OCHRONA ŚRODOWISKA

Vol. 38 2016 Nr 3

Łukasz Kuźmiński, Łukasz Szałata, Jerzy Zwoździak

Zastosowanie wybranych rozkładów prawdopodobieństwa wartości ekstremalnych do szacowania ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego w dorzeczu Odry na Dolnym Śląsku

W ostatnich 20 latach Polska kilkakrotnie zmagała się z atakiem nagłych powodzi. Największe z nich wystąpiły w 1997 r. oraz 2010 r., przy czym najbardziej ucierpiał obszar dorzecza Odry na Dolnym Śląsku. Powodzie w tych latach przyczyniły się do znaczących i trudnych do oszacowania strat finansowych. Awaryjne zabiegi, jakie zostały zastosowane pod presją czasu w trakcie zbliżającej się fali powodziowej, a tym samym zasięgu powodzi, polegały między innymi na budowie tymczasowych barier zabezpieczających, natychmiastowym usunięciu płynących przeszkód napierających na mosty oraz ewakuacji ludności z obszarów bezpośrednio zagrożonych. Jednym z miast, które najbardziej ucierpiało podczas powodzi latem 1997 r. był Wrocław. Znacznego uszczerbku doznały między innymi budowle historyczne (kościoły, mosty), budynki publiczne (szkoły, urzędy, hotele), budynki mieszkalne oraz obiekty komunalne (zakłady wodociągowe, oczyszczalnia ścieków). Obszerne badania powstałych szkód dostarczyły wartościowych informacji o działaniach powodzi oraz powodach strukturalnych szkód. Na główne powody wystąpienia obszernych szkód strukturalnych po powodziach składają się:

– aspekty geotechniczne (wyższy poziom wód podziemnych, niedostateczne fundamenty – przede wszystkim w domach mieszkalnych),

– nieadekwatne właściwości strukturalne (zmiana objętości z powodu wilgoci i niewłaściwych materiałów konstrukcyjnych),

– niewystarczająca komunikacja pomiędzy odpowiedzialnymi władzami.

Powodzie rzeczne zostały obecnie uznane za jedno z głównych niebezpieczeństw w Europie Środkowej, a skuteczna ochrona przed ich skutkami wymaga odpowiednich przedsięwzięć w zakresie planowania [1, 2]. Do zabiegów ochronnych, które mogą ograniczyć konsekwencje powodzi, należy stworzenie odpowiednich barier, a także zarządzanie rzekami, polegające na konserwacji i renowacji obszarów zalewowych, modyfikacji ich głębokości, szerokości i nierówności kanałów rzecznych. Ponieważ zabiegi te i związane z nimi inwestycje są bardzo kosztowne, dlatego decyzje władz terytorialnych dotyczące informacji, które obszary rzeczne i w jakim stopniu należy poddać zabiegom ochronnym, powinny być oparte na ocenie ryzyka powodziowego, z uwzględnieniem społecznych i ekonomicznych konsekwencji powodzi na danym obszarze oraz przewidywanych strat spowodowanych jej wystąpieniem.

Zgodnie z dyrektywą 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 23 października 2007 r. (zwaną Dyrektywą Powodziową), powodzie zostały podzielone na trzy rodzaje – o niskim prawdopodobieństwie wystąpienia (w tym obszary, na których powódź będzie miała charakter zdarzenia ekstremalnego), średnim prawdopodobieństwie wystąpienia (nie częściej niż co 100 lat) oraz o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia.

Przedmiot badań i metody badawcze

W niniejszej pracy do oceny ogólnej struktury ryzyka powodziowego wykorzystano dane hydrologiczne obejmujące dobowe przepływy pochodzące ze stacji hydrologicznej na Odrze w Malczycach z lat 1971–2013. Stosując empiryczną funkcję gęstości prawdopodobieństwa przedstawiono graficzny obraz empirycznego rozkładu maksymalnych wartości przepływów dobowych wyselekcjonowanych metodą blokową. Wykorzystując powszechnie stosowaną technikę estymacji, jaką jest metoda największej wiarygodności, oszacowano parametry rozkładów Gumbela, Fracheta i logarytmiczno-normalnego, jako rozkładów optymalnie dopasowanych do empirycznego rozkładu maksymalnych wartości przepływów dobowych. Spośród trzech rozkładów wybrano dwa najlepiej dopasowane i wykorzystano je do oszacowania prawdopodobieństwa przekroczenia określonych wartości przepływów maksymalnych. Oszacowane prawdopodobieństwa potraktowano jako miary ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego na badanym terenie.

