

Łukasz Kuźmiński

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: lukasz.kuzminski@ue.wroc.pl

**OCENA RYZYKA ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO
NA RZECIE NYSA KŁODZKA
Z WYKORZYSTANIEM WYBRANYCH ROZKŁADÓW
PRAWDOPODOBIENSTWA WARTOŚCI
EKSTREMALNYCH**

**ASSESSMENT OF FLOOD RISK
ON THE NYSA KŁODZKA RIVER USING
SELECTED EXTREME VALUES DISTRIBUTIONS**

DOI: 10.15611/ekt.2016.1.04

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest zastosowaniu wybranych rozkładów wartości ekstremalnych do szacowania ryzyka zagrożenia powodziowego na terenie Bystrzycy Kłodzkiej nad rzeką Nysa Kłodzka. W badaniu wykorzystane zostały dobowe stany wody na rzece Nysa Kłodzka zebrane w stacji hydrologicznej Bystrzyca Kłodzka. Z danych pochodzących z lat 1981-2014 wyselekcjonowane zostały maksima półroczne stanów wody. Do rozkładu empirycznego rocznych maksimów dopasowano dwa rozkłady teoretyczne: Gumbela i Frecheta. Dystrybuanty obu rozkładów wykorzystano do oszacowania ryzyka powodziowego dla badanego obszaru.

Słowa kluczowe: ryzyko zagrożenia powodziowego, maksima roczne, stan wody, rozkład Gumbela, rozkład Frecheta.

Summary: The article concerns the application of selected distributions of extreme values to estimate the risk of occurring of flood danger in Lower Silesia. In the study a daily water level on the Nysa Kłodzka River was used, that was gathered in the hydrological station in Bystrzyca Kłodzka. From the collected data from the period 1981-2013 biannual maximum water level was selected. Two theoretical distributions: Gumbel and Frechet were fitted to the empirical distribution of biannual maximal. The best fitted two distributions were used for the exemplary assessment of flood danger.

Keywords: flood risk, one-yaer maximum, water level , Gumbel distribution, Frechet distribution.

1. Wstęp

W ostatnich dwóch dekadach Polska dwa razy zmagą się z atakiem nagłych, bardzo dużych powodzi, które miały miejsce w latach 1997 oraz 2010. Jednym z najbardziej dotkniętych regionów Polski był właśnie region Dolnego Śląska. Praca jest kolejnym artykułem z cyklu traktującym o badaniu zagrożenia wystąpienia ryzyka powodziowego na Dolnym Śląsku (z wykorzystaniem szeroko rozumianej teorii wartości ekstremalnych), którego autor jest rodowitym mieszkańcem. Powodzie w wymienionych latach, które dotknęły Dolny Śląsk, spowodowały bardzo duże i trudne do oszacowania straty finansowe. Zaskoczyły władze lokalne oraz służby reagowania kryzysowego. Awaryjne zabiegi, jakie zostały zastosowane podczas powodzi, to między innymi budowa tymczasowych barier zabezpieczających, natychmiastowe usunięcie płynących przeszkód napierających na mosty oraz przemieszczenie ludności z obszarów bezpośrednio zagrożonych.

Jednym z miast, które ucierpiało najbardziej podczas powodzi latem w roku 1997, był Wrocław. Setki zalanych obiektów zawierało struktury historyczne (kościół, mosty oraz inne), budynki publiczne (szkoły, urzędy, budynki biurowe oraz hotele) oraz budynki mieszkalne. Obszerna analiza szkód popowodziowych w wymienionych strukturach dostarczyła wartościowych informacji o skutkach powodzi oraz powodach powstałych szkód.

Efektywna ochrona przed skutkami ewentualnych kolejnych powodzi wymaga planowania i przygotowania, które będą brały pod uwagę klimat, struktury chronione i ich zawartość [Stovel 1998]. Po rozważeniu przez odpowiedzialne władze różnych zabiegów ochronnych można zredukować konsekwencje powodzi w przyszłości. Do tych zabiegów należą między innymi: stworzenie odpowiednich zabezpieczeń w postaci wałów przeciwpowodziowych, zarządzanie rzekami, na które składa się konserwacja i renowacja obszarów zalewowych oraz modyfikacja głębokości, szerokości i nierówności kanałów rzecznych. Wszystkie wymienione zabiegi należą do inwestycji bardzo kosztownych. Decyzje odpowiedzialnych władz terytorialnych dotyczące tego, które obszary rzeczne i w jakim stopniu należy poddać wymienionym powyżej zabiegom ochronnym, oparte powinny być na ocenie ryzyka powodziowego z uwzględnieniem społecznych i ekonomicznych konsekwencji powodzi na danym obszarze oraz przewidywanych możliwych strat spowodowanych jej wystąpieniem.

W prezentowanej pracy do oceny ogólnej struktury ryzyka powodziowego zaproponowany zostanie probabilistyczny model dla wartości ekstremalnych będący elementem szerokiego zagadnienia, jakim jest teoria wartości ekstremalnych. Na podstawie dostępnych danych hydrologicznych pochodzących ze stacji hydrologicznej na rzece Nysa Kłodzka w Bystrzycy Kłodzkiej oraz przy użyciu modeli probabilistycznych zostanie oszacowane ryzyko wystąpienia zagrożenia powodziowego w postaci prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń niekorzystnych dla badanego obszaru.

