczynnika redukcji była najbardziej zbliżona do podawanej przez Dębskiego, jednak ewentualne przyjęcie hipotezy zerowej generowało by błąd I rodzaju na poziomie 98,6%. Resumując można stwierdzić, że w obliczeniach przepływów maksymalnych prawdopodobnych wg wzoru (1) w zlewniach o podobnej charakterystyce, jak w badanym regionie, nie powinno się stosować wartości współczynnika n podawanego przez Dębskiego.

Tabela 4. Wartości prawdopodobieństw dla testów „post-hoc" różnic między średnimi wartościami współczynników redukcji z analizowanych metod
Table 4. Values of probability of differences between average values of coefficient of reduction for „post-hoc" tests for analyzed methods

Test NIR	**metoda**	**1**	**2**	**3**
1	WO	-	0,000000	0,000001
2	KOR	0,000000	-	0,061759
3	WB	0,000001	0,061759	-
Test Tukeya	**metoda**	**1**	**2**	**3**
1	WO	-	0,000149	0,000150
2	KOR	0,000149	-	0,142955
3	WB	0,000150	0,142955	-

WO – metoda wartości odcinkowych, KOR – metoda korelacyjna, WB – metoda wykresów bezwymiarowych; wartości na czerwono oznaczają różnice istotne statystycznie na poziomie α = 0,05

Należy zwrócić uwagę na jeszcze jedną kwestię. Według której metody, spośród prezentowanych, należy przyjmować współczynniki redukcji? W tym celu dokonano obliczeń średnich błędów bezwzględnych i względnych. Wyniki zestawiono w tabeli 5. Jednoznacznie można stwierdzić, że przepływy maksymalne prawdopodobne obliczone wzorem (1) przy przyjęciu współczynnika n wg metody wartości odcinkowych obarczone są najmniejszym błędem względnym, wynoszącym od 0,19% do 6,24%. W przypadku pozostałych metod błędy są znacznie większe i wahają się od 11 do 28% dla metody wykresów bezwymiarowych oraz od 15 do 39% dla metody korelacyjnej. Biorąc także pod uwagę znaczną zmienność warunków hydrologicznych panujących w badanych regionach, zaleca się przyjmowanie wartości współczynnika *n* określonego z metody wartości odcinkowych.

Tabela 5. Wielkości błędów przepływów maksymalnych prawdopodobnych obliczonych wzorem (1) dla współczynników n obliczonych analizowanymi metodami
Table 5. Values of errors of maximum flows with probability of exceed estimated with use formula (1) for *n* coefficients calculated with use analyzed methods

Prawdopodobieństwo	Metoda					
	Wartości odcinkowych		Korelacyjna		Wykresów bezwymiarowych	
	S_r	δ_r	S_r	δ_r	S_r	δ_r
0,1	362,9	0,0604	286,2	-0,1509	291,8	-0,1129
1	243,7	0,0493	186,8	-0,1809	190,5	-0,1332
2	208,3	0,0440	158,3	-0,1905	161,0	-0,1424
5	162,3	0,0336	121,9	-0,2128	123,5	-0,1591
10	127,8	0,0216	95,5	-0,2329	96,0	-0,1782
20	93,9	0,0019	71,3	-0,2781	70,1	-0,2071
50	50,1	-0,0624	41,8	-0,3900	38,5	-0,2816

S_r – błąd średni bezwzględny [$m^3 \cdot s^{-1}$], $S_r = \sqrt{\frac{1}{(N-1)}\sum(Q - Q_{ekst})^2}$, δ_r – średni błąd względny [-] $\delta_r = \frac{1}{N}\sum\frac{Q-Q_{ekst}}{Q}$, gdzie: N – liczba przekrojów Q – przepływ maksymalny prawdopodobny w danym przekroju obliczony metodą bezpośrednią, Q_{ekst} – przepływ maksymalny prawdopodobny w danym przekroju obliczony wg wzoru (1) dla n określonego dla danej metody