Aby określić prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi na rozpatrywanym terenie, poddano analizie parametr hydrometryczny w postaci maksymalnego dobowego natężenia przepływu wody w badanej rzece. Znając maksymalne wartości tego parametru w badanych punktach rzeki, podjęto próbę oszacowania ryzyka powodziowego na podstawie estymowanych rozkładów prawdopodobieństwa rocznych przepływów maksymalnych.

Dr inż. Ł. Kuźmiński: Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny, Katedra Metod Ilościowych w Ekonomii, ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław, *lukasz.kuzminski@ue.wroc.pl*

Dr inż. Ł. Szałata: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Ekologistyki i Zarządzania Ryzykiem Środowiskowym, wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław *lukasz.szalata@pwr.edu.pl*

Prof. dr hab. inż. J. Zwoździak: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Ośrodek Główny Warszawa, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa, *jerzy.zwozdziak@imgw.pl*

Wybrane zastosowania teorii wartości ekstremalnych

Zastosowanie modeli statystycznych oraz technik modelowania do określania oraz identyfikacji zagrożeń środowiskowych ma szerokie zastosowanie w inżynierii środowiska i stanowi popularne narzędzie inżynierskie w szeroko rozumianym zarządzaniu środowiskiem [3]. Za początek prac nad problemami analizy wartości ekstremalnych uważa się rok 1709, kiedy N. Bernoulli prowadził rozważania nad średnią największą odległością między danymi punktami rozłożonymi losowo na linii prostej o ustalonej długości [4]. Bardzo bogata bibliografia na temat teorii rozkładów wartości ekstremalnych i jej zastosowań do początków XXI wieku liczy ponad 1000 pozycji. Tak obszerna literatura świadczy o bardzo dużym zainteresowaniu tą dziedziną nauki i jej szerokim zastosowaniu. Wartości ekstremalne w badaniach nad powodziami prawdopodobnie pierwszy wykorzystał W. Fuller [5], natomiast rozwój ogólnej teorii wartości ekstremalnych związany jest z pracą L. von Bortkiewicza [6], dotyczącą rozkładu zakresu w losowej próbie pochodzącej z populacji o rozkładzie normalnym. W tej pracy po raz pierwszy wprowadzono i jasno zdefiniowano pojęcie rozkładu największej wartości. Z kolei E. J. Gumbel jako pierwszy zwrócił uwagę inżynierów i statystyków na możliwość zastosowania formalnej teorii wartości ekstremalnych do pewnych rozkładów, które wcześniej były traktowane jako empiryczne. Autor ten w 1941 r. zastosował rozkład wartości ekstremalnych do analizy przepływów w rzekach w Stanach Zjednoczonych [7], zaś w kolejnych pracach kontynuował badania na temat estymacji ekstremalnych przepływów i prognoz powodziowych [8–10]. Autor pracy [11] uzyskał podczas swoich badań obserwowane częstości N(T), czyli liczbę dni w czasie T, w których przepływ wody w rzece Greenbrier (zachodnia Virginia) przekroczył wartość 17000 ft^3/s (około 480 m^3/s). Obserwacje, które obejmowały lata 1896–1967 porównano z teoretycznym rozkładem Poissona i wykazano, że dyskretne obserwacje N(T) dotyczące badanej rzeki i danego klimatu można bardzo dobrze modelować tym rozkładem.