2. Zastosowania teorii wartości ekstremalnych w hydrologii – przegląd literatury

Historycznie początek prac nad problemami analizy wartości ekstremalnych datuje się na rok 1709. Wtedy to Nicolas Bernoulli prowadził rozważania nad średnią największą odległością między danymi n punktami rozłożonymi losowo na linii prostej o ustalonej długości t [Gumbel 1954].

Bardzo bogata i kompleksowa literatura na temat teorii rozkładów wartości ekstremalnych i jej zastosowań do początków XXI wieku liczy ponad 1100 pozycji. Nie sposób ją całą spisać i przedstawić, ponieważ wymagałoby to napisania osobnej kilkutomowej monografii poświęconej tylko studiom literaturowym na ten temat. Tak obszerna literatura pokazuje bardzo duże zainteresowanie tą dziedziną nauki i jej szerokie zastosowanie. Dlatego w tym punkcie przedstawione zostaną jedynie wybrane pozycje, które zdaniem autora miały istotny wpływ na rozwój tej teorii i są ściśle związane z problemami poruszonymi w artykule.

Prawdopodobnie pierwszy wartości ekstremalne wykorzystał w badaniach nad powodzią w swoim artykule Fuller [1914]. Systematyczny rozwój ogólnej teorii wartości ekstremalnych związany jest z kolei z pracą Bortkiewicza, która dotyczyła rozkładu zakresu (*range*) w losowej próbie pochodzącej z populacji o rozkładzie normalnym. Ta praca jest bardzo ważna, dlatego że autor po raz pierwszy wprowadził w niej i jasno zdefiniował pojęcie rozkładu największej wartości [Bortkiewicz 1922].

Gumbel jako pierwszy zwrócił uwagę inżynierów i statystyków na możliwość zastosowania formalnej teorii wartości ekstremalnych do pewnych rozkładów, które wcześniej były traktowane jako empiryczne. Zastosował on rozkład wartości ekstremalnych do analizy przepływów rzecznych w USA w roku 1941 [Gumbel 1941]. W kolejnych pracach kontynuował swoje badania i dyskusje na temat estymacji ekstremalnych przepływów rzecznych i prognoz powodziowych [Gumbel 1944; 1945; 1949].

Todorovic uzyskał podczas swoich badań obserwowane częstości $N(T)$, czyli liczbę dni w okresie o długości T dni, w których przepływ wody w rzece Greenbrier w zachodniej Virginii przekroczył wartość 17 000 stóp sześciennych. Okres jego obserwacji objął 72 lata – (1896-1967). Obserwowane częstości porównywał z teoretycznymi rozkładami Poissona. Pokazał w swoich wynikach, że dyskretne obserwacje $N(T)$ dla badanej rzeki i danego klimatu dają się bardzo dobrze modelować rozkładami Poissona [Todorovic 1979].

Od lat 70. do 90. XX wieku powstało bardzo dużo prac poruszających tematykę zastosowania elementów teorii wartości ekstremalnej do rozwiązywania problemów związanych z powodzią. Pericchi i Rodriguez-Iturbe prowadzili badania oparte na danych dotyczących dziennych przepływów wody w rzece Feather w Oroville w stanie Kalifornia w USA. Zebrane dane pochodziły z lat 1902-1960. Z tych danych wyselekcjonowali roczne maksima dla przepływów i do ich empirycznego roz-

kładu dopasowali rozkład Gumbela. Dodatkowo w swojej pracy do analizy wyselekcjonowanych maksimów zaproponowali również takie rozkłady, jak: gamma (Person rodzaju III), log-gamma (log – Pearson rodzaju III) oraz log-normalne. W badaniach zasugerowali również zastosowanie dystrybuant przekroczeń oraz funkcji hazardu w analizach zagrożenia powodziowego [Pericchi, Rodriguez-Iturbe 1985]. Zastosowanie rozkładów prawdopodobieństwa do estymacji częstości powodzi zostało zilustrowane także w pracy Greisa i Wooda [1981]. Shen zastosowała rozkłady prawdopodobieństwa do prognozowania zjawisk powodziowych [Shen, Bryson, Ochoa 1980]. Z kolei Rossi do analizy częstości występowania powodzi zaproponował dwuskładnikowy rozkład wartości ekstremalnych [Rossi, Fiorentino, Versace 1986]. Beran w tym samym roku opublikował komentarz do tej pracy [Beran, Arnell 1986]. W kolejnych latach Smith, Jain i Singh oraz Ahmad dostarczyli dyskusji na temat zastosowania rozkładu wartości ekstremalnych do analizy częstości występowania powodzi [Smith 1987; Jain i Singh 1987; Ahmad, Sinclair, Spurr 1988]. Pod koniec XX wieku po wielkiej powodzi w USA, która wyrządziła ogromne straty w środkowo-zachodniej części kraju, zastosowanie teorii wartości ekstremalnych w analizie zjawisk powodziowych przedstawił w swojej pracy Hipel. Omówił dokładnie analizę przekroczeń stanów alarmowych w ciągu 100 lat w kontekście powodzi z 1993 roku [Hipel 1994].