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można sformułować następujące wnioski:

1. Kształtowanie się przepływów maksymalnych prawdopodobnych w obszarze dorzecza górnej Wisły nie jest jednoznaczne. W odcinkach zlewni wykazujących górski charakter przepływy maksymalne wzrastają wraz z przyrostem powierzchni zlewni. W środkowych i dolnych partiach zlewni, gdzie występują szerokie doliny i mniejsze spadki cieków, obserwuje się zmieszanie się wartości przepływów maksymalnych wraz ze wzrostem powierzchni zlewni, na co wpływa efekt spłaszczenia fali w terenach zalewowych.
2. Wartości współczynników redukcji przepływów maksymalnych istotnie różnią się od siebie w zależności od zastosowanej metody obliczania. Najwyższe wartości współczynników redukcji uzyskano z metody wartości odcinkowych.

3. Jako rekomendowane wartości współczynników n do obliczeń przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia wg wzoru (1) powinno się przyjmować wielkości uzyskane z metody wartości odcinkowych.
4. Należy zaniechać stosowania w obliczeniach hydrologicznych, wartości współczynnika redukcji przepływów n = 2/3 podawanego przez Dębskiego. Wartość ta nie uwzględnia zmiany redukcji przepływów wraz ze zmianą prawdopodobieństwa, a wiec jej stosowanie może prowadzić do nieprawidłowego oszacowania przepływów w przekrojach niekontrolowanych.

LITERETURA

Application of Hydrologic Methods in Maryland (2005). State Highway Administration

Cebulak E., Limanówka D., Pyrc R., Kilar P. (2010). *Zagrożenie dorzecza górnej Wisły wysokimi opadami w okresie wiosennym.* [W:] Ryzyko w problemach zagrożeń środowiska. Red. Red. Maciej Maciejewski, Mieczysław S. Ostojski. IMGW Warszawa, 50-64

Dębski K. (1957). *Zwyczajne roczne i letnie maksima przepływu rzek polskich*. Roczn. Nauk Roln. T. 72, ser. F, nr 1.

DID Manual (2009). *Hydrology and Water Resources*, vol. 4, Government of Malaysia Department of Irrigation and Drainage

Fal B., Stachỳ J. (1984). R*egionalne wartości wskaźnika stopnia redukcji przepływów maksymalnych w Polsce*. Przegląd Geofizyczny Zeszyt 4, IMGW Warszawa

FLOODFREQ (2013). COST Action ES0901. *Review of Applied – Statistical methods for flood-frequncy analysis in Europe*. Center for Ecology and Hydrology. ISBN: 978-1-906698-32-4

Highway drainage design manual. *Hydrology* (1993). Arizona Department of Transportation. Report nr FHWA-AZ93-281

Krzanowski S. (2000). *Wpływ retencji zbiornikowej na wybrane element środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem zmian reżymu przepływów w rzece poniżej zbiornika (na przykładzie dorzecza Sanu).* Zesz. Nauk. AR w Krakowie, ser. Rozprawy, z. 259.

Ozga – Zielińska M., Brzeziński J. (1997). *Hydrologia stosowana*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

Ozga – Zieliński B. (1987). *Badanie statystycznej niejednorodności ciągów pomiarowych*. Gospodarka Wodna 10, 226-228

Stachỳ J. (1976). *Propozycja metody obliczania przepływów maksymalnych w zlewniach niekontrolowanych o powierzchni 50-200 km*^{2}. Gospodarka Wodna 12,

Stachỳ J., Fal B. (1986). *Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych*. Instytut Budowy Dróg i Mostów. 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

Dr hab. Andrzej Wałęga, dr inż. Agnieszka Cupak, dr hab. Bogusław Michalec
Uniwersytet Roniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Al.Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

Mgr inż. Marek Sygut
Śląski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Katowicach