W ostatnich dekadach XX wieku powstało bardzo wiele prac poruszających tematykę zastosowania elementów teorii wartości ekstremalnej do rozwiązywania problemów związanych z powodziami. Autorzy pracy [12] prowadzili badania oparte na danych dotyczących dobowych przepływów wody w rzece Feather w Oroville (Kalifornia) z lat 1902–1960, z których wyselekcjonowali roczne maksima przepływów i do ich empirycznego rozkładu dopasowali rozkład Gumbela i dodatkowo takie rozkłady, jak gamma (Pearson III), log-gamma (log-Pearson III) oraz logarytmiczno-normalny. Ponadto zasugerowali również zastosowanie dystrybuant przekroczeń oraz funkcji hazardu w analizach zagrożenia powodziowego. Zastosowanie rozkładów prawdopodobieństwa do estymacji częstości powodzi zostało zilustrowane także w pracach [13, 14], natomiast dwuskładnikowy rozkład wartości ekstremalnych do analizy częstości występowania powodzi został zaproponowany w pracach [15, 16]. Kolejne prace dotyczyły zastosowania rozkładu wartości ekstremalnych I typu do analizy częstości występowania powodzi [17–19]. Po wielkiej powodzi w Stanach Zjednoczonych w 1993 r., która wyrządziła ogromne straty na środkowym zachodzie kraju, zastosowanie teorii wartości ekstremalnych w analizie zjawisk powodziowych opublikowano w pracy [20], w której dokonano dokładnej analizy przekroczeń stanów alarmowych na przestrzeni 100 lat. Oprócz prac dotyczących zjawisk typowo powodziowych, opublikowano bardzo wiele wyników badań dotyczących zastosowania teorii wartości ekstremalnych do modelowania wielu innych zjawisk meteorologicznych, a także zjawisk z dziedziny ekonomii i inżynierii, które obecnie są z powodzeniem kontynuowane.

Metody przewidywania zjawisk powodziowych

Metoda określania prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi na danym obszarze polega na statystycznym dopasowaniu teoretycznych rozkładów do dostępnych danych dotyczących wartości parametrów hydrologicznych. Najczęściej badanymi parametrami w tym zakresie są maksymalne dobowe natężenie przepływu (analizowane w niniejszej pracy) oraz maksymalny dobowy stan wody w badanym przekroju rzeki. Do tej pory badacze sugerowali wiele różnych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa do opisu zjawisk powodziowych, ale żaden z nich nie był stosowany powszechnie, jako wyraźnie dominujący. Duża liczba czynników, jakie mają wpływ na kształtowanie się rozkładów maksymalnych wartości tych parametrów hydrometrycznych powoduje, że prowadząc badania na wybranym obszarze danego dorzecza należy za każdym razem zastosować kilka rozkładów w celu dopasowania tego, który najlepiej oddaje empiryczny rozkład wartości badanego parametru na tym obszarze. Jako kryterium wyboru najlepiej dopasowanego rozkładu, spośród badanych rozkładów teoretycznych, stosowane są nieparametryczne testy zgodności, natomiast do estymacji wartości parametrów tych rozkładów stosuje się metodę momentów oraz metodę największej wiarygodności [21]. Wiadomo, że częste obserwacje w centralnej części histogramu badanej próby mają dominujący wpływ na wartości parametrów estymowanych tymi metodami. Pewnym ulepszeniem może być zastosowanie na przykład metod dopasowania krzywej lub momentów ważonych prawdopodobieństwem, które wydają się być statystycznie odporne w związku z estymacją maksymalnych przepływów i stanów wód w rzekach [22, 23]. Alternatywnie można również zastosować inne metody do bezpośredniego modelowania tak zwanych ogonów rozkładu [24], wymagają one jednak dodatkowych informacji wejściowych, podczas gdy metoda momentów i metoda największej wiarygodności są niezależne od dodatkowych założeń. Dlatego są one częściej stosowane do rozwiązywania praktycznych problemów o tematyce powodziowej i zostały zastosowane w niniejszej pracy do szacowania ryzyka zjawisk powodziowych.

