



Zachodniopomorski
Uniwersytet
Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Budownictwa
i Inżynierii Środowiska

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY
W SZCZECINIE

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Rozprawa doktorska

**Kryteria estymacji parametrów konceptualnych modeli
hydrologicznych relacji opad-odpływ**

Autor: mgr inż. Norbert Laskowski

Praca doktorska napisana pod kierunkiem
dr. hab. inż. Jacka Kurnatowskiego

Szczecin 2022

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu dr. hab. inż. Jackowi Kurnatowskiemu za trud pracy włożony w mój rozwój naukowy, okazaną życzliwość, wyrozumiałość i cierpliwość, motywację do dalszego rozwoju oraz nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej, a zwłaszcza w klarownym formułowaniu myśli naukowej.

Niniejszą pracę dedykuję mojej córce, żonie i rodzicom.

„Cała nasza nauka, w porównaniu z rzeczywistością, jest prymitywna i dziecinna – ale nadal jest to najcenniejsza rzecz jaką posiadamy.” – Albert Einstein

Spis treści

Wykaz oznaczeń	6
Streszczenie	7
Abstract	7
1. Wstęp	9
1.1 Zarys problematyki	9
1.2 Cel pracy	10
1.3 Teza rozprawy doktorskiej	10
2. Aktualny stan badań w zakresie rozpatrywanej problematyki	11
2.1 Klasyfikacja modeli relacji opad-odpływ	11
2.1.1 Wprowadzenie do klasyfikacji	11
2.1.2 Sposób opisu procesu	12
2.1.3 Jednoznaczność procesu	15
2.1.4 Przestrzenne zróżnicowanie procesu	15
2.1.5 Skala czasu	17
2.1.6 Fizyczna interpretacja parametrów	17
2.2 Skale hydrologiczne	18
2.3 Wyróżnienie elementów obliczeniowych na potrzeby modelowania rozproszonego	19
2.4 Separacja przepływu bazowego	20
2.5 Aktualne zastosowanie skupionych modeli zbiorników liniowych	22
2.6 Wyznaczenie opadu efektywnego i problem jakości dostępnych danych	24
2.7 Kalibracja parametrów modelu zlewni	25
2.8 Niepewności i źródła błędów	31
2.9 Ocena porównawcza modeli opad-odpływ	34
2.10 Podsumowanie stanu badań	36
3. Metodyka badawcza	39
3.1 Sformułowanie problemu oraz podstawowy opis metodyki	39
3.2 Zastosowane struktury liniowych modeli zbiornikowych	44
3.2.1 Model pojedynczego zbiornika liniowego	44
3.2.2 Kaskada Nasha	46
3.2.3 Model kaskady zbiorników zatopionych	47
3.2.4 Model Diskina	50
3.2.5 Dwugłęziowy model kaskady Nasha i SC2 (NCSC2)	51
3.3 Zastosowane kryteria estymacji parametrów	52
3.4 Kryteria oceny jakości modelu	57

3.5 Określenie opadu efektywnego.....	58
3.6 Charakterystyka obiektów badawczych.....	60
3.7 Wybór materiału badawczego.....	65
4. Przyjęte założenia i ograniczenia kalkulacyjne	76
5. Wyniki	78
5.1 Przedstawienie przykładowych wyników.....	78
5.2 Analiza wyników.....	94
6. Podsumowanie	116
6.1 Wnioski.....	116
6.2 Wytyczne do dalszych badań.....	118
Bibliografia	119
Wykaz tabel	126
Wykaz rysunków	127
Załącznik nr 1. Zestawienie wysokości dobowych opadów i wielkości przepływów dla analizowanych rzek	134
Załącznik nr 2. Wyniki estymacji parametrów dla rzek: Pasłęki, Żebrówki, Czerwonej Wody i Piotrówki.....	140
Załącznik nr 3. Wartości kryteriów estymacji uzyskane modelami pojedynczego zbiornika liniowego i kaskadą Nasha przedstawione w układzie parametrów (m, k)	161
Załącznik nr 4. Hydrogramy wynikowe uzyskane dla Żebrówki – wydarzenie 1 przy użyciu analizowanych kryteriów estymacji.....	169

Wykaz oznaczeń

α_p – współczynnik spływu [-]

β – wskaźnik rozdziału zasilania na dwie kaskady [-]

C_j – stałe całkowania modelu SC2 [-]

d_i – różnica między rangami y_p i y_m dla i obserwacji [-]

ε_{KR} – dopuszczalny błąd funkcji celu [zależnie od funkcji]

f – wielkość potencjalnej infiltracji [mm]

F_{KR} – wartość funkcji celu [zależnie od funkcji]

I_E – intensywność opadu efektywnego [mm/h]

k – stała retencji zbiornika systemu hydrologicznego [h]

lag time – opóźnienie między występującym opadem, a generowanym wezbraniem [h]

\hat{L} – maksymalna wartość funkcji wiarygodności [zależnie od funkcji]

m – wskaźnik kształtu krzywej $\alpha_p(t)$ [-]

n – liczba obserwacji [-]

N – liczba zbiorników [-]

N_i – liczba zbiorników w i -tej kaskadzie [-]

p – liczba oszacowywanych parametrów [-]

P – wysokość opadu [mm]

P_E – wysokość opadu efektywnego [mm]

Q – wielkość odpływu [m^3/s]

Q_0 – wypływ ze zbiornika w czasie $t = t_0$ [m^3/s]

$Q(0)$ – wektor warunków początkowych, zależny od analizowanego problemu [m^3/s]

S – retencja zbiornika [m^3]

T – okres próbkowania [h]

t_p – czas do szczytu wezbrania [h]

τ – założony przedział czasu trwania opadu [h]

$u(t)$ – funkcja transformująca opad w odpływ [-]

y_m – wielkość zmiennej wyjściowej modelu [m^3/s]

y_p – wielkość zmiennej wyjściowej pomiaru [m^3/s]

Streszczenie

Pomimo upływu lat problem transformacji opadu w odpływ pozostaje nadal aktualny, o czym świadczą prace (Kurnatowski, 2017; Rodriguez-Rincon *et al.*, 2015; Todini & Biondi, 2017; Chowdary *et al.*, 2012) i wielu innych. Wraz z rozwojem technologii i technik numerycznych powstają nowe możliwości modelowania związku relacji opad-odpływ, wśród których wyróżnia się zaawansowane algorytmy matematyczne pozbawione fizycznego uzasadnienia bazujące na sztucznych sieciach neuronowych czy mechanistycznym modelowaniu opartym na danych (DBM) oraz rozbudowane matematyczne modele zlewni odzwierciedlające strukturę rzeczywistego systemu zlewni. Podstawowym elementem tych rozbudowanych modeli zlewni o rozproszonej strukturze (*ang. distributed models*) najczęściej są konceptualne modele zbiorników liniowych. Wnikliwa analiza w zakresie ich struktury, optymalizacji parametrów i uzyskanych niepewności pozostaje zatem aktualnym tematem rozważań hydrologów.

W pracy analizie poddano pięć struktur konceptualnych liniowych modeli hydrologicznych relacji opad-odpływ: pojedynczy zbiornik liniowy, kaskada Nasha, model kaskady zbiorników zatopionych, model Diskina, model równoległych kaskad: Nasha i zbiorników zatopionych. Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że wykorzystane w badaniach modele liniowe cechuje duża wrażliwość na zastosowane kryteria estymacji. Większość z powszechnie stosowanych funkcji celu bazuje na pojęciu błędu kwadratowego, co skutkuje dużą czułością modelu na różnice wartości szczytowych i niewrażliwością na rozbieżności w zakresie niskich wartości przepływów. Ponieważ wykorzystywane funkcje celu determinują wyniki modelu w zakresie rozpatrywanej miary, idea kryterium umożliwiającego jednoczesną analizę kilku cech hydrogramu wydaje się dobrym kierunkiem rozwoju optymalizacji umożliwiając uzyskanie rozwiązania satysfakcjonującego z punktu widzenia kilku charakterystyk. Takie podejście, choć wymaga przyjęcia większego zakresu dopuszczalnego błędu rozwiązania w odniesieniu do pojedynczej cechy dopasowania, pozwala uzyskać większe podobieństwo między hydrogramem symulowanym a rzeczywistym w aspekcie całościowym. Ocenę możliwości modeli konceptualnych relacji opad-odpływ do odtworzenia kształtu wezbrania określano przy użyciu kryterium szczytów przesuwnych.

Pomimo uzyskania obiecujących wyników zarówno kryterium wielocelowe, jak i kryterium szczytów przesuwnych wymagają dalszej pracy w celu zwiększenia zakresu ich zastosowania. Zastosowanie struktury kaskady zbiorników zatopionych jako jednej z kaskad modelu Diskina pozytywnie wpływa na jakość modelu.

Abstract

Despite the passage of time the problem of transformation of rainfall into runoff still exists, as it can be seen in the following publications (Kurnatowski, 2017; Rodriguez-Rincon *et al.*, 2015; Todini & Biondi, 2017; Chowdary *et al.*, 2012) and many others. With the development of technology and numerical methods some new possibilities of rainfall-runoff relationship modelling appeared. Among them advanced mathematical algorithms deprived of physical meaning based on artificial neural network (ANN) or data-based mechanistic (DBM) and developed mathematical watershed models describing real watershed system structure stand out. Linear reservoir conceptual models are usually a fundamental element of these developed spatially distributed watershed models. Precise analysis of their structure, optimization of parameters procedure and uncertainties remain the current subject of hydrologists considerations.

Five structures of hydrologic linear conceptual rainfall-runoff models were analyzed in the paper: single linear reservoir, Nash cascade, cascade of submerged reservoirs, Diskin model,

model of two cascades in parallel: Nash and submerged reservoirs. Results of conducted research showed that linear models used at work were very sensitive to the estimation criterions used while optimization. Most of commonly used objective functions refers to squared errors, which results in high sensitivity to differences in peak values and insensitivity to divergence in low flow values range. Since the use of objective function determines model results in the scope of considered measure, the idea of criterion which takes into consideration several hydrograph features seems to be a good direction of optimization development enabling to obtain a solution satisfying multiple measures. A greater similarity of real and simulated hydrograph might be obtained assuming greater error tolerance of solution with respect to single matching criterion. The assessment of rainfall-runoff conceptual model ability to reproduce shape of flood hydrograph was determined by using a superimposed peak criterion.

Although the superimposed peak criterion and multi-objective criterion performed promising, a little refinement is advisable to improve their performance. The application of cascade of submerged reservoirs instead of one of Nash cascades in Diskin model improves the model efficiency.

1. Wstęp

1.1 Zarys problematyki

Proces transformacji opadu w odpływ jest nieliniowy i dynamiczny, z przestrzennie rozmieszczonymi danymi wejściowymi. Ponieważ na ogół brakuje danych niezbędnych do szczegółowego opisu heterogeniczności zlewni, wiedza w zakresie fizycznego zachowania się jej systemu jest niedostateczna. W konsekwencji do matematycznego opisu relacji między opadem a odpływem najczęściej wybieranym narzędziem są zbiornikowe modele konceptualne. Modele te zawierają jednak w swojej strukturze parametry, których wartości nie mają bezpośredniej fizycznej interpretacji. Są one oszacowywane poprzez kalibrację modelu, na podstawie kryteriów estymacji zaaplikowanych do operatora transformacji opadu w odpływ.

Twierdzi się, że wyniki generowane przez modele zbiornikowe wykazują dużą wrażliwość na stosowane kryteria estymacji (Byczkowski, 1996; Krause *et al.*, 2005; Moussa & Chahinian, 2009). Kluczem do osiągnięcia dokładniejszego odwzorowania hydrogramów rzeczywistych jest zatem należyte zdefiniowanie funkcji celu, dopasowana do przeznaczenia modelu. Nie można jednak zapomnieć, że u podstaw jakości każdego modelu matematycznego leży wiarygodność posiadanych danych wejściowych. W przypadku modeli relacji opad-odpływ często są to wielkości, których bezpośredni pomiar w terenie jest niemożliwy, jak chociażby wysokość opadu efektywnego. Z tego względu jedyną możliwością oszacowania tych wielkości jest zastosowanie rozwiązań matematycznych, co generuje dodatkowy błąd już na etapie przygotowania danych wejściowych. W konsekwencji, pomimo upływu lat wciąż nie udało się stworzyć uniwersalnego i wiarygodnego modelu transformacji opadu w odpływ.

Stworzono wiele modyfikacji bazujących na pierwotnej koncepcji modelu pojedynczego zbiornika liniowego, z których największym uznaniem cieszy się model Nasha oraz dwukaskadowy model Diskina. Ich struktura wskazuje na to, że modele te uwzględniają jedynie zasilanie odbiornika spływem powierzchniowym. Chociaż obecnie niemożliwym jest określenie podpowierzchniowych zasobów zlewni, tj. pełna charakterystyka spływu śródpokrywowego i podziemnego, wiadomo że zasilanie powierzchniowe i podpowierzchniowe w różny sposób wpływają na generowany odpływ. Przedstawiona przez Kurnatowskiego (2017) koncepcja modelu kaskady zbiorników zatopionych swą strukturą może symulować zasilanie odbiornika wodami podpowierzchniowymi. Niemniej nie opracowanie nowych koncepcji, lecz potrzeba dokładnego rozpoznania procesu optymalizacji

oraz rozwiązanie problemu jakości danych wydają się koniecznym kierunkiem rozwoju w dziedzinie modelowania matematycznego zagadnień hydrologicznych.

1.2 Cel pracy

Nadrzędnym celem rozprawy doktorskiej jest wskazanie kryteriów estymacji parametrów umożliwiających uzyskanie maksymalnego podobieństwa między rzeczywistymi i symulowanymi, na podstawie danych opadowych, hydrogramami wyjściowymi zlewni. Zastosowanie różnych koncepcji modeli zbiornikowych pozwala przeanalizować w szerszym zakresie problem podatności modeli hydrologicznych relacji opad-odpływ na proces optymalizacji. Dzięki temu wnioski z przeprowadzonych badań mogą być w większym stopniu zgeneralizowane. Dodatkowymi celami pracy są:

- opracowanie kryterium sprawdzającego, czy struktura modelu umożliwia odtworzenie przebiegu hydrogramu rzeczywistego,
- zbadanie jakości modelu konceptualnego składającego się z dwóch równoległych kaskad – Nasha i zbiorników zatopionych,
- analiza porównawcza jakości i użyteczności zastosowanych konceptualnych modeli relacji opad-odpływ.

1.3 Teza rozprawy doktorskiej

Kryteria estymacji parametrów modelu determinują cechy hydrogramów wynikowych hydrologicznych modeli relacji opad-odpływ, bez względu na zastosowaną koncepcję ich struktury. Odpowiednio elastyczny dobór kryteriów estymacji parametrów prowadzi do uzyskania najdokładniejszych odzwierciedleń kształtu rzeczywistych hydrogramów odpływu. Kryterium szczytów przesuwnych może być skuteczną metodą oceny zdolności struktury modelu do odtworzenia hydrogramu rzeczywistego. Wpływ wód podpowierzchniowych na proces kształtowania się odpływu ze zlewni można zamodelować za pomocą koncepcji zbiorników zatopionych, której struktura zbliżona jest do układu wód podziemnych. Wykorzystując ją jako jedną z kaskad modelu Diskina, wygenerowane hydrogramy odpływu swym przebiegiem są bliższe hydrogramom rzeczywistym, w porównaniu z hydrogramami uzyskanymi z tradycyjnych modeli zbiorników otwartych.

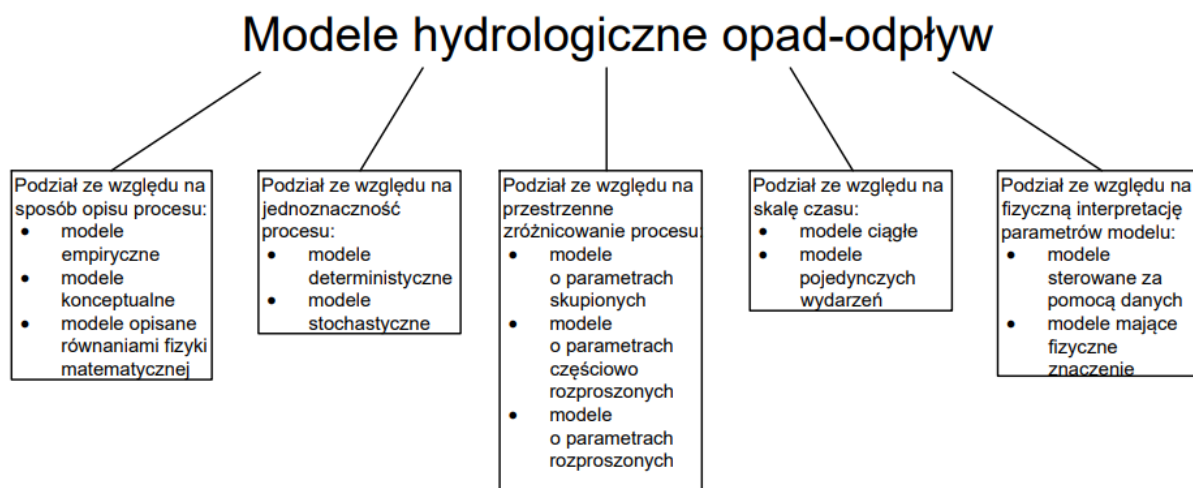
2. Aktualny stan badań w zakresie rozpatrywanej problematyki

2.1 Klasyfikacja modeli relacji opad-odpływ

2.1.1 Wprowadzenie do klasyfikacji

Dane dotyczące opadów i przepływów rzecznych można zamienić w informację charakteryzującą dynamiczne zachowanie zlewni za pomocą matematycznych modeli transformujących opad w odpływ (Littlewood, 2002). Modele te opisują naturalne procesy obiegu wody, dzięki czemu są ważnym i niezbędnym narzędziem do dysponowania zasobami wodnymi oraz środowiskowymi. Z uwagi na dużą złożoność odpowiednich zjawisk fizycznych i postępującą działalność człowieka, m.in. tworzenie pompowni, sztucznych drenaży podziemnych czy rosnącą urbanizację, zawierają one jednak istotne uproszczenia (Bardossy, 2007; Zhang & Savenije, 2005). W konsekwencji część parametrów modeli konceptualnych oraz częściowo konceptualnych nie może zostać fizycznie pomierzona ilościowo i stąd musi być oszacowana na podstawie dostępnych danych oraz informacji (Bardossy, 2007). Nie umniejsza to jednak popytu na zdolności predykcyjne takich modeli, który jest coraz większy i prowadzi do potrzeby uwydatnienia istniejących modeli lub nawet rozwinięcia nowych teorii. W skrajnych przypadkach modele opad-odpływ są jedynym sposobem pozyskiwania informacji o hydrogramach powodziowych, co jest spowodowane brakiem danych obserwacyjnych (Onyando *et al.*, 2003).

Klasyfikacja modeli hydrologicznych relacji opad-odpływ jest skomplikowanym zagadnieniem. Na proces transformacji opadu w odpływ składa się ogół procesów hydrologicznych zachodzących w zlewni, a większość kryteriów podziału modeli pośrednio powstała w wyniku wprowadzania uproszczeń będących następstwem braku wiedzy lub niedoboru informacji w zakresie analizowanych procesów. Powszechnie stosowaną klasyfikację modeli relacji opad odpływ przedstawia rys.1.



Rysunek 1. Klasyfikacja modeli hydrologicznych relacji opad-odpływ [opracowano na podstawie (Ozga-Zielińska & Brzeziński, 1997)]

2.1.2 Sposób opisu procesu

Istniejące modele relacji opad-odpływ najogólniej można podzielić ze względu na przyjęte podejście do przedstawienia zależności między opadem a odpływem. Wyróżniamy tutaj: modele empiryczne („czarna skrzynka”), modele koncektualne oraz modele opisane równaniami fizyki matematycznej (Zhang & Savenije, 2005).

Równania hydrodynamiki opisane pełnymi równaniami Saint-Venanta rzadko są stosowane w hydrologii. W licznych przypadkach można zastosować bowiem sensowne uproszczenia wyodrębniając model fali kinematycznej i dynamicznej (Kundzewicz, 1979). Zastosowanie równań fizyki matematycznej wiąże się z rozwiązaniem pełnych równań charakteryzujących zasadę zachowania masy, pędu i energii, co w hydrologii często jest trudne do uzyskania (Byczkowski, 1996), pojawiają się bowiem problemy w zakresie określenia warunków początkowych i brzegowych oraz uwzględnieniu nierozpoznanych niejednorodności, anizotropii i niestacjonarności systemu. W rezultacie często zachodzą rozbieżności między wynikami otrzymanymi przy użyciu równań hydrodynamiki a wartościami mierzonymi w systemie rzeczywistym (Kundzewicz, 1979).

W obliczu złożoności procesu transformacji opad-odpływ i braku informacji w zakresie jego mechaniki można założyć ogólną strukturę zjawiska wykorzystując modele empiryczne. Rozważając zlewnię jako system liniowy o własnościach niezmiennych w czasie jego ogólną postać można zapisać za pomocą całki splotu (1)

$$Q(t) = \int_0^{t_k} u(t - \tau) I_E(\tau) d\tau \quad (1)$$

gdzie czas trwania sygnału jest ograniczony $t=0$ na początku i $t=t_k$ na końcu (Kordas, 1974). W praktyce dane jednak rzadko są analizowane w formie ciągłej. Dyskretyzacja całki splotu wygląda następująco:

$$Q(nT) = \sum_{k=0}^{k=n} u(kT)I_E[(n-k)T] \quad (2)$$

gdzie:

$I_E(nT)$ – natężenie opadu efektywnego zawierające się w przedziale $t=nT$ do $t=(n+1)T$

$Q(nT)$ – przepływ bezpośredni próbkowany w czasie $t=nT$

$u(kT)$ – prezentuje hydrogram jednostkowy (UH) w czasie T , np. bezpośredni odpływ z jednostkowego opadu efektywnego trwającego początkowy interwał T (Parmentier *et al.*, 2003).

Rozważania rozpoczynamy najczęściej od określenia własności transformacyjnych zlewni opisanych funkcją $u(t)$, identyfikowaną na podstawie szeregów czasowych wielkości pomierzonych na wejściu – opad i wyjściu – odpływ. Ponieważ funkcja ta znajduje się pod znakiem całki, do rozwiązania powyższego równania można posłużyć się różnymi metodami, np. metodami transformacyjnymi (transformacja Laplace'a i transformacja Fouriera) lub metodami korelacyjnymi (Kordas, 1974).

Jako funkcja transformująca opad w odpływ zarówno w analizie szeregów czasowych jak i teorii systemów najczęściej stosowany jest liniowy UH (Ding, 2011). Metody Turnera i de Laine'a pozwalają wyznaczyć rzędne UH bez odniesienia się do danych opadowych (Parmentier *et al.*, 2003). Ich wadą jest jednak konieczność uprzedniego wydzielenia przepływu bazowego z hydrogramu odpływu. Parmentier i inni zaprezentowali metodę pierwiastkowej separacji, która umożliwia określenie rzędnych UH i opadu efektywnego bezpośrednio z hydrogramu odpływu. Odpowiedź systemu bazującego na pojęciu hydrogramu jednostkowego rozważano w dwóch formach: IUH – nagłych impulsów odpowiedzi (*ang. instantaneous unit hydrograph*) i TUH – odpowiedź na zdyskretyzowane w czasie wejścia (*ang. finite period unit hydrograph*) (Shaw, 1994).

Założenie liniowości fizycznych systemów hydrologicznych jest ograniczone tylko do pewnego zakresu warunków, gdyż w rzeczywistości są one nieliniowe (Spolia, 1980; Kundzewicz & Napiórkowski, 1986). Badania Minshalla nad zlewnią Edvardsville wykazały istnienie nie jednej, lecz rodziny pięciu krzywych IUH zależnych od intensywności opadu (Ding, 2011; Gironás *et al.*, 2009). Zastosowanie nieliniowego modelu matematycznego jest jednak trudniejsze niż modelu liniowego. Nie ma unikatowej, zwartej i ogólnej teorii

nieliniowych systemów dynamicznych, a ważność osiągniętego rozwiązania ograniczona jest do określonego zbioru warunków początkowych i brzegowych oraz użytego sygnału wejściowego do obliczeń. W celu wywnioskowania zachowania systemu w innych warunkach należy powtórzyć obliczenia dla nowych warunków.

W praktyce używa się dwóch metod wprowadzenia nieliniowości do struktur opartych na całce spłotu. Pierwszą jest przyjęcie zależności jądra $u(t)$ od wielkości danych wejściowych. Wzór (1) przyjmuje wówczas postać:

$$y(t) = \int_0^{t_k} u(P_e, \tau) I_E(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

gdzie P_e jest wektorem charakterystyk wydarzenia, który w aspekcie pojedynczego zdarzenia pozostaje stały, lecz może się zmieniać między zdarzeniami. Drugim jest zastosowanie modelu w postaci szeregu Volterry:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{t_k} | \int |_i u_i(\tau_1, \dots, \tau_i) \prod_{b=1}^i I_E(t - \tau_b) d\tau_b \quad (4)$$

gdzie, $| \int |_i$ oznacza całkę i -krotną (Kundzewicz & Napiórkowski, 1986).

Podjęciem wypełniającym lukę między modelami hydrodynamiki, a niemającymi fizycznego uzasadnienia modelami „czarnej skrzynki” są modele konceptualne. Wykorzystuje się je w celu rozwiązania równania (1) (Kordas, 1974). Termin „modele konceptualne” najczęściej odnosi się do jedno- lub kilkuparametrowych modeli liniowych o stałych skupionych. Struktura tych modeli oparta jest na przesłankach quasi-fizycznych uwzględniając równanie ciągłości. Poszczególne modele konceptualne rozróżnia równanie dynamiki (stanu). Jednym z podstawowych elementów strukturalnych jest kanał liniowy, odpowiadający czystej translacji przepływu w czasie (Kundzewicz, 1979). Drugim jest koncepcja zbiornika liniowego bazująca na równaniu ciągłości ruchu, do rozwiązania którego wykorzystuje się dodatkowo równanie dynamiki (stanu) (Pedersen *et al.*, 1980). Na ich podstawie buduje się bardziej złożone struktury jak: kaskada zbiorników liniowych połączonych szeregowo (Nash, 1957), dwie gałęzie kaskady zbiorników liniowych (Diskin, 1980), połączone struktury zbiorników i kanału liniowego, np. model Dooge’a, model Singha (Kordas, 1974).

W celu ujęcia nieliniowości rozpatrywanych procesów najczęściej wykorzystuje się pojęcie zbiornika nieliniowego. Różni się ono od pojęcia zbiornika liniowego tylko równaniem dynamiki (stanu), które przyjmuje postać:

$$Q(t) = \alpha S^\beta(t) \quad (5)$$

gdzie: α , β – parametry równania dynamiki modelu nieliniowego (Kundzewicz, 1979). Wykazano, że kaskada trzech zbiorników nieliniowych przedstawiona w postaci aproksymacji trzeciego rzędu kaskady zbiorników nieliniowych TOSM (ang. Third Order State Model) jest odpowiednikiem trzech pierwszych wyrazów szeregu Volterry (Napiórkowski, 1983). Zbiornik nieliniowy można przedstawić za pomocą kaskady liniowych zbiorników. W ten sposób można określić parametry krótkiej kaskady nieliniowych zbiorników za pomocą liniowej analizy odpowiednio dłuższej kaskady równych zbiorników liniowych (Dooge, 1974b).

2.1.3 Jednoznaczność procesu

Pojawienie się na wyjściu procesu wielkości ulegających wahaniom, podczas gdy od procesu oczekuje się powtarzalności, zaowocowało wyróżnieniem członów deterministycznych oraz stochastycznych, rozumianych jako zaburzenia (szumy), co można zapisać następującym wzorem:

$$y(t) = H_1[x_1(t)] + H_2[x_2(t)] \quad (6)$$

gdzie składowa deterministyczna reprezentowana jest przez H_1 na bazie zmiennych wejściowych $x_1(t)$, a czynnik zakłócający może być symulowany działaniem komponentu H_2 na wejście $x_2(t)$. Podejście czysto deterministyczne lub stochastyczne polega na analizie wyłącznie jednego z dwóch wyróżnionych komponentów systemów (Dooge, 1974a). Aby model był użyteczny, powinien zawierać zarówno komponent deterministyczny, jak i stochastyczny. Oddzielenie sygnału od szumów w ujęciu hydrologicznym to określenie rzeczywistego hydrogramu jednostkowego przy istnieniu błędów w danych wejściowych i wyjściowych. Z praktycznego punktu widzenia ważne jest, aby metoda wyprowadzania UH działała w przypadku istnienia błędu – „szumu” w danych (Dooge, 1974b).

2.1.4 Przestrzenne zróżnicowanie procesu

Tradycyjne wykorzystanie rozwiązań systemowych i koncepcyjnych zakłada, że zlewnia jest homogeniczna i ma przestrzennie jednolite charakterystyki hydrologiczne. Do analiz wykorzystywana jest średnia powierzchniowa wysokość opadów, która jest związana z odpływem mierzonym w stałym miejscu na rzece, służącym jako przekrój zamykający zlewnię. Modele takie nazywamy modelami o parametrach skupionych (ang. *lumped model*) (Diskin *et al.*, 1984). Połączenie ze sobą elementów koncepcyjnych reprezentujących elementy cyklu hydrologicznego teoretycznie umożliwia identyfikację parametrów na podstawie fizjograficznych charakterystyk zlewni. Do takich modeli można zaliczyć modele

CLS (Constrained Linear System) oraz PDM (Probability Distributed Model) (Todini, 2002, 2007). Kluczowym aspektem uwytłaczonym w strukturze tych modeli jest poziom wilgotności gleb w zlewni. Główną wadą modeli o parametrach skupionych jest wymóg założenia, że opad wejściowy jest jednakowo rozłożony na zlewni, co rzadko ma miejsce. Spekuluje się, że część nieliniowości odpowiedzi modeli opad-odpływ jest spowodowana niejednakowym i niestałym rozkładem opadów wejściowych (Karnieli *et al.*, 1994).

Uwzględnienie przestrzennego zróżnicowania charakterystyk hydrologicznych wymaga wprowadzenia pewnych danych rozproszonych. Do analizy przestrzennie rozproszonych fizjograficznych czynników w zlewni wpływających na jej dynamikę hydrologiczną można zastosować System Informacji Geograficznej (GIS). Jako że takie czynniki są istotnym elementem rozproszonego modelu hydrologicznego, ściśle powiązanie modelu z technologią GIS staje się koniecznością, aby dynamika hydrologiczna zlewni mogła być symulowana w bardziej realistyczny sposób (Flügel & Lüllwitz, 1993). Modele o parametrach częściowo rozproszonych (*ang. semi-distributed models*) przedstawiają zlewnię jako zespół połączonych ze sobą elementarnych powierzchni. Każdy taki element jest reprezentowany w modelu przez komórkę, którą przedstawia się jako model skupiony tego elementu powierzchni. Opis struktury modeli komórkowych zawarty jest w pracach (Pegram & Diskin, 1987a, b). Przykładem modelu o parametrach częściowo rozproszonych jest oparty na funkcji dystrybucji indeksu topograficznego TOPMODEL (Kavetski *et al.*, 2003) oraz umożliwiający inicjalizację wartości parametrów bezpośrednio z danych GIS i DTM (Digital Terrain Model) model CLASSIC (Crooks & Naden, 2007).

Modele o parametrach rozproszonych (*ang. distributed models*) charakteryzują się dużą dekompozycją zlewni, gdyż wykorzystując dane topograficzne wyróżnia się liczne homogeniczne siatkowe komórki o małych rozmiarach, nawet kilku metrów kwadratowych, które zostają przedstawione za pomocą modeli skupionych (Patil, 2008). Alternatywną formą modeli o parametrach rozproszonych jest sformułowanie równania ciągłości i przepływu dla każdego pojedynczego elementu obszaru oraz dla każdego krótkiego odcinka kanału sieci (Diskin *et al.*, 1984). Spora ilość wymaganych danych i czas potrzebny na obliczenia ogranicza jednak ich zastosowanie do małych i dobrze opomiarowanych zlewni (Onyando *et al.*, 2003; Zhang & Savenije, 2005). Do grupy modeli rozproszonych można zaliczyć m.in. modele MIKE SHE oraz PRMS (Precipitation-Runoff-Modelling-System) (Flügel & Lüllwitz, 1993).

Szersza dostępność przestrzennych informacji, począwszy od typów gleby i użytkowania gruntów, a skończywszy na pomiarach radarowych opadów, ułatwiła tworzenie

uproszczonych, fizycznie znaczących modeli hydrologicznych o parametrach rozproszonych. Jednym z nich jest wywodzący się z przestrzennej integracji modelu fali kinematycznej model TOPKAPI. Model stosuje podejście „distributed-lumped”, polegające na oszacowaniu parametrów modelu skupionego bezpośrednio z modelu rozproszonego, którego parametry są określane na podstawie danych zawartych na mapach oraz uzyskanych z pomiarów i literatury (Liu & Todini, 2002).

Typ modelu wybierany jest w zależności od zastosowań. Przykładowo, gdy głównym założeniem jest scharakteryzowanie dynamiki zlewni, umożliwiającej dalsze badania w zakresie regionalizacji, modele skupione są bardziej wydajne niż przestrzennie zróżnicowane (Littlewood, 2002).

2.1.5 Skala czasu

Wybór struktury modelu często powiązany jest z planowaną rozpiętością czasową symulacji, która może sięgać od kilku godzin do wielu lat. W zależności od zastosowanej skali czasu można wyróżnić dwie grupy modeli. Modele ciągłe (*ang. continuous models*) umożliwiają ciągłą symulację relacji opad-odpływ z uwzględnieniem okresów opadowych oraz suszy. Aby przeprowadzić symulację dla okresu nawet kilku lat, niezbędne jest wykorzystanie szerokiego opisu procesów zachodzących w zlewni uwzględniając m.in. przepływ wód gruntowych, ewapotranspirację, retencję podziemną. W konsekwencji modele ciągłe wymagają obszernych danych i często są przeparametryzowane. Do tej grupy modeli można zaliczyć TOPMODEL i HBV (*szw. Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) (Patil, 2008). Modele oparte na wydarzeniach (*ang. event based models*) przedstawiają pojedyncze zdarzenie wezbraniowe. Są to proste modele uwzględniające wyłącznie proces spływu powierzchniowego (Plate, 2009; Patil, 2008).

2.1.6 Fizyczna interpretacja parametrów

Podstawowym problemem uproszczonych modeli UH jest duża niepewność związana z brakiem fizycznego uzasadnienia dla wartości parametrów uzyskanych podczas optymalizacji na podstawie danych wejściowych i wyjściowych oraz ekwifinalność otrzymywanych rozwiązań, czyli uzyskiwanie takich samych wyników modelowania przy różnych wartościach parametrów (Byczkowski, 1996). Identyfikacji IUH można dokonać opierając się wyłącznie na danych wejścia-wyjścia albo zachowując fizyczne uzasadnienie. Prowadzi to do wyróżnienia modeli sterowanych za pomocą danych (*ang. data-driven*) oraz modeli mających fizyczne znaczenie (*ang. physically meaningful*). Jeżeli kształt IUH można zdefiniować a priori jako rozwiązanie całkowite lub rozwiązanie układu liniowych równań

różniczkowych, a wartości parametrów są obliczane jako funkcje fizycznych charakterystyk zjawiska, to IUH można traktować jako fizyczną interpretację zjawiska. Jeśli natomiast kształt IUH i wartości parametrów oszacowywane są wyłącznie na podstawie pomiarów wejścia i wyjścia modelu, mamy do czynienia z modelem sterowanym za pomocą danych (Todini, 2007). Należy zauważyć, że próba określenia IUH z informacji zawartych na mapach topograficznych lub danych geomorfologicznych, określona jako GUH (*ang. geomorphological unit hydrograph*), spotkała się z krytyką ze strony hydrologów (Shamseldin & Nash, 1998).