Początek wieku XXI to również ciekawy okres pod względem badań zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych z wykorzystaniem teorii wartości ekstremalnych.

Katz wraz ze współautorami przedstawili w swoim artykule kompleksowe badania z zastosowaniem rozkładów wartości ekstremalnych na danych hydrologicznych zebranych w Fort Collins w stanie Colorado w USA [Katz, Parlange, Neveau 2002]. Engeland, Frigessi i Hisdal przedstawili analizę zagrożenia powodziowego i suszy, wykorzystując uogólnione rozkłady wartości ekstremalnych i Pareto. Badania przeprowadzili na danych dotyczących przepływów rzecznych na rzece Ha w zachodnio-południowej Norwegii [Engeland, Frigessi, Hisdal 2005]. Bordi wraz ze współautorami w swojej pracy przenieśli okresy mokre i suche na Sycylii. Zastosowali do tego celu miesięczne maksima opadów [Bordi i in. 2007]. Yurtal i inni porównali w swojej pracy metodę największej wiarygodności i ważoną metodę momentów do estymowania parametrów rozkładów prawdopodobieństwa danych hydrologicznych pochodzących ze stacji pomiarowych na rzece Ceyhan w południowej Turcji [Dogan i in. 2010]. Holicky i Sykora po wielkiej powodzi w Czechach do oszacowania ryzyka zagrożenia powodziowego dla dziedzictwa kulturowego w badaniach zastosowali rozkłady logarytmiczno-normalny oraz Pearsona III [Holicky, Sykora 2010]. Nachabe i Paynter prowadzili badania z wykorzystaniem uogólnionych rozkładów wartości ekstremalnych na danych hydrologicznych dotyczących wybranych jezior na południowym zachodzie Florydy [Nachabe, Paynter 2011]. Chaibandit i Konyai analizowali dane hydrologiczne w ujęciu miesięcznym pochodzące z 6 stacji na rzece Yom. Do badania zastosowali rozkłady wartości eks-

tremalnych, rozkład normalny i logarymiczno-normalny oraz metodę powrotnego okresu [Chaibandit, Konyai 2012]. Arns i inni szacowali w swoich badaniach ryzyko wystąpienia zagrożenia powodziowego przez estymację prawdopodobieństwa osiągnięcia w rzekach pewnego poziomu wody [Arns i in. 2013]. Charon wraz z innymi naukowcami w swojej pracy porównali bardzo dużą liczbę rozkładów prawdopodobieństwa zastosowanych do modelowania prędkości wiatru. Dane pochodziły z 9 stacji meteorologicznych w Zjednoczonych Emiratach Arabskich [Charon 2015].

Przedstawiony powyżej przegląd zastosowań teorii wartości ekstremalnych to jedynie wyselekcjonowane pozycje, które dotyczą zjawisk powodziowych. Dodatkowo należy wspomnieć o bardzo dużej liczbie publikacji traktujących o zastosowaniu teorii wartości ekstremalnych do modelowania wielu innych zjawisk meteorologicznych oraz zjawisk z dziedziny ekonomii, inżynierii i wielu innych. Ze względu na ograniczone ramy tej publikacji na tym etapie zakończy się rozdział poświęcony przeglądowi literatury zastosowań.

3. Statystyczna analiza danych hydrologicznych

W artykule w celu oceny wystąpienia ryzyka powodziowego na rozpatrywanym terenie badaniu poddany zostanie parametr hydrometryczny w postaci dobowego poziomu wody mierzonego o określonej godzinie w ciągu doby w badanej rzece w jednostce [*cm*]. Formalna definicja tego parametru zostanie przytoczona w dalszej części rozdziału. Na podstawie zebranych danych dotyczących dobowych stanów wody w określonym punkcie badanej rzeki podjęta zostanie próba oszacowania ryzyka powodziowego z wykorzystaniem estymowanych rozkładów prawdopodobieństwa półrocznych maksimów dobowych stanów wody.

Zgodnie z dyrektywą 2007/60/EC (Parlament i Rada Europejska 2007) powodzie zostały podzielone na trzy rodzaje według prawdopodobieństwa wystąpienia. Powódzie o niskim prawdopodobieństwie wystąpienia to takie, dla których okres powrotnego wystąpienia na danym obszarze wyraźnie przekracza 100 lat ($>>100$ lat). Powódzie o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia to takie, dla których okres powrotnego wystąpienia na danym obszarze jest mniejszy lub równy okresowi 100 lat. I trzeci rodzaj powodzi w tym podziale to powódzie o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia, dla których okres powrotnego wystąpienia na danym obszarze jest krótszy niż 100 lat [Cauncil 2007].

