ŚRODOWISKO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-Ś/2009
ZESZYT 1
ROK 106
ISSUE 1
YEAR 106

BERNARD TWARÓG*

WIELOKRYTERIALNA OCENA ALGORYTMÓW WSPOMAGANIA DECYZJI W WARUNKACH POWODZI Z UWZGLĘDNIENIEM RYZYKA

MULTICRITERION METHODS FOR EVALUATION OF DECISION SUPPORT ALGORITHMS IN FLOOD CONDITIONS WITH RISK CONSIDERATION

Streszczenie

W niniejszym artykule do oceny algorytmów sterowania zbiornikami w warunkach powodzi zastosowano wielokryterialne metody. Przeanalizowano użycie funkcji *copula* do analizy wielowymiarowej zmiennej losowej opisującej falę powodziową oraz zastosowano metodę Monte Carlo do generowania parametrów fal powodziowych. W analizie wykorzystano pojęcie ryzka.

Słowa kluczowe: *funkcje copula, rozkłady wielowymiarowej zmiennej losowej, parametry fali powodziowej, metoda Monte Carlo, wielokryterialne metody, algorytmy wspomagania decyzji, ryzyko*

Abstract

In the paper multicriterion methods were applied for evaluation of decision support algorithms in flood conditions. It was analysed the application of the *copula's* functions for description of a multivariate distribution of a flood wave and Monte Carlo method was applied to generate parameters of flood waves. The analysis was performed with risk consideration.

Keywords: *copula functions, distributions of multidimensional random variables, flood wave's parameters, Monte Carlo methods, multicriterion methods, decision support algorithms, risk*

* Dr inż. Bernard Twaróg, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Niniejszy artykuł jest efektem prac realizowanych w ramach grantu KBN 3T09D05029[1]. Jednym z głównych celów projektu było zastosowanie optymalizacji stochastycznej w połączeniu z optymalizacją wielokryterialną do poszukiwania i oceny reguł sterowania zbiornikami retencyjnymi pracującymi w warunkach powodzi.

W praktyce istnieje wiele reguł sterowania zbiornikami możliwych do stosowania w warunkach powodzi. Różne reguły sterowania zbiornikiem przynoszą rozmaite efekty w zakresie ochrony przeciwpowodziowej. Jeśli za miarę takiej efektywności przyjąć tylko wielkość średniorocznych strat powodziowych, to za najlepszą regułę uzna się taką, która zagwarantuje najmniejsze straty. Jeśli jednak do oceny reguł przyjąć, obok kryterium minimalizacji strat, inne kryteria, to wówczas rozwiązanie tak postawionego zadania optymalizacji wielokryterialnej nie jest już oczywiste i jednoznaczne. Zastosowanie współczesnych technik komputerowych w poszukiwaniu najlepszych zasad postępowania w warunkach powodzi na zbiornikach retencyjnych daje możliwość uwzględnienia szerokiego spektrum informacji mających wpływ na ich formułowanie. W zrealizowanym projekcie przetestowana została metodyka identyfikacji i rankingu reguł sterowania w warunkach powodzi z uwzględnieniem ryzyka. Jednym z istotnych elementów, jakie pojawią się w proponowanej metodyce, jest wykorzystanie optymalizacji stochastycznej z zastosowaniem optymalizacji wielokryterialnej. Podstawowym argumentem prowadzącym do użycia metod wielokryterialnych było rozszerzenie informacji o wielkości zagrożenia powodziowego poniżej sterowanego zbiornika.

2. Metody sterowania zbiornikami

Główne założenia sterowania zbiornikami można określić zgodnie z poniżej przedstawionymi zasadami postępowania przy określaniu odpływu ze zbiornika.

2.1. Sterowanie zgodnie z instrukcją

Jest to obowiązujący na każdym ze zbiorników algorytm obliczania odpływu określony w Instrukcji Gospodarowania Wodą na Zbiorniku. Dokument ten jest zatwierdzony przez władzę administracyjną i kierownik obiektu zobowiązany jest do stosowania się do zapisów zawartych w tym dokumencie. Reguły sterowania zbiornikiem są elementem tego dokumentu.

2.2. Odprowadzanie odpływu maksymalnego

Ma na celu przyśpieszenie przejścia fali powodziowej przez zbiornik przez odprowadzenie maksymalnych odpływów, jakie przy danym napełnieniu są możliwe.

2.3. Odprowadzenie odpływu minimalnego

Ma na celu opóźnienie przejścia fali powodziowej przez zbiornik.

[1]Autor niniejszego artykułu był kierownikiem grantu 3T09D05029 realizowanego w latach 2006–2007.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2.4. Sterowanie kompensacyjne na dopływ boczny

Odpływ ze zbiornika określa się w wyniku analizy zmierzającej do wyboru rozwiązania minimalizującego łączne straty powodziowe w zlewni bezpośrednio poniżej dopływu.

2.5. Sterowanie na określony hydrogram poniżej – równanie odwrotne

Ideą jest określenie hydrogramu zrzutu ze zbiornika retencyjnego na podstawie pożądanego hydrogramu odpływu w przekroju doliny cieku położonym poniżej zbiornika.

2.6. Sterowanie sztywne

Jedną z metod gospodarki wodnej na zbiorniku jest tzw. metoda gospodarki sztywnej. Sposób ten nie uwzględnia prognozy kształtowania się dopływów do zbiornika. Przy stosowaniu metody sztywnej decyzję dotyczącą sterowania podejmuje się w zależności od zaistniałej sytuacji.

2.7. Standardowa reguła

Najprostszą metodą tego sterowania jest metoda standardowa. Polega ona na utrzymaniu, w miarę możliwości, stałego odpływu ze zbiornika.

2.8. Sterowanie liniowe

Reguła standardowa może być zmodyfikowana przez uzależnienie wielkości odpływu od zapasu wody w zbiorniku.

$$U(t) = f(Q(t), V_{\text{akt}}(t), Q_{\text{wyr}}, \alpha) \tag{1}$$

gdzie:

$U(t)$ – zadysponowany odpływ [m^3/s],
$Q(t)$ – dopływ do zbiornika [m^3/s],
$V_{\text{akt}}(t)$ – zapas wody w zbiorniku [m^3],
Q_{wyr} – odpływ charakterystyczny [m^3/s],
$\boldsymbol{a_1}$ – parametry.

2.9. Sterowanie skokowe

Wraz ze wzrostem ilości wody możliwej do zadysponowania w zbiorniku skokowo zwiększa się odpływ zaregulowany.

$$U(t) = f(Q(t), V_{\text{akt}}(t), Q_{1\text{wyr}}, Q_{2\text{wyr}}, Q_{3\text{wyr}}, \ldots) \tag{2}$$

gdzie:

$U(t)$ – zadysponowany odpływ [m^3/s],
$Q(t)$ – dopływ do zbiornika [m^3/s],
$V_{\text{akt}}(t)$ – zapas wody w zbiorniku [m^3],
$Q_{1\text{wyr}}$, $Q_{2\text{wyr}}$, $Q_{3\text{wyr}}$ – odpływy charakterystyczne [m^3/s].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2.10. Wykresy dyspozytorskie

Wykresy dyspozytorskie przedstawiają w sposób graficzny ogólne zasady napełniania i opróżniania zbiornika w każdym momencie w ciągu roku. Ich celem jest pokierowanie pracą zbiornika w taki sposób, by w zbiorniku był określony zapas wody oraz by odpływ poniżej zbiornika nie był mniejszy od przyjętej wartości minimalnej.

$$U(t) = f(Q(t), V_{\text{akt}}(t)) \tag{3}$$

gdzie:

U – zadysponowany odpływ [m^3/s],
Q – dopływ do zbiornika [m^3/s],
V_{akt} – zapas wody w zbiorniku [m^3].

2.11. Sterowanie półsztywne

Półsztywna reguła sterowania zakłada, że wartości odpływu U są określone jako funkcje dopływu $U = f(Q)$ bądź stanu retencji V na początku rozpatrywanego okresu $U = f(V)$ albo też obu tych elementów jednocześnie $U = f(Q,V)$. Zarówno U, jak i V są zatem zmiennymi losowymi. Należy tak określić wspomniane funkcje, aby uzyskać pożądany przebieg w czasie zarówno odpływów ze zbiornika, jak i stanów retencji.

Jednym z przykładów półsztywnej reguły sterowania jest zasada formułowania odpływu proporcjonalnego do nadwyżki dopływu w stosunku do założonego przepływu wyrównanego (np. nieszkodliwego) poniżej zbiornika. W wypadku dopływu przekraczającego przepływ Q_{wyr} poniżej zbiornika odpływ kształtuje się wg zależności

$$U = Q_{\text{wyr}} + K \cdot (Q - Q_{\text{wyr}}) \tag{4}$$

przy założeniu jednak, że do czasu osiągnięcia Q_{wyr} odpływ jest równy dopływowi, w wyniku czego w początkowej fazie wezbrania nie zmienia się stan retencji zbiornika. Po przejściu fali, czyli w wypadku dopływu mniejszego od Q_{wyr} następuje opróżnianie rezerwy powodziowej odpływem równym Q_{wyr}.

2.12. Sterowanie elastyczne

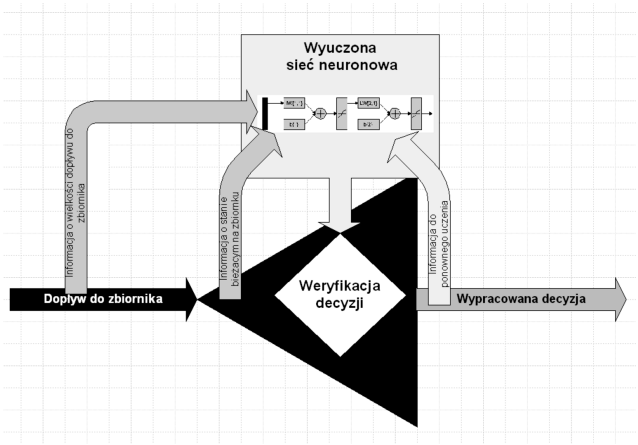
Bardziej efektywną metodą gospodarki wodą w zbiorniku retencyjnym jest sterowanie elastyczne. Opiera się ono na podejmowaniu decyzji na podstawie pełnej bieżącej informacji w zakresie zarówno potrzeb użytkowników wody, jak i stanu zbiornika oraz warunków hydrologicznych z wykorzystaniem prognozy zmian tych czynników. Jednak by można było zastosować tę metodę, potrzebne są sieć obserwacyjna zjawisk hydrologicznych oraz ośrodek dyspozycyjny gromadzący i opracowujący informacje hydrologiczne.

2.13. Reguły budowane z zastosowaniem sztucznej inteligencji

Działania SSN (Sztuczna Sieć Neuronowa), wspomagającej dyspozytora na wielozadaniowym zbiorniku retencyjnym, przeprowadzone przez autora pokazują sens i możliwości stosowania tego typu rozwiązań. Wspomagająca rola SSN polega na wypracowywaniu podpowiedzi dla dyspozytora, które na etapie podejmowania decyzji są weryfikowane równaniem stanu oraz przyjętymi ograniczeniami. Tylko takie podejście jest

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

rozsądne i dopuszczalne z punktu widzenia poprawności pracy oraz bezpieczeństwa obiektu. Podstawowa rola SSN polega na wypracowywaniu propozycji, które uwzględniają losowość dopływów (niepewność prognozy, błąd prognozy) oraz kompensacji braków (niedoskonałości) obowiązującej reguły sterowania. Stosowanie SSN w procesach decyzyjnych na zbiorniku retencyjnym to jeden z wyników doświadczeń i efektów prac autora w ramach większych projektów związanych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w gospodarce wodnej, ekonomii i finansach oraz ochronie środowiska.



Rys. 1. SSN w roli wspomagania decyzji podejmowanej przez dyspozytora na zbiorniku retencyjnym
Fig. 1. ANN (Artificial Neural Networks) as decision maker on storage reservoir

2.14. Sterowanie z zastosowaniem regulatorów rozmytych

U podstaw rozmytego sterowania deskryptywnego leży fakt, że nie jest ono oparte na znajomości ścisłego analitycznego opisu sterowanego procesu. Deskryptywne sterowanie rozmyte stanowi zatem pewien system ekspercki, w którym zakłada się, że:

– nie dysponujemy modelem sterowanego procesu lub ze względu na jego złożoność, skomplikowaną formę, nieliniowość itp. nie chcemy lub nie możemy go zastosować w procesie sterowania,
– dysponujemy instrukcjami dyspozytorskimi, wiedzą , doświadczeniem, intuicją instruktorów, dzięki którym mamy informacje, jak sterować procesem bez znajomości jego modelu,
– wyżej wymienione wiedzę, intuicję, doświadczenia operatorzy systemu (decydenci) mogą przekazać jedynie w postaci naturalnej (werbalnej), a nie w postaci dokładnej (np. numerycznej).