Postępująca utrata fizycznego znaczenia modeli UH na rzecz modeli sterowanych za pomocą danych rozpoczęła się od powiązania UH z modelami auto-regresywnymi ARX (*ang. Auto-Regressive with Exogenous variables model*). Późniejsze wykorzystanie inżynierii systemowej do opracowania wydajniejszych i mniej skomplikowanych modeli, czy zastosowanie sztucznej sieci neuronowej (ANN), które można postrzegać jako nieliniowe odpowiedniki oryginalnych modeli funkcji transferu liniowego, spowodowały znaczną utratę fizycznego znaczenia modeli. Wykorzystanie w modelach mechanistyki opartej na danych DBM (*ang. data based mechanistic*) umożliwia identyfikację struktury modelu oraz estymację parametrów na podstawie danych wejściowych i wyjściowych. W celu zwiększenia fizycznej wiarygodności takiego podejścia, do identyfikacji i estymacji parametrów wykorzystywane są techniki inżynierii systemowej, które rozpoznają struktury mogące mieć fizyczną interpretację (Todini, 2007). Nie uwzględniając jednak postępów w zakresie rozpoznania fizycznych mechanizmów hydrologicznych generujących wezbranie, podejście DBM kontrastuje z zasadą bayesowską, która łączy obserwacje z wiedzą apriori na temat procesów i wartości parametrów w celu zmniejszenia niepewności prognoz.

2.2 Skale hydrologiczne

Wybór struktury modelu dokonywany jest w oparciu o skalę hydrologiczną. Skale hydrologiczne stały się ważnym elementem kategoryzującym zlewnie. Są one określone zarówno przez wielkość obszaru, jak i lokalnie wiodące procesy oraz sposób ich prezentacji w modelu.

W skali punktowej obszar elementarny mierzony jest w metrach kwadratowych i pomijany jest czas przejścia. Procesy mają charakter nieliniowy i rozważa się ich pionowy rozkład wyodrębniający infiltrację, powierzchniową retencję i spływ powierzchniowy.

Modele skali punktowej tworzą bloki dla modeli mikroskalowych. Ideą jest wydzielenie w zlewni obszarów o zbliżonych warunkach infiltracyjnych – homogenicznych. Generalnie modele w mikroskali mogą zostać określone za pomocą prawa zachowania ciągłości.

Mezoskala jest definiowana jako skala, w której modele opad-odpływ mogą zostać opisane za pomocą modeli konceptualnych przy użyciu funkcji systemowych. Typowe dla tej skali są modele bazujące na UH, dla których nie ma limitów obszarowych. Ich zastosowanie zależy od dostępności danych i charakterystyki zlewni.

Makroskalę definiuje się dla zlewni o powierzchni przewyższającej 1000 km², dla której procesy generujące odpływ mają takie samo znaczenie, co przepływ w korycie głównym. Nie ma zatem potrzeby szczegółowo rozpatrywać spływ powierzchniowy. Elementem składowym przypisuje się odrębne wartości współczynnika odpływu, a retencja i charakterystyka odpływu może zostać określona za pomocą prostych funkcji, takich jak funkcje wykorzystane do opisu zbiornika liniowego.

Ponieważ wraz z wielkością obszaru zmienia się zbiorowy efekt poszczególnych procesów, dostrzega się potrzebę zdefiniowania warunków wskazujących granicę, od kiedy można zastosować modele wielkoskalowe, np. modele makroskalowe o parametrach skupionych (Plate, 2009). W ostateczności to jednak dostępność danych determinuje wybór struktury modelu sprowadzając go często do modelu sterowanego danymi. Powszechne jest dysponowanie tylko jednym punktem pomiarowym lub nawet ich brakiem. Wówczas rozwiązaniem jest regionalizacja, która polega na oszacowaniu wartości parametrów na podstawie charakterystyk zlewni lub bazując na indeksach odpowiedzi (np. średni roczny odpływ) (Bulygina *et al.*, 2009). Skala modeli opartych na fizyce jest często większa niż skala pomiaru parametrów. Efektywne wartości parametrów muszą zatem zostać dostosowane do przyjętego modelu. Kalibracja staje się wówczas nieunikniona i może prowadzić do problemu z identyfikacją parametrów (Zhang & Savenije, 2005). Pomimo rozwoju w dziedzinie dostępności danych przestrzennych i GIS jest jeszcze wiele do zrobienia w kwestii przełożenia tych danych na informację hydrologiczną (Plate, 2009).

2.3 Wyróżnienie elementów obliczeniowych na potrzeby modelowania rozproszonego

Rozproszone modelowanie hydrologiczne umożliwia symulację przestrzennego zróżnicowania charakteru procesów zachodzących w zlewni poprzez wydzielenie na jej niejednorodnej i złożonej powierzchni elementów obliczeniowych, takich jak jednostkowe odpowiedzi hydrologiczne (HRU), komórki siatki lub podzlewnie (Chowdary *et al.*, 2012).

Przy modelowaniu siatkowym topografia i geometria jest pobierana z wielkoskalowych cyfrowych modeli terenu DTM. Klimat i zagospodarowanie są łączone z modelami siatkowymi przez system informacji geograficznej GIS. Modele CBM (*ang. catchment based model*) są zorientowane wektorowo. Do określenia rozmiarów i charakterystyki topograficznej wyróżnionych podzlewni również wykorzystywany jest DTM (Plate, 2009). Modele bazujące na jednostkowej odpowiedzi HRU dzielą zlewnie na obszary o jednorodnej dynamice hydrologicznej (Flügel & Lüllwitz, 1993).

Modele przestrzenne do określenia odpływu wyróżniają zarówno komponenty o rozkładzie pionowym, jak i poziomym. Do określenia wielkości odpływu wykorzystywane są współczynniki odpływu przyjmujące postać stałych empirycznie powiązanych z parametrami gleby lub złożonych funkcji modelu bilansu wodnego. Odpływ jest kierowany z elementarnych obszarów – komórek, podzlewni lub HRU do odpowiedniego punktu na długości cieków. Proste modele działają na zasadzie translacji, przy założeniu stałej prędkości odpływu z elementu, natomiast modele złożone uwzględniają systemy zbiorników liniowych w każdym elemencie (Plate, 2009).

Zmieniając liczbę i powierzchnię podobszarów można ocenić wpływ zmiany gospodarowania terenu (Flügel & Lüllwitz, 1993). Modele CBM nie ograniczają się do bilansu wilgotności gleby, lecz uwzględniają różnorodne charakterystyki zlewni elementarnych, jak topografia i zagospodarowanie terenu. Taki model może być bardzo szczegółowy w zależności od rozwiązań ujętych w podzlewniach i podmodeli zastosowanych do określenia procesów. Poziomą szczegółowość będzie zależał od skali rozpatrywanego zjawiska i ilości posiadanych danych (Plate, 2009). Z badań przeprowadzonych przez Chowdary'ego i innych (2012) wynika, że różnice między symulowanymi a obserwowanymi wartościami odpływu wzrastają wraz ze wzrostem wielkości przyjętej siatki – powyżej 184 m bardziej wyraźnie.

2.4 Separacja przepływu bazowego

Rozciągnięcie IUH na obszar zlewni wymaga pewnych subiektywnych wyborów: separacji przepływu bazowego i bezpośredniego, wyznaczenia opadu efektywnego, otrzymania kształtu IUH i jego parametrów z dostępnych pomiarów (Todini, 2007; Szilagyi & Parlange, 1998). W niektórych zlewniach zachodzi duże zróżnicowanie w przepływach bazowych i proporcjach udziału opadu efektywnego w całkowitym opadzie dla poszczególnych wydarzeń opadowych. Nieodseparowanie przepływu bazowego może skutkować brakiem prawidłowej relacji między wejściem i wyjściem (Boneh & Diskin,

1973). Choć hydrogram jednostkowy zlewni można odnieść do przepływu bazowego, którego rzeczywiste cechy przyrównuje się do nieskomplikowanej struktury konceptualnych modeli zbiornikowych (Feldman, 2000; Kurnatowski, 2017), najczęściej wykorzystuje się go do identyfikacji odpływu bezpośredniego (Parmentier *et al.*, 2003). Równanie procesu odpływu bazowego można generalnie zapisać w postaci modelu zbiornika nieliniowego, który przy pewnych uproszczeniach sprowadza się do modelu liniowego.

Do tradycyjnych metod wyznaczenia krzywej recesji przepływu bazowego zalicza się zastosowanie krzywych: wykładniczej, podwójnej wykładniczej i hiperbolicznej. Szilagyi i Parlange (1998) wykazali, że wartość maksymalna odpływu bazowego i hydrogram krzywej recesji mogą zostać wyznaczone przez dopasowanie analitycznych rozwiązań równania Boussinesqa do obserwowanych wartości przepływu dla poszczególnych wezbrań. Ponadto w wyniku porównania numerycznej i analitycznej metody rozwiązania równania Boussinesqa wywnioskowano, że zwiększenie złożoności zlewni nie miało wpływu na dokładność szacowanych parametrów równania (Szilagyi *et al.*, 1998). Równanie Boussinesqa uwzględnia fizykę podczas separacji przepływu bazowego, co zmniejsza niepewności towarzyszące tradycyjnym metodom separacji przepływu bazowego, takim jak graficzna metoda półlogarytmiczna (Szilagyi, 1999).

Dzięki rozwojowi technik automatycznych subiektywne metody separacji odpływu bazowego, np. graficzne, są zastąpione przez dwa typy metod umożliwiających ciągłe modelowanie przepływu bazowego: metody filtrowania cyfrowego i konceptualnych modeli hydrologicznych. W modelu HEC-HMS do oszacowania wielkości odpływu bazowego wykorzystywane są metody: stałej miesięcznej wartości odpływu bazowego, wykładniczej krzywej recesji lub zbiornika liniowego w połączeniu z ciągłym modelem SMA (*ang. Soil-Moisture Accounting*) (Feldman, 2000). Szilagyi (2004) wykazał przydatność algorytmu cyfrowego filtrowania dla ciągłej separacji przepływu bazowego w sytuacji braku możliwości zastosowania modelu symulacji przepływu bazowego uwzględniającego aspekty fizyczne. Pokazano, że filtr cyfrowy daje porównywalne wyniki z symulacjami modelowymi pod względem wieloletniego wskaźnika przepływu bazowego. Fenicia i inni (2006) używając prostego modelu zbiornika określili relację retencja-odpływ. Z pracy wynika, że struktura liniowego zbiornika najlepiej opisuje zachowanie wód gruntowych. Nourani (2008) wyznaczył przepływ bazowy przy użyciu metody „stałego nachylenia”, co pozwoliło na określenie hydrogramu bezpośredniego.

Stoelzle i inni (2012) wykazali, że zastosowanie różnych metod analiz recesji doprowadziło do uzyskania różnych wartości parametrów, co może zaburzyć rzeczywiste

charakterystyki recesji odpływu rzecznego. Duża różnorodność wartości parametrów równań odpływu ma przełożenie na niespójność charakterystyk recesji. Ograniczona porównywalność charakterystyk recesji otrzymanych z różnych metod może być związana z niepewnościami poszczególnych metod analiz recesji, dlatego zaleca się stosowanie możliwie wielu metod poszukiwania charakterystyk recesji rzecznej.

2.5 Aktualne zastosowanie skupionych modeli zbiorników liniowych

Skrajna niejednorodność istotnych parametrów, takich jak własności gleby lub niezidentyfikowana przestrzenna i czasowa zmienność wielkości meteorologicznych ogranicza zastosowanie modeli fizycznych głównie do prowadzenia badań na małych, dobrze opomiarowanych zlewniach doświadczalnych. Pomimo iż w pracy Ogdena (1993) stwierdzono, że skupione modele parametryczne niedoszacowują szczytowe wartości przepływów, modele konceptualne stanowią największą grupę modeli hydrologicznych, jaka została rozwinięta przez hydrologów i która jest najczęściej wykorzystywana w praktyce operacyjnej.

Ponieważ większość modeli konceptualnych należy do grupy modeli skupionych, pomijających przestrzenną różnorodność zmiennych i parametrów (Zhang & Savenije, 2005), ich zastosowanie znajduje swoje uzasadnienie, gdy zakres rozważań jest ograniczony do wielkości uzyskiwanych w przekroju zamykającym zlewnię. Ze względu na swoją prostotę skupione modele liniowe są również często wykorzystywane jako przykład zastosowania analizy niepewności. Ponadto proste modele opad-odpływ z małą liczbą parametrów są wygodne do predykcji powodzi, gdy dysponuje się ograniczonymi danymi i w związku z tym zastosowanie skomplikowanych modeli jest niemożliwe (Sikorska *et al.*, 2013). Obecnie wiele uwagi poświęca się problemowi regionalizacji, w kontekście której istotne jest stosowanie uproszczonych modeli opisujących tylko istotne elementy procesów opad-odpływ z minimalną liczbą parametrów (Patil, 2008).

Konfiguracja dwóch równoległych zbiorników ma praktyczne oraz fizyczne uzasadnienie relatywnie szybkiej i wolnej odpowiedzi, rozumianej jako odpływ bezpośredni i bazowy. Można oczekiwać, że parametry dwóch równoległych UH będą się odnosiły do takich fizycznych cech zlewni jak nachylenie, gęstość sieci drenów, użycie terenu zmierzające do oszacowania UH dla zlewni niekontrolowanych (Littlewood, 2002). Ze względu na małą liczbę parametrów i swoją fizyczną interpretację struktura dwóch równoległych zbiorników jest powszechnie wykorzystywaną koncepcją modelu opad-odpływ. Stanowi ona punkt wyjścia dla modelu PDM (Moore, 2007), modelu Classic (Crooks & Naden, 2007), modelu

Jakemana (Szilagyi, 2004), metody pierwiastkowej separacji (Parmentier et al., 2003). Inną powszechnie wykorzystywaną strukturą modeli zbiornikowych przedstawiającą rozdział na zasilanie powierzchniowe i podziemne jest model infiltracji Diskina-Nazimova (Diskin & Nazimov, 1995) oraz jego połączenie z kaskadą Nasha (Nash Cascade Diskin-Nazimov), co analizują Onyando i inni (2003).

Znaczenie konceptualnego modelu kaskady zbiorników liniowych Nasha i rozwinięcia tej koncepcji do równoległej kaskady Diskina nie może zostać przecenione. Te modele były i są szeroko stosowane w matematycznym modelowaniu zlewni (Kurnatowski, 2017). Większość modeli prognostycznych stosowanych we Francji to skupione modele konceptualne (Moussa & Chahinian, 2009). Program HEC-HMS wyróżnia osiem możliwych metod wyznaczenia odpływu bezpośredniego, z których aż sześć stanowi grupę skupionych modeli UH, m.in. model Clarka, model Snydera, SCS UH model (Feldman, 2000). Praktyczne wykorzystanie modelu zbiornika liniowego zostało opisane m. in. w pracach (Fenicia *et al.*, 2006) oraz (Diskin *et al.*, 1973). Dla potrzeb matematycznego modelowania zlewni model pojedynczego zbiornika jest jednak mało użyteczny, gdyż nie uwzględnia czasowego przesunięcia generowanego hydrogramu. Opóźnienie odpływu, tzw. „lag time”, jest ważnym elementem modelowania relacji opad-odpływ. Banasik i Barszcz (2004) definiują je jako odległość na osi czasu między środkami geometrycznymi hietogramu opadu efektywnego i hydrogramu bezpośredniego. Do wyznaczenia wielkości lag time wykorzystuje się wzory empiryczne oparte na charakterystyce zlewni.

Chociaż systemy i procesy hydrologiczne są nieliniowe, było wiele prób modelowania ich za pomocą metod liniowej matematyki. W przypadku, gdy dostępne są dane dla kilku zdarzeń i można znaleźć model liniowy, który zgodnie z określonym kryterium najdokładniej symuluje relacje między tymi danymi, obecnie zakłada się model liniowy uśredniony, optymalnie pokrywający wszystkie zachowania nieliniowe występujące dla różnych zaobserwowanych warunków. Działaniem umożliwiającym uwzględnienie nieliniowości zachodzących procesów jest zastosowanie modelu, który chociaż pozostaje liniowy dla jednego zdarzenia, może zmieniać się między zdarzeniami. Można to osiągnąć uzależniając wartość k od stałej retencji S w równaniu dynamiki (stanu) i przyjmując odpowiednie przedziały stosowności kolejnych wyznaczonych wartości k_i . (Kundzewicz & Napiórkowski, 1986)

2.6 Wyznaczenie opadu efektywnego i problem jakości dostępnych danych

Niezależnie od przyjętej struktury modelu relacji opad-odpływ w większości przypadków głównym problemem wydaje się określenie opadu skutecznego (Parmentier *et al.*, 2003; Singh, 1976). Odpływ spowodowany opadem może być generowany przez kombinację odpływu przewyższającego infiltrację, odpływu ze stref saturacji, podpowierzchniowego odpływu opadowego i bezpośredniego opadu do odbiornika. Jakość danych opadowych zdaje się więc być głównym ograniczeniem oszacowania odpływu (van Dijk, 2010). Mała liczba posterunków opadowych uniemożliwia jednak dokładną przestrzenną charakterystykę występujących opadów. Powstały niedobór przestrzennych informacji pomiarowych można uzupełnić stosując algorytmy przestrzennej interpolacji opadów atmosferycznych. (Szczepanek, 2003).

Nadrzędnie rozpatrywanymi czynnikami przy wyznaczaniu opadu efektywnego są infiltracja i ewaporacja. Takie podejście zastosowane jest między innymi w modelu PDM (Moore, 2007) oraz w pracy Singha (1976). Uwzględnienie zmiennej intensywności opadu w modelu Diskina-Nazimova umożliwia określenie dynamicznego wskaźnika infiltracji, co ma istotny wpływ na wielkość generowanego odpływu bazowego (Diskin & Nazimov, 1996). Znajduje to swoje potwierdzenie w wielu pracach (Gironás *et al.*, 2009; Balistrocchi & Bacchi, 2011; van der Kloet *et al.*, 1977). O uzasadnionym pominięciu wielkości ewaporacji podczas symulacji pojedynczych wydarzeń wezbraniowych wspominali w swojej pracy Moussa i Chahinian (2009). Rozważania Gironása i innych (2009) oraz Zhanga i Savenije'a (2005) wykazały, że ważną rolę w bilansie wodnym odgrywa również intercepcja, która nierzadko bywa pomijana w opisach hydrologicznych.

Ważniejsze jednak od analizy dynamiki interakcji procesów generujących odpływ jest uwzględnienie przestrzennej różnorodności opadu (Schuurmans & Bierkens, 2007). Intensywność opadów zmienia się w sposób ciągły czasowo i przestrzennie, jednak w modelach hydrologicznych zazwyczaj zakłada się uproszczenie w postaci pojedynczych wartości parametrycznych dla intensywności czasowej i przestrzennej. Takie podejście powoduje, że wyjście modelu nie odzwierciedla efektu czasowego i przestrzennego zróżnicowania danych opadowych na wejściu (Ogden, 1993). W niektórych przypadkach przestrzenny rozkład dziennego opadu znacząco oddziałuje na odpływ, przestrzenny rozkład poziomu wód podziemnych i poziom wilgotności gleb w zlewni (Schuurmans & Bierkens, 2007). Schuurmans i Bierkens twierdzą, iż obiecującą metodą umożliwiającą uchwycenie

zmienności opadu jest wykorzystanie danych zarejestrowanych przez radar meteorologiczny, którego wydajność jest równa gęstej sieci posterunków opadowych.

Pomimo iż przestrzenna zmienność opadu jest znacząca dla odpływu, opad w modelach hydrologicznych małych zlewni zazwyczaj jest przyjmowany jako jednolity. Jest to najczęściej spowodowane brakiem danych, które ograniczają się niekiedy do pomiaru z jednego posterunku opadowego (Schuurmans & Bierkens, 2007; Sikorska *et al.*, 2012; Singh, 1976). Przestrzenne zróżnicowanie opadu, jak i czułość modeli hydrologicznych na te zróżnicowanie jest zatem często pomijane w rozważaniach hydrologicznych. Takie podejście może prowadzić do błędów w wartościach parametrów modeli, które będą dostosowywane, aby zniwelować błędy w wejściowych danych opadowych (Schuurmans & Bierkens, 2007). Mała liczba (lub nawet brak) obserwacji kluczowych zmiennych wpływających na procesy hydrologiczne ogranicza zatem możliwość zastosowania modeli opad-odpływ (Bardossy, 2006).

Powszechnymi metodami oszacowania opadu efektywnego dla modeli pojedynczych wydarzeń są: SCS, wskaźnik strat początkowych i stałych, model Greena i Ampta (Feldman, 2000; Karnieli *et al.*, 1994). Dla ciągłej generacji opadu skutecznego często wykorzystywany jest model SMA (Feldman, 2000).

2.7 Kalibracja parametrów modelu zlewni

Kalibracja modelu to proces oszacowania parametrów danego modelu, tak aby wyniki uzyskane przez model z tymi parametrami były zgodne z rzeczywistymi, w kontekście arbitralnym zastosowanej funkcji celu (Diskin & Pegram, 1987). Modele stanowią kombinację struktury opisującej połączenia między stanami zmiennych a parametrami. Te parametry w zależności od koncepcji twórcy modelu mają uzasadnienie fizyczne lub pełnią funkcję „gałki regulacyjnej” (Todini & Biondi, 2017). Choć wydaje się, że specyfikacja, czyli odpowiedni dobór struktury i funkcji transformujących odgrywa kluczową rolę w procesie modelowania to okazuje się, że modele konceptualne są wrażliwe na proces optymalizacji. Funkcja celu zastosowana na etapie identyfikacji determinuje kształt hydrogramów wynikowych w stopniu większym niż zastosowana struktura modelu (Byczkowski, 1996).

Tradycyjna kalibracja pozwalała oszacować wartości parametrów, jeśli żadne założenia ich natury nie zostały przyjęte, lub dostosować ich wartość, jeśli parametry mają w założeniu fizyczne znaczenie, w celu uzyskania optymalnego wyjścia modelu na tle korespondujących pomiarów zgodnie z przyjętą funkcją celu (Crooks & Naden, 2007). Jak wspomniano w rozdziale 2.1, modele mogą zawierać zarówno składową deterministyczną i stochastyczną,

dlatego trudno jest określić parametry komponentu deterministycznego przy jednoczesnym wystąpieniu szumów (Dooge, 1974a). Metody umożliwiające uzyskanie zgodności wyników symulacji z danymi pomiarowymi, mogą być mało użyteczne przy wyznaczaniu odpowiedzi deterministycznej, gdyż wskutek swej efektywności dopasowują zarówno szумы w danych, jak i sygnał podstawowy (Dooge, 1974a, b). Fakt, że rzeczywisty wybór optymalnych wartości parametrów może być dokonany przez więcej niż jedną procedurę optymalizacji i że wyniki otrzymane różnymi metodami nie zawsze będą takie same, prowadzi do wniosku, że kalibracja modelu to wciąż sztuka.

Diskin i Pegram (1987) stwierdzili, że procedury minimalizacji funkcji zwykle nie działają dobrze, gdy wartości początkowe parametrów są dalekie od optymalnych, dlatego należy używać metod optymalizacyjnych w oparciu o doświadczenie i wstępną analizę. Niepewności w oszacowaniu parametrów związane są z wstępnymi założeniami natury modelu, parametrami, błędami obserwacji i podejściem estymacyjnym zastosowanym w fazie kalibracji parametrów (Todini & Biondi, 2017). Obecnie tendencje kalibrowania ukierunkowane są bardziej w stronę uzyskania gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wartości parametrów uwzględniającej malejące niepewności założeń modelu, wymaganych uproszczeń, błędów danych, niż znalezienie „optymalnej” wartości parametrów. Takie podejście zgodne jest z bayesowskim wnioskowaniem statystycznym, które w odróżnieniu od podejścia klasycznego oprócz wyników zaobserwowanych w próbie umożliwia wykorzystanie informacji *a priori* dotyczących rozważanego problemu (Todini, 2007). Estymacja parametrów w tym rozumieniu jest sposobem oceny i redukcji niepewności predykcyjnej modelu. Ważne jest zatem, aby dostrzec różnicę między kalibracją i oszacowaniem prawdziwych wartości parametrów (o ile istnieją). Zdaniem Todiniego i Biondiego (2017) kalibracja ma na celu dostosowanie wartości parametrów w celu dopasowania wyjścia modelu do obserwacji, podczas gdy estymacja polega na znalezieniu prawdziwej wartości parametrów, które niekoniecznie spowodują poprawę jakości modelu. Na etapie kalibracji/estymacji należałoby zatem określić, co jest głównym celem: „oszacowanie parametrów” czy „predykcja” modelu (Todini, 2007). W literaturze obecne są przykłady zastosowania zarówno kalibracji, jak i estymacji przedziałów wartości (Flügel & Lüllwitz, 1993).

Obecnie większość badań hydrologicznych obejmuje modelowanie w celu prognozowania pewnych wielkości fizycznych. Wyniki takiego modelowania muszą zostać wyrażone w sposób ilustrujący, jak dobrze model się zachowuje (ang. *goodness of fit*), zatem będący w pewnym sensie miarą oceny przydatności modelu (Rodda & Little, 2015). Taka miara

umożliwia również ocenę udoskonalenia podejścia do modelowania poprzez dostosowanie wartości parametrów modelu, modyfikacje konstrukcyjne modelu, włączenie dodatkowych informacji obserwacyjnych oraz reprezentację ważnych cech przestrzennych i czasowych, by porównać obecne wyniki modelowania z poprzednimi (Krause *et al.*, 2005). Przyjmuje się jednak, iż nie ma powszechnie sformułowanych i obowiązujących miar, które wynikają z kryteriów weryfikacji zgodności modelu z rzeczywistością (Zhang & Savenije, 2005). Ozga-Zielińska i Brzeziński (1997) w swojej pracy zastosowali cztery możliwe rodzaje kryteriów i miar. Ich fundamenty stanowią: charakterystyki statystyczne, funkcja celu, entropia oraz analiza szeregów czasowych. Dodatkowo istnieją również graficzne sposoby oceny jakości modelowania, wśród których najbardziej podstawowe podejście polega na porównaniu symulowanych i obserwowanych hydrogramów (Krause *et al.*, 2005).

Wybór funkcji celu oraz miary wydajności najczęściej jest subiektywny i zależny od celu zastosowania modelu (Zhang & Savenije, 2005). Przez długi czas nie było znane jaki efekt poszczególne funkcje celu mogą wywołać na wartościach parametrów modelu lub jego czułości (Sefe & Boughton, 1982). Powszechnie stosowanymi metodami pomiaru efektywności modelu jest pomiar błędu systematycznego oraz pomiary wariancji. Dooge (1974a) wskazał na potrzebę intensywnych badań w zakresie optymalizacji parametrów, zwłaszcza w kwestii badania wpływu kryteriów na działanie modelu i wartość jego parametrów.

Prawdopodobnie najpowszechniejszą miarą używaną do wyrażenia jakości modelu i kalibracji jest współczynnik Nasha-Sutcliffe'a (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) oraz pierwiastek średniego błędu kwadratowego (RMSE). Znajduje to swoje uzasadnienie w licznych pracach m.in.: Littlewooda (2002), Crooksa i Nadena (2007), Chowdary'ego i innych (2012), Sikorskiej i innych (2013), Spady i innych (2015). Zastosowanie współczynnika NSE do analiz pojedynczych wydarzeń jest również rekomendowane przez Komitet Zadaniowy ASCE (Onyando *et al.*, 2003). Przeprowadzając analizę błędów systemowych bias w odniesieniu do różnorodnych charakterystyk hydrogramów dostrzega się ściśle ukierunkowane skutki zastosowania poszczególnych kryteriów estymacji, przykładowo model kalibrowany w celu uzyskania zgodności objętości wezbrań, nie symuluje dobrze kształtu hydrogramu lub wartości szczytowej. Konwencjonalne funkcje celu, jak NSE i RMSE, mają skłonność do kładzenia nacisku na wysokie przepływy i konsekwentnie są nadczułe na ekstremalne i odstające wartości. Z drugiej strony średni bezwzględny błąd procentowy (MAPE) jest wrażliwy na niskie przepływy (Moussa & Chahinian, 2009). O różnorodności wskaźnikowych kryteriów kalibracji świadczą wykorzystane w pracy

Diskina i Pegrama (1987) metody jakości dopasowania: MAE (średni błąd bezwzględny), RMSE, WMAE (średni ważony błąd bezwzględny), ME (maksymalny błąd bezwzględny), różnica wartości szczytowych. Program HEC-HMS wyróżnia cztery funkcje celu: suma błędów bezwzględnych (wielkości szczytu, objętości fali i czasu od początku symulacji do szczytu), suma kwadratu błędów, procentowy błąd szczytu, ważony RMSE (Feldman, 2000).

Aby uniknąć stronniczości, zaleca się ocenę wydajności modelu w odniesieniu do kilku funkcji celu, a nie do pojedynczej funkcji (Karnieli *et al.*, 1994). Analiza 10 funkcji celu przeprowadzona przez Sefe'a i Boughtona (1982) wykazała, że zachodzą związki korelacyjne między trzema zastosowanymi funkcjami celu: NSE, współczynnikiem zmienności (CV), niezależną od liczby danych funkcją zaproponowaną przez Diskina i Simona, podczas gdy pozostałe nie wykazują zależności korelacyjnych. Wykonana przez Nourani'ego (2008) optymalizacja parametrów modelu Nasha przy użyciu metod: momentów, najmniejszego błędu kwadratowego, maksymalnego podobieństwa, maksymalnej entropii i bazująca na sztucznej sieci neuronowej wykazała, że algorytm genetyczny oraz metoda najmniejszego błędu kwadratowego pozwalają osiągnąć najwyższe wartości współczynnika korelacji i NSE. W procesie kalibracji parametrów algorytm genetyczny można uznać za solidne podejście do rozwiązywania problemów, które nie są jeszcze w pełni scharakteryzowane lub zbyt złożone, aby umożliwić pełną charakterystykę, ale dla której analityczna ocena jest dostępna. Szilagyi (2003) wykazał, że zmiana systemu dyskretyzacji z pulsowego (ang. *pulse data system*) na system próbkowy (ang. *sample data system*) zwiększa wartości NSE i RMSE, gdyż system próbkowy uwzględnia ciągłą liniową zmienność danych w analizowanych przedziałach czasowych.

W większości zastosowań na świecie modele są używane do reprodukcji całego kształtu hydrogramu, spełniając więcej niż jedno kryterium dopasowania (Moussa & Chahinian, 2009). Wiele badań poświęcono więc problemowi decyzji wielokryterialnej (Littlewood, 2002; Zhang & Savenije, 2005). Różne cele definiują wydajność modelu w odniesieniu do różnych aspektów symulacji i można je wykorzystać, aby wymusić różne pożądane zachowanie symulacji w celu dopasowania różnych mierzonych zmiennych. Jedną z najczęściej stosowanych metod do rozwiązywania optymalizacji wielokryterialnej jest przetransformowanie problemu wielocelowego na serię problemów jednocelowych. Gdy posiadany jest zestaw rozwiązań odpowiadających poszczególnym celom – kryteriom, ostateczne rozwiązania mogą zostać oszacowane przy użyciu frontu Pareto lub powierzchni Pareto (Moussa & Chahinian, 2009).

W pracy Fenicii i innych (2006) zastosowano wielokrokową kalibrację, w której parametry są kalibrowane na oddzielnych etapach według wielu kryteriów. Metodologia polega na początkowej kalibracji parametrów modelu w celu dopasowania niskich wartości przepływu, a następnie przeprowadzeniu ponownej kalibracji niektórych parametrów w celu dopasowania wysokich przepływów. Podobna propozycja sekwencyjnej kalibracji przeprowadzonej w trzech modułach przy uwzględnieniu zarówno technik automatycznych, jak i ręcznych została przedstawiona w pracy Crooksa i Nadena (2007).

Różne jednocelowe i wielocelowe funkcje zostały zastosowane przez Mousse i Chahiniana (2009) do kalibracji skupionych modeli relacji opad-odpływ na zlewni rzeki Gardon. Wyniki pokazują, że wartości kalibrowanych parametrów zależą od zastosowanych kryteriów. Żaden unikatowy zestaw parametrów nie satysfakcjonował wszystkich zastosowanych kryteriów jednocześnie. Podobne wnioski wynikają z pracy Krausego i innych (2005). Wykazali oni, że stosując kryterium NSE i współczynnik determinacji R^2 ocenie podlega jedynie dynamika generowanych wyników, pomijając ilościowe określenie błędu. Dla dokładnej oceny modelu zalecili zatem zastosowanie dodatkowych miar, takich jak pomiary objętości bezwzględnej i względnej lub błąd średniokwadratowy. W celu pozyskania informacji w zakresie zgodności wysokich przepływów, niskich przepływów, wartości objętości i predykcji van Esse i inni (2013) wykorzystali odpowiednio 4 kryteria estymacji: NSE, NSE bazujący na odwrotności przepływów, relatywny błąd objętości, stosunek odchylenia standardowego przepływu obserwowanego i symulowanego. Zgodność szczytu fali i błąd objętości zostały wykorzystane również w pracy Karnieli'ego i innych (1994).

Fovet i inni (2015) stwierdzili, że zamiast zwiększania liczby funkcji celu, które muszą być spełnione, alternatywą może być zastosowanie niektórych funkcji celu opartych na kombinacji różnych zmiennych. Mańko i Laskowski (2018) przedstawili ideę wielokryterialnej metody estymacji parametrów modeli łączącej w sposób wagowy błąd wartości szczytowej fali, czasu wystąpienia szczytu fali oraz objętości powstałego wezbrania.

Bardossy (2006) w swojej pracy wskazał na dwie cechy estymowanych (kalibrowanych) parametrów: niepewność samych parametrów oraz brak unikalności – różne zestawy możliwych wartości parametrów mogą prowadzić do podobnych wyników modelowych. Bardzo często przy wyznaczaniu trzech parametrów jednocześnie wiele kombinacji parametrów prowadzi do jednakowego wyjścia modelu, co powoduje problemy z automatycznymi algorytmami estymacji parametrów (Parmentier *et al.*, 2003). Rosnącym zaufaniem cieszy się zatem ręczna kalibracja bazująca na obserwacji wizualizacji

modelowanych hydrogramów, wykorzystując automatyczną optymalizację tylko na dalszych udoskonaleniach (Zhang & Savenije, 2005).

Opisana przez Parmentiera i innych (2003) metoda zmniejszenia ekwifinalności polega na przypisaniu parametrom fizycznie możliwych wartości. Podobnym zabiegiem narzucenia fizyczności na parametr jest wprowadzenie w fazie estymacji pewnych uzasadnionych ograniczeń. Wymaga to specjalnej uwagi, gdyż w wyniku nieprawidłowych ograniczeń wariancja zmiennej zostanie zredukowana kosztem rosnącej stroniczości symulacji (Todini & Biondi, 2017).