3.1. Metody wykorzystywane do przewidywania zjawisk powodziowych

Metoda określania prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi na danym obszarze polega na statystycznym dopasowaniu teoretycznych rozkładów do dostępnych danych dotyczących parametrów hydrometrycznych. Najczęściej badanymi parametrami hydrometrycznymi są: maksymalne dobowe natężenie przepływu oraz maksy-

malny dobowy stan wody w badanym punkcie rzeki (parametr poddany badaniu w niniejszym opracowaniu). Do tej pory badacze do opisu zjawisk powodziowych sugerowali wiele różnych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa, ale żaden z nich nie był stosowany powszechnie jako wyraźnie dominujący. Duża liczba czynników, jakie mają wpływ na kształtowanie się rozkładów maksimów wymienionych parametrów hydrometrycznych, powoduje, że prowadząc badania dla wybranych obszarów rzecznych, należy za każdym razem zastosować kilka rozkładów w celu dopasowania tego, który najlepiej oddaje empiryczny rozkład badanego parametru na danym obszarze. Jako kryterium wyboru najlepiej dopasowanego rozkładu spośród badanych rozkładów teoretycznych stosowane są powszechnie znane nieparametryczne testy zgodności dla rozkładów, a do estymacji parametrów dla tych rozkładów stosuje się metody estymacji: metodę momentów oraz metodę największej wiarygodności [Magiera 2002, s. 162-167, 239].

3.2. Charakterystyka danych hydrologicznych

W artykule badaniu poddany został jeden z parametrów hydrometrycznych, jakim jest stan wody w badanej rzece mierzony w cm. Stan wody jest to wzniesienie zwierciadła wody w cieku ponad umowny poziom odniesienia (co nie jest równoznaczne z głębokością cieku). Należy rozróżnić pojęcia „stan wody” i „poziom wody”. Są to te same wielkości fizyczne, jednak podawane względem różnych odniesień. Poziomy terenu liczymy od przyjętego poziomu morza, dlatego wysokość, na której znajdują się obiekty na ziemi, wyrażamy w metrach nad poziomem morza. W Polsce sieć wodowskazowa odniesiona jest obecnie do poziomu morza w Kronsztadzie w Rosji. Dla uproszczenia zapisu wzniesienie zwierciadła wody liczymy od ustalonego „zera” wodowskazu. Taki pomiar nazywamy stanem wody w odróżnieniu od poziomów liczonych względem przyjętego zera niwelacji [Byczkowski 1996, s. 126].

Na podstawie wieloletnich pomiarów można określić charakterystyczny rozkład stanów wody dla danej rzeki w danym miejscu. Wyznacza się wówczas następujące strefy stanów wody: strefa niskich stanów, strefa stanów średnich, strefa stanów wysokich, stan ostrzegawczy i stan alarmowy. W kontekście oceny ryzyka zagrożenia powodziowego pod szczególną uwagę będą brane stany ostrzegawczy i alarmowy. Dla rzeki Nysa Kłodzka w miejscu badanym w tej pracy stan ostrzegawczy wynosi 110 cm, alarmowy zaś 180 cm.

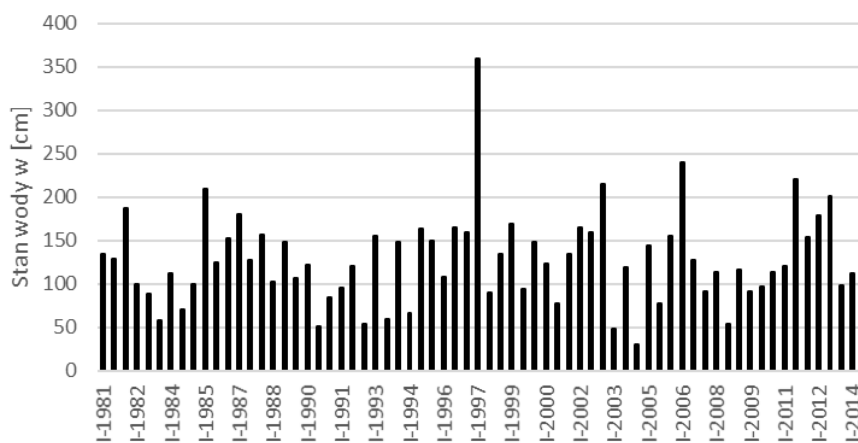
Do badania wykorzystane zostały dobowe pomiary stanu wody na rzece Nysa Kłodzka w stacji hydrologicznej w Bystrzycy Kłodzkiej pochodzące z okresu od 01.01.1981 r. do 31.12.2014 r. Z tych danych do właściwego badania zostaną wyselekcjonowane maksima półroczne stanów wody w badanej rzece.

Do wyselekcjonowania z badanego zbioru danych maksimów półrocznych zostanie zastosowana metoda maksimów rocznych (określenie „roczne” w nazwie tej metody jest symboliczne i oznacza pewien określony przez badacza przedział czasowy zawierający określoną liczbę obserwacji w zależności od częstości, z jaką obserwacje są dokonywane), inaczej określana jako metoda blokowa lub Gumbela.

Zgodnie z tą metodą, chcąc wyselekcjonować maksima z określonego zbioru danych, oznacza się, że y_i są maksimami tzn.