Jeżeli celem sterowania nie jest ścisła optymalizacja jawnej funkcji celu w świetle ograniczeń i z uwzględnieniem dynamiki procesu, wówczas rozmyte sterowanie deskryptywne w zupełności i z powodzeniem spełnia swoją rolę. Rozmyte deskryptywne układy sterowania zbudowane są m.in. z regulatorów rozmytych (*fuzzy logic controller*), które są alternatywną propozycją do klasycznych regulatorów sterujących procesami technologicznymi. Zasada ich działania oparta jest na naśladowaniu umiejętności ludzkich radzenia sobie w prosty sposób z bardzo złożonymi problemami.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W sterowaniu preskryptywnym, dla odmiany, zakłada się rozmytość w odniesieniu jedynie do pewnych elementów układu sterowania, natomiast wykorzystuje się nierozmyte algorytmy optymalizacyjne oraz jawną funkcję celu.

2.15. Sterowanie optymalne zbiornikiem retencyjnym

Ze względu na wieloaspektowość problemu sterowania zbiornikiem retencyjnym pojęcie sterowania optymalnego jest trudno definiowalne. Decyzje podejmowane na zbiorniku (na zbiornikach) wpływają na stan całego systemu wodno-gospodarczego, w związku z tym stosowane kryteria powinny uwzględnić możliwie szeroką wieloaspektowość podejmowanych decyzji, miary o charakterze ekonomicznym, ekologicznym oraz społecznym. W najszerszym rozumieniu zadanie optymalnego sterowania jest:
- wielokryterialne,
- losowe,
- dynamiczne,
- wielowymiarowe oraz
- nieliniowe.

Powszechna jest opinia, że możliwości rozwiązywania złożonych problemów związanych z projektowaniem oraz eksploatacją systemów wodno-gospodarczych (w tym zbiorników retencyjnych) na drodze analitycznej są ograniczone. W związku z powyższym nawet dla prostej struktury nie można całkowicie rozwiązać problemu znanymi metodami.

Szczegółowe analizy różnych przypadków pracy systemu jednozbiornikowego oraz systemów wielozbiornikowych zostały przedstawione w pracy [3], a dotyczą głównie normalnych warunków eksploatacji, jednak ze względu na ogólność przedstawienia postaci rozwiązań istnieje możliwość ich aplikacji dla zastosowań w sterowaniu dla warunków szczególnych (powódź oraz susza). Istotną zaletą prezentowanych w pracy [3] modeli optymalizacyjnych jest to, że reguły otrzymane w wyniku rozwiązania analizowanych przypadków systemów wielozbiornikowych o złożonej strukturze połączeń mają postać analityczną. Jest to bardzo istotny czynnik wpływający na czas obliczeń propozycji sterowań, jednak podstawowe założenie o deterministycznej prognozie ogranicza (a czasami wręcz uniemożliwia) możliwość zastosowania prezentowanych analitycznych rozwiązań. W wypadku przesunięcia akcentu analiz na metody prognostyczne w obszar modeli probabilistycznych oraz deterministycznych zaprezentowane rozwiązania mogą stać się bardzo użyteczne.

3. Zastosowana metodyka

Problem optymalizacji reguły sterowania dla warunków nadzwyczajnych był już wielokrotnie poruszany i rozwiązywany zarówno dla deterministycznie sformułowanego problemu, jak również z uwzględnieniem elementów probabilistycznych. Wydawałoby się, że w zasadzie problem został rozwiązany i aplikacja wypracowanych zasad określania reguł sterowania dla warunków powodzi powinna być stosowana z powodzeniem z uwzględnieniem lokalnych zasad pracy i znajomości opisu matematycznego obiektu. Możliwość wykorzystania współczesnych technik analizy informacji przestrzennej (GIS) daje nowe sposoby oceny reguł sterowania przez stworzenie dodatkowych kryteriów i ich wzbogacenie istotną informacją o wielkości i lokalizacji zagrożeń poniżej obiektów piętrzących.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W związku z wykorzystaniem wielokryterialnych metod do oceny algorytmów sterowania zastosowano ideę metodyki bazującej na pojęciu ryzyka definiowanego w kategoriach agregowania wyników pogorszenia zasad sterowania w stosunku do zasad obowiązujących.

3.1. Charakterystyka przyjętej metodyki

Budując probabilistyczną przestrzeń Ω, gdzie elementami przestrzeni są reguły sterowania

$$L_k(s_k), k = 1, \ldots, p \tag{5}$$

wartość ryzyka rozumianego jako porażka skuteczności reguły sterowania można określić jako

$$R = 1 - P\left(\left|L_k(s_k) - X^*\right| \le d_{\mathrm{kr}}\right) \tag{6}$$

Wybór decyzji lub zbioru decyzji odbywa się wg zasady minimalizacji ryzyka, czyli minimalizacji prawdopodobieństwa porażki. Algorytm wyboru decyzji można zdefiniować w następujący sposób

$$D \equiv \{S^*\} \Leftrightarrow \min R = \min\left\{1 - P\left(\left|L_k(s_k) - X^*\right| \le d_{\mathrm{kr}}\right)\right\} \tag{7}$$

gdzie:

$j = 1, \ldots, m$ – liczba kryteriów,

$X^*[x_1^*, \ldots, x_j^*, \ldots, x_m^*]$ – punkt idealny (współrzędne punktu idealnego),

$P\left(\left|L_k(s_k) - X^*\right| \le d_{\mathrm{kr}}\right)$ – prawdopodobieństwo, że efekty k-tej reguły sterowania będą w odległości nie większej niż d_{kr},

$R = 1 - P\left(\left|L_k(s_k) - X^*\right| \le d_{\mathrm{kr}}\right)$ – wartość ryzyka rozumianego jako porażka skuteczności reguły sterowania.

Kluczowym elementem w prezentowanej metodyce jest pojęcie współrzędnych wektora bezpieczeństwa. Kalibracja wartości progowej bezpieczeństwa d_{kr} może być realizowana na podstawie obowiązującej reguły sterowania dla wybranego obiektu. W wypadku nowego, projektowanego obiektu (nowej reguły sterowania) wartości progowe mogą być określane subiektywnie z zastosowaniem metod eksperckich.

W wyniku powyżej opisanej analizy uzyskamy podzbiór strategii – reguł w sensie kryterium (7), które w stopniu co najmniej takim samym jak obecnie obowiązująca wspomagają decydenta przy ochronie przed powodzią.

Mając na względzie bezpieczeństwo przeciwpowodziowych zbiorników retencyjnych oraz zabudowanych dolin, proponuje się przyjąć następujące podstawowe kryteria (wskazano kierunek poszukiwań dla wybranych kryteriów):

- wartość uzyskanego odpływu ze zbiornika (minimalizacja),
- wartość możliwych strat powodziowych (minimalizacja),
- wartość rezerwy przeciwpowodziowej (maksymalizacja),
- wartość wyprodukowanej energii elektrycznej (maksymalizacja),

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

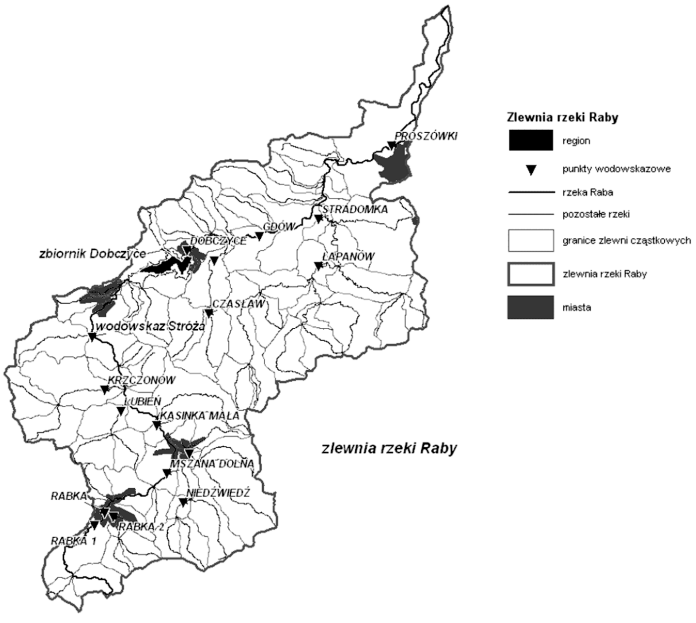
– wartość stanu końcowego napełnienia zbiornika przy analizowanym zbiorze fal powodziowych (maksymalizacja),
– wartości statystyk zmiennych losowych charakteryzujących odpływ: wartości kulminacji, wartości objętości fali powodziowej, wartości strat powodziowych (minimalizacja),
– prawdopodobieństwa przekroczenia subiektywnie założonych wartości krytycznych zarówno na poziomie wartości kulminacji, jak i wartości strat powodziowych (minimalizacja).

Przykład zastosowania proponowanej metodyki został zrealizowany dla wybranego obiektu zbiornika wielozadaniowego z funkcją ochrony przeciwpowodziowej.

4. Opis przykładu

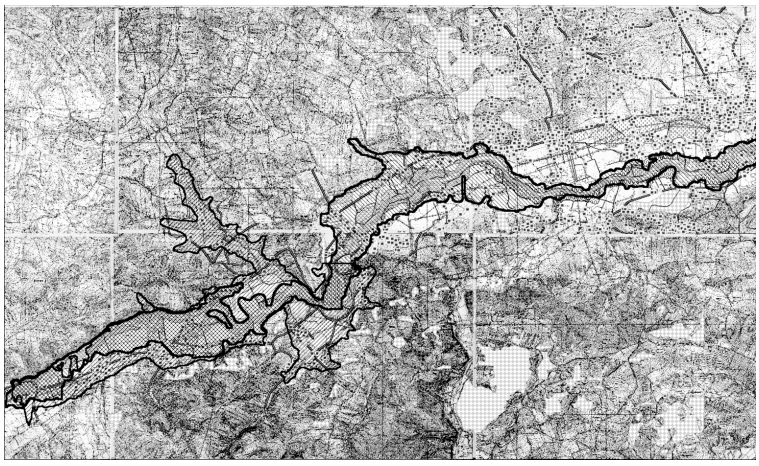
Do analizy przyjęto obszar ok. 250 km^2, fragment doliny rzeki Raby od zbiornika Dobczyce wraz ze zbiornikiem do miasta Gdów. Jest to odcinek doliny o długości ok. 24 km. Danymi wejściowymi do analizowanego problemu były:

– krzywa strat powodziowych charakteryzująca cechy zagospodarowania analizowanego odcinka doliny,
– hydrogram ekstremalnych fal powodziowych określonych dla przekroju Stróża,
– parametry zbiornika Dobczyce,
– parametry obowiązującej reguły sterowania dla warunków powodzi.

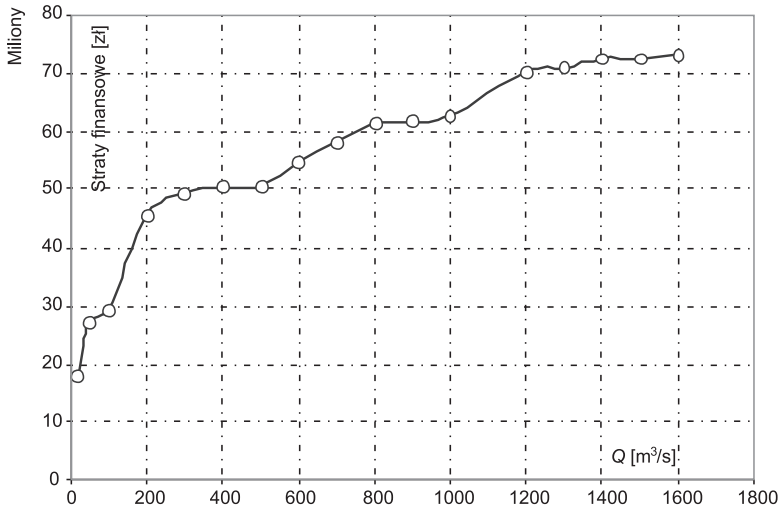


Rys. 2. Położenie zbiornika Dobczyce w zlewni rzeki Raby
Fig. 2. Localization of Dobczyce reservoir in Raba river catchment

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Fragment doliny Raby, linia cofki zbiornika oraz obszar zalewu dla wybranej fali z pokazaną zabudową w dolinie
Fig. 3. Part of valley of Raba catchment, contour of Dobczyce reservoir and inundation area of the chosen flood wave



Rys. 4. Wykres funkcji strat rzeczywistych w zależności od wartości kulminacji fal powodziowych (ceny bieżące za 2001 r.)
Fig. 4. Flood loses function in valley of Raba catchment (current prices, 2008)

4.1. Aplikacja metody Monte Carlo do budowania hydrogramów dopływów do zbiornika retencyjnego

Na podstawie analizy hydrologicznej oraz analizy statystycznej estymatorów parametrów rozkładów brzegowych wielowymiarowej zmiennej losowej przyjęto dwuwymiarowy rozkład Gumbela–Hougaarda *copula*.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$$F(x_1, x_2) = \exp\left(-\left[\sum_{k=1}^{2} \left(-\ln\left(\int_0^{x_k} \frac{1}{\zeta_k \sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln(\zeta_k)-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} d\zeta_k \right) \right)^{\theta} \right]^{\frac{1}{\theta}} \right) \tag{8}$$

gdzie:

θ – parametr optymalny dla wybranej funkcji *copula*,

(x_1, x_2) – trójwymiarowa zmienna losowa, odpowiednio (Q_k, V_f),

$\int_0^{x_k} \frac{1}{\zeta_k \sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln(\zeta_k)-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} d\zeta_k$ – brzegowa dystrybuanta *k*-tej zmiennej losowej,

σ_k, μ_k – parametry rozkładu brzegowego *k*-tej zmiennej losowej.