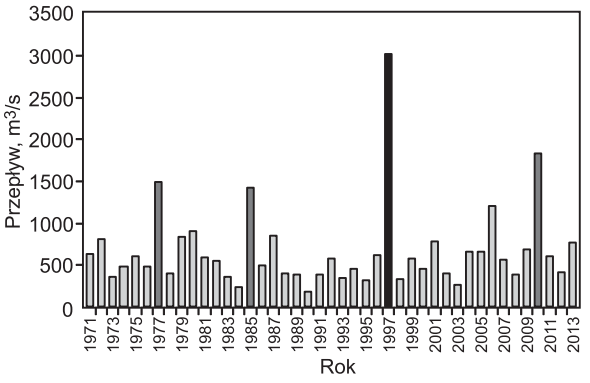
Charakterystyka danych hydrologicznych

Na potrzeby badań zebrano dobowe przepływy pochodzące ze stacji hydrologicznej na Odrze w Malczycach w czasie od 1 stycznia 1971 r. do 31 grudnia 2013 r., z których wyselekcjonowano roczne przepływy maksymalne. W tym celu zastosowano metodę maksimów rocznych (określenie „roczne” w nazwie tej metody jest symboliczne i oznacza pewien założony przedział czasu, zawierający określoną liczbę obserwacji w zależności od częstości, z jaką obserwacje były dokonywane). Metoda ta jest również nazywana metodą blokową lub metodą Gumbela [25].

Zgodnie z nią, w celu wyselekcjonowania wartości maksymalnych z określonego zbioru danych, przez y_i oznacza się maksima:

$$y_i = \max\{x_{i1}, ..., x_{im}\};\ i=1, ..., n \quad (1)$$

Z zestawienia rocznych przepływów maksymalnych w latach 1971–2013 (rys. 1) wynika, że w badanym czasie największą wartość przepływu w stacji hydrologicznej Malczyce odnotowano w 1997 r. – $q_{1997}=3020\,m^3/s$.



Rys. 1. Maksymalne dobowe przepływy w Odrze (stacja hydrologiczna Malczyce) w latach 1971–2013
Fig. 1. Maximum annual flows in the Oder river (Malczyce hydrological station) in the period of 1971–2013

Podstawowe parametry dotyczące zbioru maksimów rocznych estymowano z użyciem metody momentów, która nie wymaga informacji o rodzaju ukrytego rozkładu maksimów. W tabeli 1 zestawiono estymatory punktowe podstawowych parametrów, policzone na podstawie zbioru wyselekcjonowanych maksimów rocznych z historycznie wysokim maksymalnym przepływem rocznym w 1997 r. (q_{1997}) oraz bez niego.

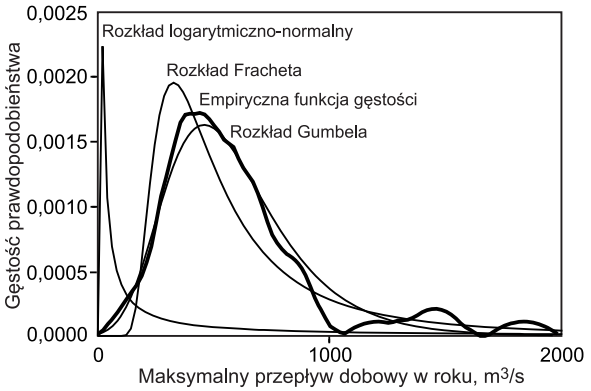
Tabela 1. Parametry próby (n) rocznych przepływów maksymalnych
Table 1. Parameters of a sample (n) of maximum annual flows

Parametr	Bez q_{1997} (n=43)	Z q_{1997} (n=44)
Średnia	601,5 m^3/s	656,5 m^3/s
Odchylenie standardowe	347,4 m^3/s	500,8 m^3/s
Współczynnik zmienności	0,58	0,76
Współczynnik skośności	1,80	2,98

Modele probabilistyczne

W analizie dotyczącej rozkładów maksymalnych wartości parametrów hydrologicznych sugeruje się stosować rozkład Gumbela [26]. Raport IACWD (U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data – Hydrology Subcommittee) z 1983 r. rekomenduje do przewidywania zjawisk powodziowych rozkład Pearsona III z logarytmiczno-normalną transformacją danych długookresowych. Parametry policzone w tabeli 1 wskazują, że rozkład logarytmiczno-normalny, mający stosunkowo mały skok przy początku, może alternatywnie również opisywać rozkład maksimów rocznych. Innym możliwym teoretycznym rozkładem, który może zostać użyty do modelowania rocznych maksimów przepływów rzecznych jest typ II rozkładu wartości ekstremalnych nazywany rozkładem Frecheta [25].