Innym sposobem zmniejszenia ekwifinalności jest przeprowadzenie analizy czułości modelu. Analiza czułości jest pożytecznym narzędziem do oceny wpływu perturbacji parametrów na wyjście modelu. Dostępnych jest wiele technik analizy czułości i można je podzielić na trzy grupy: przesiewanie współczynników, analiza czułości w skali lokalnej i analiza czułości w skali globalnej. Test czułości amplitudy Fouriera (*ang. Fourier amplitude sensitivity testing*) i metoda Monte Carlo są najpopularniejszymi podejściami analizy czułości przy konceptualnym modelowaniu opad-odpływ (Zhang & Savenije, 2005; Rodda & Little, 2015). Nieczułość parametrów odnosi się do sytuacji, w której zmiana wartości jednego lub kilku parametrów nie wpływa na wartość funkcji celu, co nie oznacza jednak, że wartości symulacji się nie zmieniają lub że parametr jest zbędny. Wówczas zachodzi możliwość nadania takim parametrom pewnej ustalonej wartości zmniejszając wymiarowość przestrzeni poszukiwań dla następnych kalibracji modelu. Szczególną uwagę należy zwrócić na wybór funkcji celu do analizy czułości modelu, gdyż niektóre funkcje celu mogą wywierać mały nacisk lub nawet nie uwzględniać aktywności poszczególnych, niekiedy znaczących, parametrów, wskazując tym samym na ich małą istotność. Wówczas analizę czułości należy przeprowadzić na różnych funkcjach celu (Jacquin & Shamseldin, 2009). Analiza czułości parametrów przeprowadzona przez Jacquina i Shamseldina uwzględniała kilka miar: NSE, błąd objętości i błąd wartości szczytowych. Wyniki pokazują, że parametry modelu zależą zarówno od typu zlewni jak i miar użytych do oceny wydajności modelu.

Bardossy (2007) stwierdził, że zestawy parametrów modeli, które prowadzą do dobrych rezultatów modelu mogą mieć interesujące wewnętrzne zależności. Pary parametrów kaskady Nasha, dla których osiągnięto dobrą wydajność, leżą wzdłuż krzywej hiperbolicznej wskazując, że niepewność jest głównie spowodowana kompensacją; dla dużego zakresu parametrów k można znaleźć mniej lub bardziej wyjątkowy parametr n , tak aby model utrzymał wysoką jakość. Nie zaleca się zatem szukać powiązania indywidualnych wartości parametrów z właściwościami zlewni, lecz rozpatrywać zestawy parametrów jako wektory

i w takiej formie odnosić je do właściwości zlewni. Do podobnych wniosków doszli Jacquín & Shamseldin (2009) postrzegając obecność wielu lokalnych optimumów odpowiedzi modelu jako rodzaj interakcji parametrów w skali globalnej. Wówczas niektóre parametry, choć nie mają bezpośrednio wpływu na wydajność modelu, mogą mieć silne powiązania z innymi parametrami.

Niedobór danych i nadparametryzacja prowadzą do ekwifinalności oraz dużej niepewności predykcji. Są to pospolite bariery w efektywnym modelowaniu hydrologicznym. Problem może zostać złagodzony przez wcześniejsze narzucenie wymiarowości (przestrzeni) parametrów używając regionalizacji parametrów (Bulygina *et al.*, 2009). Można założyć, że zlewnie o podobnych charakterystykach wykazują podobne zachowanie hydrologiczne, zatem mogą być modelowane przy użyciu podobnych parametrów modelu. Zdaniem Bardossy'ego (2006) regionalizacja hydrologicznych parametrów modelu na podstawie charakterystyk zlewni jest zatem wiarygodna. Wyróżnia się regionalizację bezpośrednią polegającą na przyjęciu wartości parametrów sąsiedniej zlewni oraz transfer funkcji związku parametrów z charakterystykami hydrologicznymi zlewni. Metodami wykorzystującymi regionalizację do prognozowania powodzi w zlewniach niekontrolowanych są LUTZ i SCS (Patil, 2008). W literaturze prezentowane są stanowiska zakładające, że parametry skupionego modelu konceptualnego są mniej więcej równoważne połączonemu wpływowi cech zlewni, takich jak współczynnik filtracji lub pojemność polowa. Wartości parametrów można zatem wyznaczyć przy użyciu funkcji empirycznych uwzględniających odpowiednie charakterystyki zlewni (Patil, 2008). Dla modelu Weckermanna stworzone zostały wzory umożliwiające obliczenie wartości parametrów na podstawie odległości od rozpatrywanego przekroju do najdalszego punktu zlewni i spadku rzeki (Banasik *et al.*, 2000).

2.8 Niepewności i źródła błędów

Niepewność jest często klasyfikowana jako aleatoryczna lub epistemiczna. Aleatoryczność jest zasadniczą, nieuniknioną nieprzewidywalnością, epistemiczna niepewność odzwierciedla natomiast brak wiedzy lub nieadekwatność modeli do reprezentowania rzeczywistości. W kontekście dowolnej struktury modelu epistemiczne niepewności odnoszą się do procesu określenia parametrów oraz do samej struktury modelu (Rodríguez-Rincon *et al.*, 2015). Użytkowanie terenu jest główną cechą zlewni, która może się zmieniać z czasem i takie zmiany są hydrologicznie interesujące ze względu na ich wpływ na procesy odpływu. Rosnące w ostatnich dziesięcioleciach znaczenie zarządzania zlewniami uwypukliło potrzebę dysponowania odpowiednimi danymi oraz dokładnymi oszacowaniami

wielkości opadów i odpływów w zlewni. Pomimo lepszego zrozumienia przebiegu procesów w zlewni i rozwoju technologii komputerowej do symulacji i analizy związku między opadem a odpływem wciąż najczęściej wykorzystywane są modele konceptualne, gdyż zastosowanie dokładnego rozproszonego modelu hydrologicznego uwzględniającego równania mające fizyczne uzasadnienie jest bardzo ograniczone z powodu konieczności dysponowania informacjami, które często są niemożliwe do uzyskania nawet w badaniach naukowych (Nourani, 2008; Rodriguez-Rincon *et al.*, 2015). Złożoność procesu transformacji opadu w odpływ stanowi więc barierę, którą lepiej jest obejść za pomocą modeli konceptualnych.

Wiedza na temat jakości danych przepływu ma podstawowe znaczenie, gdy używamy danych do kalibracji modelu lub oceny jakości modelu. Pomiary odpływu na stacjach pomiarowych często podatne są na czynniki, które wpływają na dokładność danych i stacjonarność zapisu. Do takich czynników możemy zaliczyć zmianę metody pomiaru przepływu, zmianę reżimu rzeczno spowodowanego działalnością człowieka czy dokładność oszacowania szczytowych wartości wezbrań. Dane odpływu rzeczno są bardziej podatne na błędy, gdy metoda i lokalizacja pomiarów zmienia się podczas okresu rejestracji. Może to powodować nieciągłości danych w przypadku długoterminowych pomiarów przepływów (Crooks & Naden, 2007). Szczególną uwagę na jakość rejestrowanych danych i propagację błędów z nimi związanymi zwrócili już van der Kloet i inni (1977). Wyniki badań Sikorskiej i innych (2013) wskazują, że niepewność w kalibracji danych otrzymanych z krzywej konsumpcyjnej może mieć takie samo znaczenie jak niepewność samych parametrów modelu opad-odpływ. Modele krzywej konsumpcyjnej nie są wolne od błędów ze względu na kilka powodów: krzywa bazuje na danych przepływów, które są niepewne, gdyż są obliczane z modelu (równanie związku stan-przepływ); niepewność krzywej konsumpcyjnej jest spowodowana przez niepewność parametrów i ograniczenia strukturalne przyjętej funkcji krzywej konsumpcyjnej; tymczasowe warunki hydrologiczne, jak sezonowe zróżnicowanie wegetacji w przekroju, dynamika dna, rumowisko, zjawiska lodowe dodają niepewności obliczonym przepływom; w większości przypadków dane kalibracyjne krzywej konsumpcyjnej dotyczą normalnych warunków, podczas gdy prognozy powodziowe dotyczą wyjątkowych wydarzeń (krzywa musi być ekstrapolowana). Wykazano, że dane przepływów wyznaczone z krzywej konsumpcyjnej zawierają błąd rzędu 25% przy ekstrapolacji (Sikorska *et al.*, 2013). O wpływie błędnych krzywych konsumpcyjnych na jakość modelu wspominają również Fenicia i inni (2006).

Dowolny model opad-odpływ, niezależnie od tego, czy ma charakter empiryczny, koncepcyjny czy fizyczny, nie jest w stanie uchwycić dokładnego charakteru procesów

opadowo-spływowych. Jest to spowodowane brakiem dogłębnego zrozumienia fizyki procesów opad-odpływ oraz nieprecyzyjnego przedstawienia dostępnej wiedzy o procesach. W najlepszych przypadkach cechy hydrologiczne mierzone są w kilku punktach rozproszonych w danej zlewni, a następnie transponowane do skali modelu (podzlewnia, komórka siatki itp.) przyjmując równomierny rozkład wartości w zlewni. Ten nieunikniony efekt unifikacji cech hydrologicznych ogranicza możliwości modeli pod kątem uchwycenia niejednorodności. W celu uwzględnienia niezidentyfikowanych i niereprezentowanych procesów zachodzących w zlewni oraz niemierzalnej niejednorodności zmiennych hydrologicznych używane są różnorakie ogólne współczynniki (Patil, 2008).

Zdaniem Todini'ego (2007) celem prognozowania jest opisanie niepewności rzeczywistych przyszłych wartości stanu, odpływu, objętości odpływu itp., a nie opisanie niepewności predykcji generowanych przez modele prognostyczne. Niepewność, powszechnie wyrażona w warunkach funkcji gęstości prawdopodobieństwa, jest zależna od predykcji modelu, która jest rozumiana jako dostępna, choć niepewna wiedza o przyszłości. Należy wyraźnie rozróżnić niepewność predykcyjną od niepewności parametrów. Nieprecyzyjne informacje opadowe i deficyty struktury modelu w znacznym stopniu wpływają na niepewność predykcji. Zaletą prostych modeli jest możliwość odniesienia wartości parametrów do cech zlewni, z drugiej jednak strony deficyty strukturalne zwiększają niepewność. Niepewność predykcji bierze się z błędnej struktury modelu, niepewności parametrów, błędów pomiarowych oraz niepewnych danych wejściowych (Sikorska *et al.*, 2012; Sikorska, *et al.*, 2013). Problem dodatkowo potęguje ekwifinalność modeli hydrologicznych (Todini, 2007). Metodą umożliwiającą analizę niepewności przedstawionych w formie rozkładu prawdopodobieństwa jest statystyka bayesowska (Sikorska, *et al.*, 2012).

Z badań Sikorskiej i innych (2012) wynika, że błędy struktury modeli można zniwelować stosując mnożniki opadu, które zwiększają elastyczność modelu. Niepewności strukturalne modelu można jednak zmniejszyć, jeśli model konceptualny nie jest sztywno zdefiniowany a priori, lecz może być dostosowywany w odpowiedzi na obserwacje (Fenicia *et al.*, 2006). Fovet i inni (2015) wskazują, że znalezienie histeretycznych powiązań między liczbowymi charakterystykami hydrologicznymi zlewni pomaga szybko zidentyfikować, kiedy i dlaczego modele dają właściwe odpowiedzi z niewłaściwych powodów oraz mogą być używane jako deskryptor wewnętrznego funkcjonowania zlewni. Przeprowadzona przez nich analiza wartości wskaźników histerezy dla retencji i odpływu ukazała, dlaczego niektóre modele dają dobre rezultaty podczas kalibracji, a „nie zdają egzaminu” podczas walidacji.

Badania przeprowadzone przy użyciu nieliniowego modelu stochastycznego przez Srinivasa i Ramachandré (1984) wykazały, że struktura modelu składająca się z analogicznych równoległych subsystemów rozpatrujących na wejściu kolejne rzędy pochodnych opadów prowadzi do redukcji błędu uzyskiwanych prognoz.

2.9 Ocena porównawcza modeli opad-odpływ

Sztwyne podejście do modelowania zakłada, że pojedyncza struktura modelu może być opracowana do zastosowania w większości sytuacji, czego przykładem są modele HBV. Słabością tych modeli jest założenie niezmienności zawartych w nich procesów i ich matematycznego przedstawienia, które mogą nie odpowiadać aktualnie wiodącym procesom w poszczególnych analizowanych zlewniach. To skutkuje niedopasowaniem struktury modelu rzutującym na słabą pracę modelu. Alternatywą jest podejście elastyczne, które w odróżnieniu od posługiwania się „jednowymiarową pasującą do wszystkiego” strukturą modelu polega na stworzeniu struktury z ogólnych komponentów, takich jak zbiorniki i funkcje lag time, która najwierniej oszacuje istotne aspekty zachowania zlewni (van Esse *et al.*, 2013). Główną zaletą podejścia elastycznego jest zmniejszenie niepewności strukturalnej modelu. Spodziewa się, że wiodące procesy odpływu różnią się między zlewniami o różnym podłożu, klimacie, użyciu terenu, dlatego różne struktury modelu mogą lepiej się prezentować na różnych zlewniach (van Dijk, 2010).

W związku z rozwojem zarówno modeli sterowanych danymi, jak i opartych na fizyce zachodzi potrzeba obiektywnych ocen tych modeli przy użyciu pewnych ogólnie przyjętych testów wzorcowych (Todini, 2007). Wskazanie definitywnie wyższej jakości danego modelu względem innego jest jednak niemożliwe, gdyż porównania dokonuje się wyłącznie w zakresie ograniczonym przez przyjęte kryterium porównawcze. Singh (1976) wyróżnia dwa aspekty, jakie należy uwzględnić podczas porównania różnych struktur modeli: odwołać się do dokładności i do wydajności obliczeniowej. W takich okolicznościach może być zasugerowany pewien kompromis. Powszechnie stosowanymi kryteriami uwzględniającymi liczbę parametrów oraz dokładność wyników są kryterium informacyjne Akaike oraz bayesowskie kryterium informacyjne Schwarza (Kukier *et al.*, 2009). Interesującą propozycję oceny postępów w dziedzinie modelowania hydrologicznego zaprezentowali Andreassian i inni (2009) twierdząc, że więcej można się nauczyć z odrzucenia modelu niż z jego zaakceptowania; odrzucenie hipotezy, gdy jest właściwie postawiona, jest ważnym etapem w rozwoju i doskonaleniu modelu.

Według przeprowadzonej przez Singha (1976) analizy porównawczej kaskady Nasha i nieliniowego modelu fali kinematycznej Singha (CONV), model fali kinematycznej wierniej prognozuje całościowe hydrogramy, natomiast kaskada Nasha dokładniej generuje czas wystąpienia szczytu wezbrania. Odnotowano tendencję do zaniżania wartości szczytowych i czasu wystąpienia szczytu przy zastosowaniu modelu zbiornikowego oraz zawyżenia tych wartości przy użyciu modelu CONV. Ponadto stwierdzono większą podatność modelu fali kinematycznej na błędy danych wejściowych. Przyczyn tego zjawiska upatruje się w nieliniowej strukturze modelu (Singh, 1976). Refsgaard i Knudsen (1996) stwierdzili natomiast, że zarówno modele rozproszone bazujące na równaniach fizycznych, jak i konceptualne modele skupione zaprezentowały się równie dobrze w ich badaniach.

Zauważono, że proste modele wykorzystujące kilka parametrów niezbędnych do przedstawienia podstawowych wielkości charakteryzujących odpływ są korzystne ze względu na minimalizację problemu nadmiernej parametryzacji i związanej z tym niepewności w kalibrowaniu zestawu parametrów (Crooks & Naden, 2007). Jest to zgodne z teorią oszacowania parametrów głoszącą, że niepewność oszacowanych parametrów rośnie szybko wraz z liczbą parametrów (Spada *et al.*, 2015). Ponadto Chiew i inni (1993) wykazali, że proste struktury modeli konceptualnych mogą być użyte dla większych skal czasu (miesiące, lata). W pracy Perrina i innych (2001) wykazano natomiast, że złożone modele skupione przewyższają proste modele w kalibracji, ale nie weryfikacji. Przyczyn tego dopatruje się w błędach struktury modelu, braku spójności między dostępnymi i wymaganymi danymi oraz przesadnej złożoności skutkującej nadmierną liczbą parametrów, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu ich niepewności. Teza pracy van Dijka (2010) głosi, że model o najmniejszej liczbie parametrów gwarantuje najlepsze predykcje. W tej samej pracy wykazano przy użyciu NSE, że największą moc predykcyjną mają modele sześcioparametrowe, ale bardzo zbliżoną jakość można osiągnąć przy zastosowaniu trzech parametrów. Dwu- i trójparametrowe modele generują podobne wartości NSE. Analiza porównawcza modeli zbiorników liniowych przeprowadzona przez Mańko i Laskowskiego (2018) wykazała, że pięcioparametrowy model Weckermanna, którego wielkości parametrów zostały oszacowane na podstawie wzorów Ignara (Banasik *et al.*, 2000), zaprezentował się najgorzej przy graficznej ocenie modeli.

Przeprowadzone badania w zakresie wyznaczania i prognozowania wezbrań powodziowych na terenach tropikalnych wykazały, że równie satysfakcjonujące wyniki można uzyskać przy użyciu częściowo rozproszonego modelu Bochuma, jak i skupionego modelu infiltracji Diskina-kaskady Nasha (NCDI) (Onyando *et al.*, 2003). Reed i inni (2004)

również wykazali, że modele o parametrach skupionych generalnie są przynajmniej tak samo wydajne jak modele o parametrach rozproszonych.

Z pracy van Esse'a i innych (2013) wynika, iż dodanie funkcji lag time między zbiornikami lub zbiornika intercepcji nie zwiększa znacząco jakości modeli. Wykazano również, że modele matematyczne mają problem z symulacją dynamicznych skoków wartości przepływu – dużych, krótkotrwałych wzebrań, a zwiększenie stopnia skomplikowania struktury nie gwarantuje wzrostu jakości symulacji, choć złożone modele prezentują się niezadowolająco na mniejszej liczbie zlewni. Zarówno van Dijk (2010), jak i van Esse i inni (2013) zauważyli, że konceptualne modele hydrologiczne działają lepiej na większych zlewniach, które cechują się dużą wilgotnością gleb. Dla dużej liczby brytyjskich zlewni przeanalizowanych przy użyciu dobowych danych wykazano, że konfiguracja dwóch równoległych zbiorników UH lepiej przedstawia dynamikę przepływów rzecznych niż konfiguracja jednego zbiornika bądź dwóch zbiorników w szeregu (Littlewood, 2002).

2.10 Podsumowanie stanu badań

Analiza piśmiennictwa wykazuje, iż nie ma przyjętych reguł określających sposób tworzenia modeli relacji opad-odpływ. Liczne podejmowane próby opracowania rozwiązania problemu transformacji opadu w odpływ okazały się być ślepyimi uliczkami. Podczas gdy wykorzystanie równań matematyki fizycznej jest ograniczone ze względu na brak szczegółowej wiedzy w zakresie zachodzących w zlewni procesów hydrologicznych, całkowite pominięcie wiedzy o procesach przy tworzeniu struktury pozbawia model fizycznego znaczenia i sprowadza proces modelowania wyłącznie do rozważań matematycznych. Utrata fizycznej interpretacji modelu skutkuje wzrostem jego niepewności, dlatego zachodzi potrzeba poszukiwania rozwiązań o dużej stosowalności przy jednoczesnym zachowaniu fizycznego znaczenia modelu. Takim rozwiązaniem z założenia miały być modele konceptualne.

Konceptualne modele zbiornikowe mimo swoich ograniczeń stały się powszechnie stosowanym narzędziem do modelowania procesu opad-odpływ. Wykorzystywane są one zarówno jako proste modele skupione, jak i jako struktura elementarnych komórek rozbudowanych modeli rozproszonych i częściowo rozproszonych.

Proste struktury konceptualnych modeli skupionych nie uwzględniają przestrzennego zróżnicowania procesów; ich parametry często nie mają bezpośredniej fizycznej interpretacji, przez co ich użyteczność poddawana jest w wątpliwość. Zwiększenie fizycznej interpretacji modeli konceptualnych miało się dokonać poprzez przyjęcie rozbudowanych struktur

o parametrach przestrzennie rozproszonych. Niestety takie podejście również nie poskutkowało osiągnięciem zamierzonego celu, gdyż w wyniku dużej liczby parametrów niemożliwych do określenia a priori, na przekór założeniu ztraca się fizyczne znaczenie modelu.

Możliwość określenia wartości parametrów na podstawie badań terenowych bądź charakterystyk hydrologicznych zlewni znacznie zwiększa fizyczną interpretację modeli. Zazwyczaj jednak parametry oszacowuje się w procesie optymalizacji za pomocą matematycznych funkcji celu (nawet w przypadku wstępnego określenia wartości parametrów na podstawie analiz fizyko-geograficznych). Takie rozwiązanie niestety uwypukla jedną ze znaczących wad struktur konceptualnych modeli hydrologicznych jaką jest ekwifinalność, czyli otrzymanie bardzo zbliżonego wyniku symulacji przy różnych kombinacjach wartości parametrów. Określenie właściwych wartości parametrów jest wówczas niemożliwe i zachodzi konieczność przeprowadzenia dalszych analiz, najlepiej odnosząc się do charakterystyk hydrologicznych zlewni. Ogólnie stwierdza się, że odpowiedni dobór parametrów modelu i powiązane z nim funkcje celu zastosowane w procesie optymalizacji mają większy wpływ na uzyskiwane wyniki niż struktura stosowanego modelu, dlatego dostrzega się potrzebę dalszych badań w zakresie estymacji parametrów. Świadczy o tym wiele prac, np. van Esse i inni (2013), Moussa i Chahinian (2009), Fovet i inni (2015).

W wielu pracach wykazano, że wyniki symulacji różnią się w zależności od zastosowanego kryterium estymacji parametrów. Skuteczność procesu optymalizacji zależy jednak przede wszystkim od jakości posiadanych danych pomiarowych. Błędy pomiarów, jak i niedobór danych pomiarowych są więc głównymi problemami wszelkich analiz hydrologicznych. Nie tylko ograniczają one wybór struktury modelu, lecz również znacząco wpływają na jakość tworzonych modeli.

Z przeprowadzonych analiz porównawczych wynika, że konceptualne modele skupione ze względu na małą liczbę wymaganych do identyfikacji danych przewyższają modele rozproszone zakresem możliwości zastosowania. Mimo znacznie uproszczonej struktury jakość ich symulacji nie jest gorsza od tej uzyskanej z modeli rozproszonych (Refsgaard & Knudsen, 1996; Reed *et al.*, 2004), dlatego rozwój modeli skupionych wciąż trwa, czego przykładem jest przedstawiona przez Kurnatowskiego (2017) koncepcja modelu zbiorników zatopionych.

Reasumując można stwierdzić, że w modelowaniu transformacji opadu w odpływ braki wiedzy o procesach hydrologicznych zastąpione zostały czysto matematycznymi rozważaniami, które poza utratą fizycznego znaczenia modelu doprowadziły do powstania

nowych problemów, jak ekwifinalność i nadparametryzacja modelu. Podejście to, choć nie jest idealne, obecnie wydaje się jedynym środkiem do uzyskania narzędzia umożliwiającego z dostatecznie akceptowalną skutecznością symulację transformacji opadu w odpływ.

3. Metodyka badawcza

3.1 Sformułowanie problemu oraz podstawowy opis metodyki

Głównymi celami podjętych badań są ocena kryteriów estymacji parametrów modeli konceptualnych relacji opad-odpływ pod kątem ich wpływu na przebiegi hydrogramów wynikowych modeli oraz wskazanie kryteriów estymacji parametrów umożliwiających uzyskanie maksymalnego podobieństwa między przebiegami rzeczywistych i symulowanych hydrogramów wyjściowych zlewni. Cele te realizowano poprzez wyznaczenie kolejnych zestawów wartości parametrów konceptualnych modeli zbiornikowych otrzymanych w wyniku identyfikacji przeprowadzonej za pomocą różnych kryteriów estymacji, a następnie obserwację uzyskanych hydrogramów wynikowych. Ponieważ panuje pełna dowolność zarówno w wyborze funkcji celu, jak i w opracowywaniu nowych funkcji celu, nie sposób przeanalizować je wszystkie. Badania przeprowadzono dla grupy 15 kryteriów estymacji cechujących się możliwie różnym oddziaływaniem na przebieg generowanych hydrogramów, wśród których znaczną część stanowią powszechnie uznane i stosowane kryteria estymacji, jak: różnica wartości szczytowych, NSE czy R^2 . Struktury modeli konceptualnych wykorzystane w pracy obejmują: model pojedynczego zbiornika liniowego, kaskadę Nasha, kaskadę zbiorników zatopionych (SC2), model Diskina, dwugałęziowy model kaskad: Nasha i SC2. Szczegółowy opis zastosowanych kryteriów i modeli zawarty jest w rozdziałach 3.2. i 3.3.

Prace badawcze przeprowadzono dla pięciu polskich rzek. Przy ich wyborze kierowano się stosunkowo niewielką powierzchnią zlewni $A < 200 \text{ km}^2$, niskim wpływem czynników zaburzających naturalny proces formułowania wezbrania na skutek występujących opadów, obecnością posterunku opadowego w niewielkiej odległości od przekroju zamykającego zlewnię oraz odmiennością typów hydrologicznych rzek. Wybrane obiekty hydrologiczne to zlewnie rzek: Pasłęki, Żebrówki, Brynicy, Czerwonej Wody i Piotrówki. Ich charakterystyka została przedstawiona w rozdziale 3.6. Dla każdej z tych rzek wybrano sześć wydarzeń wezbraniowych, które modelowano przy użyciu konceptualnych modeli hydrologicznych za pomocą 15 różnych kryteriów estymacji. Łącznie wykonano więc 450 symulacji. Dane niezbędne do przeprowadzenia prac, tj. wielkości przyptywu oraz wysokości opadów pozyskano z publicznej bazy Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB).

Średnią wysokość opadów atmosferycznych w zlewni określono na podstawie pojedynczego posterunku opadowego. Rozwiązanie to jest często praktykowane w rozważaniach hydrologicznych, gdyż wynika z małej liczby istniejących punktów

pomiarowych (Schuurmans & Bierkens, 2007; Sikorska *et al.*, 2012). Zastosowali je w swojej pracy m.in. Sefe i Boughton (1982). Do wyznaczenia wysokości opadu efektywnego wykorzystano metodę chwilowego współczynnika spływu α_p , dokładnie omówioną w rozdziale 3.5. Parametr nachylenia krzywej współczynnika odpływu m wyznaczano iteracyjnie dla każdego wydarzenia. Mnożąc kolejne dobowe wysokości opadu przez odpowiednie wartości współczynnika odpływu, odpowiadające danemu dniowi, otrzymano dobowe objętości odpływu powierzchniowego, które liczbowo równe są opadowi efektywnemu.

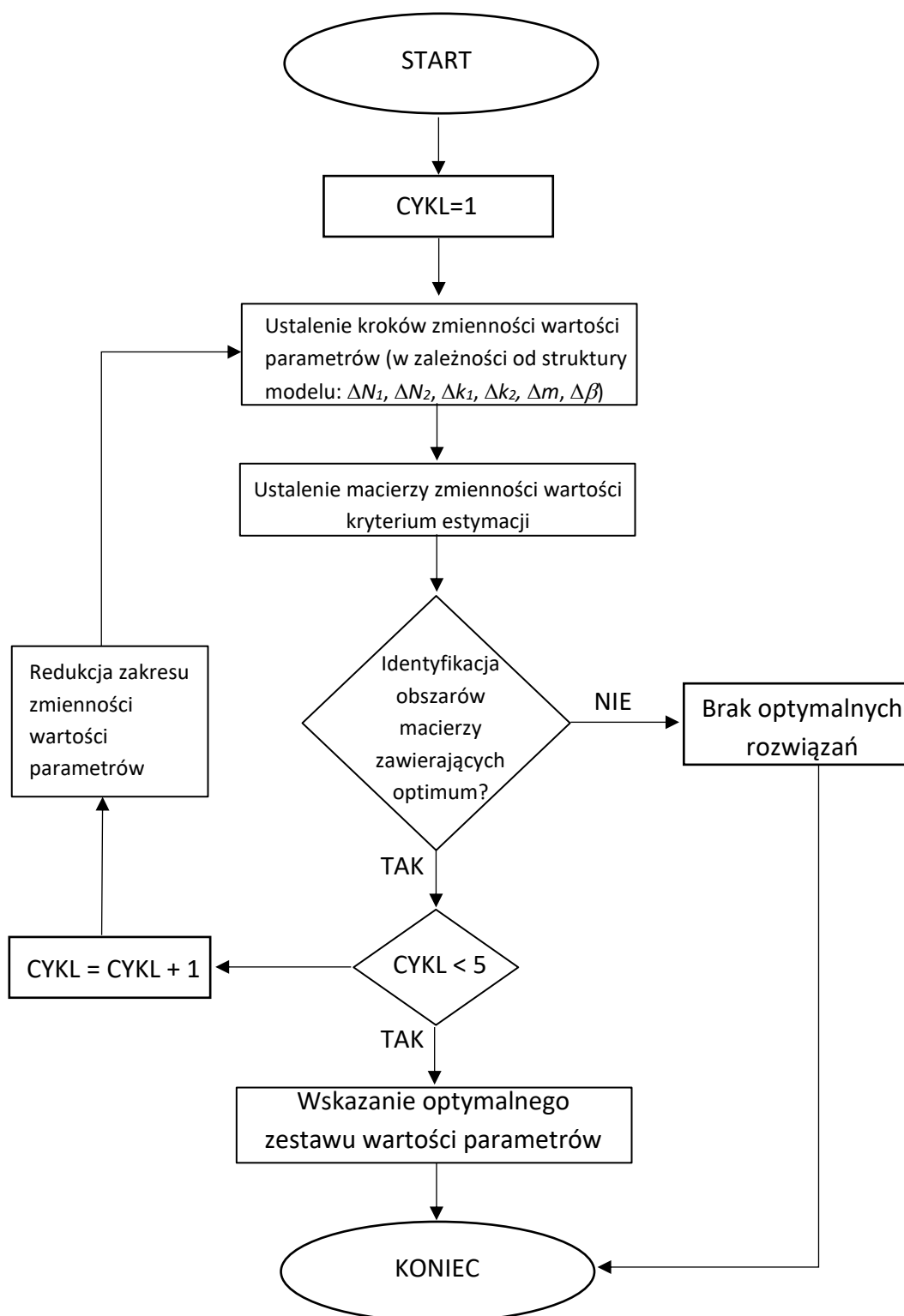
$$P_E(t_i) = \alpha_p \cdot P(t_i) \quad (7)$$

gdzie: $P_E(t_i)$ i $P(t_i)$ – wysokość opadu efektywnego i wysokość opadu całkowitego w chwili t_i , α_p – współczynnik odpływu powierzchniowego.

Podstawę obliczeń stanowiła macierzowa forma całki splotu:

$$\{y_m\} = [I_E]\{u\} \quad (8)$$

gdzie: $[I_E]$ jest wektorem wejścia (opad efektywny) w formie macierzy trójkątnej, $\{y_m\}$ oznacza wektor wyjścia, a $\{u\}$ jest wektorem odpowiedzi na pobudzenie jednostkowe (Dooge, 1974b). Wszystkie obliczenia wykonano w programie Microsoft Excel wykorzystując elementy programowania makr w języku VBA. Procedura wyznaczania optymalnego zestawu wartości parametrów modelu dla pojedynczego wydarzenia została przedstawiona na rys. 2.

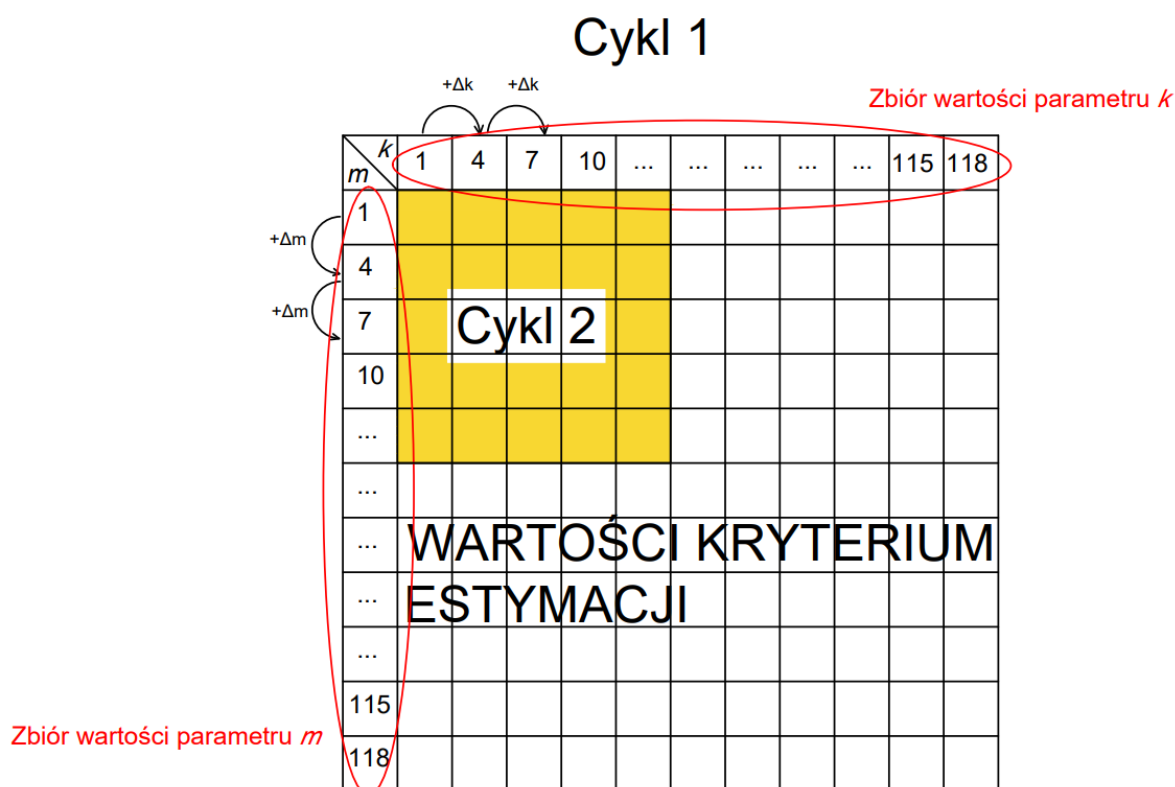


Rysunek 2. Schemat blokowy wyznaczania optymalnego zestawu wartości parametrów modelu dla pojedynczego wydarzenia

Jak wynika z rys. 2 zastosowana w badaniach procedura estymacji wartości parametrów bazuje na metodzie kolejnych przybliżeń. Dla modeli jednokaskadowych przyjęto przedział poszukiwania liczby zbiorników w kaskadzie N od jednego do siedmiu, natomiast dla modeli

dwukaskadowych maksymalną liczbę zbiorników w jednej kaskadzie zmniejszono do pięciu. W pierwszym cyklu obliczeń założono zmienność liczby zbiorników o 0,25 dla modelu Nasha ($\Delta N_I=0,25$) i o 1,0 dla modeli dwukaskadowych i SC2 ($\Delta N_{I,2}=1$). W późniejszych cyklach wraz z zagęszczaniem siatki poszukiwanych wartości parametrów krok ten odpowiednio zmniejszano. Współczynnik rozdziału opadu efektywnego β przyjmowano w zakresie 0,25–0,75 z krokiem $\Delta\beta=0,25$. Dla pozostałych parametrów modeli oraz wskaźnika kształtu krzywej $\alpha_p(t)$, przyjmowano w przypadku modeli jednokaskadowych zbiory 40 możliwych wartości parametrów zakładając w pierwszym cyklu obliczeniowym przedział od 1 do 118 z krokiem co 3 (czyli: 1, 4, 7..., 118), zaś dla modeli dwukaskadowych przyjmowano zbiory 10 możliwych wartości parametrów z początkowym przedziałem poszukiwań od 1 do 91 z krokiem co 10 (czyli 1, 11, 21..., 91). Zawężenie zbiorów wartości parametrów i liczebności zbiorników w jednej kaskadzie dla modeli dwukaskadowych spowodowane jest znacznym wydłużeniem czasu potrzebnego na przeprowadzanie obliczeń, gdyż prowadzono wówczas poszukiwania rozwiązań w przestrzeni sześciowymiarowej.