Parametry tego rozkładu są następujące:

Tabela 1

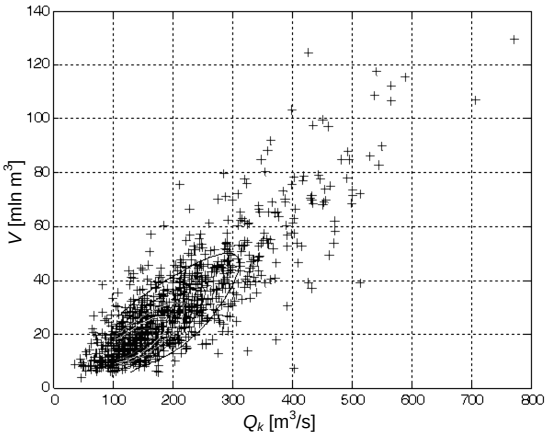
Parametr funkcji Gumbela–Hougaarda *copula*

Parametr funkcji *Copula*	θ	2,663

Tabela 2

Zestawienie parametrów rozkładów brzegowych

Parametry rozkładów brzegowych	Zmienna losowa	
	Q_k	V_f
μ	5,240	3,265
σ	0,487	0,638



Rys. 5. Realizacja MC opartej na dwuwymiarowej funkcji *copula*, zbudowanej na brzegowych rozkładach logarytmiczno-normalnych, MC – 1000 punktów

Fig. 5. MC performance based on two-dimensional *copula* function created on boundary Log-Normal distributions – 1000 points

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4.2. Tworzenie hydrografów hipotetycznych

Hydrogramy fal powodziowych zostały zbudowane na bazie funkcji potęgowej w postaci

$$y = bx^{1/a} \tag{9}$$

gdzie:

y, x – zmienne zależna i niezależna,
a, b – parametry funkcji.

Aplikacja tej postaci funkcji sprowadza się do rozwiązania zagadnienia wariacyjnego (dopasowania jej parametrów), tak by spełniła nasze oczekiwania względem generowanych parametrów, tzn. by parametry hydrogramu spełniały następujące równanie

$$V_f = \int_0^{T_f} Q(t)dt \cap \max_{t\in(0,T_f)}(Q(t)) = Q_k \cap Q(t = T_k) = Q_k \tag{10}$$

gdzie:

t – czas [h],
V_f – objętość fali powodziowej [mln m^3],
T_f – czas trwania fali powodziowej [h],
T_k – czas pojawienia się kulminacji [h],
$Q(t)$ – poszukiwany hydrogram fali [m^3/s],
Q_k – kulminacja fali powodziowej [m^3/s].

Objętość fali powodziowej możemy zapisać w wygodnej postaci do dalszych przekształceń

$$V = \frac{Q_k}{T_k^{1/a}} \int_0^{T_k} t^{1/a} dt \tag{11}$$

Całkując to równanie, można wyprowadzić nieliniową zależność, po rozwiązaniu której mamy możliwość określenia parametru a, tak by funkcja bazowa spełniła nasz, zapisany powyżej, warunek

$$\left(1+\frac{1}{a}\right)\frac{V_f T_k^{1/a}}{Q_k} - T_k^{(1+1/a)} = 0 \tag{12}$$

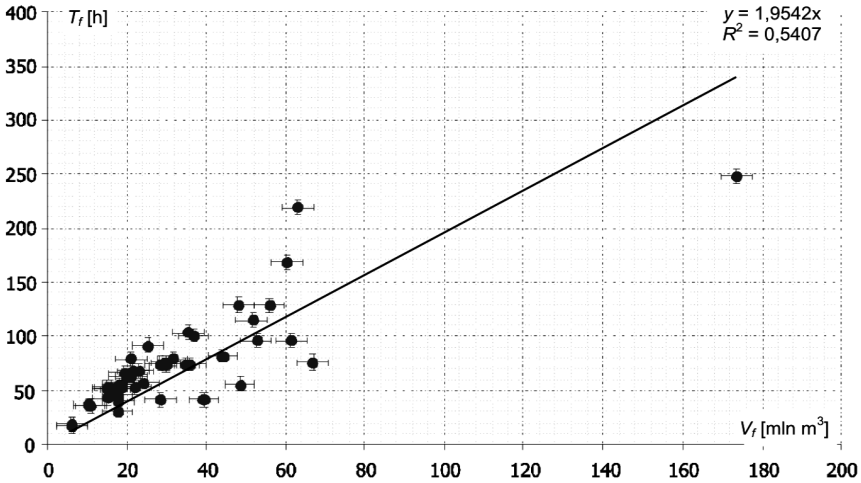
Poniżej przedstawiono pozostałe przyjęte zależności pomiędzy parametrami fal powodziowych. Zatem układ równań pozwalający opisać hydrogram fali powodziowej można zapisać w następującej postaci

$$\begin{aligned} Q(t) &= \begin{cases} \dfrac{Q_k}{T_k^{1/a}} t^{1/a}, t \in \left[0, T_k\right] \\ \dfrac{Q_k}{T_k^{1/a}} (T_f - t)^{1/a}, t \in \left[T_k, T_f\right) \end{cases} \\ T_f &= 1{,}954 V_f \\ T_k &= 0{,}5 T_f \end{aligned} \tag{13}$$

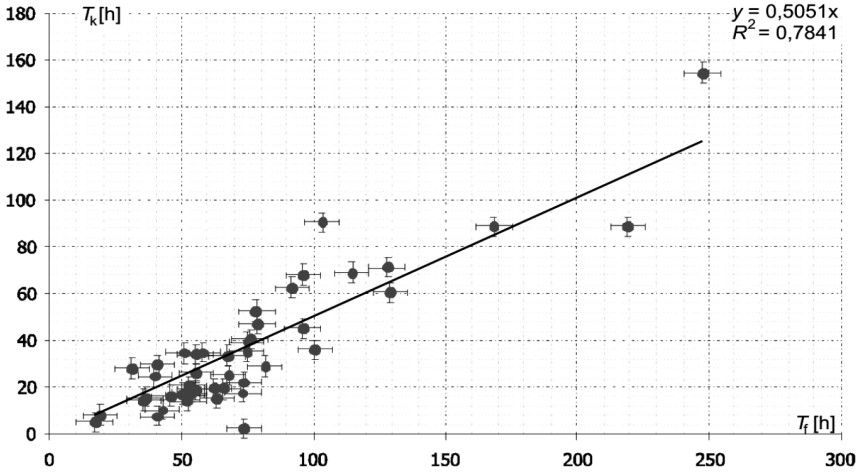
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

V_f – objętość fali powodziowej [mln m^3],
T_f – czas trwania fali powodziowej [h],
T_k – czas pojawienia się kulminacji [h],
$Q(t)$ – hydrogram fali [m^3/s],
Q_k – kulminacja fali powodziowej [m^3/s].



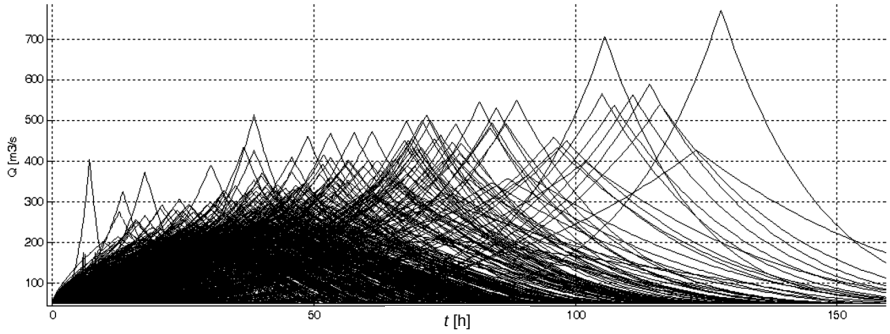
Rys. 6. Zależność korelacyjna pomiędzy objętością fali powodziowej oraz jej czasem trwania
Fig. 6. Correlation between flood wave volume and time of its duration



Rys. 7. Zależność korelacyjna pomiędzy objętością fali powodziowej oraz czasem pojawienia się kulminacji
Fig. 7. Correlation between time of flood wave duration and the time of appearance of a wave peak

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

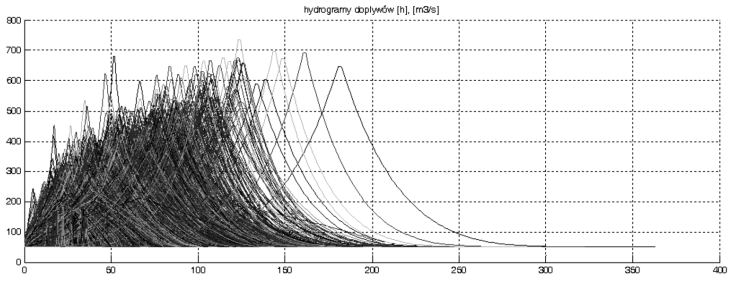
W tym wypadku dość korzystne jest (jeśli chodzi o obliczenia), że czas kulminacji jest równy połowie czasu trwania fali. Jednak należy zauważyć, że istnieje również możliwość jednoznacznego określenia kształtu hipotetycznego hydrogramu dla bardziej skomplikowanych warunków – dla innego czasu pojawienia się kulminacji.



Rys. 8. Przykład hipotetycznych hydrogramów fal powodziowych odpowiadających ww. realizacji MC – 1000 hydrogramów
Fig. 8. Hypothetical flood wave hydrographs corresponding to the above MC performance – 1000 hydrographis

5. Testowanie reguł sterowania na zbiorniku retencyjnym Dobczyce

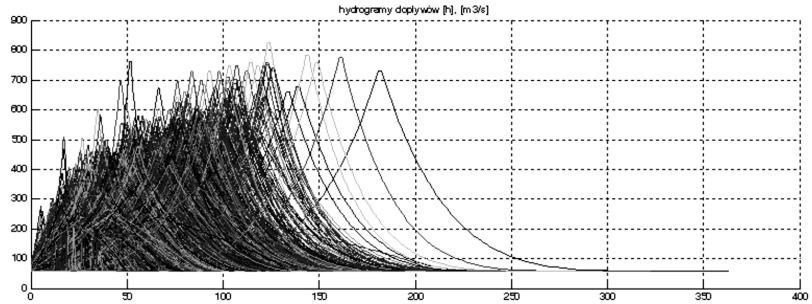
W analizie przetestowano ok. 40 reguł sterowania o zróżnicowanych parametrach, w założeniach opartych na idei sterowania sztywnego, regułach liniowych oraz regułach schodkowych. Do określenia współrzędnych wektora bezpieczeństwa przyjęto elastyczną regułę obowiązującą. Hydrogramy dopływów zostały zbudowane z wykorzystaniem zaprezentowanej metodyki MC z zastosowaniem funkcji *copula*. Do symulacji przygotowano zestaw 10 000 fal powodziowych o rozkładach brzegowych kulminacji i objętości zgodnych z rozkładami teoretycznymi. Wartości przepływów hydrogramów z przekroju wodowskazowego Stróża zostały przeniesione do przekroju Dobczyce. Wszystkie analizy wykonano na tym samym zestawie hydrogramów.



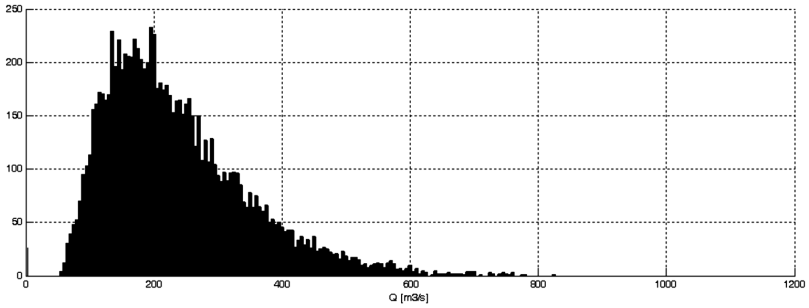
Rys. 9. Przykład hipotetycznych hydrogramów fal powodziowych – dopływów do zbiornika, MC – 10 000 hydrogramów, przekrój wodowskazowy Stróża
Fig. 9. Set of 10,000 hydrographs (achieved with the help of MC method) used for the reservoir work simulation, Stróża crossection

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

We wszystkich przypadkach symulacji przyjęto:
- pojemność maksymalną: 141,74 mln m^3,
- pojemność minimalną: 99,94 mln m^3,
- pojemność przeciwpowodziową (rezerwę): 41,8 mln m^3,
- pustą rezerwę przeciwpowodziową na początku symulacji.