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

W kontekście danych wykorzystanych do badania w tej pracy x_{ij} , $j = 1, \dots, m$ jest j – tym dobowym stanem wody (mierzonym o godzinie 8:00 każdej doby) w i – tym półroczu poddanym badaniu. Wykres maksimów półrocznych stanów wody z badanego okresu przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Półroczne maksima dobowych stanów wód na rzece Nysa Kłodzka

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 1 wyraźnie widać dominującą wartość maksymalnego stanu dobowego dla drugiego półrocza roku 1997 roku, kiedy to miała miejsce jedna z największych powodzi na Dolnym Śląsku, w której badana rzeka brała czynny udział. Zgodnie z wzorem (1) będzie to obserwacja $y_{34} = 360$ [cm], czyli maksymalna wartość dobowego stanu wody dla drugiego półrocza roku 1997. Na początek obliczeń w tabeli 1 przedstawione są podstawowe parametry próby dla badanych wartości maksymalnych wyestymowane za pomocą metody momentów. Ze względu na występo-

Tabela 1. Parametry z próby półrocznych maksimów stanów wody (wielkość prób $n = 67$ lub 68)

Parametry próby	Bez obserwacji y_{34}	Z obserwacją y_{34}
Średnia	125 [cm]	128,46 [cm]
Odchylenie standardowe	45,04 [cm]	53 [cm]
Współczynnik zmienności	0,36	0,413
Współczynnik skośności	0,23	1,28

Źródło: opracowanie własne.

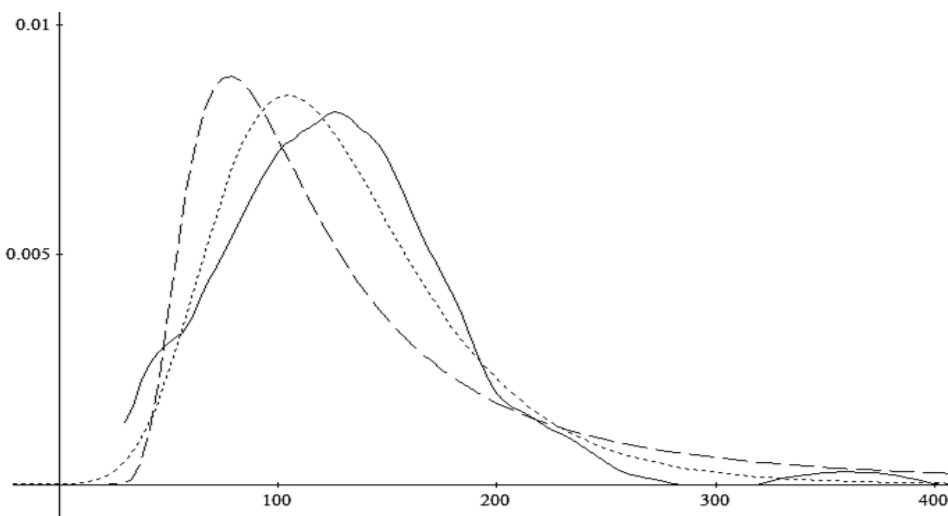
wanie w próbie wyraźnej obserwacji odstającej (y_{34}) dla porównania parametry zostały wyestymowane dwukrotnie: raz dla całej próby oraz dla próby z pominięciem obserwacji y_{34} .

Jak widać w tab. 1, wyłączenie obserwacji z drugiego półrocza w roku 1997 nieznacznie wpłynęło na obniżenie średniego maksimum półrocznego stanu wody w badanej rzece. Większy wpływ obserwacji y_{34} widoczny jest w wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności, a największy wpływ usunięcie tej obserwacji miało na współczynnik skośności rozkładu empirycznego.

3.3. Modele probabilistyczne

W analizie dotyczącej rozkładów maksimów danych hydrologicznych sugeruje się stosowanie rozkładu Gumbela [Yue i in. 1999]. Raport [IACWD (U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data – Hydrology Subcommittee) 1983] rekomenduje rozkład III Persona z logarytmiczno-normalną transformacją dla danych długookresowych do przewidywania zjawisk powodziowych. Innym możliwym teoretycznym rozkładem, który może zostać użyty do modelowania półrocznych maksimów dobowych stanów wód rzecznych, jest II typ rozkładu wartości ekstremalnych nazywany rozkładem Frecheta [Thomas, Reiss 2007, s. 15].

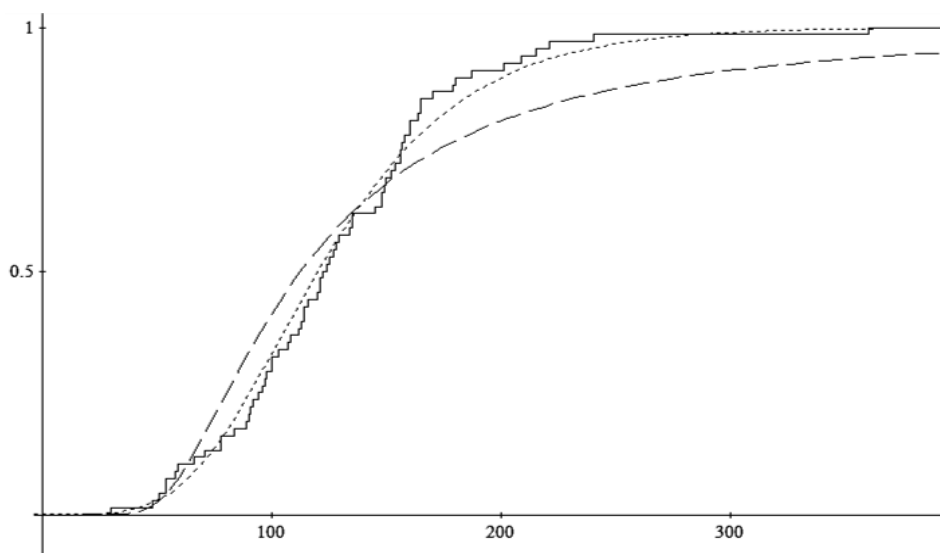
Na rysunku 2 przedstawiona jest empiryczna funkcja gęstości półrocznych maksymalnych dobowych stanów wody na rzece Nysa Kłodzka przy użyciu narzędzia w postaci jądra gęstości [Kuźmiński 2013]. Wykres został wykonany z wykorzysta-