Sprawdzając wartości każdego z piętnastu kryteriów estymacji dla każdej możliwej kombinacji parametrów w przyjętym początkowym zakresie poszukiwania, znajdowano najbardziej satysfakcjonujące zestawy parametrów w odniesieniu do poszczególnych kryteriów estymacji. Następnie zmniejszano założony krok zmienności wartości parametrów oraz przyjmowano nowe przedziały poszukiwań w otoczeniu wartości parametrów uzyskanych w pierwszym cyklu obliczeniowym. Otrzymywano tym samym kolejny zbiór wartości każdego z parametrów (o takiej samej liczebności), dla którego wyznaczano kolejne wartości kryterium estymacji. Po uzyskaniu rozwiązania w drugim cyklu obliczeń powtarzano procedurę zagęszczania siatki w otoczeniu rozwiązania i wyznaczania wartości kryterium estymacji. Wyniki generowano w układzie tablicowym dwóch parametrów (k, m) lub (k, N), co widoczne jest na rys. 3. Dzięki zastosowaniu tabelarycznego zestawienia pełnego zakresu otrzymywanych wyników możliwe jest przeanalizowanie otrzymywanych rozwiązań dla każdego z stosowanych kryteriów estymacji oraz zaobserwowanie braków zmienności wartości kryteriów świadczących o ekwifinalności oraz istnienie lokalnych ekstremów.



Rysunek 3. Macierz zmienności wartości kryterium estymacji w układzie parametrów (m, k) .

Dla każdego kryterium estymacji przeprowadzono pięć cykli obliczeniowych, stopniowo zagęszczając siatkę wartości parametrów w obszarze uzyskiwanych rozwiązań. Warunki każdego z cykli obliczeniowych przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Przyjęte w kolejnych cyklach obliczeniowych dokładności wartości parametrów

Cykl obliczeń	Model jednokaskadowy		Model dwukaskadowy		
	ΔN	$\Delta k, \Delta m$	$\Delta N_1, \Delta N_2$	$\Delta \beta$	$\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta m$
1	0,25	3	1	0,25	10
2	0,25	1	1	0,25	5
3	0,25	0,5	1	0,25	1
4	0,1	0,1	0,5	0,25	0,5
5	0,05	0,05	0,5	0,25	0,1

Zastosowana metodyka umożliwia analizę wpływu dokładności wartości stosowanych parametrów na jakość otrzymywanych wyników modelowania.

Analiza otrzymanych przy użyciu różnych kryteriów estymacji wartości zestawów parametrów dla danego modelu może wykazać pewne zależności zachodzące między poszczególnymi kryteriami lub nawet wskazać na pewne fizyczne znaczenie parametru, w przypadku powtarzającej się dla różnych kryteriów tej samej wartości parametru.

W ramach prowadzonych badań opracowano dwie koncepcje kryteriów sprawdzających, czy struktura modelu umożliwia odtworzenie przebiegu hydrogramu rzeczywistego – jednocześnie analizy kilku cech hydrogramu (JAKC) i kryterium szczytów przesuwnych, dokładniej omówione w rozdziale 3.3.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej jakości analizowanych kryteriów zestawiono przebiegi hydrogramów wygenerowane przez daną strukturę modelu dla danego zdarzenia opadowego przy użyciu różnych funkcji celu.

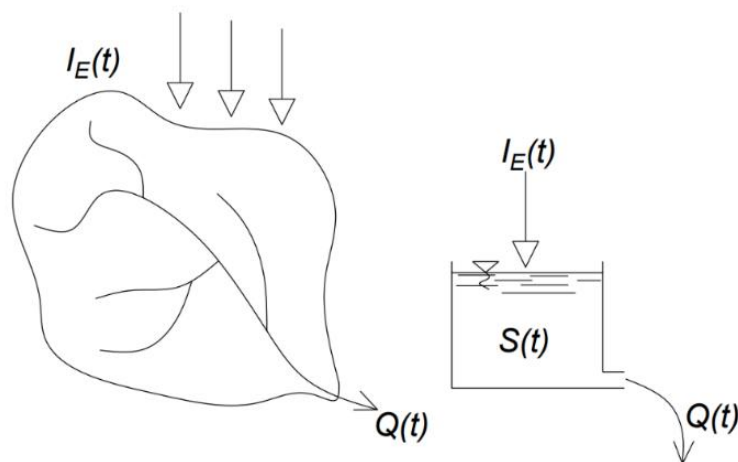
Do oceny porównawczej jakości struktur modeli konceptualnych zastosowano metody graficzne oraz kryteria informacyjne AIC i BIC.

3.2 Zastosowane struktury liniowych modeli zbiornikowych

3.2.1 Model pojedynczego zbiornika liniowego

W pracy analizie poddano modele konceptualne bazujące na pojęciu zbiornika liniowego. Wykorzystywane są one do transformowania wysokości opadu efektywnego, określonego poza modelem, w odpływ powierzchniowy. Trzy spośród pięciu przyjętych do badań struktur modeli zbiornikowych można określić mianem klasycznych, tj. pojedynczy zbiornik liniowy, kaskada Nasha oraz model Diskina. Model kaskady zbiorników zatopionych SC2 jest dość nową koncepcją, której jakość nie była jeszcze dokładnie weryfikowana. Włączenie jej do modelu Diskina w miejscu jednej z kaskad Nasha jest autorską koncepcją, która również została poddana analizie. Wszystkie powyższe modele należą do grupy modeli o parametrach skupionych.

Model zbiornika liniowego opiera się na koncepcji, że zlewnia zachowuje się niczym zbiornik, którego retencja przedstawiona jest w postaci liniowego związku z odpływem (rys. 4) (Pedersen *et al.*, 1980).



Rysunek 4. Koncepcja zlewni jako zbiornika retencyjnego

Związek opadu efektywnego $I_E(t)$, odpływu $Q(t)$ oraz retencji $S(t)$ opisany jest równaniem ciągłości ruchu, co wraz z liniowym równaniem stanu tworzy układ równań stanowiący opis modelu pojedynczego zbiornika liniowego

$$\begin{cases} I_E(t) - Q(t) = \frac{dS}{dt} \\ S(t) = k \cdot Q(t) \end{cases} \quad (9)$$

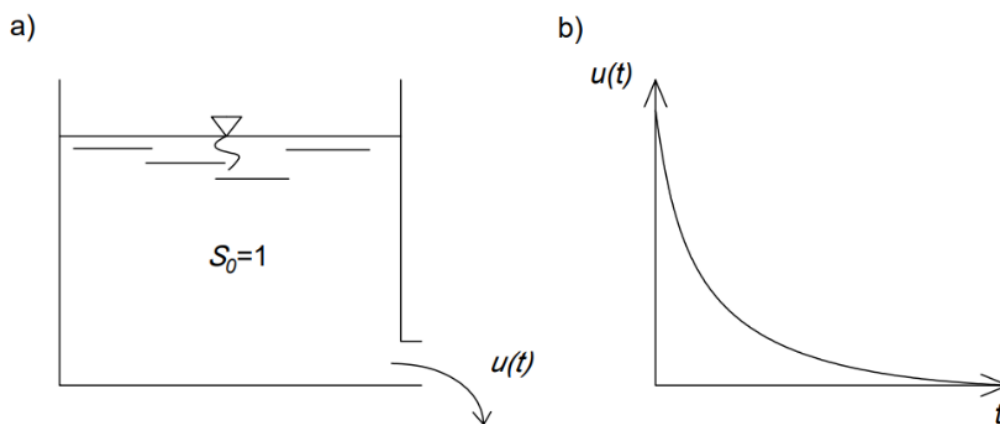
(Kundzewicz, 1979).

Wypływ ze zbiornika przy braku zasilania jest opisywany równaniem krzywej recesji:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \quad (10)$$

Zakładając, że opad był chwilowym impulsem w momencie $t = t_0 = 0$ oraz że objętość retencjonowanej wody w zbiorniku jest jednostkowa, czyli $S = 1$, otrzymuje się równanie chwilowego hydrogramu jednostkowego dla wypływu ze zbiornika (rys. 5) (Byczkowski, 1996).

$$u(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (11)$$

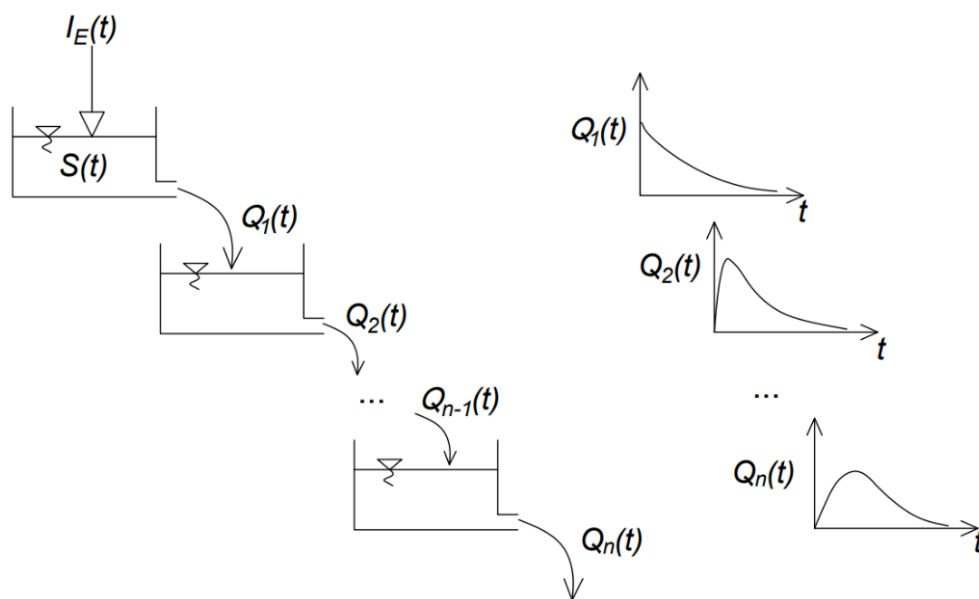


Rysunek 5. Model pojedynczego zbiornika liniowego: a) zbiornik b) hydrogram wypływu ze zbiornika

Parametr k może odnosić się do charakterystyk zlewni i intensywności opadu efektywnego. Pedersen i inni (1980) stwierdzili, że parametr k jest równy czasowi opóźnienia – lag time. Ponieważ model pojedynczego zbiornika liniowego UH zawsze generuje szczyt fali w czasie $\Delta t > 0$ od chwili wystąpienia opadu efektywnego, zastosowanie modelu jest ograniczone do małych zlewni z krótkim czasem odpowiedzi.

3.2.2 Kaskada Nasha

Koncepcja bazuje na równaniu IUH, przy założeniu, że zlewnia przekształca opad efektywny analogicznie do kaskady zbiorników liniowych (Nash, 1957). Zgodnie z rys. 6 wpływ z pierwszego zbiornika $Q_1(t)$ jest dopływem do drugiego zbiornika. Analogicznie funkcjonuje drugi zbiornik, który przekształca dopływ, będący wpływem ze zbiornika pierwszego, w wpływ.



Rysunek 6. Konceptualny model kaskady Nasha

Wypływ z drugiego zbiornika $Q_2(t)$ wyznacza się stosując całkę splotu (działającą na zasadzie superpozycji) (Kindler, 1974). Ostatecznie, po przejściu przez wszystkie N zbiorników, otrzymuje się na wyjściu ostatniego z nich następującą funkcję chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH):

$$u_N(t) = \frac{1}{k\Gamma(N)} \left(\frac{t}{k}\right)^{N-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (12)$$

(Nash, 1957).

Do określenia parametrów Nash sugerował wykorzystanie dwóch pierwszych momentów statystycznych opisanych równaniami:

$$M_1 = Nk \quad (13)$$

$$M_2 = N(N + 1)k^2 \quad (14)$$

Rozwiązanie to jest jednak problematyczne z dwóch powodów: wymaga dysponowania precyzyjnymi danymi dotyczącymi opadu efektywnego i odpływu oraz rzeczywiście

występującej założonej liniowości, gdyż równanie (14) jest czułe na niedokładność danych wyjściowych. Do wyznaczenia wartości k i N zaleca się ostatecznie procedury optymalizacyjne (Kordas, 1974; van der Kloet *et al.*, 1977). Chociaż w literaturze są dostępne związki regresyjne między parametrami modelu i czynnikami fizycznogeograficznymi zlewni (Byczkowski, 1996), parametry kaskady Nasha N oraz k na ogół przyjmuje się jako pozbawione interpretacji fizycznej. Obserwuje się natomiast silne powiązanie między parametrami modelu przez funkcję interparametrową, co umożliwia regionalizowanie ich przy założeniu, iż rozważa się je jako wektor (Patil, 2008).

Nourani (2008) w swojej pracy przedstawił równania umożliwiające określenie czasu wystąpienia szczytu wezbrania t_p oraz czasu opóźnienia – lag time na podstawie parametrów modelu Nasha, przy założeniu niezmienności funkcji transformującej opad w odpływ $u(t)$.

$$t_p = k(N - 1) \quad (15)$$

$$\text{lag time} = kN \quad (16)$$

Współczynnik retencji k może być zatem wyznaczony za pomocą równania (16), gdy znane są liczba zbiorników N i całkowite opóźnienie zlewni lag time.

Przyjmując, że czas opóźnienia w kaskadowym modelu równych zbiorników liniowych powinien być proporcjonalny do liczby zbiorników, Spolia (1980) zaproponował stochastyczny model kaskadowy przyjmując T jako lag time przez zbiorniki o określonej funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(T)$. Zmieniając w równaniu systemu kaskady Nasha stałą k na T/k otrzymano stochastyczny system kaskadowy zdefiniowany przez kolejnych N równań różniczkowych pierwszego rzędu ($i=1, 2, \dots, N$).

$$\frac{d}{dt}Q_i(t) = \frac{k}{T}[Q_{i-1}(t) - Q_i(t)] \quad (17)$$

Opierając się na równaniu (17) Spolia przedstawił w pracy rozwinięcie niezmiennego czasowo modelu kaskady Nasha do czasowo zmiennego modelu deterministycznego.

3.2.3 Model kaskady zbiorników zatopionych

Alternatywną koncepcją dla modelu Nasha jest koncepcja kaskady zbiorników zatopionych (SC2), zaprezentowana na rys. 7. Warunki napełnienia/opróźnienia dla kaskad zbiorników to podstawowa cecha różnicująca modele SC2 i Nash. W modelu SC2 intensywność procesu wypływu zależy od różnicy stanu retencji obu sąsiednich zbiorników (oprócz ostatniego zbiornika w łańcuchu), natomiast w zbiorniku Nash zależy tylko od górnego zbiornika retencyjnego. Różnicę retencji dwóch sąsiednich zbiorników można

postrzegać analogicznie do spadku zwierciadła wód podziemnych, dlatego model SC2 jest konceptualną interpretacją prawa Darcy’ego. Ta analogia pozwala przewidzieć użyteczność modelu SC2 przede wszystkim w odniesieniu do modelowania odpływu bazowego. Dane wyjściowe modelu zawierają różne funkcje wykładnicze z pierwiastkami wielomianów Czebyszewa pierwszego rodzaju jako wykładniki (Kurnatowski, 2017).

Kluczowym równaniem w tej koncepcji jest proporcjonalność przepływu pomiędzy poszczególnymi zbiornikami do aktualnych stanów retencji tych zbiorników:

$$Q_i = k(S_i - S_{i+1}) \quad \text{dla } i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (18)$$

$$Q_N = k \cdot S_N \quad (19)$$

W modelu SC2 dla ostatniego zbiornika zakłada się podwojenie współczynnika proporcjonalności (Kurnatowski & Laskowski, 2017). Rozwiązanie to znajduje swoje uzasadnienie również w pracy Szilagyi’ego (2005).

Wyływ z ostatniego zbiornika, będący ostateczną odpowiedzią systemu, przyjmuje postać:

$$Q_N = \sum_{j=1}^N C_j \cdot e^{-[2 + 2 \cos(\frac{2j-1}{2N} \cdot \pi)]kt} \quad (20)$$

gdzie: C_j – stałe całkowania.

Do wyznaczenia stałych całkowania niezbędne jest rozwiązanie równania:

$$C = \gamma^{-1} \cdot Q(0) \quad (21)$$

gdzie:

$$Q_1(0) = k, \quad Q_2(0) = \dots = Q_N(0) = 0 \quad (22)$$

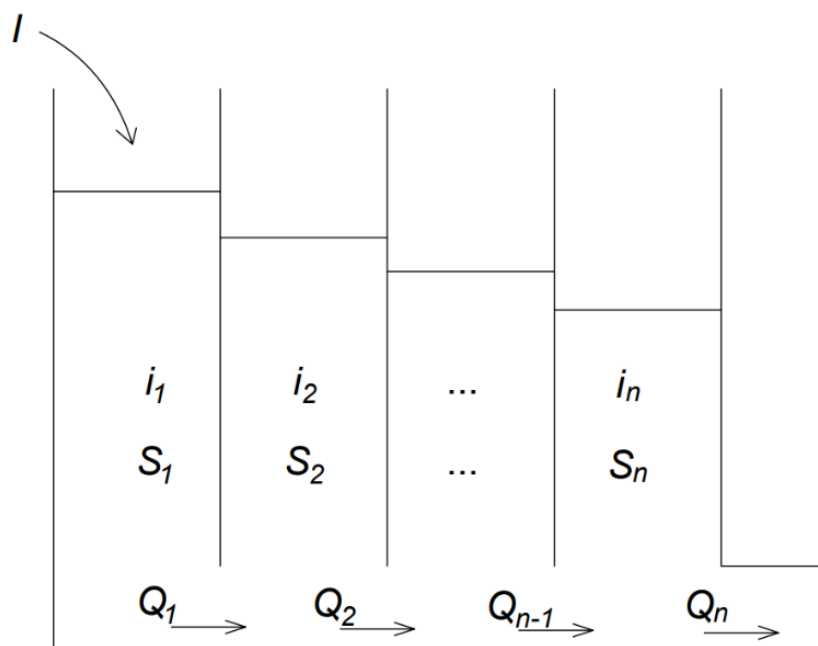
Dla dowolnej liczby zbiorników w zestawie równanie powyższe można rozwiązać numerycznie przez obliczenie macierzy odwrotnej γ^{-1} , której elementy mają postać (Kurnatowski 2017):

$$\gamma_{i,j}^{-1} = (-1)^{N-1} \frac{2}{N} \cos \left[(N-j) \frac{2i-1}{2N} \pi \right] \quad (23)$$

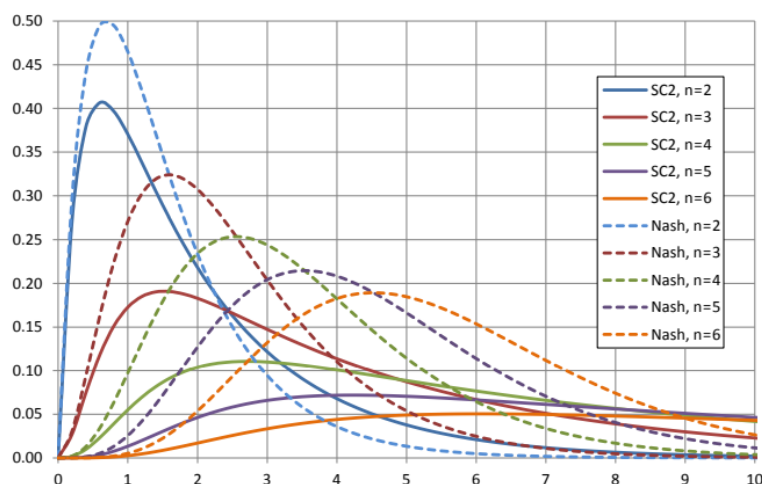
Macierz γ^{-1} w ogólnej postaci można zapisać następująco:

$$\gamma^{-1} = \begin{bmatrix} (-1)^{N-1} \frac{2}{N} \cos \left[(N-1) \frac{1}{2N} \pi \right] & (-1)^{N-2} \frac{2}{N} \cos \left[(N-2) \frac{1}{2N} \pi \right] & \dots & -\frac{2}{N} \cos \frac{1}{2N} \pi & \frac{1}{N} \\ (-1)^{N-1} \frac{2}{N} \cos \left[(N-1) \frac{3}{2N} \pi \right] & (-1)^{N-2} \frac{2}{N} \cos \left[(N-2) \frac{3}{2N} \pi \right] & \dots & -\frac{2}{N} \cos \frac{3}{2N} \pi & \frac{1}{N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (-1)^{N-1} \frac{2}{N} \cos \left[(N-1) \frac{2N-3}{2N} \pi \right] & (-1)^{N-2} \frac{2}{N} \cos \left[(N-2) \frac{2N-3}{2N} \pi \right] & \dots & -\frac{2}{N} \cos \frac{2N-3}{2N} \pi & \frac{1}{N} \\ (-1)^{N-1} \frac{2}{n} \cos \left[(N-1) \frac{2N-1}{2N} \pi \right] & (-1)^{N-2} \frac{2}{N} \cos \left[(N-2) \frac{2N-1}{2N} \pi \right] & \dots & -\frac{2}{N} \cos \frac{2N-1}{2N} \pi & \frac{1}{N} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ze wstępnych badań porównania hydrogramów IUH przeprowadzonych przez twórcę koncepcji wynika, iż model reaguje większym spłaszczeniem generowanej fali na liczbę zbiorników niż kaskada Nasha, co widoczne jest na rys. 8. Świadczy to o dużej podatności struktury na proces identyfikacji parametru N . Z drugiej strony, w przeciwieństwie do kaskady Nasha, model ten nie umożliwia zastosowania niecałkowitej liczby zbiorników, co oznacza, że wrażliwość na proces identyfikacji parametrów może okazać się niedostateczna (Kurnatowski & Laskowski, 2017). Wyniki analizy Kurnatowskiego (2017) pokazują, że zoptymalizowane wartości współczynników retencji k w modelu SC2 są praktycznie stałe dla każdej krzywej recesji i niezależne od liczby zbiorników N , co może być przydatne jako możliwa korelacja między wartościami zidentyfikowanych współczynników retencji a parametrami zlewni.



Rysunek 7. Schemat modelu zbiorników zatopionych



Rysunek 8. Różnice kształtów chwilowych hydrogramów jednostkowych IUH dla SC2 i kaskady Nasha (Kurnatowski, 2017)

3.2.4 Model Diskina

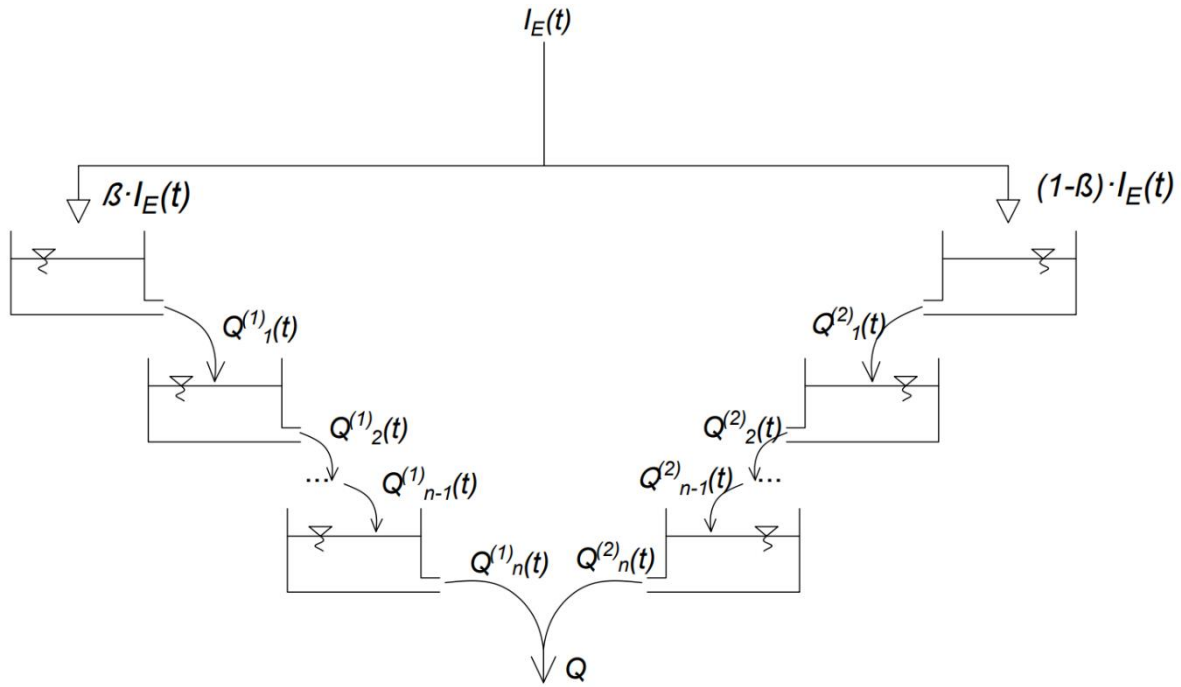
Podczas modelowania relacji opad-odpływ na terenach zurbanizowanych należy wyróżnić dwa typy obszarów – przepuszczalne i nieprzepuszczalne, gdyż będą one odmiennie reagować na opad, będący wejściem do modelu. Różnice te uwidaczniają się w wysokościach opadu efektywnego i w konsekwencji w wielkościach powstałego odpływu powierzchniowego. Koncepcja kaskad równoległych uwzględnia ten warunek zakładając oddzielne hietogramy opadu efektywnego oraz oddzielne hydrogramy odpływu dla każdej z kaskad, co zostało zilustrowane na rys. 9 (Diskin, 1980). Podstawowym problemem, który pojawia się w modelowaniu wielokaskadowym, jest rozdzielenie zewnętrznych sygnałów wejściowych na wejścia liniowych podmodeli (Kundzewicz & Napiórkowski, 1986). Wpływ kaskad na ostateczny hydrogram odpływu jest przedstawiony w postaci współczynnika udziału gruntów nieprzepuszczalnych β (Diskin, 1980). Taki sam współczynnik jest wykorzystany do rozdziału zasilania (Byczkowski, 1996).

Stopień urbanizacji poza wspomnianym współczynnikiem udziału gruntów nieprzepuszczalnych jest ujęty w przyjętych dla każdej z kaskad wartościach współczynników retencji k_1, k_2 . Wpływ urbanizacji na wielkość odpływu i kształt hydrogramu odpływu można oszacować zmieniając wartości przedstawionych współczynników.

Funkcja chwilowego hydrogramu jednostkowego przyjmuje zatem postać:

$$u_N(t) = \frac{(1 - \beta)}{(N_1 - 1)! k_1} \left(\frac{t}{k_1}\right)^{N_1-1} e^{-\frac{t}{k_1}} + \frac{\beta}{(N_2 - 1)! k_2} \left(\frac{t}{k_2}\right)^{N_2-1} e^{-\frac{t}{k_2}} \quad (25)$$

Model Diskina jest modelem pięcioparametrowym ($N_1, N_2, k_1, k_2, \beta$), co utrudnia praktyczne stosowanie tej koncepcji (Kindler (1974).



Rysunek 9. Schemat modelu Diskina

3.2.5 Dwugłęziowy model kaskady Nasha i SC2 (NCSC2)

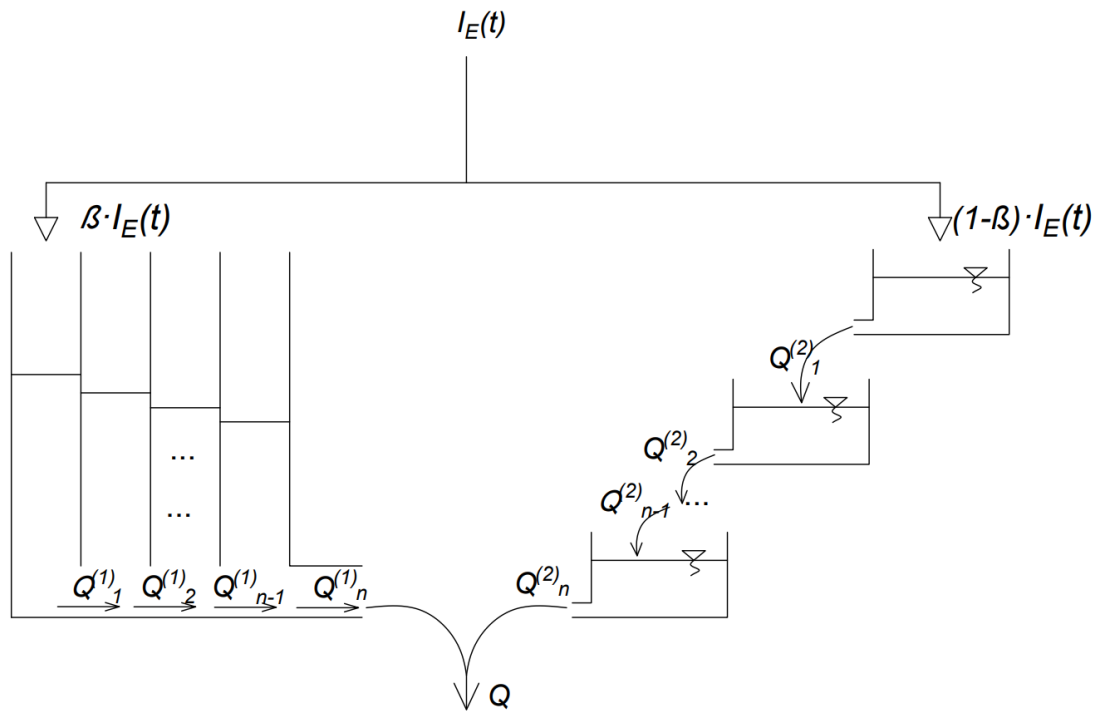
Rozważając zlewnię jako system, w którym wielkość odpływu zależy zarówno od spływu powierzchniowego, jak i podpowierzchniowego, zaproponowano zmodyfikowaną koncepcję modelu Diskina, w której jedną z kaskad zastąpiono modelem kaskady zbiorników zatopionych (rys. 10). Szacuje się, że wielkość spływu podpowierzchniowego na terenach niezurbanizowanych może wynieść nawet 15% do 50% spływu powierzchniowego (Wichwerek, 1995). Zastosowanie koncepcji kaskady zbiorników zatopionych do symulacji tego zjawiska wydaje się uzasadnione biorąc pod uwagę duże podobieństwo między strukturą modelu a cechami ruchu wód podpowierzchniowych. Rozdział opadu efektywnego na dwie kaskady wyznacza się analogicznie jak w modelu Diskina.

Funkcja chwilowego hydrogramu jednostkowego przyjmuje postać:

$$u_N(t) = \beta \sum_{j=1}^{N_1} C_j \cdot e^{-[2 + 2 \cos(\frac{2j-1}{2N_1} \cdot \pi)]k_1 t} + \frac{(1-\beta)}{k_2 \Gamma(N)} \left(\frac{t}{k_2}\right)^{N-1} e^{-\frac{t}{k_2}} \quad (26)$$

gdzie: N_1, N_2 są liczbami zbiorników w kaskadzie zbiorników zatopionych i kaskadzie Nasha, a k_1, k_2 to współczynniki retencji w kaskadzie zbiorników zatopionych i kaskadzie Nasha.

Model NCSC2 podobnie jak model Diskina jest modelem pięcioparametrowym ($N_1, N_2, k_1, k_2, \beta$).



Rysunek 10. Koncepcja modelu NCSC2

3.3 Zastosowane kryteria estymacji parametrów

Aby ocenić wpływ funkcji celu na wyniki generowane przez modele konceptualne, zastosowano piętnaście różnych kryteriów estymacji pełniących funkcję miar oceny dopasowania. O wyborze kryteriów decydowała przede wszystkim powszechność ich stosowania, przy czym dwa z przedstawionych kryteriów są autorskimi koncepcjami. Kryteria estymacji wykorzystane w badaniach przedstawione są w tabeli 2:

Tabela 2. Analizowane kryteria estymacji parametrów

Nr.	Nazwa	Symbol	Wzór
1	Różnica wartości szczytowych	Δy_{\max}	$\Delta y_{\max} = y_{\max,m} - y_{\max,p} $ (27)
2	Zgodność czasu wystąpienia wartości szczytowej wezbrania	Δt_p	$\Delta t_p = t_{p,m} - t_{p,p} $ (28)
3	Stosunek objętości wezbrań	ΔV	$\Delta V = V_m - V_p $ (29)
4	Współczynnik wydajności Nasha-Sutcliffe'a	NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - \bar{y}_p)^2}$ (30)
5	Średni błąd kwadratowy	MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{m,i})^2$ (31)
6	Średni bezwzględny błąd procentowy	MAPE	$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_{p,i} - y_{m,i}}{y_{p,i}} \right $ (32)
7	Stosunek wartości średnich	SWS	$SWS = \frac{\bar{y}_m}{\bar{y}_p}$ (33)
8	Współczynnik korelacji liniowej	r	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - \bar{y}_p)(y_{m,i} - \bar{y}_m)}{\sigma_p \sigma_m}$ (34)
9	Maksymalny błąd odpowiadających sobie wielkości wychodzących	ME	$ME = \max_{i=1,2,\dots,N} y_{m,i} - y_{p,i} $ (35)
10	Średni błąd bezwzględny	MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{p,i} - y_{m,i} $ (36)
11	Suma kwadratu różnic	SSE	$SSE = \sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{m,i})^2$ (37)
12	Współczynnik korelacji rang Spearmana	r_s	$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2-1)}$ (38)
13	Kryterium jednoczesnej analizy kilku cech hydrogramu (JAKC)	JAKC	$JAKC = \text{Jeżeli } [F_{KR1} \leq \varepsilon_{KR1} \rightarrow \text{Jeżeli } [F_{KR2} \leq \varepsilon_{KR2} \rightarrow \dots \text{Jeżeli } [F_{KRn} \leq \varepsilon_{KRn}] \dots]]$ (39)
14	Kryterium szczytów przesuwnych	-	-
15	Współczynnik Nasha Sutcliffe'a oparty na odwrotnościach przepływu	NSE_i	$NSE_i = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{1}{y_{p,i}} - \frac{1}{y_{m,i}})^2}{\sum_{i=1}^N (\frac{1}{y_{p,i}} - \frac{1}{\bar{y}_p})^2}$ (40)

Kryteria 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11 są prostymi kryteriami bezwzględnymi, stąd nie wymagają one komentarza.