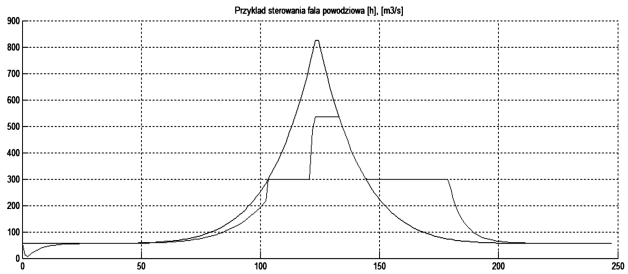


Rys. 10. Przykład hipotetycznych hydrogramów fal powodziowych – dopływów do zbiornika, MC – 10 000 hydrogramów, przekrój zapory Dobczyce
Fig. 10. Set of 10,000 hydrographs (achieved with the help of MC method) used for the reservoir work simulation, Dobczyce crossection



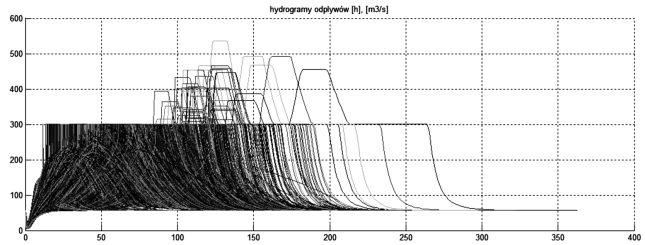
Rys. 11. Histogram maksymalnych wartości dopływów do zbiornika
Fig. 11. Histogram of maximal inflows to the reservoir

5.1. Reguła rzeczywista

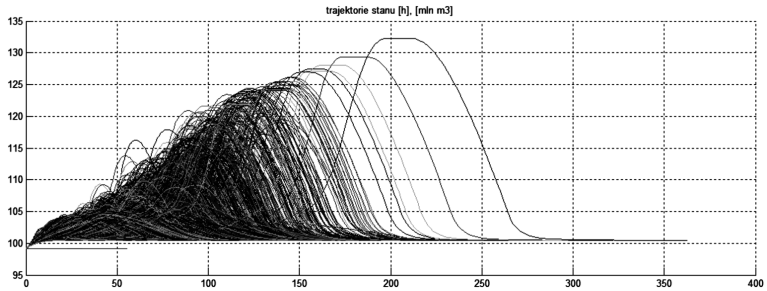


Rys. 12. Przykład sterowania wybraną falą powodziową
Fig. 12. Example of flood control on Dobczyce reservoir

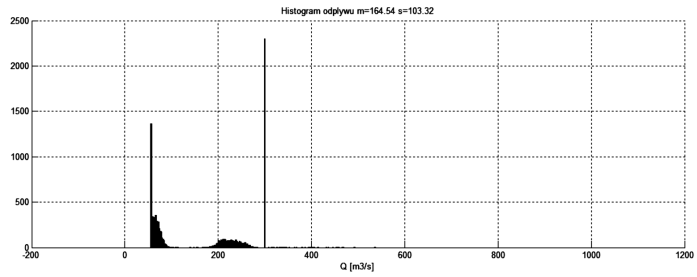
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



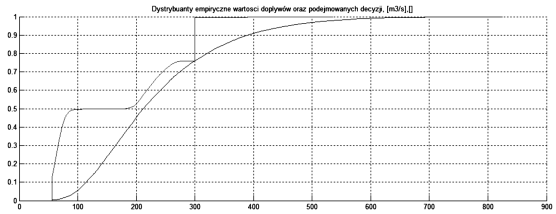
Rys. 13. Przykład dysponowanych wartości odpływów na zbiorniku
Fig. 13. Example of hydrographs of outflows from the reservoir



Rys. 14. Przykład trajektorii objętości zbiornika
Fig. 14. Example of trajectories of reservoir's capacity

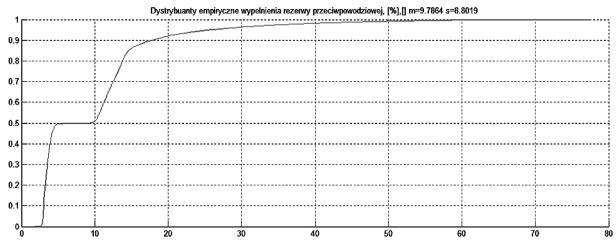


Rys. 15. Histogram maksymalnych wartości odpływów ze zbiornika
Fig. 15. Histogram of maximal outflows from the reservoir

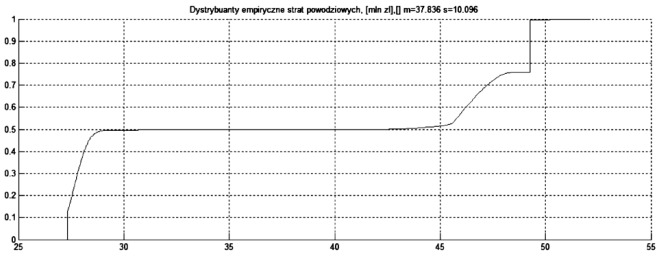


Rys. 16. Dystrybuanty empiryczne maksymalnych wartości dopływów oraz maksymalnych wartości dysponowanych odpływów (przesunięte w prawo) na zbiorniku, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 16. Empirical cumulative distribution of maximal inflows, maximal outflows (right moved) to/from the reservoir, MC – 10,000 hydrographs

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

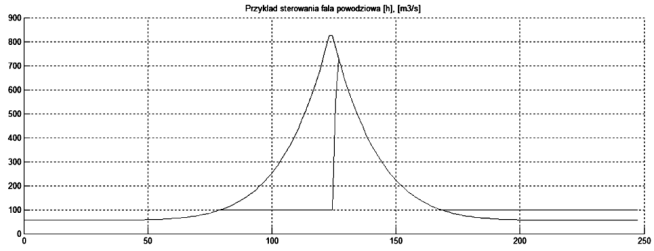


Rys. 17. Dystrybuanta empiryczna wypełnień rezerwy przeciwpowodziowej [%], MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 17. Empirical cumulative distribution of fulfill of flood capacity [%], MC – 10,000 hydrographs

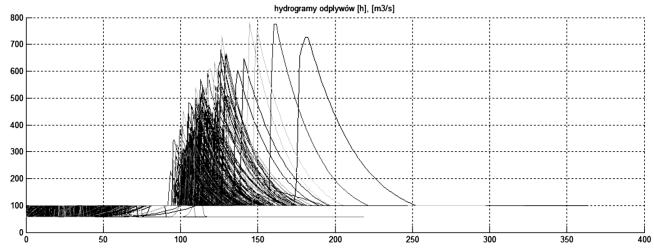


Rys. 18. Dystrybuanta empiryczna strat powodziowych, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 18. Empirical cumulative distribution of flood losen, MC – 10,000 hydrographs

5.2. Reguła sztywna, Q_{dop} = 100 m^3/s

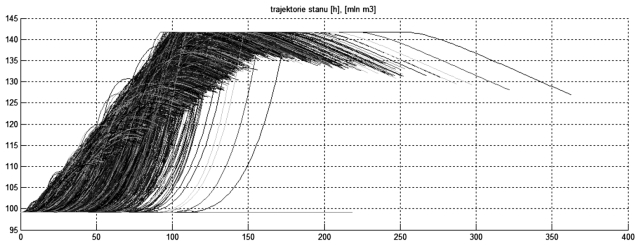


Rys. 19. Przykład sterowania wybraną falą powodziową
Fig. 19. Example of flood control on Dobczyce reservoir

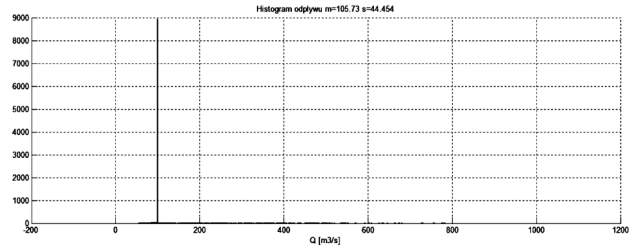


Rys. 20. Przykład dysponowanych wartości odpływów na zbiorniku
Fig. 20. Example of hydrographs of outflows from the reservoir

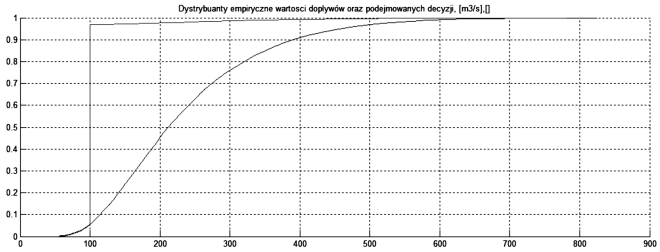
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 21. Przykład trajektorii objętości zbiornika
Fig. 21. Example of trajectories of reservoir's capacity



Rys. 22. Histogram maksymalnych wartości odpływów ze zbiornika
Fig. 22. Histogram of maximal outflows from the reservoir

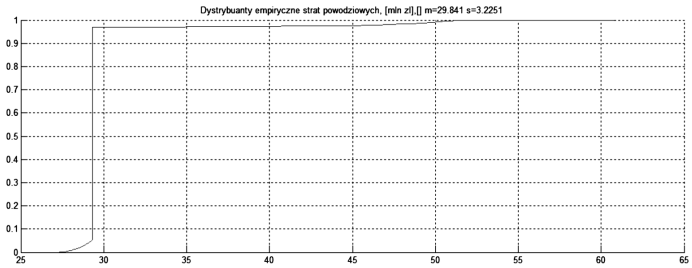


Rys. 23. Dystrybuanty empiryczne maksymalnych wartości dopływów oraz maksymalnych wartości dysponowanych odpływów (przesunięte w prawo) na zbiorniku, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 23. Empirical cumulative distribution of maximal inflows, maximal outflows (right moved) to/from the reservoir, MC – 10,000 hydrographs



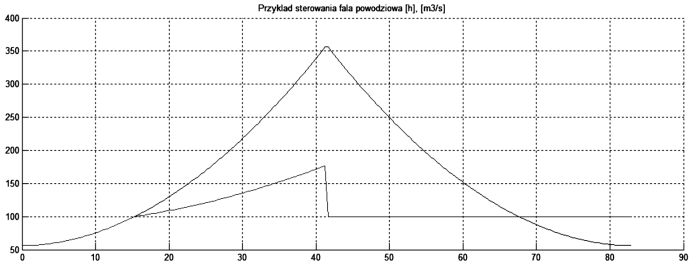
Rys. 24. Dystrybuanta empiryczna wypełnień rezerwy przeciwpowodziowej [%], MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 24. Empirical cumulative distribution of fulfill of flood capacity [%], MC – 10,000 hydrographs

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

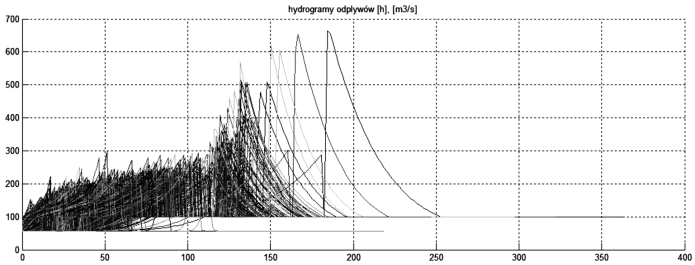


Rys. 25. Dystrybuanta empiryczna strat powodziowych, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 25. Empirical cumulative distribution of flood loses, MC – 10,000 hydrographs

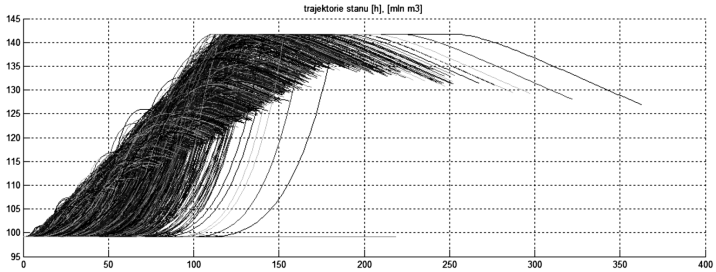
5.3. Reguła półsztywna, Q_{dop} = 100 m^3/s, α = 0,3



Rys. 26. Przykład sterowania wybraną falą powodziową
Fig. 26. Example of flood control on Dobczyce reservoir