Rys. 2. Empiryczna funkcja gęstości półrocznych maksimów stanów wody – linia ciągła, rozkład Gumbela – linia kropkowana i rozkład Frecheta – linia przerywana

Źródło: opracowanie własne.

niem wszystkich wyselekcjonowanych maksimów, łącznie z historycznie wysokim – z II półrocza roku 1997. Na wykresie zostały również dopasowane 2 funkcje gęstości rozkładów: Gumbela i Frecheta. Na podstawie wzrokowej analizy przedstawionych wykresów wyraźnie można zauważyć, że funkcja gęstości rozkładu Gumbela jest najlepiej dopasowana do empirycznej funkcji gęstości badanych danych. Na drugim miejscu znajduje się funkcja gęstości rozkładu Frecheta. Te same wnioski można wyciągnąć, obserwując wykresy teoretycznych dystrybuant rozkładu Gumbela i Frecheta wraz z empiryczną dystrybuantą rozkładu półrocznych maksimów dobowych stanów wód na rys. 3.



Rys. 3. Empiryczna dystrybuanta półrocznych maksimów stanów wody – linia ciągła, dystrybuanta rozkładu Gumbela – linia kropkowana i rozkładu Frecheta – linia przerywana

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki otrzymane po analizie wzrokowej zostały potwierdzone również po zastosowaniu testów Kołmogorova-Smirnova i chi-kwadrat na dobroć dopasowania rozpatrywanych rozkładów teoretycznych do badanego rozkładu empirycznego.

Parametry rozpatrywanych teoretycznych rozkładów, których wykresy przedstawione są na rys. 2 i 3, wyestymowane zostały powszechnie znaną metodą największej wiarygodności. Dla porównania wyników w tab. 2 przedstawione zostały wyniki estymacji otrzymane klasyczną metodą momentów oraz metodą największej wiarygodności dla obu rozpatrywanych rozkładów. Obliczenia dodatkowo zostały przeprowadzone dla wszystkich wyselekcjonowanych maksimów oraz dla danych niezawierających historycznego maksymalnego stanu wody zaobserwowanego w drugim półroczu roku 1997. Dla rozkładu Frecheta dodatkowo estymowany był parametr γ , który wynika ze wzoru (3). Dla próby maksimów zawierających obserwację

Tabela 2. Estymowane parametry półrocznych maksimumów stanów wody [w cm]

Rozkład	Gumbela				Frecheta			
	z maksimum II 1997		bez maksimum II 1997		z maksimum II 1997		bez maksimum II 1997	
Wybór	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Estymator – metoda momentów	128,46	53	125	45,04	128,46	53	125	45,04
Estymator – metoda największej wiarygodności	104,6	43	94,35	45,88	94,35	45,88	93,38	44,8

Źródło: opracowanie własne.

II półrocza 1997 r. wyniósł on 0,486, natomiast dla próby z pominięciem obserwacji tego okresu osiągnął wartość 0,479.

Wyniki pokazują, że estymatory otrzymane metodą momentów są wyraźnie większe aniżeli estymatory uzyskane metodą największej wiarygodności dla obu rozpatrywanych rozkładów. Dodatkowo wartości estymatorów otrzymane metodą momentów bardziej reagują na włączenie do danych obserwacji maksymalnego dobowego stanu wody z II półrocza 1997 r. aniżeli estymatory otrzymane metodą największej wiarygodności. Można pokusić się o stwierdzenie, że estymatory klasycznej metody momentów są estymatorami bardziej wrażliwymi na występowanie w próbie obserwacji odstających.

4. Ocena ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego na rzece Nysa Kłodzka w miejscowości Bystrzyca Kłodzka

Po przeprowadzeniu procedury dopasowania teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa do empirycznego rozkładu poddanych badaniu półrocznych maksymalnych dobowych stanów wody na rzece Nysa Kłodzka w stacji hydrologicznej w Bystrzycy Kłodzkiej okazało się, że najlepszym rozkładem, na podstawie którego można dokonać oszacowania wystąpienia zagrożenia powodziowego w badanym miejscu, jest rozkład Gumbela, a na drugim miejscu rozkład Frecheta. Do obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia wykorzystane zostaną funkcje dystrybuant, które opisane są odpowiednio wzorami:

$$G_{0,\mu,\sigma}(x) = \exp\left(-e^{-(x-\mu)/\sigma}\right), \quad (2)$$

$$G_{1,\gamma,\mu,\sigma}(x) = \exp\left[-\left(1 + \gamma\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1/\gamma}\right], \quad 1 + \gamma x > 0, \quad \gamma \neq 0, \quad (3)$$

gdzie: γ jest parametrem rozkładu Frecheta, a μ i σ są odpowiednio parametrami położenia i skali dla obu rozkładów [Thomas, Reiss 2007, s. 16-17]. W tabeli 3

przedstawione są parametry dla obu rozkładów wyestymowane metodą największej wiarygodności z wszystkich wyselekcjonowanych maksimów półrocznych stanów wód.