Kryterium 4. Współczynnik wydajności Nasha-Sutcliffe'a

Kryterium NSE przyjmuje wartości w zakresie od $-\infty$ do 1. Wartości mniejsze niż zero wskazują, że średnia wartość serii obserwowanych może być lepszym predyktorem niż model. Największą wadą NSE jest zastosowanie kwadratu różnic między obserwacjami a przewidywaniami, gdyż skutkuje to wzrostem wrażliwości na zgodność w zakresie wartości szczytowych, przy pominięciu zgodności w zakresie niskich przepływów. Z pracy Krausego i innych (2005) wynika, że normalizacja wariancji serii obserwacji skutkuje relatywnie wyższymi wartościami NSE dla zlewni z większą dynamiką i niższymi wartościami NSE dla zlewni z mniejszą dynamiką.

Kryterium 5. Średni błąd kwadratowy

Miara ta jest tożsama z powszechnie stosowanym kryterium RMSE.

Kryterium 8. Współczynnik korelacji liniowej

Zastosowane we wzorze (34) σ_p, σ_m oznaczają odchylenia standardowe, odpowiednio wielkości wyjścia uzyskiwanego z modelu (m) i z pomiarów (p), równe:

$$\sigma_m = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{m,i} - \bar{y}_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{p,i} - \bar{y}_p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

Klasyfikacja modeli w zależności od wartości współczynnika korelacji liniowej wg Delleura (Ozga-Zielińska & Brzeziński, 1997):

$1,00 \geq r \geq 0,99$	model znakomity
$0,99 > r \geq 0,95$	model bardzo dobry
$0,95 > r \geq 0,90$	model dobry
$0,90 > r \geq 0,85$	model dość dobry
$0,85 > r$	model niezadowolający

Współczynnik korelacji liniowej stosowany jest zamiennie ze współczynnikiem determinacji R^2 .

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - \bar{y}_p)(y_{m,i} - \bar{y}_m)]^2}{\sum_{j=1}^n (y_{p,i} - \bar{y}_p)^2 \sum_{j=1}^n (y_{m,i} - \bar{y}_m)^2} \quad (43)$$

Współczynnikiem determinacji R^2 nazywa się miarę oceny dopasowania funkcji regresji do danych empirycznych i jest on zdefiniowany jako kwadrat wartości współczynnika korelacji liniowej według Pearsona. Może być również wyrażony jako stosunek między kwadratem kowariancji a pomnożonymi odchyleniami standardowymi obserwowanych i przewidywanych wartości. Zakres R^2 leży między zero a jeden i wskazuje, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej y_p została wyjaśniona przez zmienność zmiennej objaśniającej y_m . Wartość zero oznacza brak korelacji, natomiast wartość 1 oznacza związek liniowy.

Klasyfikację modeli w zależności od wartości współczynnika determinacji przedstawił Guilford (1942).

Tabela 3. Klasyfikacja modeli wg. Guilforda (1942)

R^2	Ocena modelu
0,0-0,2	słaba
0,2-0,4	niska
0,4-0,7	umiarkowana
0,7-0,9	wysoka
0,9-1,0	bardzo wysoka

Jedną z głównych wad R^2 jest uzyskanie wysokich wartości tego współczynnika dla modelu, który systematycznie przeszacowuje lub niedoszacowuje wartości wynikowe, nawet w przypadku, gdy wszystkie przewidywania były złe. Jeśli współczynnik determinacji służy do walidacji modelu, wskazane jest, by brać pod uwagę dodatkowe informacje pomagające w rozwiązaniu problemu (Krause et al., 2005).

Kryterium 12. Współczynnik korelacji rang Spearmana

Podczas gdy współczynnik korelacji Pearsona wykorzystuje się do oceny zależności liniowych, współczynnik rangowy Spearmana znajduje swoje zastosowanie w ocenie związków nieliniowych. Stwierdza się, iż współczynnik Spearmana jest odpowiednikiem współczynnika korelacji Pearsona dla rang, czyli pozycji w ciągu rozdzielczym (Guilford, 1942). Można go określić różnymi wzorami, przy czym w dalszej części przyjęto postać

zaprezentowaną w równaniu (38). Zazwyczaj statystyki testowe służą do sprawdzenia, czy współczynniki korelacji rang różnią się istotnie od zera (Balistocchi & Bacchi, 2011). Kryterium rangowe Spearmana oraz współczynnik determinacji R^2 zostały wykorzystane między innymi do analizy modeli parametryzacji krzywych recesji w pracy Stoelzle'a i innych (2012).

Kryterium 13. Kryterium jednoczesnej analizy kilku cech hydrogramu (JAKC)

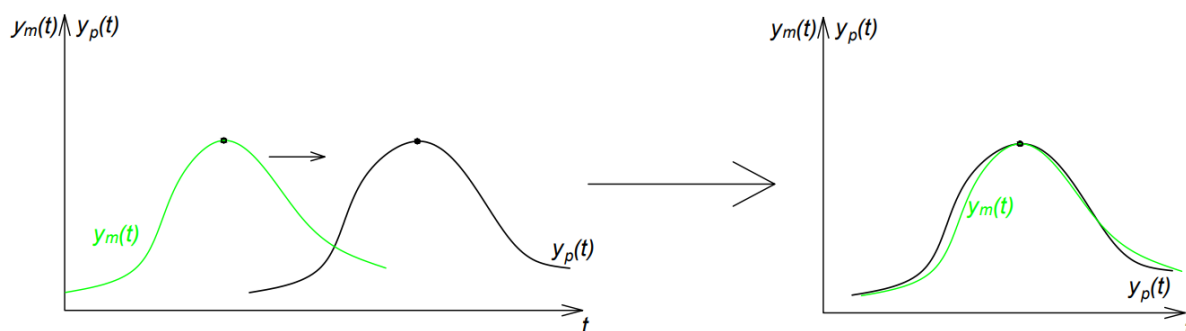
Ponieważ stosowane kryteria generują zestawy wartości parametrów, dla których hydrogram wynikowy jest satysfakcjonujący w odniesieniu tylko do jednej cechy dopasowania, aby uzyskać podobieństwo w szerszym zakresie niezbędna jest kalibracja wielokryterialna. Wspomniane w rozdziale 2.7 podejście, polegające na przyjęciu niezależnych kroków jednocelowych, skutkuje uzyskaniem niepowiązanych ze sobą zestawów parametrów, które trudno zunifikować. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie wielokryterialnego poszukiwania w ramach jednej funkcji celu. Idea kryterium polega na przyjęciu stopni istotności wybranych miar bezwzględnych hydrogramu oraz ustaleniu a priori dopuszczalnego błędu dla każdej z rozpatrywanych miar. Zakłada się zatem kolejność rozpatrywania kryteriów, co skutkuje tokiem postępowania przedstawionym we wzorze (39).

Zastosowanie metody JAKC skutkuje poszukiwaniem wyłącznie rozwiązań satysfakcjonujących jednocześnie wszystkie przyjęte kryteria, co umożliwia większą ingerencję w kształt generowanego hydrogramu. Niezbędne jest zatem umiejętne określenie stopnia akceptowalności dla każdego z rozpatrywanych kryteriów, gdyż uzyskanie idealnego dopasowania hydrogramów wynikowych w pełnym zakresie raczej jest nieosiągalne (Mańko & Laskowski, 2018). W przeprowadzonych badaniach kryterium JAKC wykorzystano w odniesieniu do czasu wystąpienia szczytu ($\Delta t_p \leq 1$ dla pojedynczego zbiornika liniowego oraz $\Delta t_p = 0$ dla pozostałych modeli), dopasowania wartości szczytowych ($\Delta y_{\max} = 0,1 y_{\max,p}$) i zgodności objętości.

Kryterium 14. Kryterium szczytów przesuwnych

Ideą kryterium szczytów przesuwnych jest sprawdzenie, jak dokładnie model jest w stanie odtworzyć kształt hydrogramu rzeczywistego na podstawie danych wejściowych, bez względu na czasową zgodność symulacji. Metoda polega na czasowym przesunięciu symulowanego hydrogramu tak, aby wartości maksymalne wezbrań miały miejsce w tym samym punkcie w czasie. Następnie za pomocą przyjętego kryterium podobieństwa oceniany

jest stopień dopasowania hydrogramów. Koncepcja kryterium szczytów przesuwnych przedstawiona została na rys. 11.



Rysunek 11. Koncepcja kryterium szczytów przesuwnych

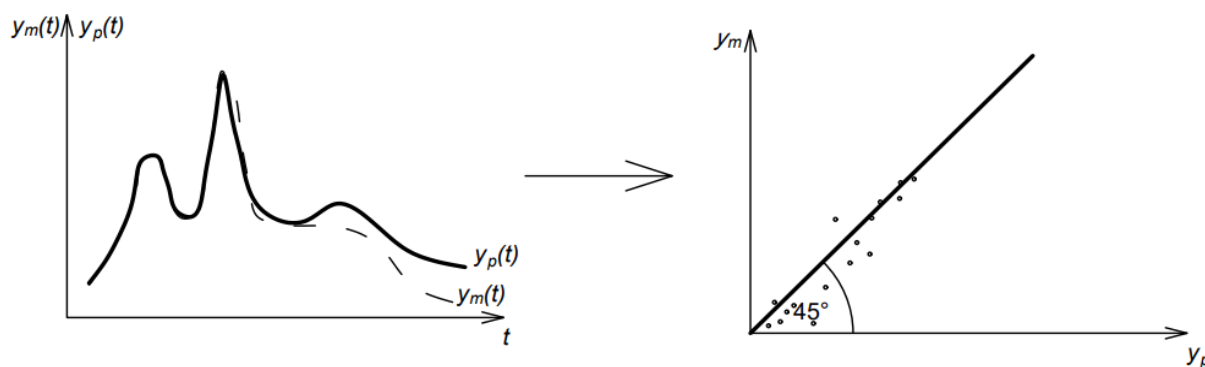
Dzięki takiemu podejściu pomijany jest problem opóźnienia lag time i weryfikowane są możliwości elastycznej zmiany kształtu hydrogramu modelu. W przeprowadzonej analizie miarą przyjętą do określenia stopnia zgodności hydrogramów jest średni błąd kwadratowy.

Kryterium 15. Współczynnik Nasha-Sutcliffe'a bazujący na odwrotnościach przepływu

Ponieważ współczynnik NSE charakteryzuje się dużą wrażliwością na zgodność w zakresie wysokich przepływów, przyjęcie w jego formule odwrotnych wartości przepływów umożliwia uzyskanie dużej zgodności w zakresie niskich przepływów.

3.4 Kryteria oceny jakości modelu

Do weryfikacji modeli posłużono się przede wszystkim analizą przebiegów czasowych wartości modelowych $y_m(t)$ i pomierzonych $y_p(t)$ oraz metodą polegającą na naniesieniu na wykres we współrzędnych prostokątnych wartości y_m i y_p (rys. 12). Choć metody te nie mają narzuconych ram interpretacji wyników – są intuicyjne, to ich zastosowanie najlepiej przedstawia jakość generowanych symulacji.



Rysunek 12. Przebiegi czasowe $y_m(t)$ i $y_p(t)$ oraz zależność pomiędzy y_m i y_p

Oprócz metod graficznych do oceny jakości modelu zastosowano kryteria informacyjne: Akaike (AIC) oraz Bayesowskie kryterium informacyjne Schwarza (BIC). Dla każdego wydarzenia wezbrania wyznaczono wartości kryteriów informacyjnych przyjmując jako funkcję podobieństwa kolejne rozpatrywane w pracy kryteria estymacji, a następnie wyciągnięto średnią arytmetyczną ze wszystkich wartości kryteriów informacyjnych uzyskanych dla każdego z modeli. O największej efektywności świadczą niższe wartości kryteriów informacyjnych.

$$AIC = 2p - 2\ln(\hat{L}) \quad (44)$$

$$BIC = \ln(n)p - 2\ln(\hat{L}) \quad (45)$$

3.5 Określenie opadu efektywnego

Wg. Pazdro (1983) tylko 17,4% opadów mających miejsce na lądzie przekształconych jest w spływ powierzchniowy. Pozostała część ulega parowaniu oraz infiltracji. Opad efektywny liczbowo jest równy objętości odpływu powierzchniowego ($P_E=V_p$), rozumianego jako część fali wezbraniowej powyżej odpływu gruntowego (Soczyńska, 1990). Jest on więc wynikiem różnicy pomiędzy wysokością opadu a stratami wywołanymi ewaporacją, przesiąkaniem wód do gruntu oraz powierzchniową i gruntową retencją (Bagiński, 1959). Duża wilgotność powietrza podczas trwania wydarzenia opadowego uzasadnia pominięcie wpływu ewaporacji na proces kształtowania się opadu skutecznego (Moussa & Chahinian, 2009). Głównym czynnikiem kształtującym odpływ powierzchniowy jest zatem zdolność infiltracyjna gruntu, która zazwyczaj w pierwszym okresie trwania deszczu przewyższa wysokość występującego opadu. Cała objętość deszczu w tym momencie ulega zatem infiltracji, a opad efektywny jest równy zero. Dopiero gdy zdolność infiltracyjna zlewni nie jest w stanie przyjąć zasilania, zaczyna formować się opad efektywny. Algorytm modelu opadu efektywnego można więc przedstawić w następujący sposób:

$$P_E(t) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } P(t) \leq f(t) \\ P(t) - f(t) & \text{gdy } P(t) > f(t) \end{cases} \quad (46)$$

Wielkość V_p można zastąpić współczynnikiem odpływu powierzchniowego α_p , nazywanym również współczynnikiem spływu. Wyraża on stosunek objętości odpływu powierzchniowego danego wezbrania V_p [mm] do objętości całkowitego opadu atmosferycznego wywołującego to wezbranie P [mm] (Lambor, 1971; Soczyńska, 1990):

$$\alpha_p = \frac{V_p}{P} \quad (47)$$

Współczynnik odpływu powierzchniowego określany jest na podstawie wysokości i natężenia opadu, charakterystyk geograficznych zlewni oraz zmiennych w czasie czynników wpływających na wysokość strat opadu atmosferycznego, np. aktualna zdolność infiltracyjna zlewni (Szymczak, 1992). Najczęściej przyjmowane są następujące związki:

$$\alpha_p = f(r, P, I, T) \quad (48)$$

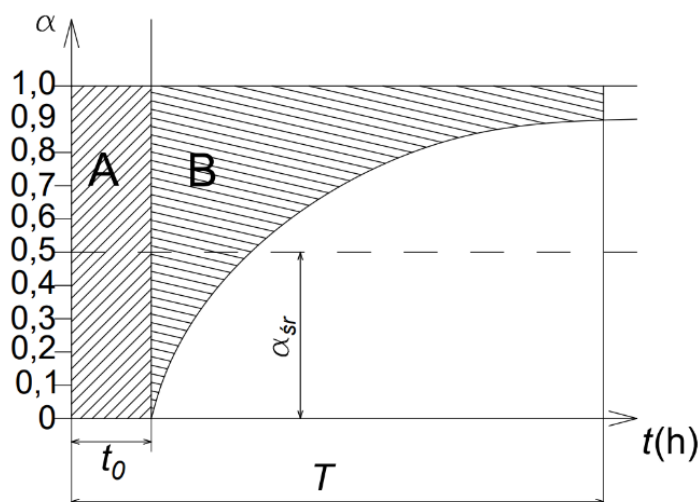
gdzie: r – wskaźnik zdolności retencyjnej zlewni (charakteryzuje stan uwilgotnienia zlewni, przed wystąpieniem deszczu, świadczy o wielkości strat na infiltrację);

P – wysokość opadu;

I – natężenie opadu (średnia wartość intensywności opadu w czasie i na obszarze zlewni);

T – wskaźnik sezonowy (określany jako średnia miesięczna temperatura powietrza, średnia miesięczna wartość parowania potencjalnego lub kolejny numer tygodnia w roku).

Ponieważ nie dysponowano danymi opisującymi wielkości opisane powyżej, do wyznaczenia opadu efektywnego posłużono się metodą chwilowego współczynnika spływu (rys. 13).



Rysunek 13. Zmienność chwilowego współczynnika spływu (Soczyńska, 1990)

Zgodnie z rys. 13, w pierwszym okresie trwania opadu współczynnik spływu jest równy zero, co jest spowodowane retencją i parowaniem, którym podlega wówczas cała ilość opadu. Po wypełnieniu retencji zlewni wartości współczynnika α_p zaczynają stopniowo rosnąć dążąc asymptotycznie do jedności, czyli całkowitego przekształcenia występującego opadu w opad efektywny. Zaletą metody chwilowego współczynnika spływu jest uchwycenie zmieniających się w czasie warunków formowania się spływu powierzchniowego, gdyż wartości

współczynnika spływu można wyznaczyć dla dowolnego punktu w czasie za pomocą równania:

$$\alpha_p(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \frac{t - t_0}{m} \quad (49)$$

gdzie: t – bieżący czas trwania opadu,

t_0 – parametr wskazujący czas dobiegania zlewni; zależy od jej zdolności retencyjnych oraz intensywności opadu w początkowym okresie jego trwania;

m – wskaźnik kształtu krzywej $\alpha_p(t)$. (Soczyńska, 1990)

3.6 Charakterystyka obiektów badawczych

Prace badawcze przeprowadzono dla pięciu polskich rzek. W dorzeczu Odry są to Czerwona Woda oraz Piotrówka, natomiast w dorzeczu Wisły: Pasłęka, Żebrówka i Brynica. Lokalizacja obiektów badawczych została przedstawiona na rys. 14.



Rysunek 14. Lokalizacja obiektów badawczych

Skrócona analiza hydrologiczna wybranych rzek przedstawiona została w tabeli 4.

Tabela 4. Charakterystyka hydrologiczna modelowanych rzek

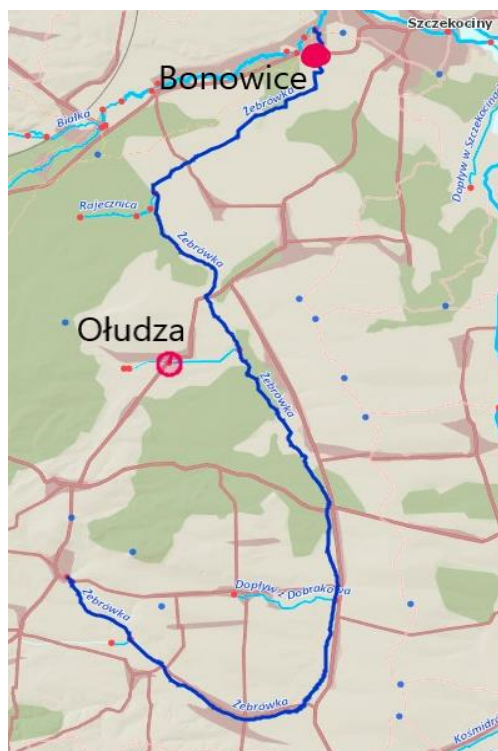
Rzeka	Wodowskaz	Powierzchnia zlewni [km ²]	SNQ [m ³ /s]	SSQ [m ³ /s]	SWQ [m ³ /s]	NNQ [m ³ /s]	WWQ [m ³ /s]	spadek [‰]
Pasłęka	Tomaryny	183	1978-1982					2,13
			0,54	1,3	2,45	0,39	2,95	
Żebrówka	Bonowice	129	1976-1980					2,52
			0,42	0,66	1,32	0,09	5,8	
Brynica	Brynica	98,2	1976-1980					2,12
			0,25	0,64	1,84	0,04	7	
Czerwona Woda	Zgorzelec	128	1961-1965					9,17
			0,44	0,82	3,85	0,24	26,6	
Piotrówka	Zebrzydowice	115	1971-1975					6,92
			0,65	1,29	6,18	0,4	22,7	

- Pasłęka – rzeka o długości 211 km, znajdująca się w północno-wschodniej części Polski. Pasłęka wypływa we wsi Gryźliny i uchodzi do Zalewu Wiślanego koło Braniewa (Cichocka, 1996). Pomimo, iż jest rzeką niziną, na odcinku od źródła do profilu Tomaryny cechuje się niewielkimi wahaniami wielkości przepływów i małym spadkiem. Na niektórych odcinkach płynie głębokim, wąskim jarem o zalesionych zboczach przyjmując charakter rzeki podgórskiej. Pasłęka płynie zarówno przez tereny zalesione, jak i przez tereny rolnicze z nieużytkami, pastwiskami i łąkami. Pasłęka przepływa również przez kilka jezior oraz zbiornik zaporowy (jeziro Pierzchalskie) (Instytut na rzecz Ekorozwoju, Rzeka Pasłęka, www.ine.eko.org.pl/index...). Zarówno posterunek opadowy, jak i wodowskazowy znajdują się w miejscowości Tomaryny (rys. 15). Jest to 145,7 km rzeki Pasłęki, dla którego powierzchnia zlewni wynosi 183 km².



Rysunek 15. Fragment mapy rastrowej ukazujący odcinek rzeki Pasłęki od źródła do miejscowości Tomaryny;
Źródło: www.geoportal.gov.pl

- Żebrówka – rzeka o długości ok. 23 km w województwie śląskim. Swój początek bierze we wsi Siadcza na wysokości 309 m n.p.m., a bieg kończy w Krztyni na wysokości 254 m n.p.m. Przeciętny spadek Żebrówki wynosi 2,5 %, co świadczy o nizinnym typie rzeki, przy czym na odcinku między Wierzbicą a Otolą spadek wzrasta aż do 8% (Nowak & Pydziński, 1968). Maksymalne przepływy powodowane są przez zwiększony spływ wód roztopowych pochodzących z topnienia pokrywy śnieżnej i można je obserwować najczęściej na przełomie marca i kwietnia (Rzętała & Machowski, 2017). Wykorzystane w pracy wielkości przepływu określane są dla posterunku Bonowice. Jest to 0,6 km rzeki, dla którego powierzchnia zlewni jest równa 129 km². Wykorzystane dane opadowe zostały zebrane na stacji opadowej Ołudza, oddalonej od Bonowic o ok. 6 km (rys.16).



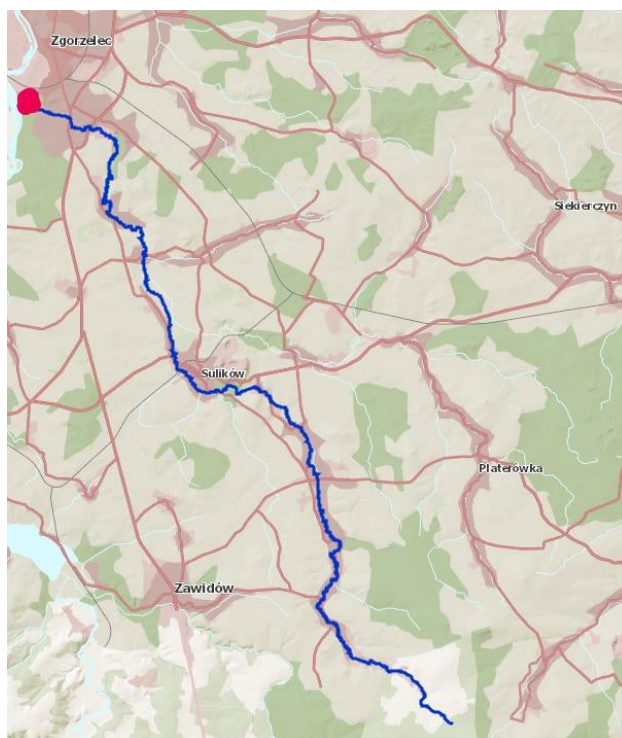
Rysunek 16. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Żębrówkę od źródła do ujścia do rzeki Krztynia przy miejscowości Bonowice; Źródło: www.geoportal.gov.pl

- Brynica – rzeka o długości 40,6 km w województwie opolskim. Brynica ma swoje źródło na wysokości 182 m n.p.m. w gminie Turawa i uchodzi do Budkowiczanki na wysokości 140 m n.p.m. Brynica przepływa głównie przez tereny leśne (Helwig, 2008). Zarówno posterunek opadowy jak i wodowskazowy znajdują się w miejscowości Brynica (rys. 17). Jest to 35,5 km rzeki Brynica, dla którego powierzchnia zlewni wynosi 98,2 km². Średni spadek zwierciadła wody na odcinku od źródła do Brynicy wskazuje na nizinny charakter rzeki. Spośród przyjętych do badań rzek nizinnych przepływy Brynicy ulegają największym wahaniom.



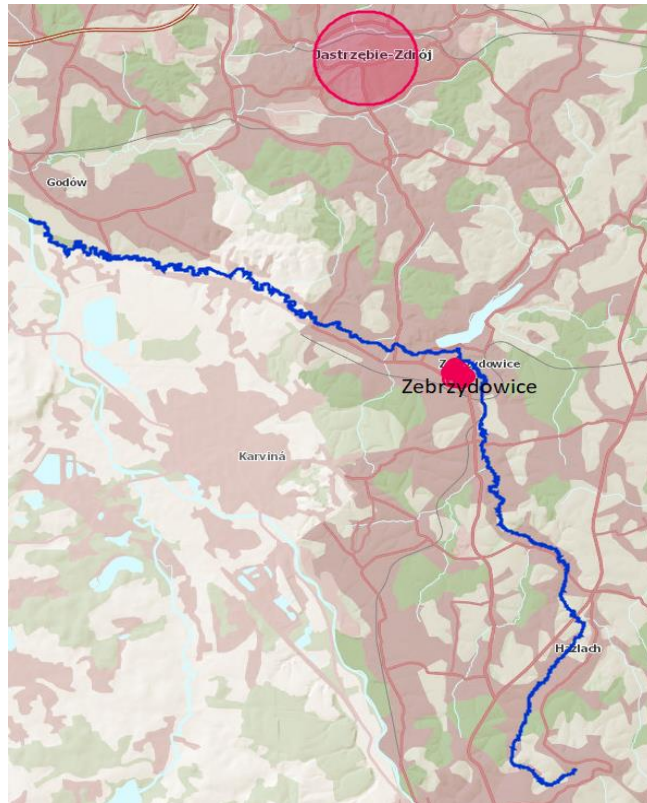
Rysunek 17. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Brynicę od źródła do wodowskazu Brynica; Źródło: www.geoportal.gov.pl

- Czerwona Woda – prawy dopływ Nysy Łużyckiej o długości 22 km. Rzeką ma swoje źródło w Górach Izerskich (Czerwona Woda..., <https://pl.wikipedia.org/wiki/...>) Wykorzystane dane wysokości opadu odnotowano na stacji opadowej Zgorzelec (rys. 18). Wielkości przepływu zostały określone dla posterunku Zgorzelec – jest to przekrój położony w 2,0 km rzeki. Zlewnia Czerwonej Wody w rozpatrywanym przekroju ma powierzchnię 128 km². Jest to rzeka typu górskiego, która na tle pozostałych przyjętych do analizy rzek, wyróżnia się największym spadkiem i największym zróżnicowaniem przepływów charakterystycznych.



Rysunek 18. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Czerwoną Wodę od źródła do ujścia do Nysy Łużyckiej;
Źródło: www.geoportal.gov.pl

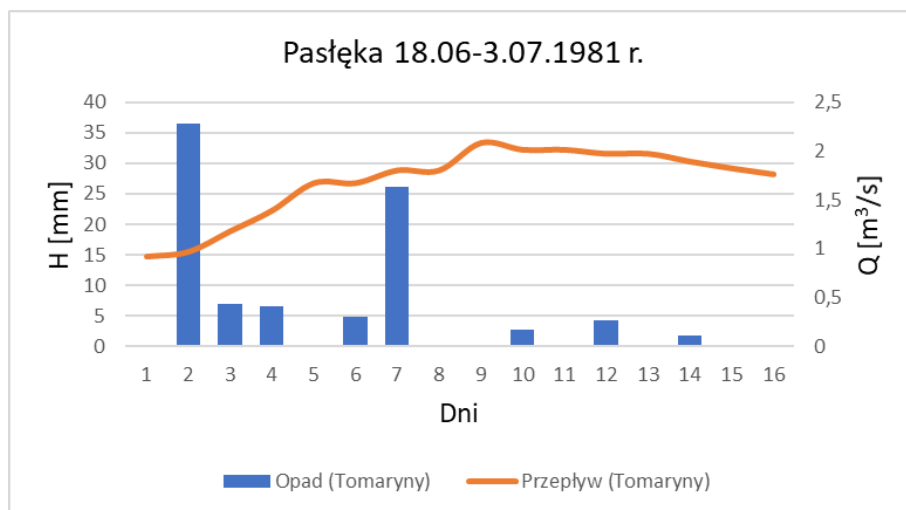
- Piotrówka – prawy dopływ Olzy o długości 31 km. Dorzecze Piotrówki ma charakter pogórski (Piotrówka, <https://pl.wikipedia.org/wiki/...>). Dane opadowe odczytano dla stacji opadowej Jastrzębie-Zdrój oddalonej od przyjętego posterunku wodowskazowego Zebrzydowice o ok. 10 km (rys. 19). Powierzchnia zlewni Piotrówki do rozpatrywanego przekroju, który znajduje się w 15,3 km rzeki, jest równa 115 km².



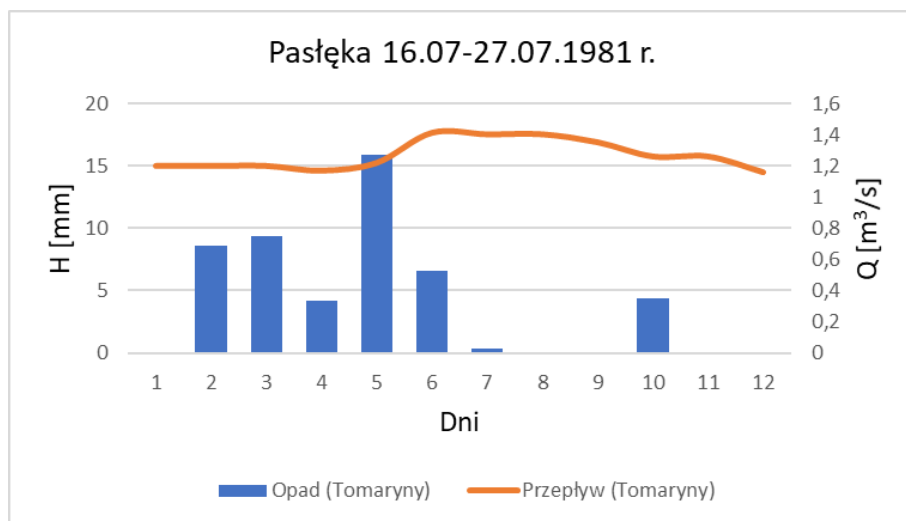
Rysunek 19. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Piotrkówkę od źródła do ujścia do rzeki Olzy;
Źródło: www.geoportal.gov.pl

3.7 Wybór materiału badawczego

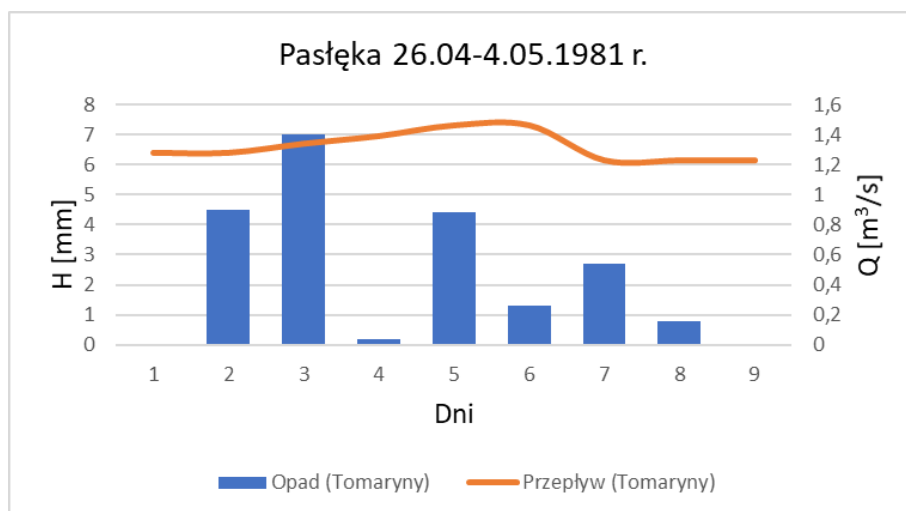
Dla każdego z omówionych w rozdziale 3.6 obiektów badawczych wybrano dwa przykładowe lata, dla których określono na podstawie roczników opadów atmosferycznych i roczników hydrologicznych dobowe wysokości opadów oraz odpowiadające im dobowe wielkości przepływów. Analizując dokładnie przebiegi wykresów dobowych wielkości opadów i przepływów, przedstawionych w załączniku nr 1, wybrano po sześć reprezentatywnych wydarzeń dla każdej rzeki, cechujących się wyraźną odpowiedzią zlewni w postaci fali wezbraniowej na występujący opad (rys.20-49). Podczas analizy nie brano pod uwagę miesięcy grudnia, stycznia i lutego, gdyż wówczas zachodzi ryzyko wystąpienia zjawisk lodowych i ewentualnych zatorów.