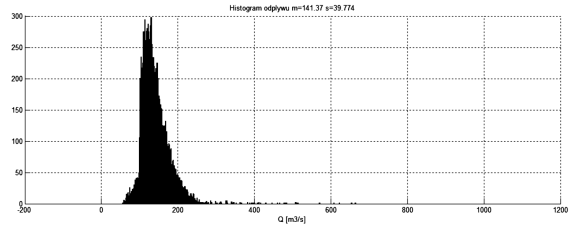


Rys. 27. Przykład dysponowanych wartości odpływów na zbiorniku
Fig. 27. Example of hydrographs of outflows from the reservoir

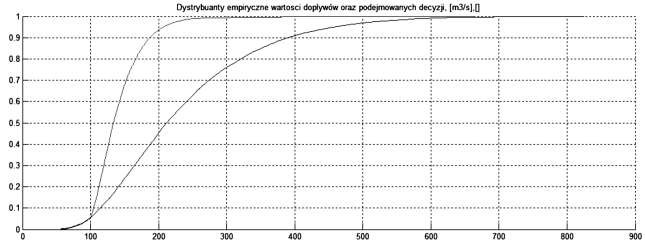


Rys. 28. Przykład trajektorii objętości zbiornika
Fig. 28. Example of trajectories of reservoir's capacity

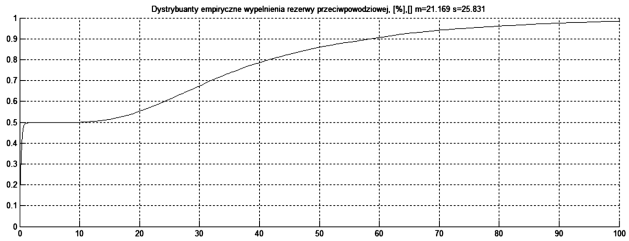
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



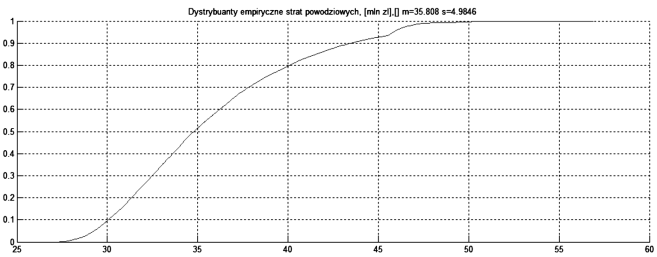
Rys. 29. Histogram maksymalnych wartości odpływów ze zbiornika
Fig. 29. Histogram of maximal outflows from the reservoir



Rys. 30. Dystrybuanty empiryczne maksymalnych wartości dopływów oraz maksymalnych wartości dysponowanych odpływów (przesunięte w prawo) na zbiorniku, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 30. Empirical cumulative distribution of maximal inflows, maximal outflows (right moved) to/from the reservoir, MC – 10,000 hydrographs



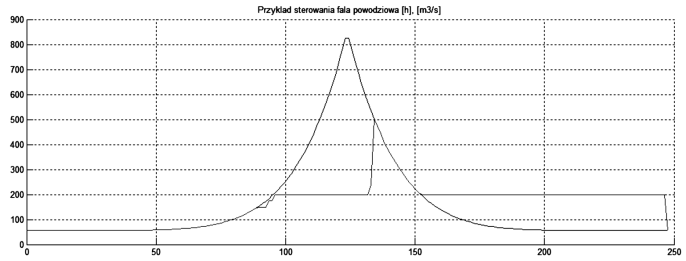
Rys. 31. Dystrybuanta empiryczna wypełnień rezerwy przeciwpowodziowej [%], MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 31. Empirical cumulative distribution of fulfill of flood capacity [%], MC – 10,000 hydrographs



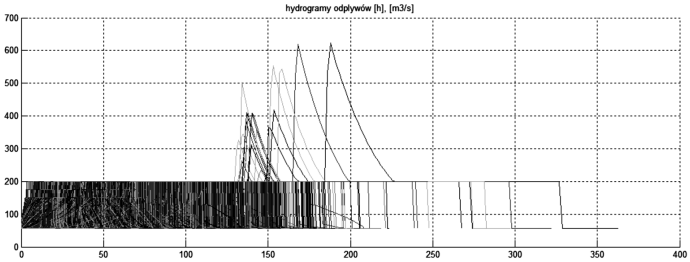
Rys. 32. Dystrybuanta empiryczna strat powodziowych, MC – 10 000 hydrogramów
Fig. 32. Empirical cumulative distribution of flood losen, MC – 10,000 hydrographs

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

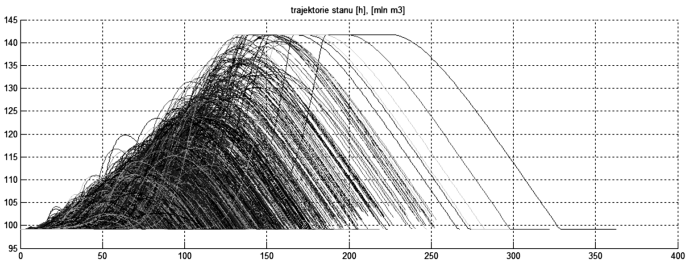
5.4. Reguła skokowa, Q_{dop1} = 150 m^3/s, Q_{dop2} = 175 m^3/s, Q_{dop3} = 200 m^3/s
(plik: fsymskokQ([150175200]).mat)



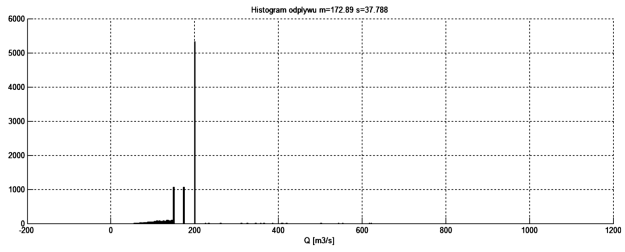
Rys. 33. Przykład sterowania wybraną falą powodziową
Rys. 33. Example of flood control on Dobczyce reservoir



Rys. 34. Przykład dysponowanych wartości odpływów na zbiorniku
Fig. 34. Example of hydrographs of outflows from the reservoir

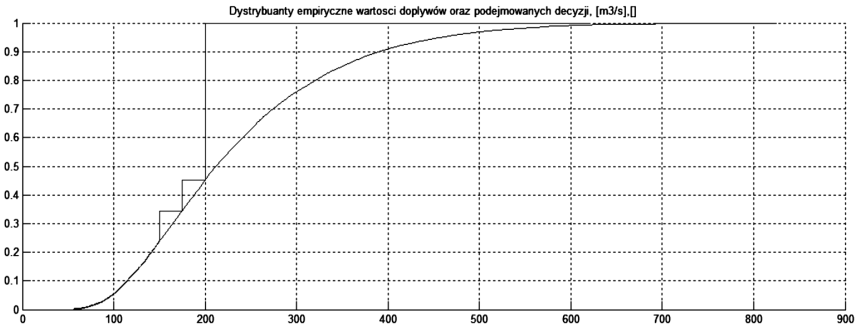


Rys. 35. Przykład trajektorii objętości zbiornika
Rys. 35. Example of trajectories of reservoir's capacity



Rys. 36. Histogram maksymalnych wartości odpływów ze zbiornika
Fig. 36. Histogram of maximal outflows from the reservoir

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



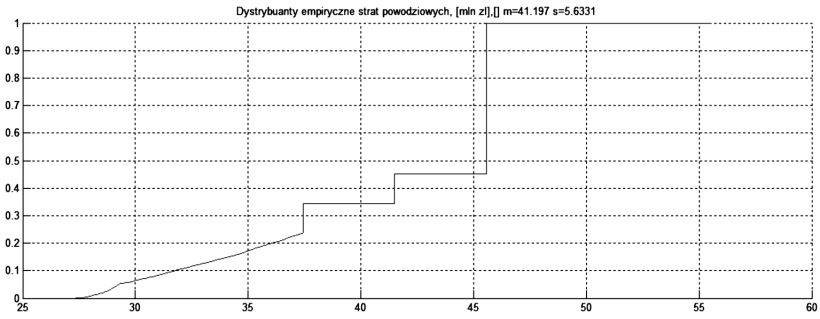
Rys. 37. Dystrybuanty empiryczne maksymalnych wartości dopływów oraz maksymalnych wartości dysponowanych odpływów (przesunięte w prawo) na zbiorniku, MC – 10 000 hydrogramów

Fig. 37. Empirical cumulative distribution of maximal inflows, maximal outflows (right moved) to/from the reservoir, MC – 10,000 hydrographs



Rys. 38. Dystrybuanta empiryczna wypełnień rezerwy przeciwpowodziowej [%], MC – 10 000 hydrogramów

Fig. 38. Empirical cumulative distribution of fulfill of flood capacity [%], MC – 10,000 hydrographs



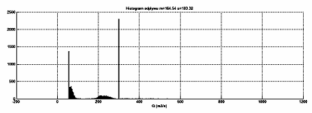
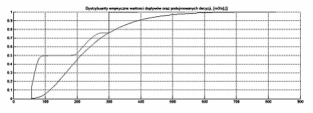
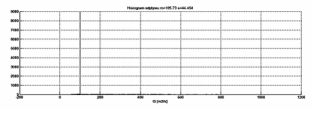
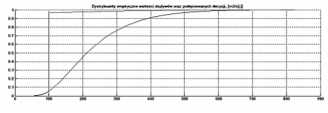
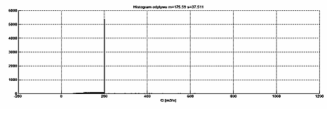
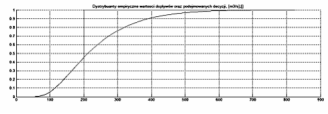
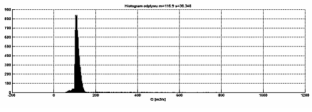
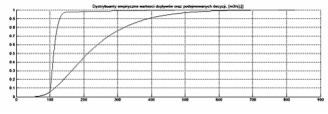
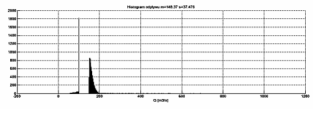
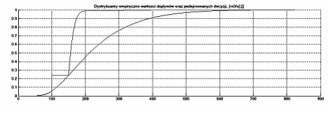
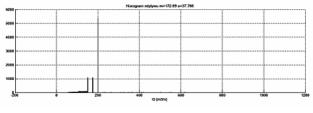
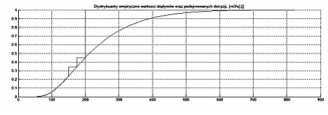
Rys. 39. Dystrybuanta empiryczna strat powodziowych, MC – 10 000 hydrogramów

Fig. 39. Empirical cumulative distribution of flood losen, MC – 10,000 hydrographs

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 3

Zestawienie wybranych wyników symulacji

Nr reguły	Plik z danymi danej reguły sterowania	Histogramy maksymalnych wartości odpływów ze zbiornika	Dystrybuanty empiryczne maksymalnych wartości dopływów oraz maksymalnych wartości dysponowanych odpływów (przesunięte w prawo) na zbiorniku
1	fsymRZECZ.mat		
2	fsym1(100).mat		
4	fsym1(200).mat		
7	fsym2([10001]). mat		
19	fsym3([10015001]). mat		
33	fsymskokQ ([150175200]).mat		

6. Analiza wielokryterialna z uwzględnieniem ryzyka w rozumieniu proponowanej metodyki

Do analizy wybrano następujące kryteria:

– kryterium wartości oczekiwanej kulminacji odpływu,
– kryterium wartości oczekiwanej wypełnienia rezerwy powodziowej,
– kryterium wartości oczekiwanej strat powodziowych.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 4