Na rysunku 2 przedstawiono empiryczną funkcję gęstości rocznych maksymalnych przepływów z użyciem narzędzia w postaci jądra gęstości [27]. Wykres został wykonany z wykorzystaniem wszystkich wyselekcjonowanych maksimów, łącznie z historycznie wysokim przepływem z 1997 r. Na wykresie zostały również dopasowane trzy funkcję gęstości rozkładów – Gumbela, Frecheta oraz logarytmiczno-normalny. Widać wyraźnie, że funkcja gęstości rozkładu Gumbela była najlepiej dopasowana do empirycznej funkcji gęstości badanych danych. Na drugim miejscu znalazła się funkcja gęstości rozkładu Frecheta, a funkcja gęstości rozkładu logarytmiczno-normalnego wyraźnie odbiegała od empirycznej funkcji gęstości badanej charakterystyki hydrologicznej. Wyniki te zostały potwierdzone po zastosowaniu testów Kołmogorowa-Smirnowa i *chi*-kwadrat na jakość dopasowania rozpatrywanych rozkładów teoretycznych do badanego rozkładu empirycznego. Rozkład logarytmiczno-normalny został definitywnie odrzucony po przeprowadzonych testach, dlatego nie był brany pod uwagę w dalszych analizach.



Rys. 2. Empiryczne funkcje gęstości rocznych przepływów maksymalnych w Odrze
Fig. 2. Empirical functions of maximum annual flow densities in the Oder river

Parametry rozpatrywanych rozkładów teoretycznych, których wykresy przedstawiono na rysunku 2, były estymowane powszechnie stosowaną metodą największej wiarygodności. W tabeli 2 przedstawiono wyniki estymacji otrzymane klasyczną metodą momentów oraz metodą największej wiarygodności w przypadku obu rozpatrywanych rozkładów. Obliczenia zostały przeprowadzone z uwzględnieniem wszystkich wyselekcjonowanych maksimów oraz danych niezawierających historycznego maksymalnego przepływu zaobserwowanego w 1997 r.

Wyniki pokazują, że wartości estymatorów otrzymane metodą momentów były wyraźnie większe od wartości estymatorów uzyskanych metodą największej wiarygodności w przypadku obu rozpatrywanych rozkładów. Dodatkowo,

Tabela 2. Estymowane wartości paramentów rocznych przepływów maksymalnych
Table 2. Estimated parameters of the maximum annual flows

Rozkład Gumbela				Rozkład Frecheta			
z q_{1997}		bez q_{1997}		z q_{1997}		bez q_{1997}	
μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
metoda momentów							
656,5	500,8	601,5	374,4	656,5	500,8	601,5	374,4
metoda największej wiarygodności							
479,0	262,4	460,0	224,9	443,1	223,1	406,0	210,5

wartości estymatorów otrzymane metodą momentów bardziej reagowały na włączenie do danych przepływu maksymalnego z 1997 r., niż estymatory otrzymane metodą największej wiarygodności. Można stwierdzić, że estymatory klasycznej metody momentów były bardziej wrażliwe na występowanie w próbie obserwacji odstających. Oprócz historycznego maksymalnego przepływu, zaobserwowanego w 1997 r., w badanej próbie wystąpiły przepływy maksymalne w latach 1977, 1985 i 2010 (rys. 1), które wyraźnie obiegały od pozostałych wartości. Po estymacji parametrów klasyczną metodą momentów, z pominięciem obserwacji z wymienionych lat, okazało się, że były one bardzo zbliżone do parametrów uzyskanych metodą największej wiarygodności w przypadku obu rozkładów.