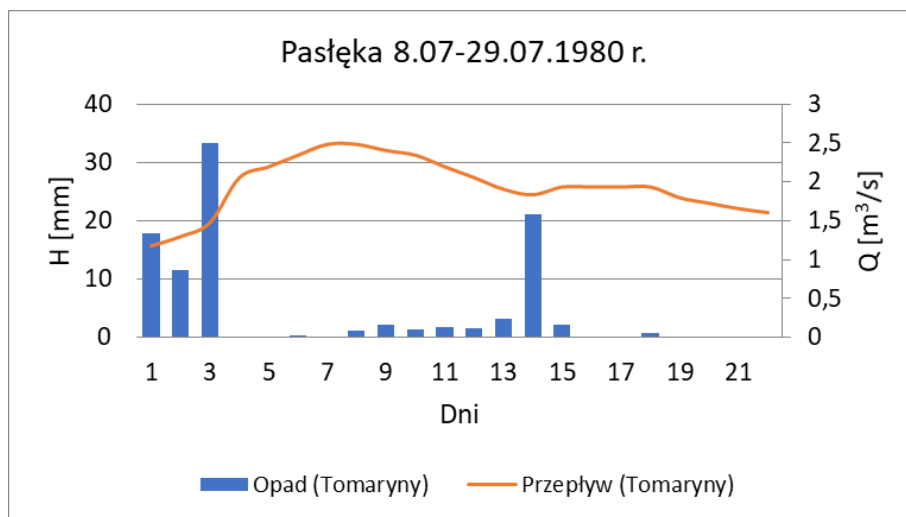
Rysunek 20. Pasłęka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



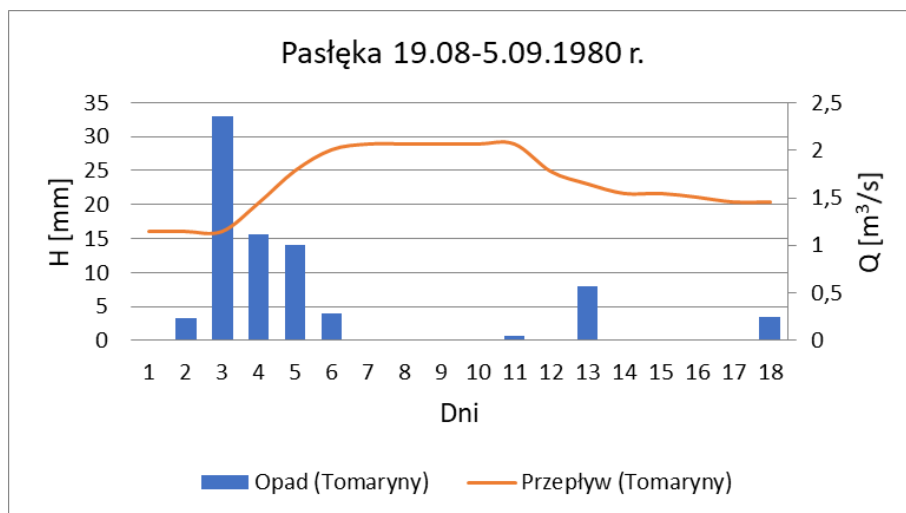
Rysunek 21. Pasłęka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



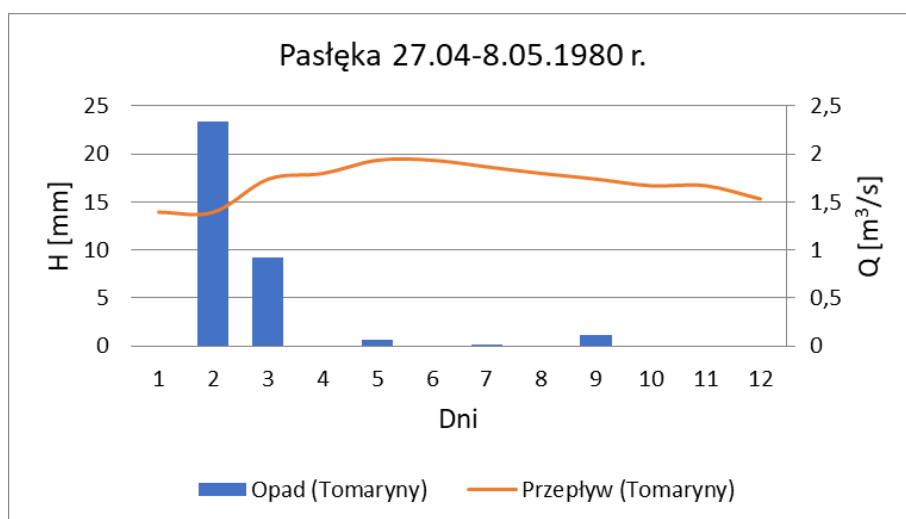
Rysunek 22. Pasłęka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



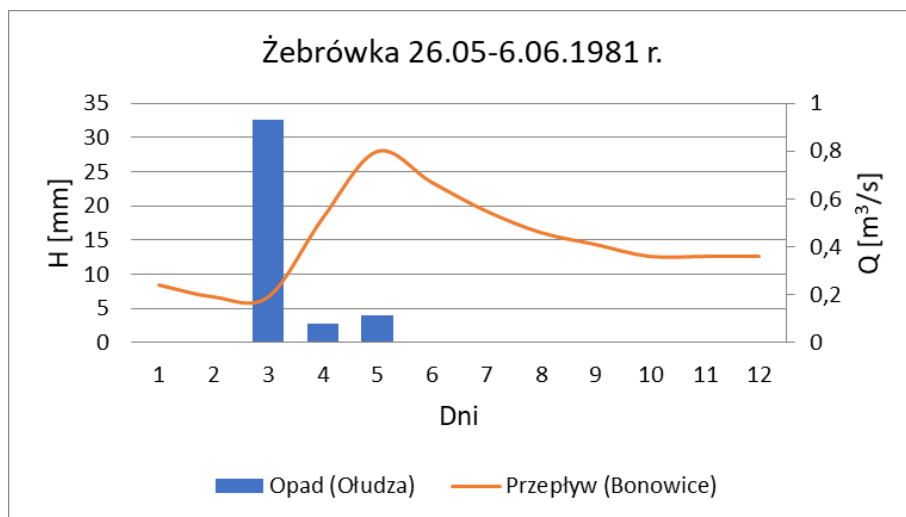
Rysunek 23. Pasłęka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



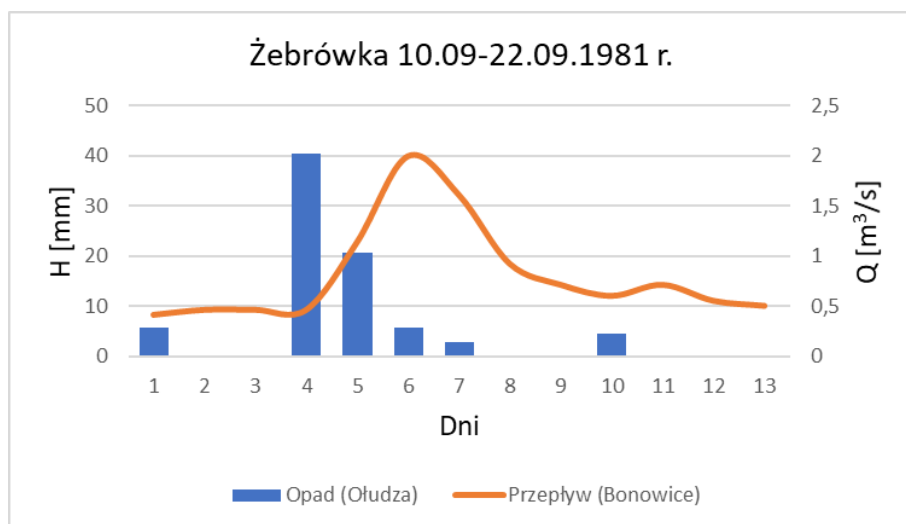
Rysunek 24. Pasłęka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



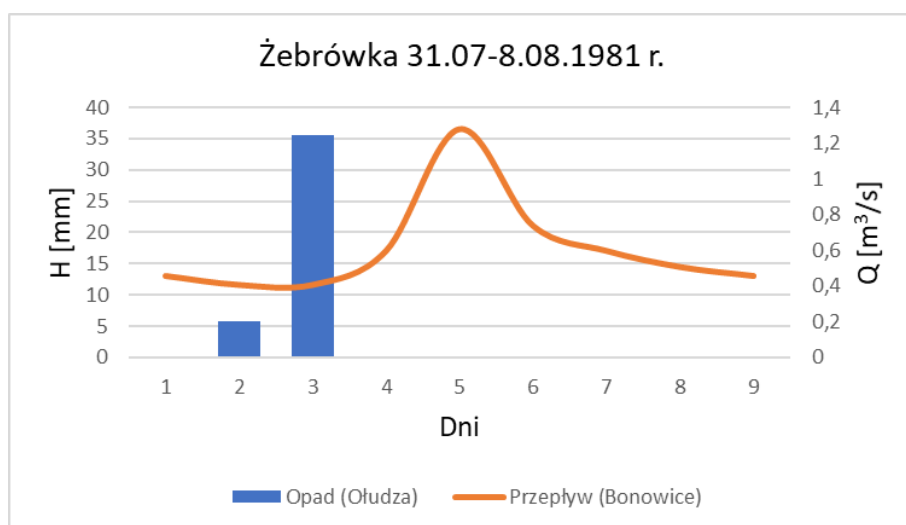
Rysunek 25. Pasłęka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



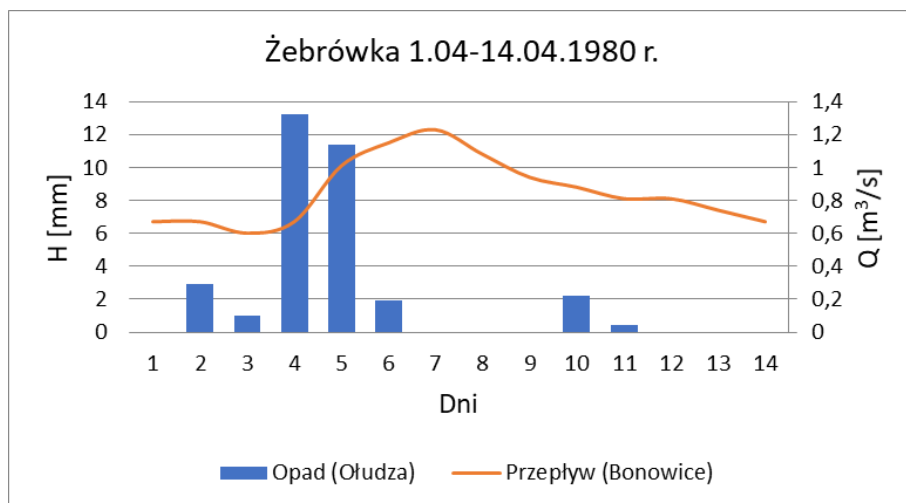
Rysunek 26. Żebrówka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



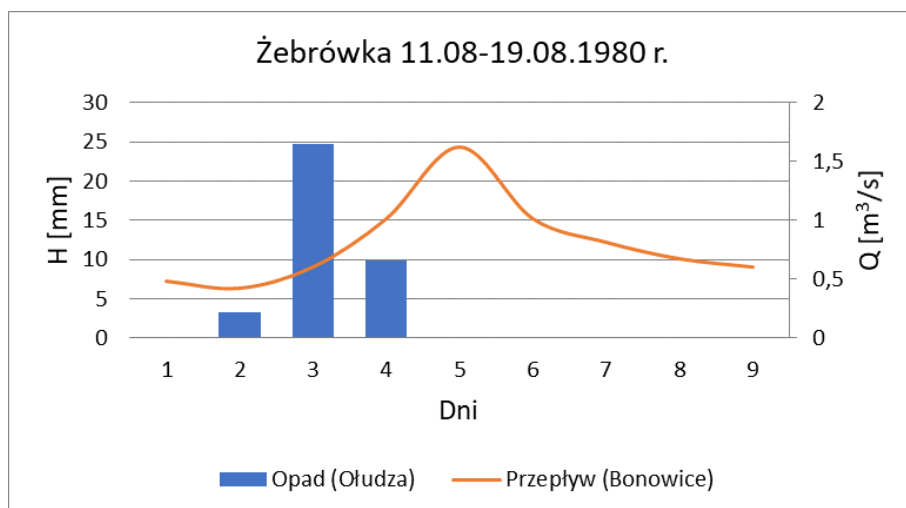
Rysunek 27. Żebrówka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



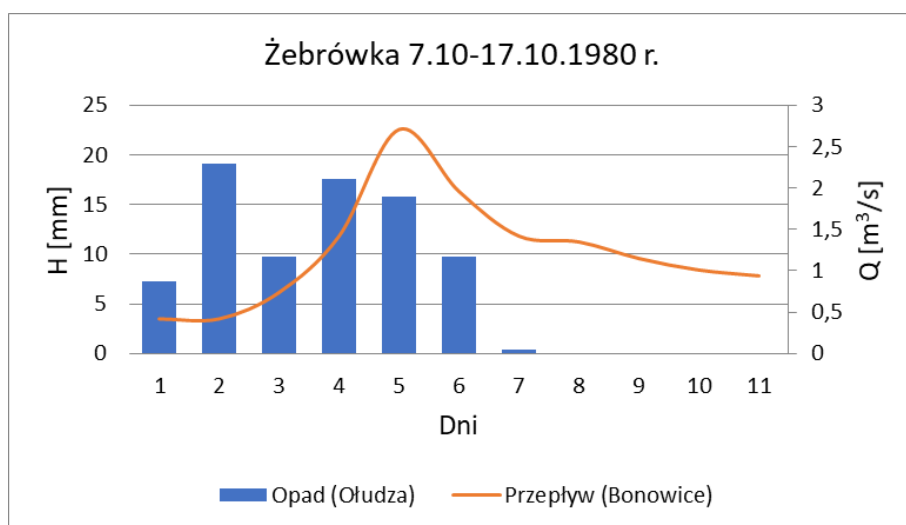
Rysunek 28. Żebrówka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



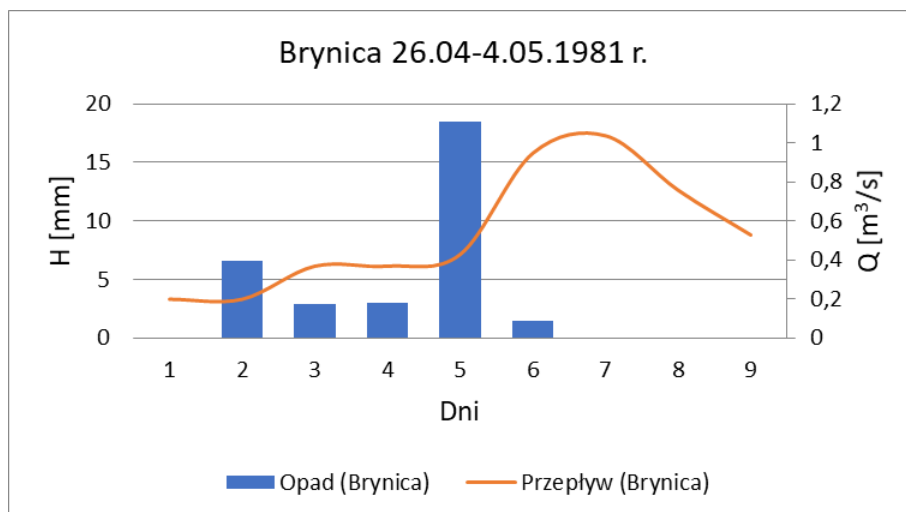
Rysunek 29. Żebrówka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



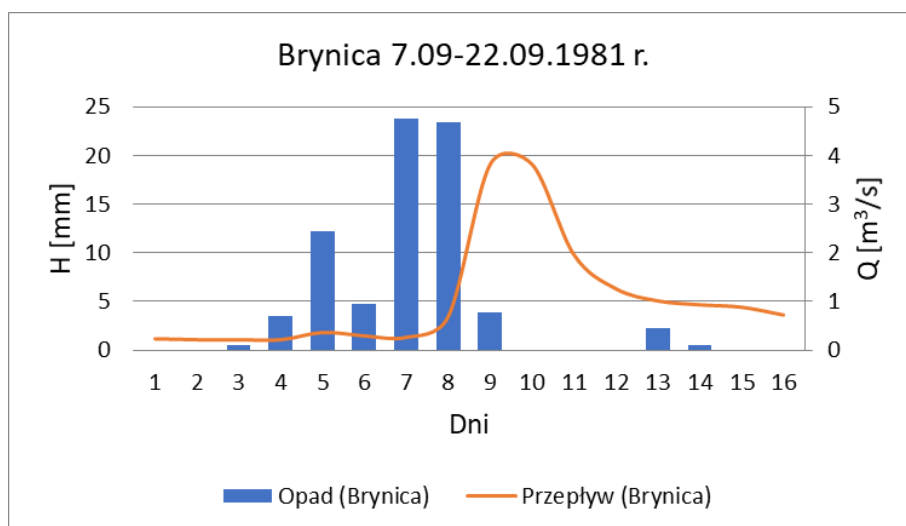
Rysunek 30. Żebrówka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



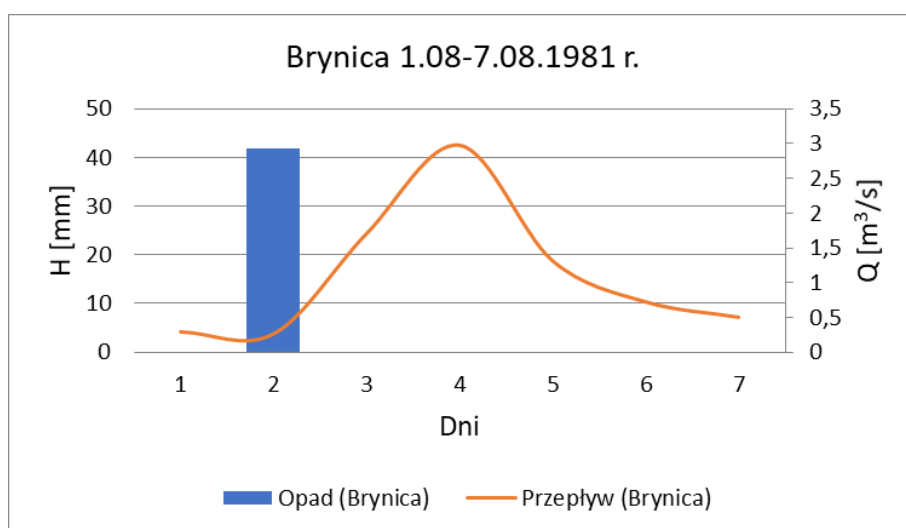
Rysunek 31. Żebrówka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



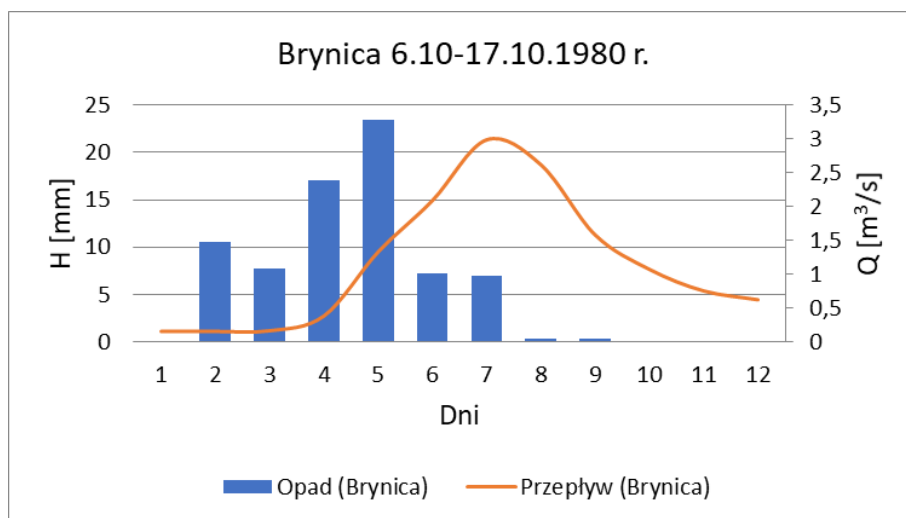
Rysunek 32. Brynica – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



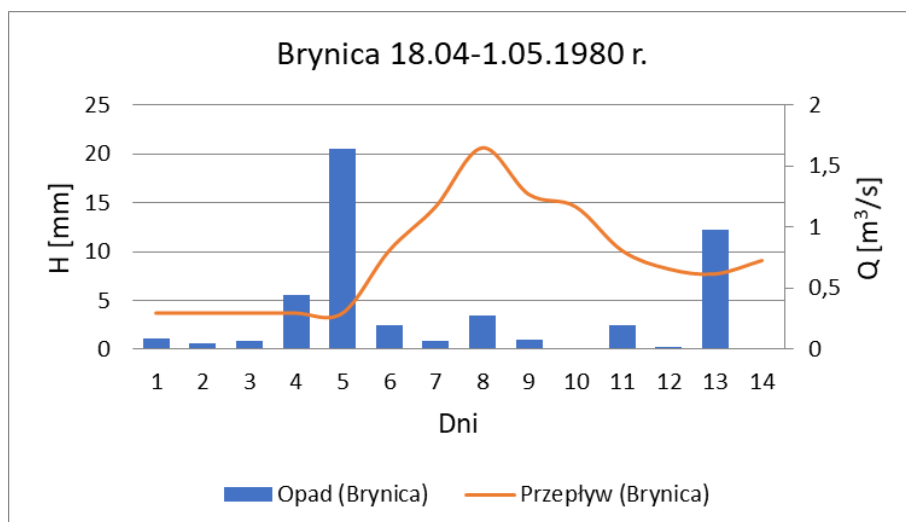
Rysunek 33. Brynica – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



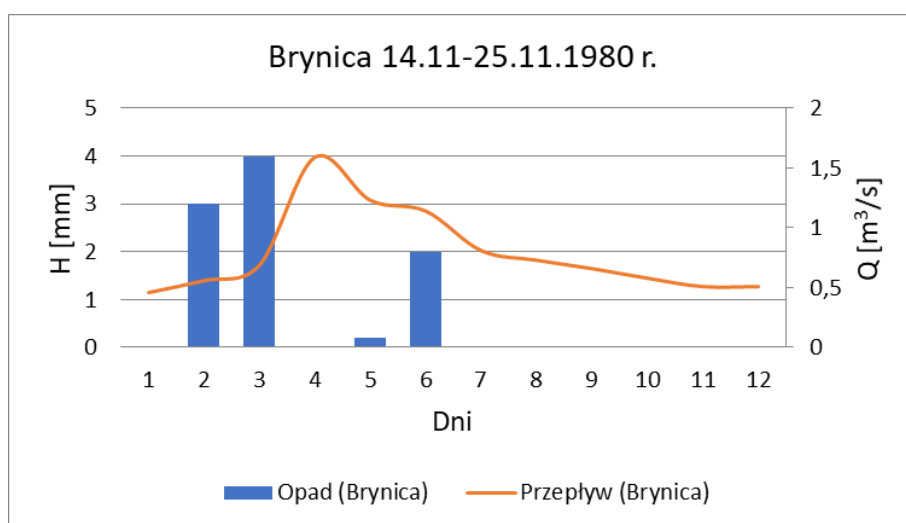
Rysunek 34. Brynica – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)



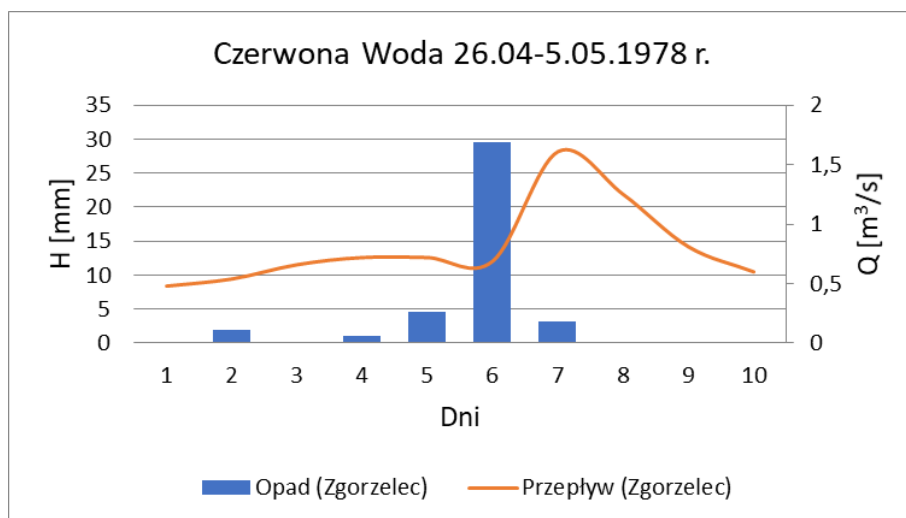
Rysunek 35. Brynica – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



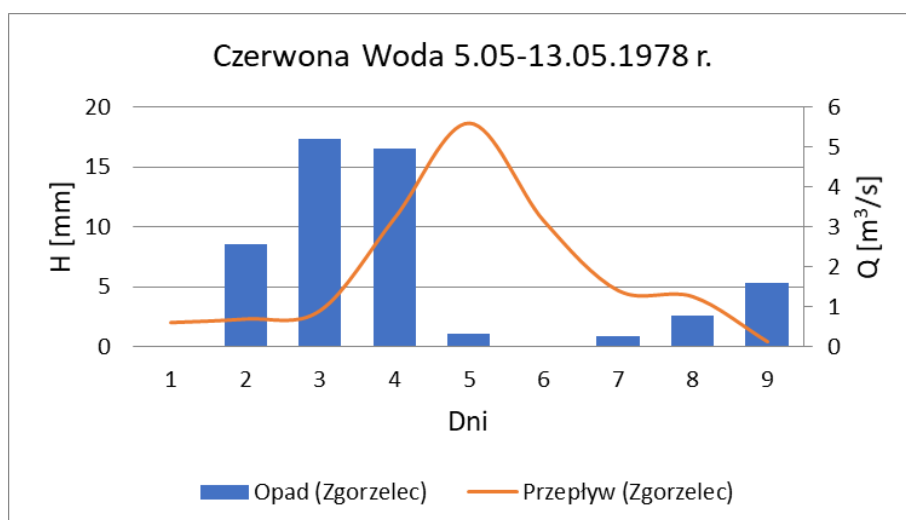
Rysunek 36. Brynica – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



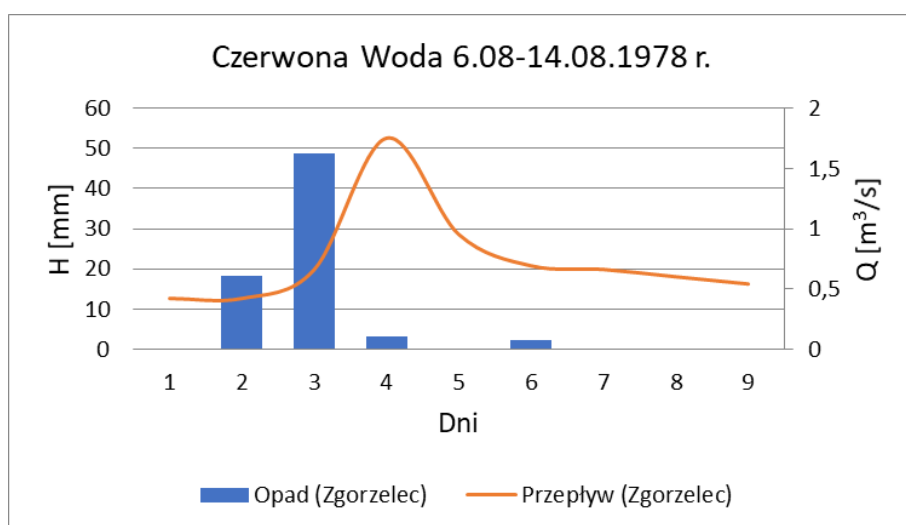
Rysunek 37. Brynica – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



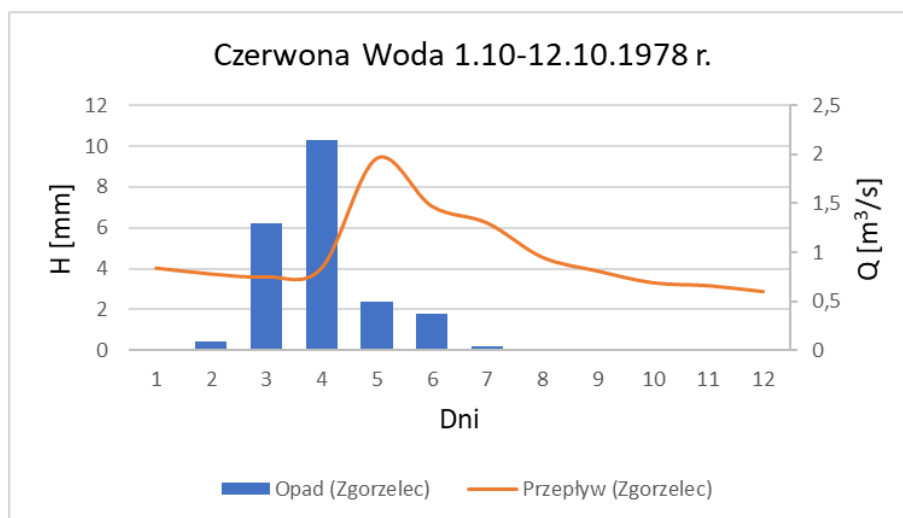
Rysunek 38. Czerwona Woda – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



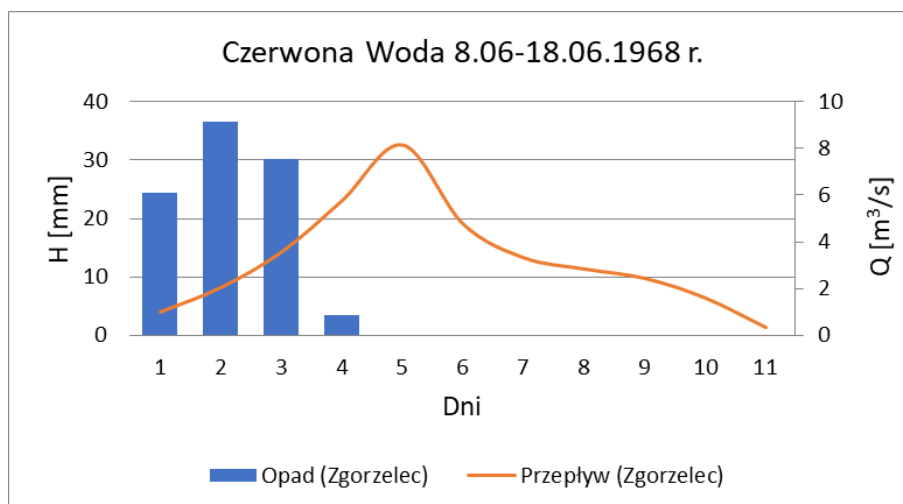
Rysunek 39. Czerwona Woda – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



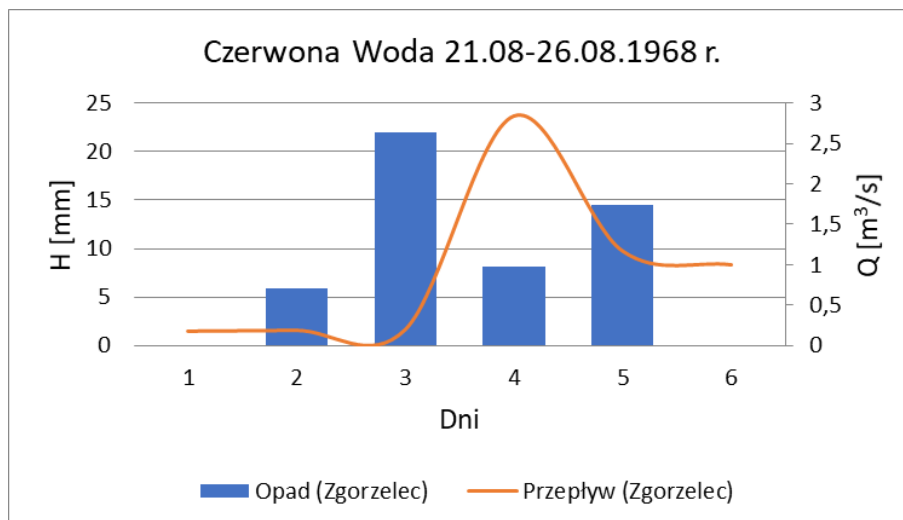
Rysunek 40. Czerwona Woda – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



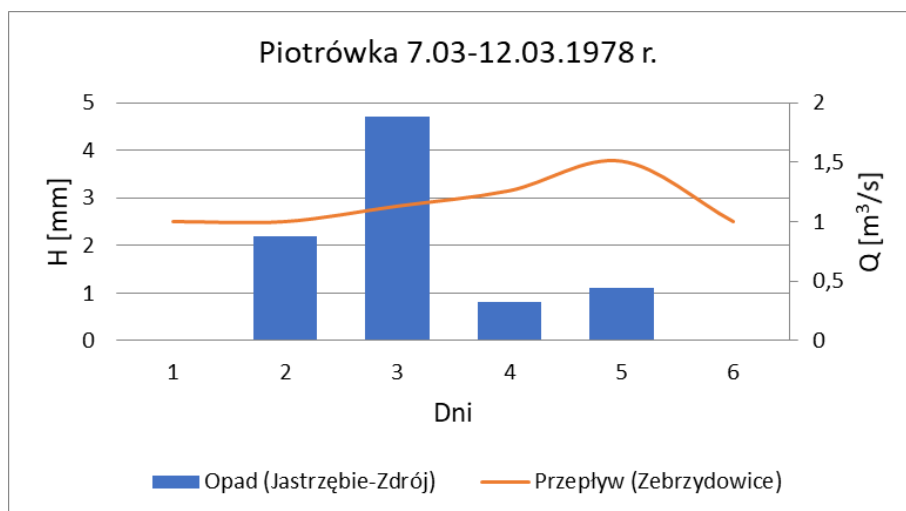
Rysunek 41. Czerwona Woda – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



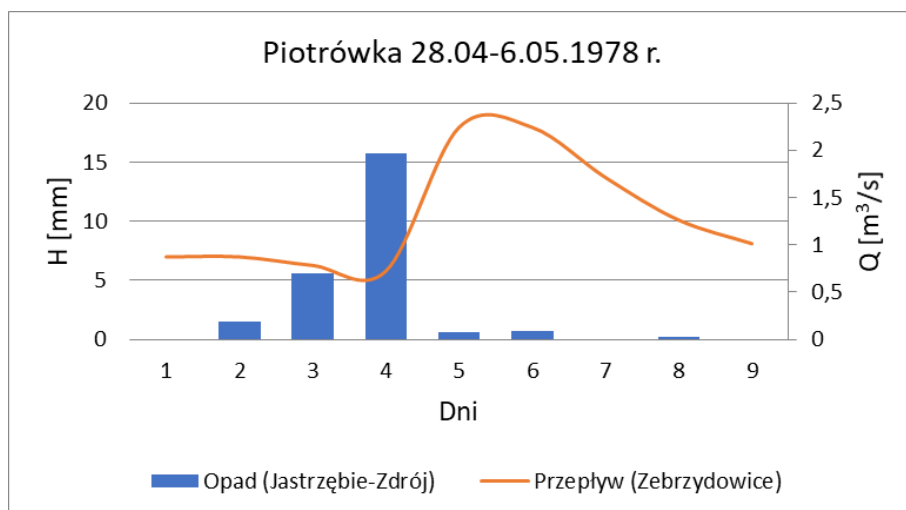
Rysunek 42. Czerwona Woda – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971)



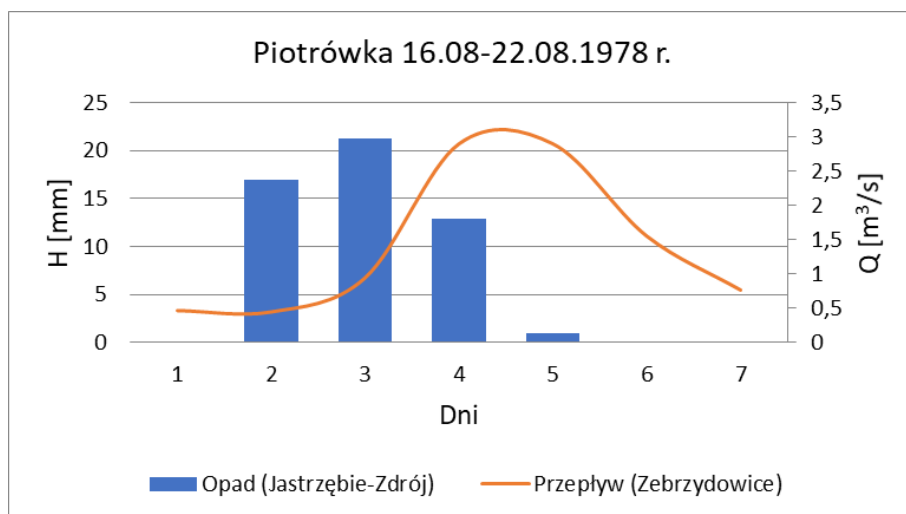
Rysunek 43. Czerwona Woda – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971)