Zestawienie statystyk analizowanych kryteriów dla analizowanych reguł sterowania

Nr reguły	Plik z danymi określonej reguły sterowania	Wartość oczekiwana kulminacji odpływu	Odchylenie standardowe kulminacji odpływu	Wartość oczekiwana wypełnienia rezerwy	Odchylenie standardowe wypełnienia rezerwy	Wartość oczekiwana strat	Odchylenie standardowe strat
1	2	3	4	5	6	7	8
		$E(U_{max})$	$\sigma(U_{max})$	E(%R)	σ(% R)	E(S)	σ(S)
		[m^3/s]	[m^3/s]	[%]	[%]	[mln zł]	[mln zł]
1	fsymRZECZ.mat	164,54	103,32	9,79	8,80	37,84	10,10
2	fsym1(100).mat	105,73	44,45	24,51	29,28	29,84	3,23
3	fsym1(150).mat	144,05	28,73	14,69	20,84	36,39	2,79
4	fsym1(200).mat	175,59	37,51	7,83	14,71	41,64	5,59
5	fsym1(250).mat	198,14	54,71	3,99	10,19	42,48	6,21
6	fsym1(300).mat	213,14	70,74	2,04	6,92	43,04	6,69
7	fsym2([10001]).mat	116,90	38,35	23,42	28,19	31,78	3,05
8	fsym2([10003]).mat	141,37	39,77	21,17	25,83	35,81	4,98
9	fsym2([10005]).mat	168,10	57,36	18,81	23,22	38,95	6,25
10	fsym2([10008]).mat	209,36	90,68	15,13	18,91	41,95	6,84
11	fsym2([20001]).mat	181,57	41,81	7,45	14,03	41,86	5,75
12	fsym2([20003]).mat	193,74	54,56	6,68	12,63	42,30	6,11
13	fsym2([20005]).mat	206,05	70,17	5,90	11,19	42,67	6,42
14	fsym2([20008]).mat	224,56	95,57	4,72	8,98	43,07	6,77
15	fsym2([30001]).mat	215,52	73,85	1,94	6,57	43,06	6,71
16	fsym2([30003]).mat	220,27	81,06	1,73	5,88	43,11	6,76
17	fsym2([30005]).mat	225,02	89,34	1,53	5,19	43,16	6,81
18	fsym2([30008]).mat	232,15	103,17	1,22	4,15	43,24	6,90
19	fsym3([10015001]).mat	148,37	37,48	19,88	24,98	37,06	4,72
20	fsym3([10015003]).mat	165,99	48,72	18,53	23,32	39,34	6,33
21	fsym3([10015005]).mat	184,64	67,04	17,14	21,55	40,67	7,13
22	fsym3([10015008]).mat	212,99	97,49	14,98	18,65	41,90	7,81
23	fsym3([10020001]).mat	160,97	59,14	19,31	23,80	38,45	8,35
24	fsym3([10020003]).mat	172,72	71,43	18,61	22,75	38,88	8,77
25	fsym3([10020005]).mat	184,94	86,75	17,88	21,66	39,24	9,12
26	fsym3([10020008]).mat	203,45	111,87	16,75	19,89	39,64	9,51
27	fsym3([20025001]).mat	197,83	57,58	6,32	12,23	42,47	6,24
28	fsym3([20025003]).mat	205,53	68,01	5,92	11,27	42,70	6,46

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
29	fsym3([20025005]).mat	213,29	80,13	5,53	10,30	42,85	6,60
30	fsym3([20025008]).mat	224,95	99,92	4,93	8,82	43,03	6,78
31	fsymskokQ ([100150200]).mat	171,71	44,73	9,55	15,58	41,00	6,79
32	fsymskokQ ([100200300]).mat	224,81	93,68	7,01	9,70	42,22	9,16
33	fsymskokQ ([150175200]).mat	172,89	37,79	8,25	14,87	41,20	5,63
34	fsymskokQ ([175200250]).mat	199,05	56,84	4,80	10,47	42,34	6,26
35	fsymskokQ ([200225250]).mat	200,42	56,43	4,31	10,30	42,56	6,27
36	fsymskokQ ([200250300]).mat	225,48	79,24	2,95	7,31	43,50	7,02
37	fsymskokQ ([75100150]).mat	144,43	32,24	15,82	21,68	36,49	3,13
38	fsymskokQ ([75150200]).mat	182,36	42,44	10,72	16,43	42,90	5,82

Tabela 5

Przyjęte współrzędne wektora bezpieczeństwa

Wartość oczekiwana kulminacji odpływu	Wartość oczekiwana wypełnienia rezerwy	Wartość oczekiwana strat
$E(U_{max})$	$E(\%R)$	$E(S)$
[m^3/s]	[%]	[mln zł]
164,54	9,79	37,84

Tabela 6

Zestawienie rankingów analizowanych reguł sterowania względem poszczególnych kryteriów

	Plik z danymi określonej reguły sterowania	$E(U_{max})$	$E(\%R)$	$E(S)$	Pozycja w rankingu wg kryterium		
					$E(U_{max})$	$E(\%R)$	$E(S)$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	fsymRZECZ.mat	164,54	9,7864	37,836	8	22	7
2	fsym1(100).mat	105,73	24,507	29,841	1	38	1
3	fsym1(150).mat	144,05	14,688	36,391	4	24	4
4	fsym1(200).mat	175,59	7,8317	41,638	14	19	17
5	fsym1(250).mat	198,14	3,9851	42,48	21	7	25
6	fsym1(300).mat	213,14	2,0378	43,039	29	5	32
7	fsym2([10001]).mat	116,9	23,422	31,783	2	37	2
8	fsym2([10003]).mat	141,37	21,169	35,808	3	36	3
9	fsym2([10005]).mat	168,1	18,81	38,95	10	33	10
10	fsym2([10008]).mat	209,36	15,134	41,948	27	26	20
11	fsym2([20001]).mat	181,57	7,4484	41,862	15	18	18
12	fsym2([20003]).mat	193,74	6,6756	42,305	19	16	22

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 6

1	2	3	4	5	6	7	8
13	fsym2([20005]).mat	206,05	5,8954	42,666	26	13	27
14	fsym2([20008]).mat	224,56	4,7196	43,072	33	9	34
15	fsym2([30001]).mat	215,52	1,9359	43,064	31	4	33
16	fsym2([30003]).mat	220,27	1,7322	43,114	32	3	35
17	fsym2([30005]).mat	225,02	1,5284	43,158	36	2	36
18	fsym2([30008]).mat	232,15	1,2227	43,24	38	1	37
19	fsym3([10015001]).mat	148,37	19,876	37,061	6	35	6
20	fsym3([10015003]).mat	165,99	18,527	39,339	9	31	12
21	fsym3([10015005]).mat	184,64	17,135	40,667	17	29	14
22	fsym3([10015008]).mat	212,99	14,977	41,897	28	25	19
23	fsym3([10020001]).mat	160,97	19,309	38,447	7	34	8
24	fsym3([10020003]).mat	172,72	18,606	38,879	12	32	9
25	fsym3([10020005]).mat	184,94	17,883	39,239	18	30	11
26	fsym3([10020008]).mat	203,45	16,755	39,645	24	28	13
27	fsym3([20025001]).mat	197,83	6,3185	42,468	20	15	24
28	fsym3([20025003]).mat	205,53	5,9249	42,703	25	14	28
29	fsym3([20025005]).mat	213,29	5,5298	42,854	30	12	29
30	fsym3([20025008]).mat	224,95	4,9334	43,032	35	11	31
31	fsymskokQ([100150200]).mat	171,71	9,5471	40,995	11	21	15
32	fsymskokQ([100200300]).mat	224,81	7,0135	42,221	34	17	21
33	fsymskokQ([150175200]).mat	172,89	8,2511	41,197	13	20	16
34	fsymskokQ([175200250]).mat	199,05	4,8048	42,341	22	10	23
35	fsymskokQ([200225250]).mat	200,42	4,3129	42,565	23	8	26
36	fsymskokQ([200250300]).mat	225,48	2,9487	43,497	37	6	38
37	fsymskokQ([75100150]).mat	144,43	15,819	36,492	5	27	5
38	fsymskokQ([75150200]).mat	182,36	10,718	42,9	16	23	30

Tabela 7

Zestawienie dystrybuant pozycji w rankingu wg poszczególnych postaci kryteriów

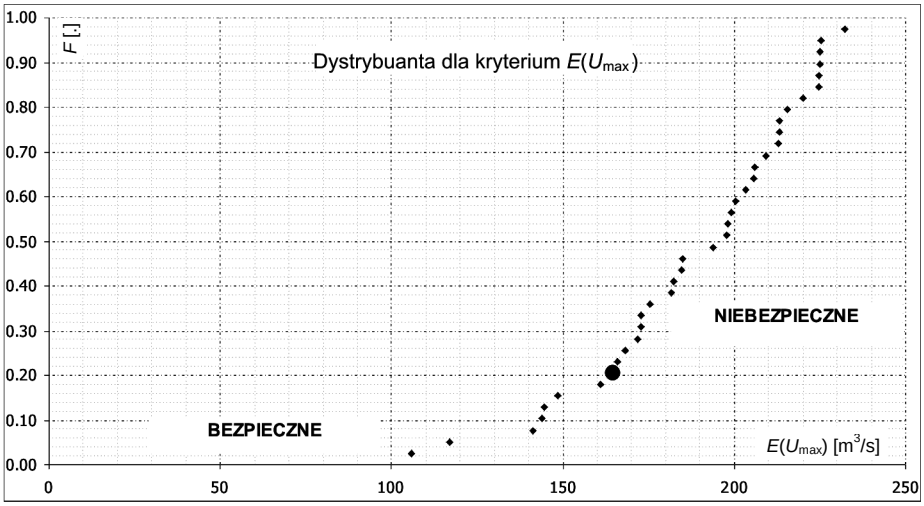
Nr reguły	Plik z danymi określonej reguły sterowania	$E(U_{max})$	Dystrybuanta $E(U_{max})$	$E(\%R)$	Dystrybuanta $E(\%R)$	$E(S)$	Dystrybuanta $E(S)$
1	2	3	4	5	6	7	8
2	fsym1(100).mat	105,73	0,0256	24,507	0,9744	29,841	0,0256
7	fsym2([10001]).mat	116,9	0,0513	23,422	0,9487	31,783	0,0513
8	fsym2([10003]).mat	141,37	0,0769	21,169	0,9231	35,808	0,0769
3	fsym1(150).mat	144,05	0,1026	14,688	0,6154	36,391	0,1026

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

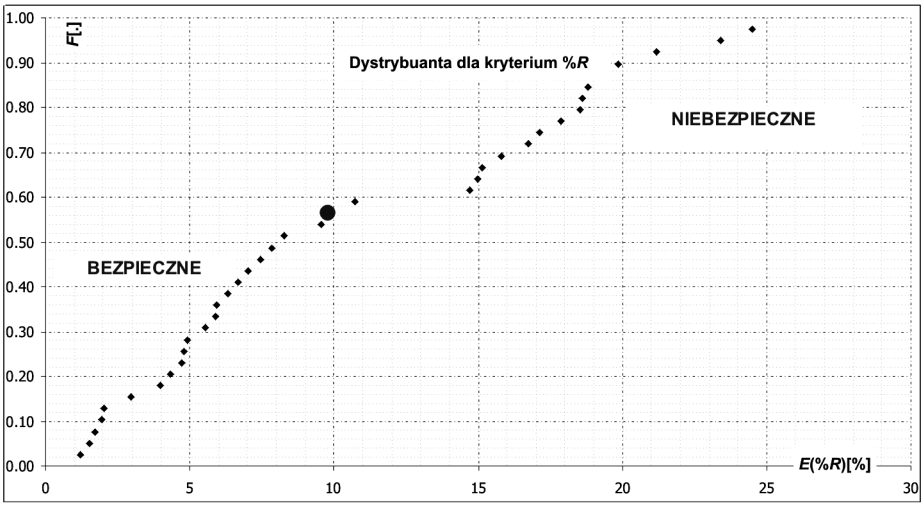
cd. tab. 7

1	2	3	4	5	6	7	8
37	fsymskokQ([75100150]).mat	144,43	0,1282	15,819	0,6923	36,492	0,1282
19	fsym3([10015001]).mat	148,37	0,1538	19,876	0,8974	37,061	0,1538
1	fsymRZECZ.mat	164,54	0,2051	9,7864	0,5641	37,836	0,1795
23	fsym3([10020001]).mat	160,97	0,1795	19,309	0,8718	38,447	0,2051
24	fsym3([10020003]).mat	172,72	0,3077	18,606	0,8205	38,879	0,2308
9	fsym2([10005]).mat	168,1	0,2564	18,81	0,8462	38,95	0,2564
25	fsym3([10020005]).mat	184,94	0,4615	17,883	0,7692	39,239	0,2821
20	fsym3([10015003]).mat	165,99	0,2308	18,527	0,7949	39,339	0,3077
26	fsym3([10020008]).mat	203,45	0,6154	16,755	0,7179	39,645	0,3333
21	fsym3([10015005]).mat	184,64	0,4359	17,135	0,7436	40,667	0,359
31	fsymskokQ([100150200]).mat	171,71	0,2821	9,5471	0,5385	40,995	0,3846
33	fsymskokQ([150175200]).mat	172,89	0,3333	8,2511	0,5128	41,197	0,4103
4	fsym1(200).mat	175,59	0,359	7,8317	0,4872	41,638	0,4359
11	fsym2([20001]).mat	181,57	0,3846	7,4484	0,4615	41,862	0,4615
22	fsym3([10015008]).mat	212,99	0,7179	14,977	0,641	41,897	0,4872
10	fsym2([10008]).mat	209,36	0,6923	15,134	0,6667	41,948	0,5128
32	fsymskokQ([100200300]).mat	224,81	0,8718	7,0135	0,4359	42,221	0,5385
12	fsym2([20003]).mat	193,74	0,4872	6,6756	0,4103	42,305	0,5641
34	fsymskokQ([175200250]).mat	199,05	0,5641	4,8048	0,2564	42,341	0,5897
27	fsym3([20025001]).mat	197,83	0,5128	6,3185	0,3846	42,468	0,6154
5	fsym1(250).mat	198,14	0,5385	3,9851	0,1795	42,48	0,641
35	fsymskokQ([200225250]).mat	200,42	0,5897	4,3129	0,2051	42,565	0,6667
13	fsym2([20005]).mat	206,05	0,6667	5,8954	0,3333	42,666	0,6923
28	fsym3([20025003]).mat	205,53	0,641	5,9249	0,359	42,703	0,7179
29	fsym3([20025005]).mat	213,29	0,7692	5,5298	0,3077	42,854	0,7436
38	fsymskokQ([75150200]).mat	182,36	0,4103	10,718	0,5897	42,9	0,7692
30	fsym3([20025008]).mat	224,95	0,8974	4,9334	0,2821	43,032	0,7949
6	fsym1(300).mat	213,14	0,7436	2,0378	0,1282	43,039	0,8205
15	fsym2([30001]).mat	215,52	0,7949	1,9359	0,1026	43,064	0,8462
14	fsym2([20008]).mat	224,56	0,8462	4,7196	0,2308	43,072	0,8718
16	fsym2([30003]).mat	220,27	0,8205	1,7322	0,0769	43,114	0,8974
17	fsym2([30005]).mat	225,02	0,9231	1,5284	0,0513	43,158	0,9231
18	fsym2([30008]).mat	232,15	0,9744	1,2227	0,0256	43,24	0,9487
36	fsymskokQ([200250300]).mat	225,48	0,9487	2,9487	0,1538	43,497	0,9744