Tabela 3. Parametry rozkładów Gumbela i Frecheta wykorzystane do oceny zagrożenia powodziowego

Rozkład	Parametry		
	μ	σ	γ
Gumbela	104,6	43	nie dotyczy
Frecheta	94,35	45,88	0,486

Źródło: opracowanie własne.

W celu oceny zagrożenia powodziowego na badanym obszarze pod uwagę zostanie wzięty maksymalny stan wody z półrocza, w którym na Dolnym Śląsku miała miejsce największa powódź, czyli drugiego półrocza 1997 roku. Maksymalny stan wody dla tego okresu wyniósł $y_{34} = 360$ [cm]. Dodatkowo wykorzystane zostaną stany ostrzegawczy i alarmowy, które wynoszą dla Nysy Kłodzkiej w Bystrzycy Kłodzkiej odpowiednio: $u_o = 110$ [cm] i $u_A = 180$ [cm]. Wykorzystując dystrybuanty obu rozkładów, policzono prawdopodobieństwa przekroczenia stanu wody z drugiego półrocza 1997 r. oraz stanu ostrzegawczego i alarmowego. Wyniki obliczeń zostały zamieszczone w tab. 4.

Tabela 4. Prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia powodziowego na rzece Nysa Kłodzka na obszarze Bystrzycy Kłodzkiej

Rozkład	$P(Y > y_{34})$	$P(Y > u_o)$	$P(Y > u_A)$
Gumbela	0,00263	0,586	0,159
Frecheta	0,06163	0,51775	0,23264

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki z tabeli 4 pokazują stosunkowo wysokie prawdopodobieństwa przekroczenia stanu ostrzegawczego w okresie półrocza. Dla rozkładu Gumbela wynosi ono 0,586, a dla rozkładu Frecheta 0,518. Prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji, w której stan wody w ciągu pół roku przekroczy stan alarmowy, obliczone z dystrybuanty rozkładu Gumbela wynosi 0,159 i jest niższe aniżeli prawdopodobieństwo zajścia tego samego zdarzenia otrzymane z dystrybuanty rozkładu Frecheta, które wynosi 0,232. Dodatkowo zostały policzone prawdopodobieństwa przekroczenia stanu wody, jaki został osiągnięty podczas powodzi w roku 1997. Prawdopodobieństwo, że stan wody przekroczy poziom 360 [cm], obliczone dla rozkładu Gumbela, wynosi 0,0026, a z rozkładu Frecheta jest wyższe i wynosi 0,06163.

Na podstawie tych wyników można wyciągnąć wnioski, że badany obszar Bystrzycy Kłodzkiej nad rzeką Nysa Kłodzka należy do obszarów o podwyższonym ryzyku wystąpienia zagrożenia powodziowego.

5. Zakończenie

Badania przedstawione w tej pracy oparte są na dostępnych danych hydrologicznych dla rozpatrywanego regionu. Nie ujmują one aspektów, które mogą wpływać na przepływ wody w rzece, do których należą między innymi: szeroko pojęte zarządzanie terenem rzeczny, na które składa się obsługa i renowacja obszarów zalewowych, efekty wylesienia i zmiany w klimacie. Dokładna analiza, która uwzględni wymienione aspekty, jest obok analizy probabilistycznej bardzo pożądana. Przedstawiona w artykule analiza probabilistyczna zagrożenia powodziowego jest dodatkowym narzędziem służącym do oceny wpływu wymienionych aspektów na obniżenie ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego.

W pracy zaproponowane zostało narzędzie do szacowania wystąpienia ryzyka powodziowego w postaci teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych wartości przepływów rzecznych. Prezentowane rozkłady stanowią probabilistyczną ochronę przeciwpowodziową i są narzędziem uzupełniającym, które ma usprawnić obecnie funkcjonujący system przeciwpowodziowych działań profilaktycznych na terenie Dolnego Śląska.

Wyniki w tabeli 4 pokazują, że badany obszar Bystrzycy Kłodzkiej nad rzeką Nysa Kłodzka jest obszarem o bardzo wysokim ryzyku wystąpienia zagrożenia powodziowego. Obszar ten powinien być objęty szczególną opieką władz lokalnych i służb odpowiedzialnych za ochronę przeciwpowodziową w kontekście działań i inwestycji mających doprowadzić do obniżenia ryzyka wystąpienia zagrożenia powodziowego.