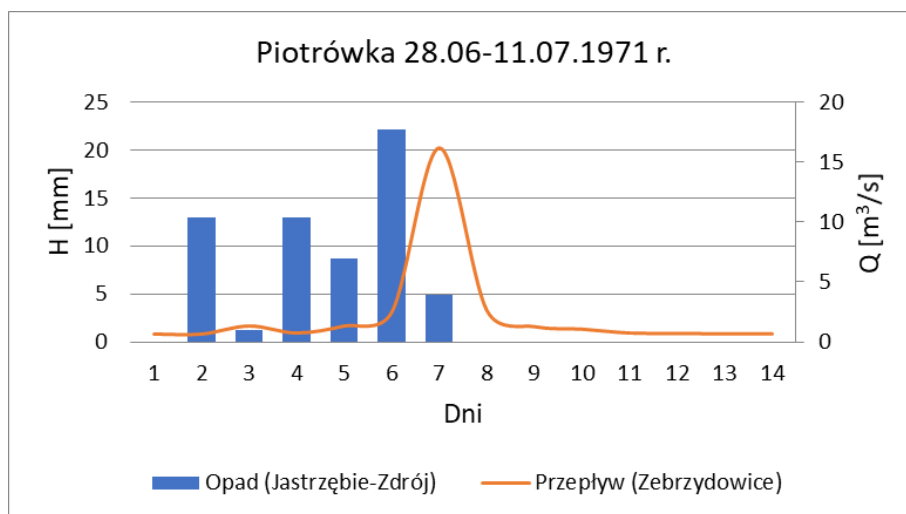
Rysunek 44. Piotrówka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



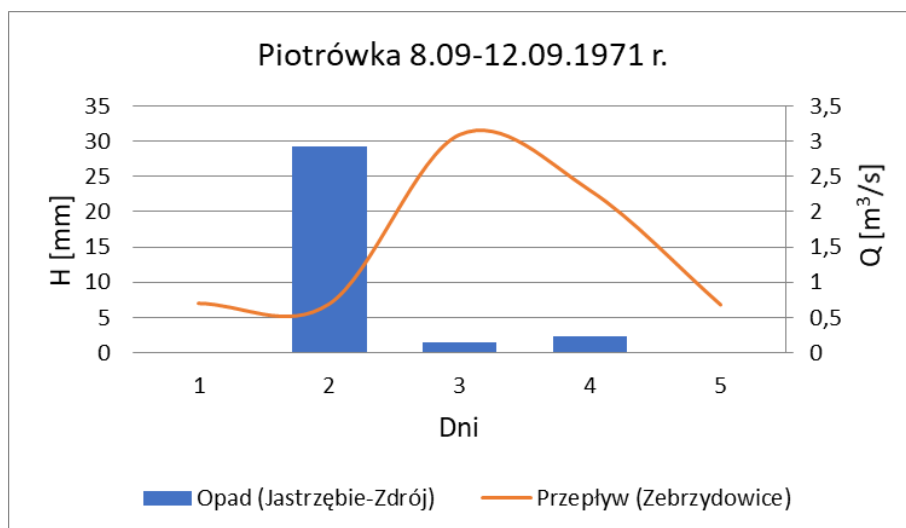
Rysunek 45. Piotrówka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



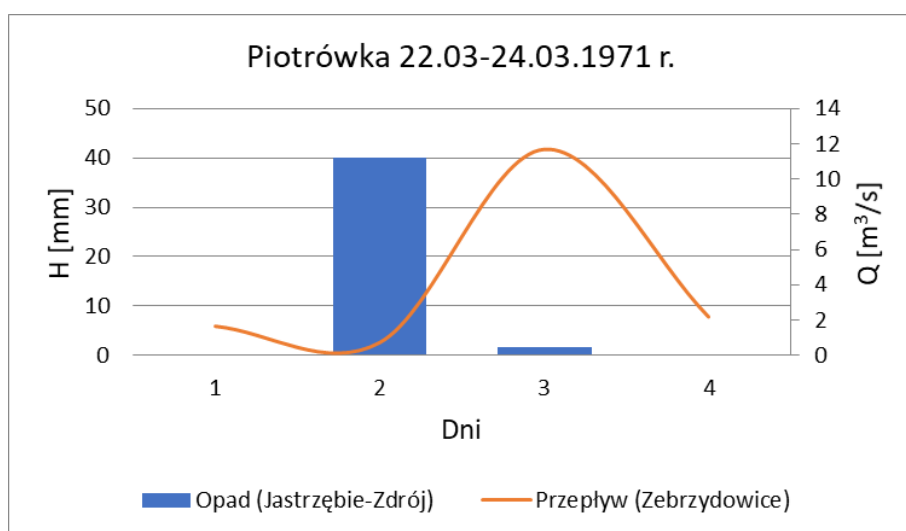
Rysunek 46. Piotrówka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



Rysunek 47. Piotrówka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)



Rysunek 48. Piotrówka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)



Rysunek 49. Piotrówka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)

4. Przyjęte założenia i ograniczenia kalkulacyjne

Jak wynika z rozdziału 2, jednym z głównych czynników decydujących zarówno o wyborze struktury modelu jak i jakości uzyskiwanych wyników jest zakres i jakość posiadanych danych pomiarowych. Do przeprowadzonej analizy posłużono się danymi pomiarowymi pozyskanymi z publicznej bazy danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB). Dla każdej zlewni przyjęto dane opadowe pozyskane z pojedynczego posterunku zlokalizowanego jak najbliżej przekroju zamykającego rozważaną zlewnię. Usytuowanie posterunków opadowych względem posterunków wodowskazowych ukazane jest na rysunkach 15-19. Ograniczenie źródła informacji opadowych do jednego punktu pomiarowego nie umożliwia uzyskania pełnego przestrzennego rozkładu zjawiska na obszarze zlewni, co w konsekwencji może nie ukazać lub ukazać niewłaściwe związki między opadem a odpływem. Niepewność ta jest jednak zdecydowanie mniejsza, gdy analizowany obszar zlewni jest niewielki, a dane pomiarowe usytuowane są w jego granicach.

Do zastosowania metody chwilowego współczynnika spływu niezbędne jest określenie czasu dobiegania w zlewni, czyli parametru t_0 . Nie dysponowano niestety odpowiednimi danymi w tym zakresie, dlatego przyjęto uproszczenie w postaci błyskawicznego czasu dobiegania w zlewni, czyli:

$$t_0=0 \text{ (godz.)}$$

Takie założenie obarczone jest oczywiście pewnym błędem, jednak znajduje swoje uzasadnienie w tym, że wszystkie analizowane zlewnie mają niewielką powierzchnię (mniejszą od 200 km²).

Ponieważ dysponowano wyłącznie dobowymi pomiarami opadów i przepływów, do obliczeń przyjęto dobowy krok czasowy $\Delta t=24\text{h}$. Jako warunek początkowy przyjęto wartość wyjścia modelu w czasie $t=1$ równą wartości przepływu obserwowanego w czasie $t=1$.

Do kryterium jednoczesnej analizy kilku cech hydrogramu JAKC wybrano trzy bezwzględne kryteria składowe: kryterium 1, kryterium 2 oraz kryterium 3.

Przy określaniu wartości kryteriów informacyjnych modeli nie uwzględniono kryteriów estymacji, dla których osiągnięto wartości ≤ 0 , tj. Δt_p , NSE, JAKC, kryterium szczytów przesuwanych, NSE_i .

Założono, że współczynnik rozdziału opadu efektywnego β przyjmuje wartości 0,25, 0,5 oraz 0,75. Podczas obliczeń nie rozważano więc przypadku, w którym modele dwukaskadowe ograniczają swoją strukturę do jednego typu kaskady, czyli kaskady Nasha lub SC2. Aspekt

ten został natomiast uwzględniony podczas końcowej analizy wyników. Porównując wartości kryteriów estymacji uzyskane w toku obliczeń dla modelu Diskina i kaskady Nasha do modelu Diskina ostatecznie przypisywano bardziej optymalną z tych dwóch wartości. Podobnie postępowano w przypadku modelu NCSC2, dla którego ostatecznie przypisywano lepszą z wartości uzyskanych w toku obliczeń dla kaskady Nasha, SC2 oraz modelu NCSC2.

5. Wyniki

5.1 Przedstawienie przykładowych wyników

Wartości stosowanego kryterium estymacji dla poszczególnych kombinacji zestawów wartości parametrów generowano w układzie dwóch parametrów (m, k) dla modeli pojedynczego zbiornika liniowego i kaskady Nasha oraz w układzie (N, k) dla pozostałych modeli. Stosując w programie Excel formatowanie warunkowe, można obserwować rozkład uzyskiwanych wartości kryteriów estymacji. W tym celu zastosowano gradientową zmianę kolorów, oznaczając kolorem czerwonym wartości maksymalne, zielonym percentyl 50 a żółtym wartości minimalne. Białe komórki oznaczają brak optymalnego rozwiązania. Zaprezentowane na rys. 50 i 51 rozkłady wartości kryteriów estymacji w układzie parametrów (m, k) uzyskano przyjmując kroki zmienności parametrów odpowiednie dla drugiego cyklu obliczeniowego, otrzymując tym samym zakres wartości parametrów m i k od 1 do 40.

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły uzyskać różne zestawy parametrów dla każdej analizowanej struktury modelu koncepcyjnego w zależności od zastosowanego kryterium estymacji. Ostateczne wartości parametrów otrzymane w zależności od zastosowanego kryterium estymacji dla rzeki Brynicy przedstawiono w tabelach 5-9. Wyniki otrzymane dla pozostałych rzek zamieszczone są w załączniku nr 2. Zaprezentowana wartość kryterium JAKC odnosi się do wartości ΔV , będącej trzecim składowym kryterium JAKC. Przedstawiona wartość kryterium szczytów przesuwanych jest wartością SSE uzyskaną przy nałożeniu hydrogramu symulowanego na hydrogram obserwowany, tak aby uzyskać pełną zgodność czasu występowania szczytów fal.

Table with columns m, k, and numerical data for indices 1 to 40. The table contains multiple rows of values, likely representing a matrix or data set for a specific analysis.

Rysunek 50. Przykładowy rozkład wartości kryterium ΔV otrzymane dla struktury pojedynczego zbiornika liniowego dla wydarzenia 5 na rzece Żebrówka

Table with columns m/k and numerical data for indices 1 to 40. This table shows a distribution of values for a specific criterion, with data points repeated for each index from 1 to 40.

Rysunek 51. Przykładowy rozkład wartości kryterium r otrzymane dla struktury kaskady Nasha dla wydarzenia 5 na rzece Żebrówka

Tabela 5. Pojedynczy zbiornik liniowy, Brynica – wyniki estymacji parametrów

Brynica																
Data	Parametry	Δy_{max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-04.05.1981	m	23,30	13,85	6,65	3,40	3,40	0,35	4,70	149,30	1,70	10,45	3,40	29,55	5,20	6,10	5,05
	k	2,15	14,35	16,20	28,30	28,30	64,75	22,75	48,75	40,25	7,90	28,30	61,00	15,70	15,35	25,75
	Wartość	0,0001	1	3,14	0,653	0,0296	23,18	1,0001	0,811	0,30	0,12	0,2661	0,979	58563,22	0,1180	0,863
07.09-22.09.1981	m	7,65	15,90	5,25	14,10	14,10	7,40	4,80	149,60	0,10	21,85	14,10	2,70	16,85	16,50	10,10
	k	6,30	11,95	25,30	7,45	7,45	62,45	27,65	7,80	30,95	9,70	7,40	64,25	1,45	3,00	42,55
	Wartość	0,0001	0	57,37	0,459	0,7084	31,44	1,0000	0,693	1,57	0,50	11,3338	0,953	168,88	4,7943	0,881
01.08-07.08.1981	m	2,80	0,05	2,40	2,30	2,30	2,50	2,25	38,10	0,20	4,90	2,30	0,05	0,00	7,10	0,55
	k	5,05	0,05	14,55	16,10	16,10	79,30	16,50	16,35	27,50	4,85	16,10	0,05	0,00	1,05	85,60
	Wartość	0,0012	2	46,13	0,153	0,6982	48,12	1,0003	0,391	1,40	0,59	4,8871	0,214	0,00	1,9924	0,496
06.10-17.10.1980	m	1,10	10,20	6,10	10,20	10,20	10,35	2,60	150,95	7,25	12,10	10,20	13,60	8,75	11,05	10,65
	k	17,40	3,90	13,50	5,35	5,35	22,90	27,15	5,85	7,95	3,80	5,35	9,50	4,00	1,30	26,30
	Wartość	0,0001	0	48,57	0,738	0,2328	37,75	1,0000	0,897	0,72	0,37	2,7931	0,998	355023,61	0,8082	0,887
18.04-07.05.1980	m	2,20	0,05	17,70	0,05	0,05	2,15	4,35	0,05	0,05	0,35	0,05	4,00		27,95	3,55
	k	22,65	0,05	6,00	57,50	57,50	85,40	29,65	13,30	46,00	66,25	57,50	13,95		1,05	49,10
	Wartość	0,0001	3	0,89	0,340	0,1169	28,98	1,0000	0,609	0,65	0,26	1,6362	0,690		1,2919	0,725
14.11-25.11.1980	m	0,40	0,05	0,50	2,40	2,40	4,45	2,70	0,05	0,10	3,85	2,40	5,65		2,15	3,65
	k	3,90	0,05	13,00	3,80	3,80	3,40	3,35	4,95	7,90	2,95	3,80	3,75		1,95	3,05
	Wartość	0,0006	1	278,26	0,414	0,0659	14,91	1,0000	0,666	0,49	0,16	0,7903	0,858		0,3448	0,718

Tabela 6. Kaskada Nasha, Brynica – wyniki estymacji parametrów

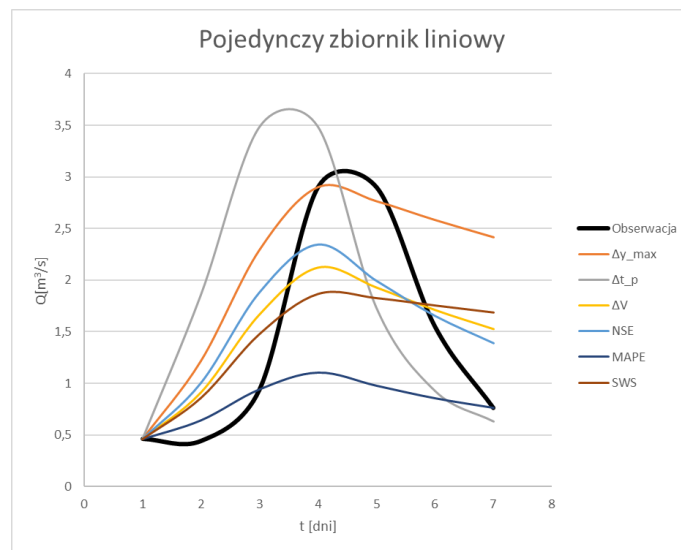
Brynica																
Data	Parametry	Δy_{max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-04.05.1981	m	25,30	0,05	5,60	65,00	64,00	41,15	12,70	146,55	27,10	42,85	64,00	2,70	41,15	35,05	59,90
	k	0,80	0,35	1,05	0,50	0,50	0,55	3,55	0,50	0,40	0,65	0,50	0,40	0,60	1,00	0,50
	N	9,30	8,40	8,15	6,50	7,80	6,25	2,80	6,60	8,00	5,35	6,50	8,55	6,30	2,55	6,50
	Wartość	0,0000	0	2,16	0,980	0,0018	6,88	1,0000	0,991	0,09	0,04	0,0153	0,992	4,98	0,0090	0,967
07.09-22.09.1981	m	10,90	0,05	77,30	41,00	41,00	55,35	1,65	151,00	37,20	48,85	41,00	2,20	25,20	36,00	37,70
	k	1,75	0,25	1,20	0,40	0,40	1,50	12,55	0,35	0,80	0,55	0,40	13,80	0,40	1,00	1,00
	N	5,20	8,45	8,95	9,25	9,25	4,25	1,95	10,00	5,40	6,50	9,25	1,25	6,00	2,75	6,00
	Wartość	0,0000	0	82,52	0,825	0,2294	21,14	1,0000	0,914	1,06	0,35	3,6708	0,968	195,79	3,5028	0,931
01.08-07.08.1981	m	5,30	0,05	4,60	19,75	19,75	45,45	6,70	0,05	18,70	23,55	19,75	0,05	17,50	17,35	49,10
	k	0,95	0,45	3,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,65	0,50	0,40	0,55
	N	4,15	6,50	1,95	6,50	6,50	6,75	2,10	7,00	6,50	6,50	6,50	5,30	6,50	5,40	6,70
	Wartość	0,0000	0	1,87	0,884	0,0957	20,01	1,0000	0,956	0,45	0,21	0,6701	0,964	120723,62	0,0943	0,902
06.10-17.10.1980	m	35,60	1,00	17,00	41,65	41,65	41,65	14,00	145,85	23,15	35,75	41,65	2,60	26,45	17,05	27,15
	k	1,10	0,45	0,50	0,65	0,65	0,80	1,50	0,50	0,70	0,80	0,65	1,65	0,50	0,50	0,80
	N	6,75	7,00	2,3500	5,60	5,60	5,40	4,05	7,00	5,25	4,55	5,60	2,80	6,25	5,00	6,15
	Wartość	0,0000	0	5,42	0,956	0,0392	21,69	1,0000	0,981	0,36	0,17	0,4699	0,998	872,10	0,3813	0,965
18.04-07.05.1980	m	37,80	0,40	17,70	20,20	20,20	26,75	55,35	2,00	18,95	20,00	20,20	2,00	16,85	20,50	38,10
	k	0,85	0,70	6,00	0,75	0,75	0,75	0,70	0,70	0,80	0,75	0,75	0,70	0,75	0,50	0,80
	N	2,55	6,00	1,00	6,00	6,00	6,05	2,80	6,60	6,00	6,00	6,00	6,50	6,00	7,00	6,25
	Wartość	0,0000	0	0,89	0,862	0,0245	14,10	1,0000	0,983	0,34	0,11	0,3423	0,976	121753,72	0,1037	0,948
14.11-25.11.1980	m	5,30	0,05	10,10	3,50	3,50	7,50	2,75	0,05	3,95	3,15	3,50	0,75	3,95	3,50	4,60
	k	0,50	0,35	1,30	0,50	0,50	1,15	1,35	0,45	0,40	0,60	0,50	0,45	0,35	0,50	0,60
	N	3,25	5,95	3,80	6,00	6,00	3,00	1,65	7,00	7,00	5,00	6,00	7,00	6,00	6,00	5,00
	Wartość	0,0000	0	3,17	0,809	0,0214	11,21	1,0000	0,946	0,25	0,10	0,2572	0,998	2624,00	0,2572	0,893

Tabela 9. NSC2, Brynica – wyniki estymacji parametrów

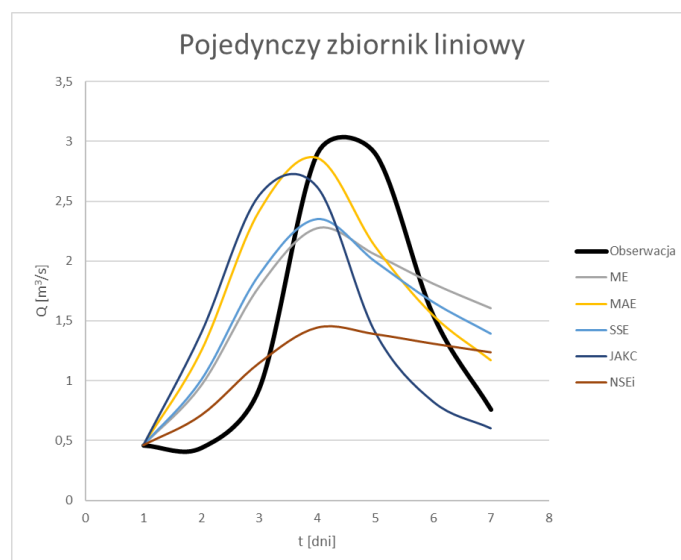
		Brynica														
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przestawne	NSE _i
26.04-04.05.1981	k1	33,00	0,10	81,00	0,70	0,70	1,00	76,00	0,70	0,80	1,00	0,70	0,10	1,00	1,00	19,60
	N1	3,00	1,00	3,00	4,50	4,50	4,00	3,00	5,00	4,50	4,00	4,50	1,00	4,00	2,50	4,00
	m	22,00	0,60	1,00	21,20	21,20	22,50	26,00	20,50	25,00	22,30	21,20	0,10	11,00	26,10	16,40
	N2	5,00	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	2,00	4,00
	k2	10,00	1,10	90,80	3,20	3,20	3,50	1,00	2,50	2,30	3,50	3,20	1,50	41,40	6,90	3,50
	β	0,50	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,25	0,50	0,75	0,75	0,25	0,50	0,25	0,75
	Wartość	0,0000	0	1,10	0,978	0,0019	6,28	1,0000	0,991	0,07	0,03	0,0168	0,992	21,90	0,0088	0,993
07.09-22.09.1981	k1	8,00	0,10	11,00	0,70	0,70	1,00	65,00	123,30	102,50	0,80	0,70	1,80	52,90	1,50	1,10
	N1	5,00	1,00	4,00	5,50	5,50	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	2,00	5,00
	m	2,00	0,60	31,00	20,00	20,00	31,70	52,60	124,00	4,70	20,10	20,00	5,40	5,30	13,90	27,00
	N2	2,00	2,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,00	4,00
	k2	7,10	0,60	41,00	2,20	2,20	1,50	7,30	2,10	2,10	2,50	2,20	2,00	14,20	5,30	0,60
	β	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Wartość	0,0000	0	2,79	0,804	0,2569	20,62	1,0000	0,911	1,07	0,31	4,1099	0,971	10,06	2,6499	0,929
01.08-07.08.1981	k1	61,00	0,10	73,80	0,70	0,70	12,00	57,00	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70	124,00	1,00	124,00
	N1	2,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,00	4,50	4,50	5,00	5,00	5,00	4,50	2,00	5,00
	m	81,00	0,10	1,00	1,10	1,10	9,00	93,50	0,10	4,10	8,10	1,10	0,10	2,90	6,90	3,10
	N2	5,00	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	2,00	5,00	5,00	3,00	2,00	5,00	4,00	5,00	5,00
	k2	11,70	0,70	21,00	80,10	80,10	4,50	2,00	2,60	44,60	3,60	80,10	12,60	3,00	8,40	6,90
	β	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,75	0,50	0,50	0,50	0,75	0,50	0,25	0,75	0,50	0,50
	Wartość	0,0000	0	0,28	0,789	0,1735	16,03	1,0000	0,905	0,74	0,29	1,2147	0,964	251169,67	0,0049	0,983
06.10-17.10.1980	k1	27,80	0,10	41,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	0,30	0,90	0,90	1,00
	N1	3,00	1,00	3,00	4,00	4,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	1,50	4,00	3,00	5,00
	m	48,70	18,60	26,00	11,10	11,10	21,00	12,00	123,50	11,00	16,00	11,10	4,10	4,60	10,00	20,60
	N2	3,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	3,00	5,00	5,00	3,00	2,00	4,00	5,00	5,00
	k2	2,70	0,10	75,00	43,10	43,10	3,50	79,10	1,20	26,90	4,50	43,10	1,00	36,70	18,00	1,50
	β	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25
	Wartość	0,0000	0	3,05	0,923	0,0681	22,17	1,0000	0,979	0,41	0,18	0,8170	0,998	150422,27	0,3917	0,958
18.04-07.05.1980	k1	63,20	0,10	1,00	0,70	0,70	0,90	41,00	1,00	1,00	0,90	0,70	1,00	1,00	15,10	1,00
	N1	3,50	2,00	2,00	6,00	6,00	5,00	4,00	5,00	5,00	6,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	m	20,80	0,10	21,00	2,90	2,90	2,60	1,00	0,10	1,70	7,60	2,90	0,60	1,30	3,00	12,20
	N2	3,00	3,00	5,00	2,00	2,00	2,00	4,00	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00
	k2	9,00	0,60	90,10	34,60	34,60	44,00	36,00	29,60	38,60	64,00	34,60	0,10	41,50	15,60	86,90
	β	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,75	0,25	0,25	0,75	0,50	0,50	0,25	0,75	0,25	0,50
	Wartość	0,0000	0	0,44	0,904	0,0170	12,93	1,0000	0,967	0,23	0,11	0,2374	0,976	134110,33	0,2011	0,932
14.11-25.11.1980	k1	31,30	0,10	20,00	0,70	0,70	44,00	1,60	0,70	0,90	35,00	0,70	1,00	17,40	0,80	0,70
	N1	3,50	1,00	4,00	4,50	4,50	5,00	2,50	4,50	4,50	5,00	4,50	3,50	4,00	3,00	4,50
	m	56,00	0,60	2,00	0,20	0,20	2,20	12,40	0,10	1,00	0,10	0,20	2,10	0,90	0,20	1,00
	N2	1,00	2,00	5,00	2,00	2,00	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,00	2,00	4,00	2,00	2,00
	k2	16,40	0,60	11,00	28,90	28,90	3,00	11,90	3,50	31,50	6,10	28,90	22,60	12,20	35,10	59,50
	β	0,25	0,25	0,75	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,75	0,50	0,50	0,25	0,75	0,25	0,50
	Wartość	0,0000	0	18,74	0,834	0,0187	11,98	1,0000	0,921	0,29	0,11	0,2247	0,998	94,01	0,1624	0,914

Przykładowe wyniki kaskady Nasha, modelu SC2 i pojedynczego zbiornika liniowego uzyskane dla Czerwonej Wody przy zmniejszanych krokach zmienności wartości parametrów zawarte są w tabelach 10-12.

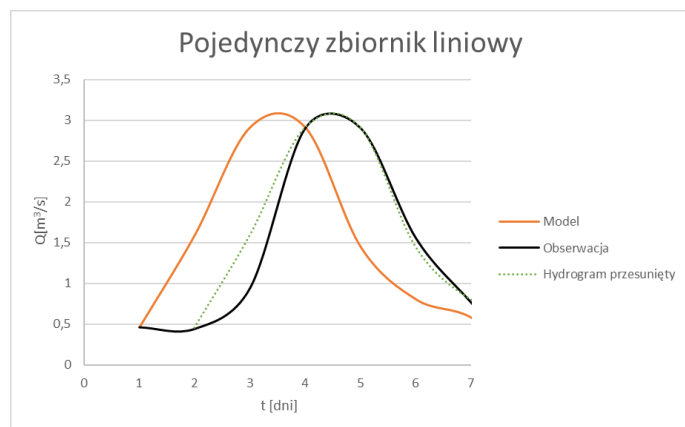
Oceny jakości modeli dokonano w oparciu o porównanie przebiegów otrzymanych hydrogramów modelowych i obserwowanych. Zestawiając na wykresie symulacje otrzymane przy użyciu jednego modelu przy zastosowaniu różnych kryteriów estymacji możliwe jest określenie wpływu poszczególnych kryteriów na kształt generowanych hydrogramów (rys.52-66). Na wykresach zazwyczaj nie uwzględniano kryteriów Δt_p , r oraz r_s , gdyż otrzymywane przy ich użyciu symulacje często znacznie wykraczały zakresem wartości przepływów poza rząd wielkości przepływów hydrogramu obserwowanego, zmniejszając tym samym przejrzystość wykresów.



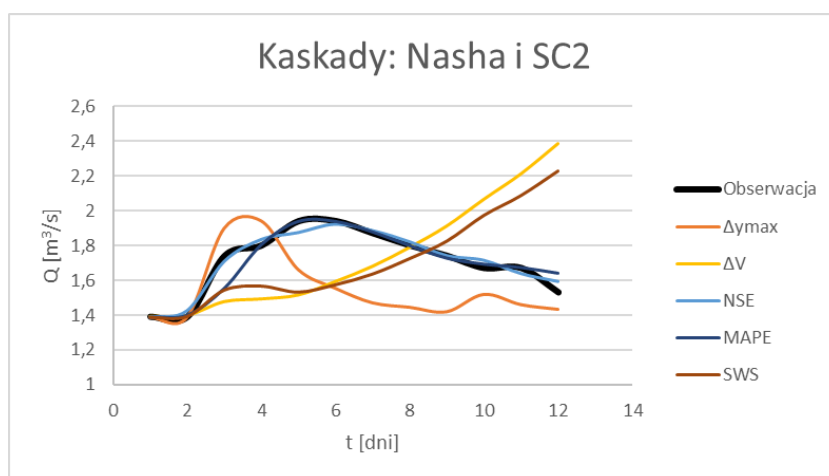
Rysunek 52. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Piotrówka – wydarzenie 3



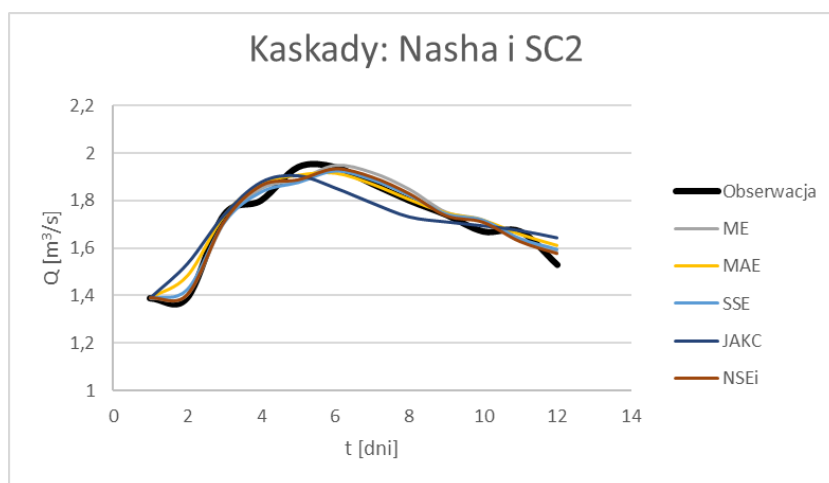
Rysunek 53. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Piotrówka – wydarzenie 3



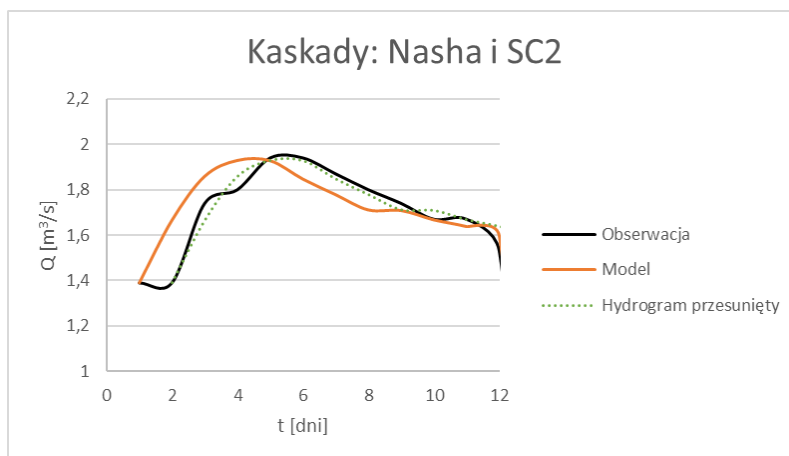
Rysunek 54. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryterium 14; Piotrówka – wydarzenie 3



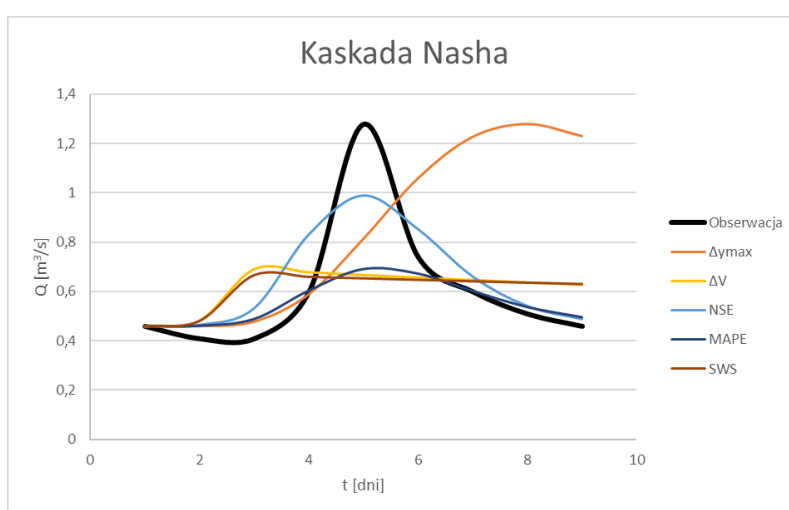
Rysunek 55. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Pasłęka – wydarzenie 6



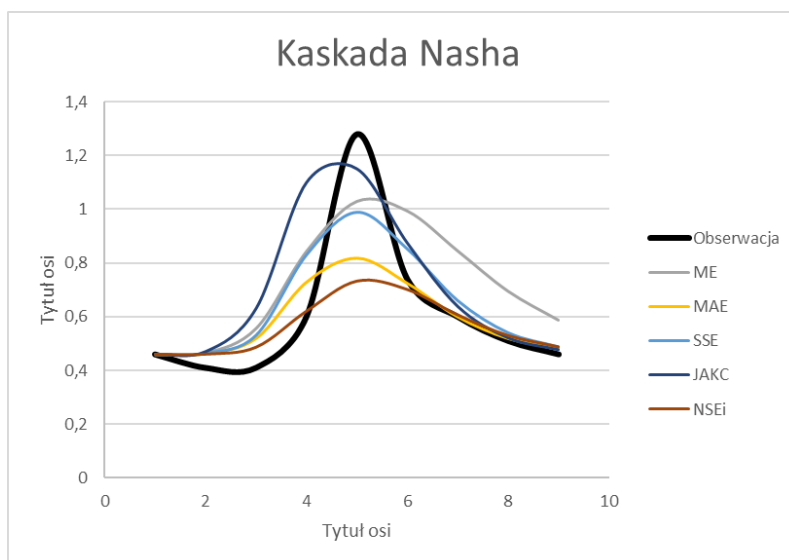
Rysunek 56. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Pasłęka – wydarzenie 6



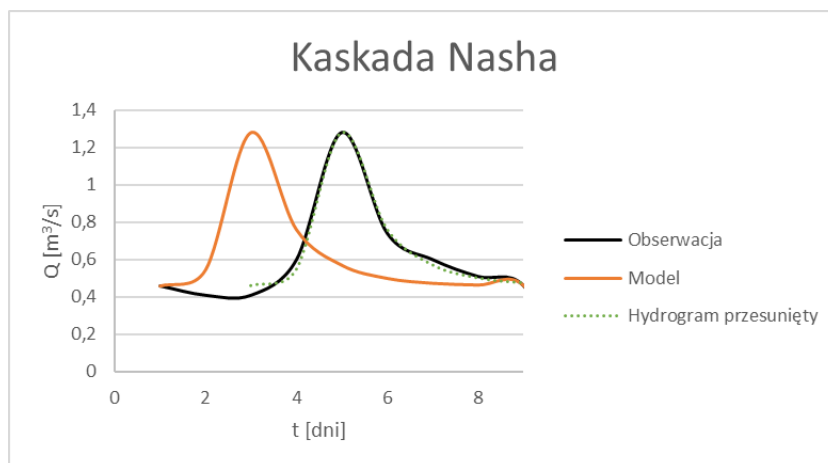
Rysunek 57. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryterium 14; Pasłęka – wydarzenie 6