Szacowanie ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego

Po przeprowadzeniu procedury dopasowania teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa do empirycznego rozkładu rocznych maksymalnych przepływów w Odrze (stacja hydrologiczna Malczyce) okazało się, że najlepszym rozkładem, na podstawie którego można dokonać oszacowania wystąpienia zagrożenia powodziowego w tym przekroju jest rozkład Gumbela, natomiast w drugiej kolejności rozkład Frecheta. Do obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia wykorzystano funkcje dystrybuanty obu rozkładów, opisane odpowiednio wzorami [25]:

$$G_{o,\mu,\sigma}(x) = \exp(-e^{-(x-\mu)/\sigma}) \tag{2}$$

$$G_{1,\gamma,\mu,\sigma}(x) = \exp\left\{-\left[1+\gamma\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\gamma}\right\} \tag{3}$$

$$1+\gamma x>0,\ \gamma\neq 0$$

w których:
γ – parametr rozkładu Frecheta
μ, σ – parametry odpowiednio położenia i skali obu rozkładów

W tabeli 3 przedstawiono wartości parametrów rozkładów estymowane metodą największej wiarygodności ze wszystkich wyselekcjonowanych maksymalnych przepływów rocznych.

Tabela 3. Wartości parametrów rozkładów Gumbela i Frecheta
Table 3. Parameter values of Gumbel and Frechet distributions

Rozkład	Parametr		
	μ	σ	γ
Gumbela	479,0	262,4	–
Frecheta	443,1	223,1	0,54

Oceniając zagrożenie powodziowe na badanym obszarze wzięto pod uwagę przepływy z lat, w których na Dolnym Śląsku miały miejsce ostatnie największe powodzie, czyli lata 1997 oraz 2010. Maksymalne przepływy w tych latach wynosiły odpowiednio $q_{1997}=3020\,m^3/s$ i $q_{2010}=1840\,m^3/s$. Wykorzystując dystrybuanty obu rozkładów policzono prawdopodobieństwo przekroczenia wartości przepływów z 1997 r. i 2010 r. (tab. 4).

Wyniki zestawione w tabeli 4 wykazały wyraźne różnice w wartościach prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia powodziowego obliczonych z obu rozkładów, wynikające z jakości dopasowania obu rozkładów do empirycznego rozkładu maksymalnych rocznych przepływów

Tabela 4. Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia powodziowego
Table 4. Flood risk probability assessment

Rozkład	Prawdopodobieństwo przekroczenia przepływu	
	q_{1997}	q_{2010}
Gumbela	0,000062	0,005575
Frecheta	0,025363	0,062954

w Odrze. Wyraźnie lepsze dopasowanie rozkładu Gumbela wskazuje na bardziej wiarygodne wyniki i je należy brać pod uwagę, natomiast wyniki otrzymane z rozkładu Frecheta przedstawiono jedynie w celach porównawczych. Otrzymane wartości prawdopodobieństwa z rozkładu Gumbela pokazują, że na badanym obszarze przepływ w Odrze przekroczy stan osiągnięty w 1997 r. z prawdopodobieństwem 0,000062, natomiast stan z 2010 r. z prawdopodobieństwem 0,005575. W sytuacji, kiedy znany jest rozkład teoretyczny, który jest dobrze dopasowany do danych empirycznych, stanowi on bardzo wygodne narzędzie do obliczania prawdopodobieństwa zajścia dowolnych zdarzeń stanowiących zagrożenie powodziowe na rozpatrywanym obszarze.

Metoda obliczeń

Z szeregu czasowego, zawierającego dobowe wartości przepływów w Odrze z lat 1971–2013, wyselekcjonowano maksima roczne (rys. 1) w programie EXCEL z wykorzystaniem z funkcji MAX. Horyzont czasowy, z jakiego wyznacza się maksima badanej zmiennej jest ustalany przez badacza. Na podstawie takiego zbioru danych, stosując metodę największej wiarygodności, wyestymowano parametry wybranych rozkładów prawdopodobieństwa – Gumbela i Frecheta. Do oszacowania parametrów danego rozkładu można stosować gotowe funkcje w dostępnych pakietach statystycznych, na przykład program R. W niniejszej pracy wykorzystano w tym celu program Xtremes 3.1, a wyniki estymacji parametrów obu rozkładów zebrano w tabeli 3. Następnie do oszacowania prawdopodobieństwa przekroczenia określonej wartości przez badaną zmienną wykorzystano dystrybuanty rozkładów Gumbela i Frecheta opisane zależnościami (2) i (3). Na przykład w celu obliczenia prawdopodobieństwa zdarzenia, że maksymalny roczny przepływ przekroczy wartość $3020\,m^3/s$ – stosując rozkład Gumbela – należy w programie EXCEL wykorzystać następującą formułę:

$$=(1-(\exp(-\exp(-(3020-479)/262,4)))) \tag{4}$$

w której od 1 została odjęta wartość funkcji dystrybuanty rozkładu Gumbela dana wzorem (2) z estymowanymi parametrami z tabeli 3 w punkcie $3020\,m^3/s$. W analogiczny sposób w celu obliczenia prawdopodobieństwa zdarzenia, że maksymalny roczny przepływ dobowy przekroczy wartość $1840\,m^3/s$ – stosując tym razem rozkład Frecheta – należy wykorzystać formułę:

$$=(1+0,54((K39-443,1)/223,1))^(-1,85) \tag{5}$$

Prezentowane formuły są uniwersalne i można w miarę potrzeb zmieniać wartości zmiennych, w przypadku których liczy się prawdopodobieństwa oraz parametry stosowanych rozkładów. W sytuacji, gdy do szacowania prawdopodobieństwa będzie wykorzystywany innych rozkład niż prezentowany w niniejszej pracy, to w formule należy wprowadzić wzór dystrybuanty stosowanego rozkładu.

Podsumowanie

Wyniki przedstawionych rozważań są ściśle związane z danymi hydrologicznymi dostępnymi na rozpatrywanym obszarze i nie uwzględniają oddziaływań niestatystycznych, jakie mogły mieć miejsce w czasie objętym badaniem (np. obsługa i renowacja obszarów zalewowych, modyfikacja głębokości, szerokości i nierówności koryta rzecznego, usunięcie roślinności i wylesienia, a także zmiany w projektach zagospodarowania przestrzennego i inne działania interwencyjne). Przedstawiona analiza probabilistyczna zagrożenia powodziowego może być skutecznym narzędziem w ocenie wystąpienia ryzyka powodziowego, dostarczając istotnych informacji niezbędnych do podejmowania decyzji dotyczących zabiegów chroniących określony teren przed powodzią. Zaproponowane narzędzie do szacowania wystąpienia ryzyka powodziowego w postaci teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych wartości przepływów w rzece może być elementem probabilistycznej oceny zagrożenia przeciwpowodziowego. Otrzymane w ten sposób wyniki mogą zostać wykorzystane przez lokalne władze i służby odpowiedzialne za ochronę przeciwpowodziową do szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia określonych zdarzeń związanych z zagrożeniem powodziowym, a także do porównywania wybranych obszarów dorzecza pod względem zagrożenia powodziowego.