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

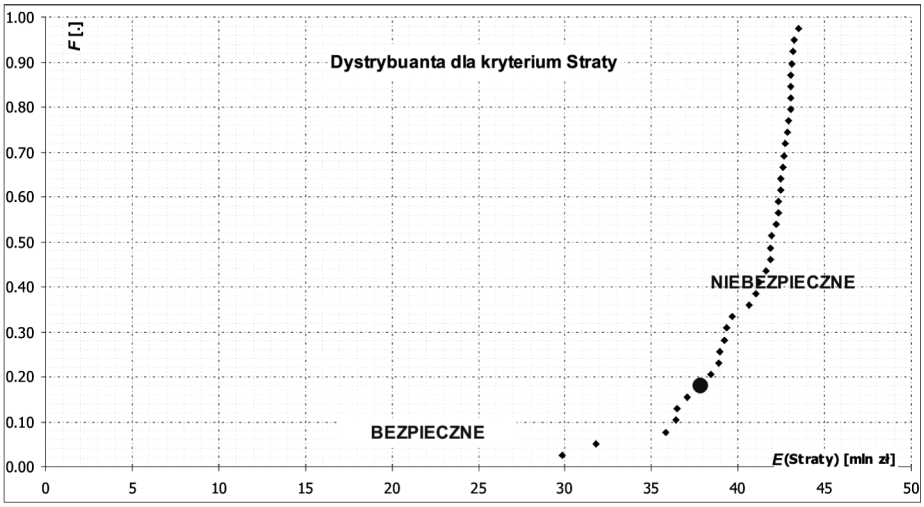


Rys. 40. Dystrybuanta pozycji w rankingu analizowanych reguł sterowania wg kryterium $E(U_{max})$
Fig. 40. Cumulative distribution of rank position of flood control analyzed, according to $E(U_{max})$ criteria



Rys. 41. Dystrybuanta pozycji w rankingu analizowanych reguł sterowania wg kryterium $E(\%R)$
Fig. 41. Cumulative distribution of rank position of flood control analyzed, according to $E(\%R)$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 42. Dystrybuanta pozycji w rankingu analizowanych reguł sterowania wg kryterium $E(S)$

Fig. 42. Cumulative distribution of rank position of flood control analyzed, according to $E(S)$ criteria

Tabela 8

Zestawienie składowych współrzędnych oceny ryzyka reguły sterowania

Nr reguły	Plik z danymi określonej reguły sterowania	$E(U_{max})$	F	$E(\%R)$	F	$E(S)$	F	Współrzędne porażki			Wartość ryzyka w rozumieniu proponowanej metodyki
								$P(X>d_{kr1})$	$P(X>d_{kr2})$	$P(X>d_{kr3})$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	fsym1(100).mat	105,73	0,0256	24,507	0,9744	29,841	0,0256	0,003	1,000	0,001	1,000
7	fsym2([10001]).mat	116,9	0,0513	23,422	0,9487	31,783	0,0513	0,145	1,000	0,167	1,024
8	fsym2([10003]).mat	141,37	0,0769	21,169	0,9231	35,808	0,0769	0,288	1,000	0,334	1,093
3	fsym1(150).mat	144,05	0,1026	14,688	0,6154	36,391	0,1026	0,430	1,000	0,500	1,198
37	fsymskokQ([75100150]).mat	144,43	0,1282	15,819	0,6923	36,492	0,1282	0,573	1,000	0,667	1,331
19	fsym3([10015001]).mat	148,37	0,1538	19,876	0,8974	37,061	0,1538	0,715	1,000	0,833	1,485
1	fsymRZECZ.mat	164,54	0,2051	9,7864	0,5641	37,836	0,1795	1,000	1,000	1,000	1,732
23	fsym3([10020001]).mat	160,97	0,1795	19,309	0,8718	38,447	0,2051	0,858	1,000	1,000	1,654
24	fsym3([10020003]).mat	172,72	0,3077	18,606	0,8205	38,879	0,2308	1,000	1,000	1,000	1,732
9	fsym2([10005]).mat	168,1	0,2564	18,81	0,8462	38,95	0,2564	1,000	1,000	1,000	1,732
25	fsym3([10020005]).mat	184,94	0,4615	17,883	0,7692	39,239	0,2821	1,000	1,000	1,000	1,732
20	fsym3([10015003]).mat	165,99	0,2308	18,527	0,7949	39,339	0,3077	1,000	1,000	1,000	1,732
26	fsym3([10020008]).mat	203,45	0,6154	16,755	0,7179	39,645	0,3333	1,000	1,000	1,000	1,732
21	fsym3([10015005]).mat	184,64	0,4359	17,135	0,7436	40,667	0,359	1,000	1,000	1,000	1,732
31	fsymskokQ([100150200]).mat	171,71	0,2821	9,5471	0,5385	40,995	0,3846	1,000	0,952	1,000	1,705

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
33	fsymskokQ([150175200]).mat	172,89	0,3333	8,2511	0,5128	41,197	0,4103	1,000	0,905	1,000	1,679
4	fsym1(200).mat	175,59	0,359	7,8317	0,4872	41,638	0,4359	1,000	0,857	1,000	1,654
11	fsym2([20001]).mat	181,57	0,3846	7,4484	0,4615	41,862	0,4615	1,000	0,810	1,000	1,630
22	fsym3([10015008]).mat	212,99	0,7179	14,977	0,641	41,897	0,4872	1,000	1,000	1,000	1,732
10	fsym2([10008]).mat	209,36	0,6923	15,134	0,6667	41,948	0,5128	1,000	1,000	1,000	1,732
32	fsymskokQ([100200300]).mat	224,81	0,8718	7,0135	0,4359	42,221	0,5385	1,000	0,762	1,000	1,607
12	fsym2([20003]).mat	193,74	0,4872	6,6756	0,4103	42,305	0,5641	1,000	0,715	1,000	1,584
34	fsymskokQ([175200250]).mat	199,05	0,5641	4,8048	0,2564	42,341	0,5897	1,000	0,429	1,000	1,478
27	fsym3([20025001]).mat	197,83	0,5128	6,3185	0,3846	42,468	0,6154	1,000	0,667	1,000	1,564
5	fsym1(250).mat	198,14	0,5385	3,9851	0,1795	42,48	0,641	1,000	0,286	1,000	1,443
35	fsymskokQ([200225250]).mat	200,42	0,5897	4,3129	0,2051	42,565	0,6667	1,000	0,334	1,000	1,453
13	fsym2([20005]).mat	206,05	0,6667	5,8954	0,3333	42,666	0,6923	1,000	0,572	1,000	1,525
28	fsym3([20025003]).mat	205,53	0,641	5,9249	0,359	42,703	0,7179	1,000	0,619	1,000	1,544
29	fsym3([20025005]).mat	213,29	0,7692	5,5298	0,3077	42,854	0,7436	1,000	0,524	1,000	1,508
38	fsymskokQ([75150200]).mat	182,36	0,4103	10,718	0,5897	42,9	0,7692	1,000	1,000	1,000	1,732
30	fsym3([20025008]).mat	224,95	0,8974	4,9334	0,2821	43,032	0,7949	1,000	0,477	1,000	1,492
6	fsym1(300).mat	213,14	0,7436	2,0378	0,1282	43,039	0,8205	1,000	0,191	1,000	1,427
15	fsym2([30001]).mat	215,52	0,7949	1,9359	0,1026	43,064	0,8462	1,000	0,144	1,000	1,421
14	fsym2([20008]).mat	224,56	0,8462	4,7196	0,2308	43,072	0,8718	1,000	0,382	1,000	1,465
16	fsym2([30003]).mat	220,27	0,8205	1,7322	0,0769	43,114	0,8974	1,000	0,096	1,000	1,417
17	fsym2([30005]).mat	225,02	0,9231	1,5284	0,0513	43,158	0,9231	1,000	0,049	1,000	1,415
18	fsym2([30008]).mat	232,15	0,9744	1,2227	0,0256	43,24	0,9487	1,000	0,001	1,000	1,414
36	fsymskokQ([200250300]).mat	225,48	0,9487	2,9487	0,1538	43,497	0,9744	1,000	0,239	1,000	1,434

Tabela 9

Ranking reguł wg ocenianego ryzyka

		$E(U_{max})$	$E(\%R)$	$E(S)$	RYZYKO
1	2	3	4	5	6
2	fsym1(100).mat	105,73	24,507	29,841	1,000
7	fsym2([10001]).mat	116,9	23,422	31,783	1,024
8	fsym2([10003]).mat	141,37	21,169	35,808	1,093
3	fsym1(150).mat	144,05	14,688	36,391	1,198
37	fsymskokQ([75100150]).mat	144,43	15,819	36,492	1,331
18	fsym2([30008]).mat	232,15	1,2227	43,24	1,414
17	fsym2([30005]).mat	225,02	1,5284	43,158	1,415

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 9

16	fsym2([30003]).mat	220,27	1,7322	43,114	1,417
15	fsym2([30001]).mat	215,52	1,9359	43,064	1,421
6	fsym1(300).mat	213,14	2,0378	43,039	1,427
36	fsymskokQ([200250300]).mat	225,48	2,9487	43,497	1,434
5	fsym1(250).mat	198,14	3,9851	42,48	1,443
35	fsymskokQ([200225250]).mat	200,42	4,3129	42,565	1,453
14	fsym2([20008]).mat	224,56	4,7196	43,072	1,465
34	fsymskokQ([175200250]).mat	199,05	4,8048	42,341	1,478
19	fsym3([10015001]).mat	148,37	19,876	37,061	1,485
30	fsym3([20025008]).mat	224,95	4,9334	43,032	1,492
29	fsym3([20025005]).mat	213,29	5,5298	42,854	1,508
13	fsym2([20005]).mat	206,05	5,8954	42,666	1,525
28	fsym3([20025003]).mat	205,53	5,9249	42,703	1,544
27	fsym3([20025001]).mat	197,83	6,3185	42,468	1,564
12	fsym2([20003]).mat	193,74	6,6756	42,305	1,584
32	fsymskokQ([100200300]).mat	224,81	7,0135	42,221	1,607
11	fsym2([20001]).mat	181,57	7,4484	41,862	1,630
4	fsym1(200).mat	175,59	7,8317	41,638	1,654
23	fsym3([10020001]).mat	160,97	19,309	38,447	1,654
33	fsymskokQ([150175200]).mat	172,89	8,2511	41,197	1,679
31	fsymskokQ([100150200]).mat	171,71	9,5471	40,995	1,705
1	fsymRZECZ.mat	164,54	9,7864	37,836	1,732
24	fsym3([10020003]).mat	172,72	18,606	38,879	1,732
9	fsym2([10005]).mat	168,1	18,81	38,95	1,732
25	fsym3([10020005]).mat	184,94	17,883	39,239	1,732
20	fsym3([10015003]).mat	165,99	18,527	39,339	1,732
26	fsym3([10020008]).mat	203,45	16,755	39,645	1,732
21	fsym3([10015005]).mat	184,64	17,135	40,667	1,732
22	fsym3([10015008]).mat	212,99	14,977	41,897	1,732
10	fsym2([10008]).mat	209,36	15,134	41,948	1,732
38	fsymskokQ([75150200]).mat	182,36	10,718	42,9	1,732

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

7. Podsumowanie

Prace w tym projekcie prowadzono dwutorowo. Część pierwsza zrealizowanego projektu zawiera podstawy oraz metodykę stosowania teorii statystycznej budowanej na funkcjach *copula* pozwalających opisywać wielowymiarową zmienną losową. Druga część dotyczy przeglądu, oceny oraz analizy wypracowywania decyzji na zbiorniku retencyjnym w warunkach powodzi. Obie części z punktu widzenia analizy informacji, jaką dysponuje decydent w momencie podjęcia decyzji, pokazują nowe możliwości oraz metody aplikacji do wypracowywania racjonalnych decyzji w sytuacji zagrożenia.