Literatura

- Ahmad M., Sinclair C., Spurr B., 1988, *Assessment of flood frequency models using empirical distribution function statistics*, Water Resources Res., 24, s. 1323-1328.
- Arns A., Wahl T., Haigh I., Jensen J., Pattiaratchi C., 2013, *Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practice*, Coastal Engineering, 81, s. 51-66.
- Beran M., Hoskin J., Arnell N., 1986, *Comment on two – component extreme value distribution for flood frequency analysis by Fabio Rossi, Mauro Fiorentino, Pasquale Versace*, Water Resources Res., 22, s. 263-266.
- Bordi I., Fraedrich K., Petitta M., Sutera A., 2007, *Extreme value analysis of wet and dry periods in Sicily*, Theor. Appl. Climatol., 87, s. 61-67.
- Bortkiewicz L., 1922, *Variationsbreite und mittlerer Fehler*, Sitzungsber Berli. Meth. Ges., 21, s. 3-11.
- Byczkowski A., 1996, *Hydrologia*, tom I, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Cauncil T.E., 2007, *Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks*, Journal of the European Union Official, Brussels.
- Chaibandit K., Konyai S., 2012, *Using statistics in hydrology for analyzing the discharge of Yom river*, APCBEE Procedia, vol. 1, s. 356-362.
- Charon C., 2015, *Probability distributions of wind speed in the UAE*, Energy Conversion and Management, 93, s. 414-434.

- Chen Y., Shortle J., Gelder P., Sha Z., 2002, *Study of parameter estimation methods for Pearson – III distribution in flood frequency analysis*, Int. Association of Hydrological Sciences, s. 263-269.
- Dogan A., Haktanir T., Seckin S., Yurtal R., 2010, *Comparison of propability weighted moments and maximum likelihood methods used in frequency analysis for ceyhan river basin*, Arabian Journal for Science & Engineering, vol. 35, Issue 1B, April, s. 49-69.
- Engeland K., Frigessi A., Hisdal H., 2005, *Practical extreme value modelling of hydrological floods and droughts: a case study*, Extremes, vol. 7, Issues 1, s. 5-30.
- Fuller W., 1914, *Floods flows*, Trans. Amer. Soc. Civil Engineers, 77, s. 564-583.
- Greis N., Wood E., 1981, *Regional flood frequency estimation and network design*, Water Resources Res., s. 1167-1177.
- Gumbel E., 1941, *The return period of flood flaws*, Ann. Math. Statist., 12, s. 163-190.
- Gumbel E., 1944, *On the plotting of flood discharges*, Trans. Amer. Geophys. Union, 25, s. 699-719.
- Gumbel E., 1945, *Floods estimated by probability methods*, Engrg. News-Record, 134, s. 97-101.
- Gumbel E., 1949, *The statistical forecast of floods*, Water Resources Board Bulletin, no. 15, s. 1-21.
- Gumbel E., 1954, *Statistical theory of extreme values and some practical applications*, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, vol. 33.
- Hipel K., 1994, *Extreme Values: Floods and Droughts, Proceedings of International, Conference on Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Enviromental Engineering*, vol. 1, Kluwer, Dordrecht.
- Holicky M., Sykora M., 2010, *Assessment of flooding risk to cultural heritage in historic sites*, Journal of Perfomance of Constructed Facilities, s. 432-438.
- Jain D., Singh V., 1987, *Estimating parameters of EV1 distribution for flood frequency analysis*, Water Resources Res., 23, s. 59-71.
- Katz R., Parlange M., Neveau P., 2002, *Statistics of extremes in hydrology*, Advances in Water Resources, s. 8-12.
- Kundzewicz Z., 2005, *Summer floods in central Europe. Climate change track?*, Natural Hazards, s. 165-189.
- Kuźmiński Ł., 2013, *The applications of the kernel densities to the modeling the generalized Pareto distributions*, Ekonometria 3(41), s. 55-64.
- Magiera R., 2002, *Modele i metody statystyki matematycznej*, Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław.
- Nachabe M., Paynter S., 2011, *Use of generalized extreme value covariates to improve estimation of trends and return frequencies for lake levels*, Journal of Hydroinformatics, 13.1, s. 13-24.
- Pericchi L., Rodriguez-Iturbe I., 1985, *On statistical analysis of floods*. W A. F. Atkinson, Celebration Statistics, s. 511-541.
- Rossi F., Fiorentino M., Versace P., 1986, *Two – component extreme value distribution for flood frequency analysis*, Water Resources Res, 22, s. 1551-1564.
- Shen H., Bryson M., Ochoa I., 1980, *Effect of tail behavior assumptions on flood*, Water Resources Re., 16, s. 361-364.
- Smith R., 1987, *Estimating the upper tail of flood frequency distributions*, Water Resources Res, 23, s. 1657-1666.
- Stovel H., 1998, *Risk Preparedness: A Management Manual for World Cultural Heritage*, [in:] *International Centre for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property*, Roma.
- Thomas M., Reiss R., 2007, *Statistical Analysis of Extreme Value with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields*, Birkhauser, Berlin.
- Todorovic P., 1979, *A probabilistic approach to analysis and prediction of floods*, Proc. 43rd ISI.
- Yue S., Bobe B., Legendre P. i Bruneau P., 1999, *The Gumbel mixed model for flood frequency analysis*, J. Hydrol., s. 88-100.