LITERATURA

1. Z. KUNDZIEWICZ: Summer floods in central Europe. Climate change track? *Natural Hazards* 2005, Vol. 36, No. 1–2, pp. 165–189.
2. H. STOVEL: Risk Preparedness: A Management Manual for World Cultural Heritage. International Centre for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property, Roma 1998.
3. J. ZWOŹDZIAK: Metody prognozy i analizy stężeń zanieczyszczeń w powietrzu w Regionie Czarnego Trójkąta. Monografia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
4. E. J. GUMBEL: Statistical theory of extreme values and some practical applications. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, Washington 1954, Vol. 33, pp. 52–68.
5. W. FULLER: Floods flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 1914, Vol. 77, pp. 564–583.
6. L. von BORTKIEWICZ: Variationsbreite und mittlerer Fehler. *Berlin Math. Ges. Sitzungsber* 1921, Vol. 21, pp. 3–11.
7. E. J. GUMBEL: The return period of flood flaws. *The Annals of Mathematical Statistics* 1941, Vol. 12, No. 2, pp. 163–190.
8. E. J. GUMBEL: On the plotting of flood-discharges. *Transactions American Geophysical Union* 1943, Vol. 24, No. 2, pp. 699–719.
9. E. J. GUMBEL: Floods estimated by probability methods. *Engineering News-Record* 1945, Vol. 134, No. 24, pp. 97–101.
10. E. J. GUMBEL: The statistical forecast of floods. *Ohio Water Resources Board* 1949, No. 15, pp. 1–21.
11. P. TODOROVIC: A probabilistic approach to analysis and prediction of floods. Proceedings of 43rd Session ISI, Buenos Aires 1981.
12. L. R. PERICCHI, I. RODRIGUEZ-ITURBE: On statistical analysis of floods. In: A. C. ATKINSON, S. E. FIENBERG [Eds.]: A Celebration of Statistics, Springer-Verlag, New York 1985, pp. 511–541.
13. N. P. GREIS, E. F. WOOD: Regional flood frequency estimation and network design. *Water Resources Research* 1981, Vol. 17, No. 4, pp. 1167–1177.
14. H. W. SHEN, M. C. BRYSON, I. D. OCHOA. Effect of tail behavior assumptions on flood predictions. *Water Resources Research* 1980, Vol. 16, No. 2, pp. 361–364.
15. F. ROSSI, M. FIORENTINO, P. VERSACE: Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. *Water Resources Research* 1984, Vol. 20, No. 7, pp. 847–856.
16. M. BERAN, J. R. M. HOSKIN, N. ARNELL: Comment on 'Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis' by Fabio Rossi, Mauro Fiorentino, and Pasquale Versace. *Water Resources Research* 1986, Vol. 22, pp. 263–266.
17. R. SMITH: Estimating the upper tail of flood frequency distributions. *Water Resources Research* 1987, Vol. 23, pp. 1657–1666.
18. D. JAIN, V. SINGH. Estimating parameters of EV1 distribution for flood frequency analysis. *Water Resources Research* 1987, Vol. 23, pp. 59–71.
19. M. I. AHMAD, C. D. SINCLAIR, B. D. SPURR: Assessment of flood frequency models using empirical distribution function statistics. *Water Resources Research* 1988, Vol. 24, No. 8, pp. 1323–1328.
20. K. HIPEL: Extreme values: Floods and droughts. Proc. of int. conf. on Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Enviromental Engineering, Vol. 1, Dordrecht 1994.
21. R. MAGIERA: Modele i metody statystyki matematycznej. Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2002.
22. Y. F. CHEN, Y. HOU, P. van GELDER, Z. SHA: Study of parameter estimation methods for Pearson-III distribution in flood frequency analysis. Proc. of conference on The Extremes of the Extremes: Extraordinary Floods, Reykjavik 2000, International Association of Hydrological Sciences, Publ. No. 271, 2002, pp. 263–269.
23. S. H. MKHANDI, R. K. KACHROO, S. L. GUO: Uncertainty analysis of flood quantile estimates with reference to Tanzania. *Journal of Hydrology* 1996, Vol. 185, No. 1–4, pp. 317–333.
24. M. MAES: Tail heaviness in structural reliability. Proc. of ICASP 7 conf., Rotterdam 1995, pp. 997–1002.
25. M. THOMAS, R. REISS: Statistical Analysis of Extreme Value with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields. Birkhauser, Basel 2007.
26. S. YUE, B. BOBE, P. LEGENDRE, P. BRUNEAU: The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 1999, Vol. 226, No. 1–2, pp. 88–100.
27. Ł. KUŹMIŃSKI: The applications of the kernel densities to the modeling the generalized Pareto distributions. *Ekonometria. Econometrics* 2013, nr 3(41), ss. 55–64.

Kuzminski, L., Szalata, L., Zwozdziak, J. Application of Selected Probability Distributions of Extreme Values to Flood Risk Assessment in the Odra River Catchment in Lower Silesia. *Ochrona Srodowiska* 2016, Vol. 38, No. 3, pp. 35–39.

Abstract: The maximum daily flows in the Oder river from the period of 1971 to 2013 were analyzed in Malczyce hydrological station. From the entire data set the maximum annual flows were selected and their empirical distributions were fitted against the three theoretical distribution models: Gumbel, Frechet and the lognormal. The presented case of probabilistic flood risk analysis for the Oder catchment in Lower Silesia may become an effective flood risk assessment tool. The results may be employed to probability assessment of certain events related to flood risk and also to compare the flood risk in selected catchment regions.

Keywords: Flood risk, maximum annual flow, empirical distribution, Gumbel distribution, Frechet distribution, lognormal distribution.