W pracy [27] zgodnie z planowanym harmonogramem działań wykonano i przedstawiono:

- analizę i przygotowanie danych,
- ich wizualizację,
- określenie parametrów fali powodziowej dla przyjętych założeń,
- identyfikację wybranych rozkładów wielowymiarowej zmiennej losowej dla dwóch teoretycznych rodzin rozkładów:
  - rozkładu Gumbela,
  - rozkładów budowanych na funkcjach *copula*,
- ze względu na nowość zastosowania funkcji *copula* w hydrologii i gospodarce wodnej:
  - zaprezentowano teoretyczne podstawy budowy rozkładów wielowymiarowej zmiennej losowej z zastosowaniem funkcji *copula*,
  - dokonano przeglądu wybranych rodzin funkcji *copula* oraz dokonano identyfikacji ich parametrów,
  - wyprowadzono funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla dwuwymiarowej zmiennej losowej z logarytmiczno-normalnymi rozkładami brzegowymi dla kulminacji oraz objętości fal powodziowych: Gumbela–Hougaarda *copula*,
  - zbudowano dwuwymiarowy generator losowy dla określania parametrów fali powodziowej,
- przedstawiono propozycję metodyki i zasady budowania hipotetycznych hydrogramów dla generowanych parametrów fal powodziowych,
- zbudowano zbiory hydrogramów fal powodziowych,
- dokonano przeglądu podstawowych zasad sterowania zbiornikami retencyjnymi w warunkach powodzi,
- przetestowano wybrane reguły sterowania zbiornikiem retencyjnym dla warunków powodzi,
- określono wartości kryteriów pod kątem oceny algorytmów sterowania z punktu widzenia wielorakości celów,
- wykorzystano techniki GIS przy ocenie strat powodziowych,
- w końcowej części opracowania dla wybranych reguł sterowania zbiornikami przeprowadzono analizę wielokryterialną algorytmów sterowania na bazie wygenerowanych hydrogramów dopływów,
- wyniki analizy zaprezentowano graficznie oraz tabelarycznie,
- dodatkowo zaproponowano algorytm sterowania zbiornikiem retencyjnym na bazie wyuczonej sztucznej sieci neuronowej,
- opracowano i przetestowano zaproponowaną metodykę na przykładzie wybranego wielozadaniowego zbiornika retencyjnego,
- dokonano rankingu wybranych analizowanych reguł sterowania.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Analizę wykonano dla trzech, wydaje się, najbardziej reprezentatywnych kryteriów: wartości oczekiwanej kulminacji odpływu, wartości oczekiwanej wypełnienia rezerwy przeciwpowodziowej oraz wartości oczekiwanej strat powodziowych. W przeprowadzonych rankingach wg analizowanych kryteriów można zauważyć komplementarność kryteriów pierwszego oraz trzeciego (jest to całkowicie zrozumiałe), w przeciwieństwie do kryterium drugiego. Określenie wartości progowych (współrzędnych wektora bezpieczeństwa) na poziomie elastycznej reguły obowiązującej spowodowało, że w zbiorze analizowanych reguł sterowania żadna nie spełnia jednocześnie trzech warunków wynikających z wartości progowych wektora bezpieczeństwa $(E(U_{\max})_i < d_{\mathrm{kr1}} \cap E(\%R)_i < d_{\mathrm{kr2}} \cap$ $\cap E(S)_i < d_{\mathrm{kr3}})$ (gdzie i jest wskaźnikiem – identyfikatorem, w tabelach nr reguły). W bardzo rygorystycznej analizie można by stwierdzić na tej podstawie, że nie ma zbioru reguł lepszych (spośród analizowanych) lub też że zbiór reguł lepszych jest zbiorem pustym. Nie jest to powód do odrzucenia analizowanych reguł. Wystarczy złagodzić warunki i założyć, że poszczególne progi mogą być przekraczane z określonym prawdopodobieństwem lub też uwzględnić strefy buforowe na poziomie 5% lub 10% przekroczenia wartości progowych bądź założyć oba warunki jednocześnie. Należy pamiętać o znacznej rezerwie przeciwpowodziowej w analizowanych regułach. W wypadku mniejszej rezerwy problemu takiego by nie było – jest to paradoksalne, ale prawdziwe. Kryterium drugie można by zdefiniować jako maksymalizację wypełnienia rezerwy, rozumiejąc to jako zdolność reguły do wykorzystania możliwości retencyjnych obiektu, następnie ustalić wartość graniczną wypełnianej rezerwy i odrzucać wszystkie te reguły, które nie spełniają postawionego kryterium, ponadto wszystkie trzy kryteria byłyby komplementarne. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy systemu lepiej formułować kryteria niezgodne i niezależne, gdzie rozwiązanie może być rozumiane jako kompromis podejmowanych decyzji. Przyjęte postępowanie jest wynikiem filozofii poszukiwania rozwiązań. Pominięcie jednoczesności spełnienia wszystkich trzech progów bezpieczeństwa powoduje, że regułę obowiązującą możemy uznać za bardzo liberalną, ponad 76% analizowanych reguł ma zagregowaną wartość ryzyka mniejszą od reguły obowiązującej. Fakt ten jest wynikiem filozofii poszukiwania rozwiązań z punktu widzenia wielorakości celów. Możemy szukać rozwiązań z uwzględnieniem warunków ograniczających, którymi są – jak w tym wypadku – wartości progowe wektora bezpieczeństwa, niespełnienie których dyskwalifikuje dany algorytm lub też zdając się na kryterium zagregowane, jak w niniejszym projekcie, gdy dopuszczamy przypadki lepszych rozwiązań w rozumieniu jednego kryterium kosztem wartości kryterium innego.

W przeprowadzonej analizie zaskakująca jest poprawność w sterowaniu regułami sztywnymi lub regułami o niewielkiej liczbie parametrów. Główną przyczyną tego faktu jest duża wartość rezerwy przeciwpowodziowej (rzeczywista) przyjęta do prowadzonych analiz. Rozpatrywane reguły nie były różnicowane ze względu na wartość rezerwy przeciwpowodziowej. W wypadku poszukiwania nowej reguły zbiór analizowanych reguł należałoby rozszerzyć o taką cechę.

Przykład, jaki został zaprezentowany pokazał wszechstronne możliwości zaawansowanego, probabilistycznego modelowania zjawisk traktowanych wielowymiarowo z wykorzystaniem idei funkcji spinających typu *copula* oraz z zastosowaniem metod MC. Uwzględniając charakter przetwarzanych danych w powyższym przykładzie, uzyskane wyniki są szczególnie istotne z punktu widzenia planowania i realizacji działań związanych z ochroną przeciwpowodziową. Użyteczność przedstawionej analizy można dostrzec

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

w zastosowaniu prezentowanej metodyki oraz konkretnych wyników w weryfikacji i planowaniu zasad gospodarowania wodą na zbiorniku Dobczyce, dla którego niniejsza aplikacja była wykonana.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2006 jako projekt badawczy 3T09D 050 29 (*PB 1425/T09/2005/29*).

Literatura

[1] Chmielowski W., Twaróg B., *A simulation model of follow up control of a group of reservoirs, which work for common recipients*, 5th International Conference on Hydro Science and Engineering, Politechnika Warszawska, wrzesień 2002, Warszawa, 197-198.

[2] Chmielowski W.Z., Twaróg B., *Regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Część I. Podstawy teoretyczne*, Czasopismo Techniczne, z. Ś-10/2006, Wyd. PK, Kraków 2006.

[3] Chmielowski W., *Metody wspomagania decyzji przy sterowaniu systemami zbiorników retencyjnych służących zaopatrzeniu w wodę*, Monografia nr 298, Wyd. PK, Kraków 2004.

[4] Drużyńska E., *Wspomaganie wielokryterialnych wyborów w zarządzaniu zasobami wodnymi*, Monografia 250, Wyd. PK, seria: Inżynieria Sanitarna i Wodna, Kraków 1999.

[5] Feller W., *Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa*, t. 1, 2, PWN, Warszawa 1978.

[6] Kaczmarek Z., *Kryteria sterowania systemami wodnogospodarczymi*, Prz. Geof. 4, 1984.

[7] Kaczmarek Z., *Rozważania w sprawie ryzyka i niepewności*, Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Ryzyko w Gospodarce Wodnej, Warszawa 2000.

[8] Kaczmarek Z., *Uwagi krytyczne w sprawie metod oceny zagrożenia powodziowego, Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 r.*, Wyd. Oddz. PAN, Kraków 1998, 219-232.

[9] Kaczmarek Z., *Programowanie gospodarki zbiornikowej*, Politechnika Warszawska, Katedra Hydrauliki i Hydrologii, Warszawa 1960.

[10] Malinowski K., Żelaziński J., *Reservoir systems*: *Operational Flood Control*, Systems & CONTROL Encyklopedia supplementary, Vol. 1, 1990.

[11] Malinowski K., *Sterowanie w systemach wodnych*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, praca zbiorowa, z. 7, Warszawa 1995.

[12] Michniewski J., *Instrukcja gospodarki wodnej zbiornika wodnego Dobczyce na rzece Rabie*, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie.

[13] Słota H., *Ryzyko w ochronie przed powodzią*, Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Warszawa 2000.

[14] Twaróg B., *Aspekty zastosowania sztucznej inteligencji w sterowaniu wybranym zbiornikiem retencyjnym. Wykorzystanie modelu GARCH*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Działalność statutowa, Ś-1/451/DS/2006, kierownik, wykonawca 2006.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[15] T w a r ó g B., I n d y k W., *Niektóre problemy obliczania ryzyka w ochronie przed powodzią*, Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Ryzyko w Gospodarce Wodnej, Warszawa 2000.
[16] T w a r ó g B., *Optymalna ochrona przed powodziami z uwzględnieniem ryzyka*, Ochrona i Inżynieria Środowiska Zrównoważony Rozwój, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 25, wrzesień 2004, Kraków 2004.
[17] T w a r ó g B., *Wybrane aspekty oceny ryzyka w inżynierii środowiska*. *Część II*. *Zastosowanie funkcji typu copula*, VI Ogólnopolska Szkoła Nadzwyczajne Zagrożenia Środowiska, Paszkówka, październik 2005, Monografie IMGW, Warszawa 2005.
[18] T w a r ó g B., *Wybrane aspekty oceny ryzyka w inżynierii środowiska*. *Część I*. *Zastosowanie mieszanego modelu Gumbela*, VI Ogólnopolska Szkoła Nadzwyczajne Zagrożenia Środowiska, Paszkówka, październik 2005, Monografie IMGW, Warszawa 2005.
[19] T w a r ó g B., *Zastosowanie funkcji Copula do budowy rozkładów prawdopodobieństwa wielowymiarowej zmiennej losowej określanej dla zbioru parametrów fali powodziowej*, Czasopismo Techniczne, z. Ś-10/2006, Wyd. PK, Kraków 2006.
[20] T w a r ó g B., *Zastosowanie metody Monte Carlo w ocenie parametrów zagrożenia*, VII Ogólnopolska Szkoła Nadzwyczajne Zagrożenia Środowiska, Współczesne problemy ekstremalnych zagrożeń środowiska, Paszkówka, 9–11 października 2006.
[21] T w a r ó g B., *Zastosowanie sieci neuronowych w sterowaniu zbiornikiem retencyjnym w warunkach powodzi*, XVIII Konferencja Naukowa nt. „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych", marzec 2006, Korbielów.
[22] T w a r ó g B., *Aspekty zastosowania sztucznej inteligencji w sterowaniu wybranym zbiornikiem retencyjnym*. *Wykorzystanie modelu GARCH*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Działalność statutowa: Ś-1/451/DS/2006, zakończony w 2006.
[23] T w a r ó g B., *Aspekty ryzyka w gospodarce wodnej*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Badania własne: Ś-1-133/BW/2007, zakończony w listopadzie 2007.
[24] T w a r ó g B., *Zastosowanie dynamicznych sztucznych sieci neuronowych do prognozowania dopływu do zbiornika – model repetycyjny*, XVII Ogólnopolska Szkoła Gospodarki Wodnej, „WODA – progiem rozwoju infrastruktury przestrzennej kraju", 12–14 września 2007, Skawina k. Krakowa.
[25] T w a r ó g B., *Zastosowanie metody Monte Carlo do generowania dopływów do zbiornika retencyjnego*, Czasopismo Techniczne, z. 2-Ś/2007, Wyd. PK, Kraków 2007.
[26] Ż e l a z i ń s k i J., *Niepewność w gospodarce wodnej*, Monografia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Ryzyko w Gospodarce Wodnej, Warszawa 2000.
[27] T w a r ó g B., *Wielokryterialna ocena algorytmów wspomagania decyzji w warunkach powodzi z uwzględnieniem ryzyka*, Projekt KBN 3T09D05029, 2006–2007.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