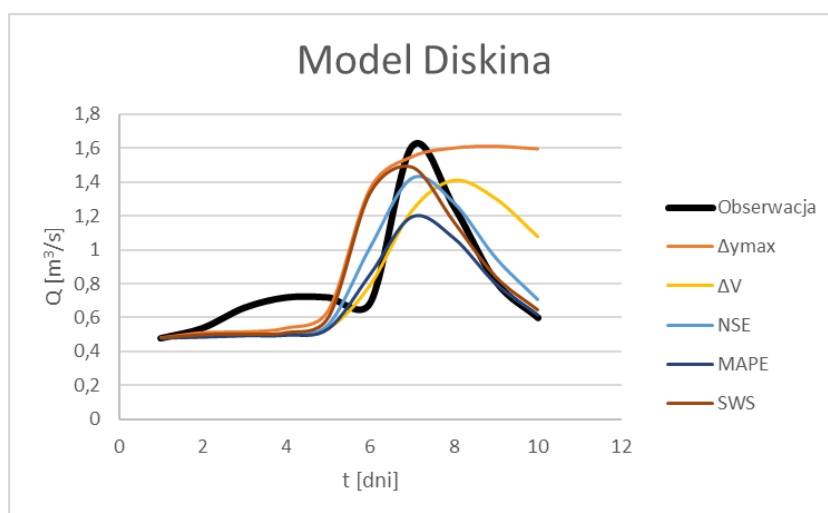
Rysunek 58. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Żebrówka – wydarzenie 3



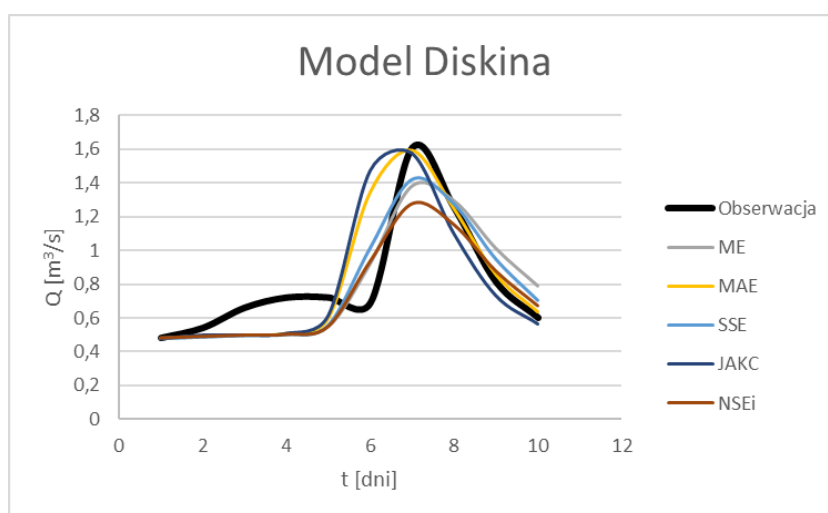
Rysunek 59. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Żebrówka – wydarzenie 3



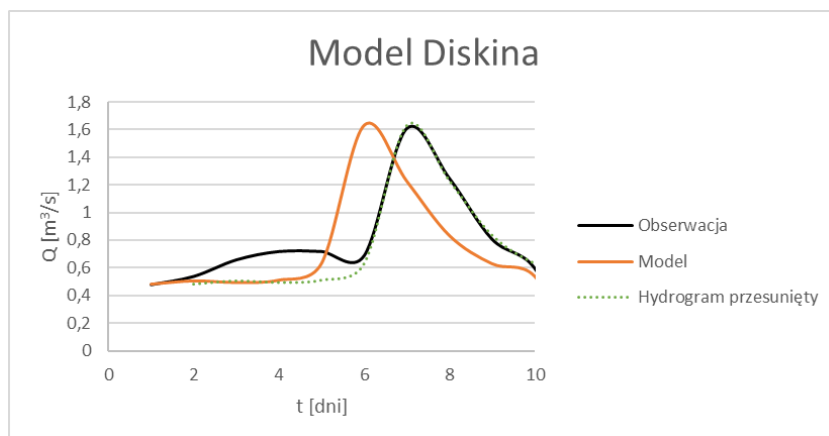
Rysunek 60. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryterium 14; Żebrówka – wydarzenie 3



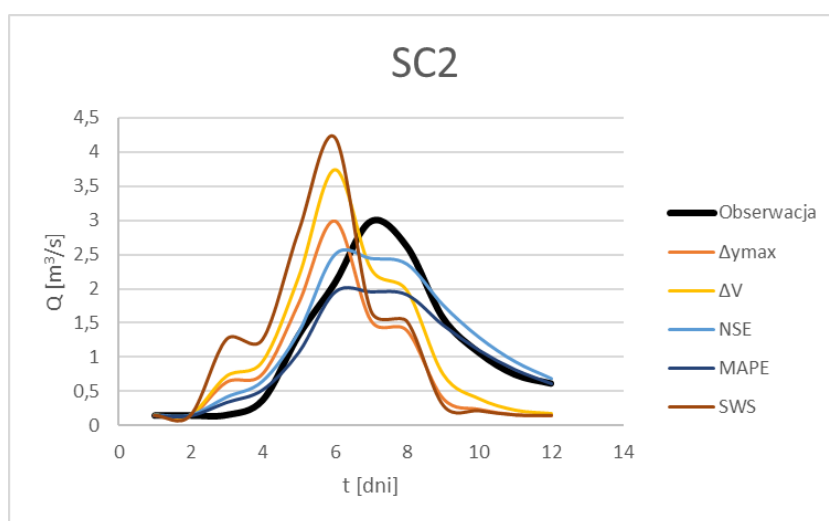
Rysunek 61. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Czerwona Woda – wydarzenie 1



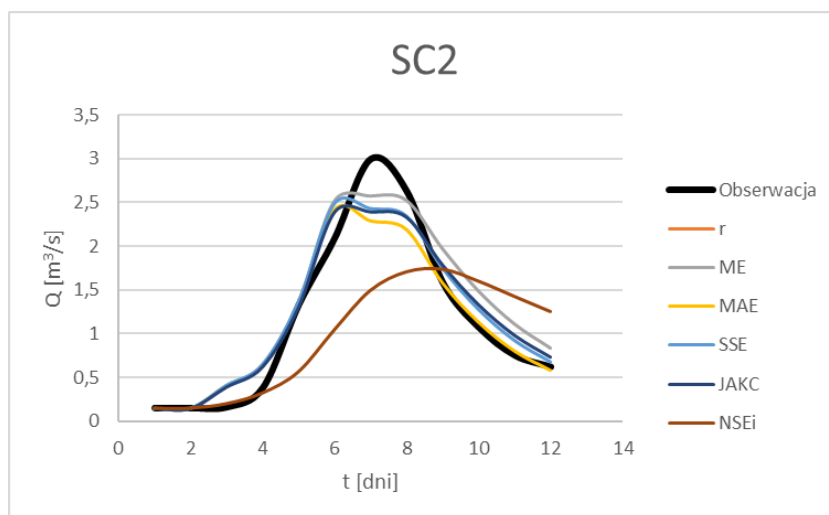
Rysunek 62. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Czerwona Woda – wydarzenie 1



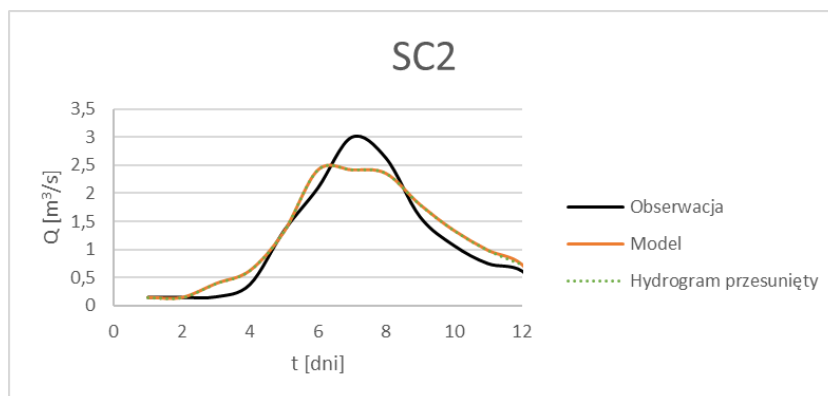
Rysunek 63. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryterium 14; Czerwona Woda – wydarzenie 1



Rysunek 64. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Brynica – wydarzenie 4

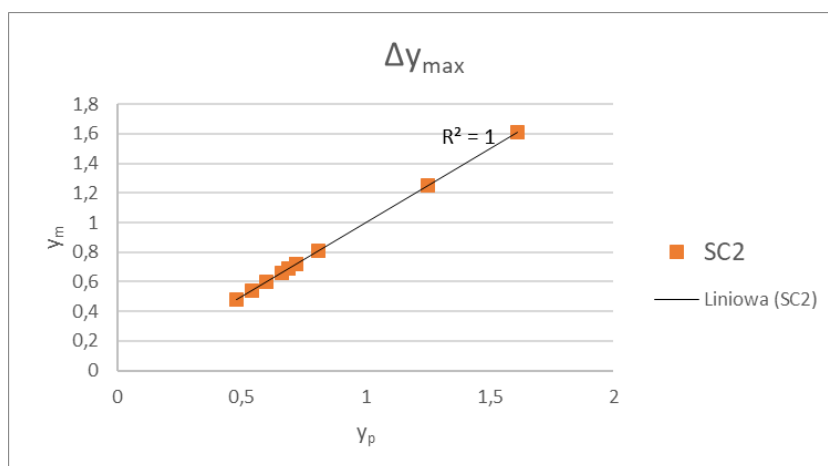


Rysunek 65. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Brynica – wydarzenie 4

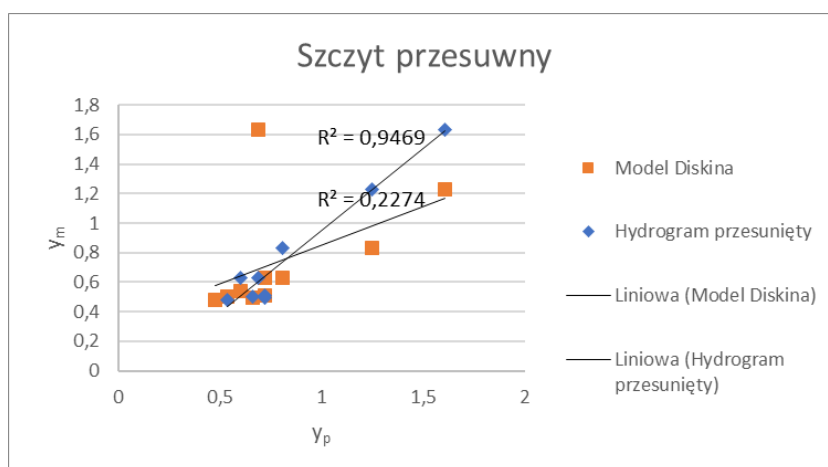


Rysunek 66. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryterium 14; Brynica – wydarzenie 4

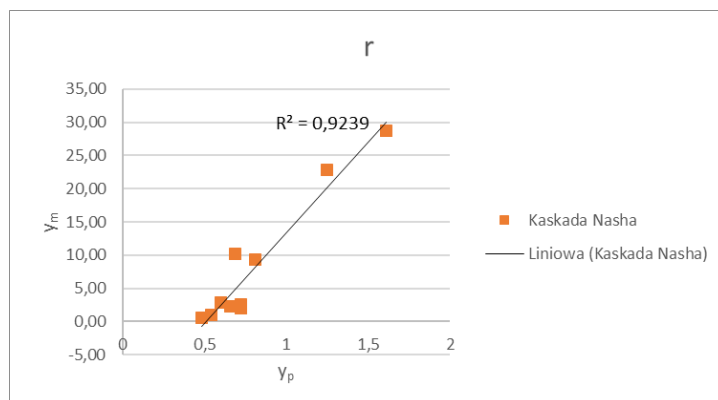
Dodatkowo do oceny jakości symulacji posłużono się wykresem zestawiającym wartości modelowane przy użyciu danego kryterium y_m oraz wartości obserwowane y_o . Przykładowe wyniki przedstawiają rys. 67-69.



Rysunek 67. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych modelem SC2 przy kryterium Δy_{\max} ; Czerwona Woda – wydarzenie 1

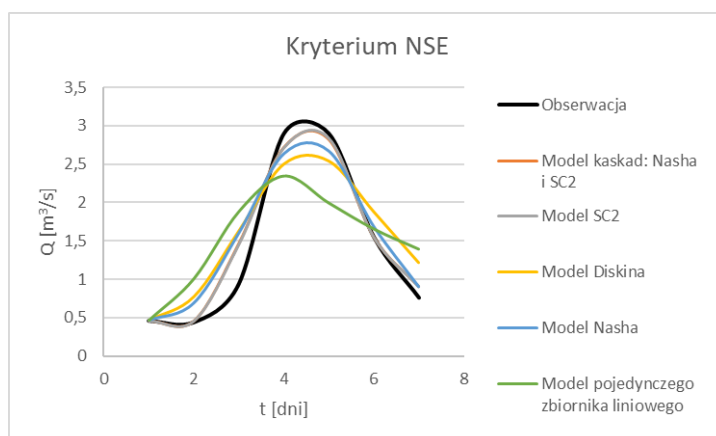


Rysunek 68. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych modelem Diskina przy kryterium szczytów przesuwnych; Czerwona Woda – wydarzenie 1

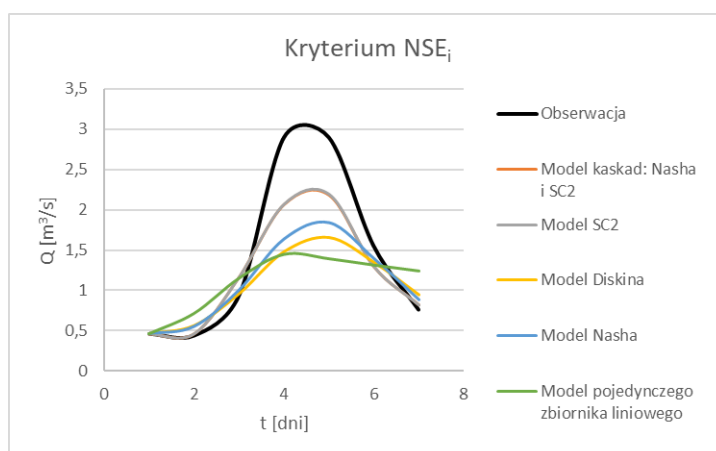


Rysunek 69. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych kaskadą Nasha przy kryterium r ; Czerwona Woda – wydarzenie 1

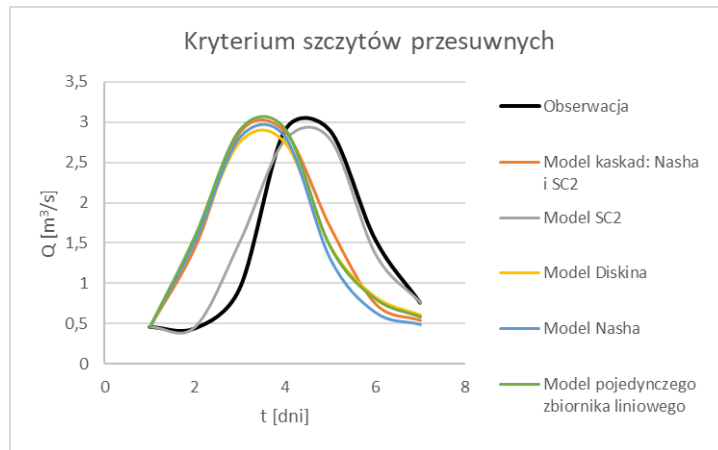
Wiodącą metodą oceny porównawczej jakości analizowanych struktur modeli konceptualnych jest porównanie przebiegów hydrogramów wynikowych uzyskanych dla różnych struktur modeli przy tym samym kryterium estymacji (rys.70-74). Metoda ta pozwala również określić, czy wyższość danej struktury nad pozostałymi zależy od zastosowanego kryterium estymacji.



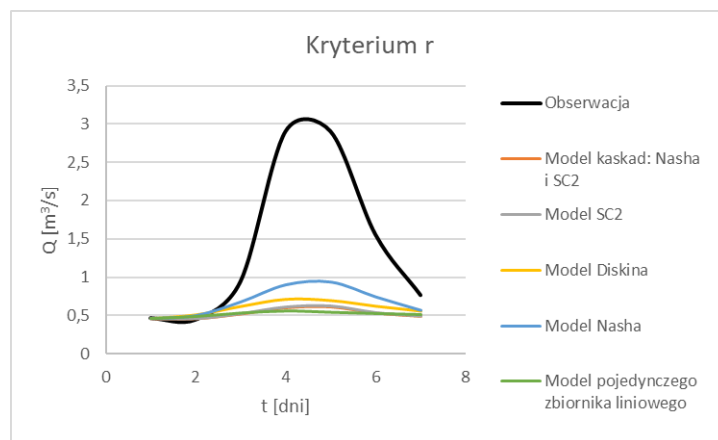
Rysunek 70. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Piotrówka – wydarzenie 3



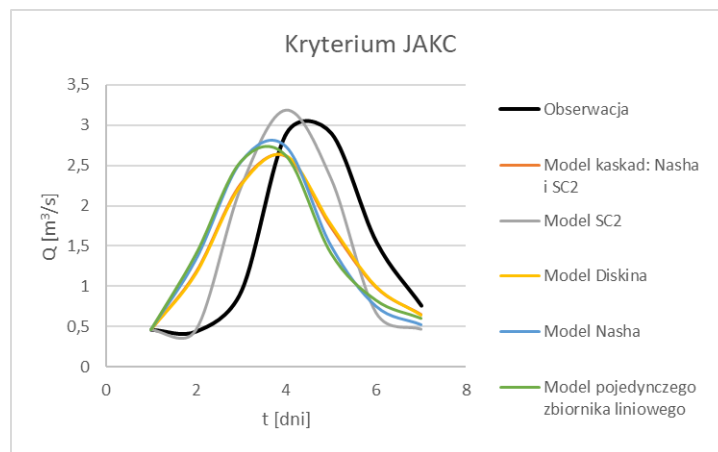
Rysunek 71. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE_i; Piotrówka – wydarzenie 3



Rysunek 72. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Szczytów przesuwnych; Piotrówka – wydarzenie 3



Rysunek 73. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r; Piotrówka – wydarzenie 3



Rysunek 74. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Piotrówka – wydarzenie 3

Oprócz metody graficznej do porównania efektywności poszczególnych struktur modeli wykorzystano kryteria informacyjnymi AIC oraz BIC. Otrzymane średnie wartości kryteriów informacyjnych uwzględniające możliwie wszystkie badane w pracy funkcje celu przedstawione są w tabeli 13.

Tabela 13. Średnie wartości AIC i BIC otrzymane dla poszczególnych struktur liniowych modeli zbiornikowych

Model	AIC	BIC
Pojedynczy zbiornik liniowy	2,119	2,686
Kaskada Nasha	2,125	2,975
Kaskada zbiorników zatopionych (SC2)	2,637	3,487
Model Diskina	6,620	8,319
Model kaskad: Nasha i SC2	6,366	8,065

5.2 Analiza wyników

Analiza przedstawionych w załączniku 2 wartości parametrów modeli uzyskanych na drodze estymacji za pomocą różnych funkcji celu nie wykazuje żadnych prawidłowości. Wartości parametrów różnią się w zależności od zastosowanego kryterium estymacji, co może świadczyć o braku fizycznego znaczenia parametrów analizowanych modeli. Nie obserwuje się powtarzalności wartości parametrów uzyskanych w obrębie jednej rzeki, ani też w obrębie jednego kryterium estymacji. Podobne wnioski wynikają z pracy Moussa & Chahiniana (2009).

Analiza wartości kryteriów estymacji otrzymywanych dla kolejnych przybliżeń wykazała, że zarówno z technicznego punktu widzenia, jak i pracy włożonej przy identyfikacji, zwiększenie dokładności parametrów modeli wynikającej z przeprowadzenia piątego cyklu obliczeń nie wprowadza znaczących zmian.

Przedstawiona na rys 75-83 analiza tabelarycznego zestawienia uzyskanych wartości kryteriów estymacji przedstawionego w układzie dwóch parametrów wskazuje, że poszczególne kryteria estymacji wykazują trendy rozwiązań optymalnych. Potwierdzają się zatem słowa Bardossy'ego (2007) na temat możliwych interesujących wewnętrznych zależności zachodzących między parametrami. Bardossy zauważył, że pary parametrów kaskady Nasha, dla których osiąga się dobrą jakość leżą wzdłuż krzywej hiperbolicznej. Podobne zjawisko zaobserwowano generując wartości kryteriów estymacji w tabelarycznym układzie parametrów m , k dla modeli pojedynczego zbiornika liniowego i kaskady Nasha (rys. 75-78). Zauważono jednak, że tendencja zmian jakości modelu odwraca się w obszarze niskich wartości parametru k dla niektórych kryteriów estymacji.

Rysunek 75. Rozkład wartości kryterium Δ_{max} otrzymane dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1

Rysunek 76. A Przybliżenie rozkładu wartości Δ_{max} uzyskanych dla małych wartości parametru $k < 0,1; 4,0 >$ przy użyciu pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1

Rysunek 77. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymane dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 2

Rysunek 78. Rozkład wartości kryterium Δ_{max} otrzymane dla kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 2

Jak wynika z rys. 82-85, hiperboliczny/UH-kształtny rozkład nie jest jednak zauważalny dla kryteriów korelacji liniowej, korelacji rang Spearmana i kryterium JAKC.

Rysunek 82. Rozkład wartości kryterium r otrzymany dla kaskady Nasha; Żębówka – wydarzenie 4

Rysunek 83. Rozkład wartości kryterium r, otrzymany dla kaskady Nasha; Żębówka – wydarzenie 3

Autorskie kryterium JAKC ze względu na swoją „hybrydową” strukturę często nie wykazywało żadnych ciągłych trendów. Można to zaobserwować na rys. 84 i 85.

Rysunek 84. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla kaskady Nasha; Żębówka – wydarzenie 3

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Rysunek 85. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrońka – wydarzenie 4

W przypadku kryterium szczytów przesuwnych oraz kryterium MAPE (rys. 86 i 87) oprócz kształtu „odwróconego UH” wyraźniej zarysowuje się obszar optymalnych rozwiązań.

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Rysunek 86. Rozkład wartości kryterium MAPE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Czerwona Woda – wydarzenie 3

nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Rysunek 87. Rozkład wartości kryterium szczytów przesuwnych otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Czerwona Woda – wydarzenie 3

Trend UH-kształtnej jest wyraźniej zarysowany w przypadku struktury o mniejszej liczbie parametrów; zarysowana linia trendu jest wyraźniejsza dla pojedynczego zbiornika liniowego, niż dla kaskady Nasha (rys. 88-89). Dla modelu Nasha obserwuje się szeroką linię trendu (rys. 78) lub kilka cienkich krzywych hiperbolicznych bądź UH-kształtnych (rys. 89 i 90).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	

Rysunek 88. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymane dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
1	1.077	1.076	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068	1.067	1.066	1.065	1.064	1.063	1.062	1.061	1.060	1.059	1.058	1.057	1.056	1.055	1.054	1.053	1.052	1.051	1.050	1.049	1.048	1.047	1.046	1.045	1.044	1.043	1.042	1.041	1.040	1.039	1.038	1.037	1.036

Rysunek 89. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymane dla kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 1

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
1	0.0794	0.0793	0.0792	0.0791	0.0790	0.0789	0.0788	0.0787	0.0786	0.0785	0.0784	0.0783	0.0782	0.0781	0.0780	0.0779	0.0778	0.0777	0.0776	0.0775	0.0774	0.0773	0.0772	0.0771	0.0770	0.0769	0.0768	0.0767	0.0766	0.0765	0.0764	0.0763	0.0762	0.0761	0.0760	0.0759	0.0758	0.0757	0.0756	0.0755	0.0754

Rysunek 90. Przybliżenie rozkładu wartości kryterium SWS uzyskanych dla małych wartości parametru k <0,2;8,0> przy użyciu kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 1

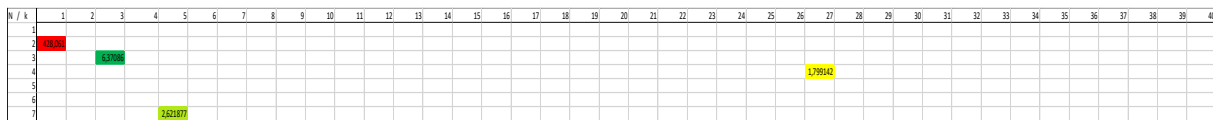
Wartości kryteriów otrzymane strukturą SC2 zestawiane były w układzie parametrow (N-k). Trend hiperboliczny nie jest tutaj dostrzegalny (rys. 91-92). Podobnie jak w przypadku modeli pojedynczego zbiornika liniowego i kaskady Nasha kryteria JAKC i ΔV cechował brak ciągłości otrzymanego rozkładu, co przedstawione zostało na rys. 93.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
1	0.0794	0.0793	0.0792	0.0791	0.0790	0.0789	0.0788	0.0787	0.0786	0.0785	0.0784	0.0783	0.0782	0.0781	0.0780	0.0779	0.0778	0.0777	0.0776	0.0775	0.0774	0.0773	0.0772	0.0771	0.0770	0.0769	0.0768	0.0767	0.0766	0.0765	0.0764	0.0763	0.0762	0.0761	0.0760	0.0759	0.0758	0.0757	0.0756	0.0755	0.0754

Rysunek 91. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymane dla modelu SC2; Żębrowka – wydarzenie 1



Rysunek 92. Rozkład wartości kryterium $A_{y_{max}}$ otrzymany dla modelu SC2; Żebrówka – wydarzenie 3



Rysunek 93. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla modelu SC2; Żebrówka – wydarzenie 1

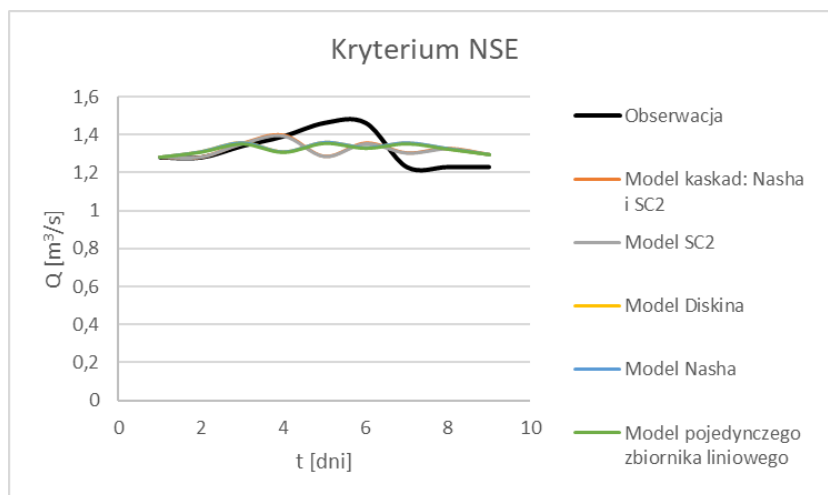
Zakresy wartości kryteriów estymacji otrzymane dla poszczególnych struktur modeli przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Otrzymane zakresy wartości poszczególnych kryteriów estymacji

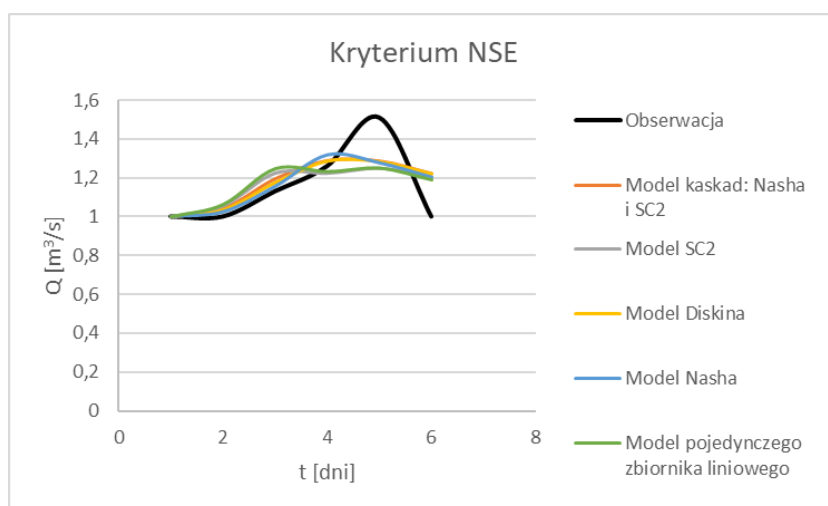
Kryteria	Pojedynczy zbiornik liniowy		Kaskada Nasha		SC2		Model Diskina		NCSC2	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Δy_{max}	0,0000	4,9598	0,0000	0,0007	0,0000	0,0019	0,0000	0,0003	0,0000	0,0001
Δt_p	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0
ΔV	0,40	403,18	0,00	82,52	0,06	230,68	0,00	61,94	0,00	51,36
NSE	-0,142	0,838	-0,129	0,980	-1,381	0,983	0,118	0,980	0,153	0,992
MSE	0,0052	17,6748	0,0017	9,1753	0,0025	5,2234	0,0018	9,1753	0,0011	5,2234
MAPE	4,65	90,08	1,80	89,68	2,39	89,68	1,73	89,68	0,04	89,68
SWS	1,0000	1,0467	1,0000	1,0001	1,0000	1,0001	1,0000	1,0001	1,0000	1,0000
r	0,344	0,917	0,610	0,991	0,503	1,000	0,610	0,984	0,610	1,000
ME	0,11	7,70	0,08	5,41	0,08	4,69	0,08	5,41	0,05	4,69
MAE	0,06	2,73	0,03	2,50	0,04	0,95	0,03	2,50	0,03	0,95
SSE	0,0629	70,6990	0,0017	98,1243	0,0229	73,1279	0,0017	98,1243	0,0017	73,1279
r_s	0,214	0,998	0,425	1,000	0,675	1,000	0,700	1,000	0,700	1,000
JAKC	1,39	355023,61	0,05	2050271,05	0,30	788955,15	0,25	532592,67	0,57	435863,37
-	0,0071	82,3941	0,0005	46,2249	0,0055	37,3209	0,0005	46,2249	0,0015	37,3209
NSE_i	0,104	0,887	0,108	0,967	-0,332	0,993	0,113	0,971	0,165	0,994

Wysokie wartości JAKC spowodowane są tym, że kryterium to uwzględnia trzy składowe. Wartości przedstawione w tabeli odnoszą się do wielkości ΔV przy pełnej zgodności czasu wystąpienia szczytów wezbrania i różnicy wartości szczytowych hydrogramów symulowanego i obserwowanego mniejszych od 10% wartości obserwowanej.

W przeprowadzonych badaniach uzyskano większy zakres wartości NSE i r niż Nourani (2008). Osiągnięte wartości maksymalne są wyższe od tych uzyskanych przez Nouraniego (Nourani: NSE=0,88, r=0,95; uzyskane w badaniach: NSE=0,99, r=1,00), a minimalne niższe (Nourani: NSE=0,38, r=0,678; uzyskane w badaniach: NSE=-1,38, r=0,34). Zdaniem Crooksa i Nadana (2007) wartości NSE przewyższające 0,6 można przyjąć jako wskazujące na satysfakcjonujące dopasowanie między obserwowanymi i modelowanymi przepływami. W oparciu o te kryterium stwierdza się, iż nie udało się z powodzeniem zamodelować wydarzenia nr 1 na Piotrówce oraz wydarzenia nr 3 na Pasłęce przy identyfikacji za pomocą NSE (MSE, RMSE, SSE), co znajduje swoje potwierdzenie na rys. 94 i 95.

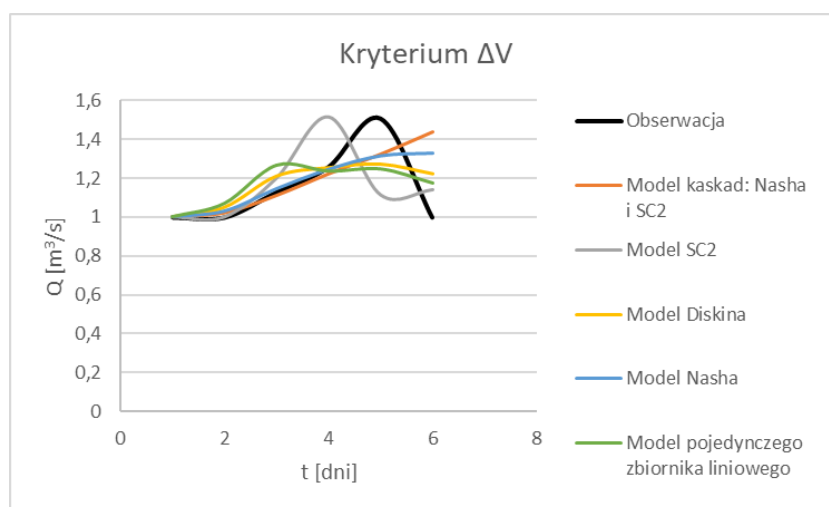


Rysunek 94. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 3

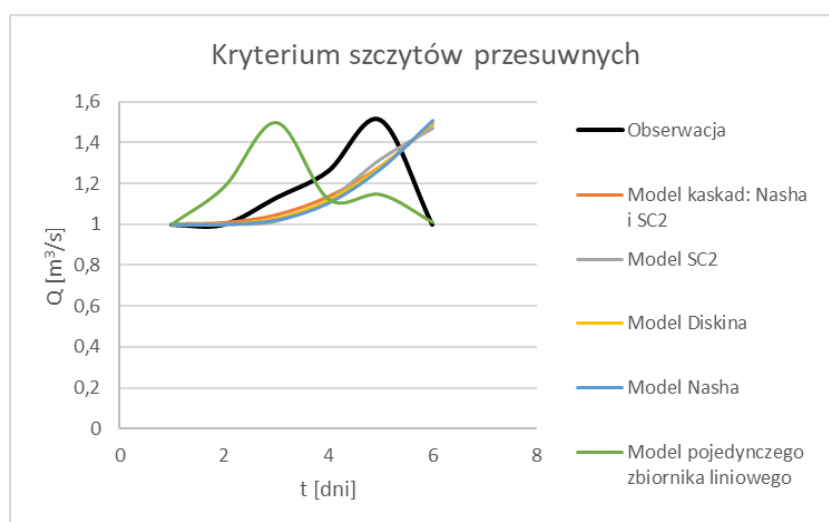


Rysunek 95. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Piotrówka – wydarzenie 1

Podczas gdy dla wydarzenia 3 na rzece Pasłęce żadne z kryteriów estymacji nie skutkowało satysfakcjonującym przebiegiem hydrogramu, uzyskanie dostatecznej zgodności kształtu powstałego wezbrania dla Piotrówki- wydarzenie 1 udało się uzyskać przy użyciu kryteriów nieuwzględniających czasowej zgodności wartości przepływów, tj. kryterium ΔV dla modelu SC2 (rys. 96) oraz kryterium szczytów przesuwnych dla modelu pojedynczego zbiornika liniowego (rys. 97) (pozostałe modele uwzględniają jedynie część wznoszącą wezbrania- kryterium wymaga wprowadzenia poprawek w tym zakresie).



Rysunek 96. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Piotrówka – wydarzenie 1

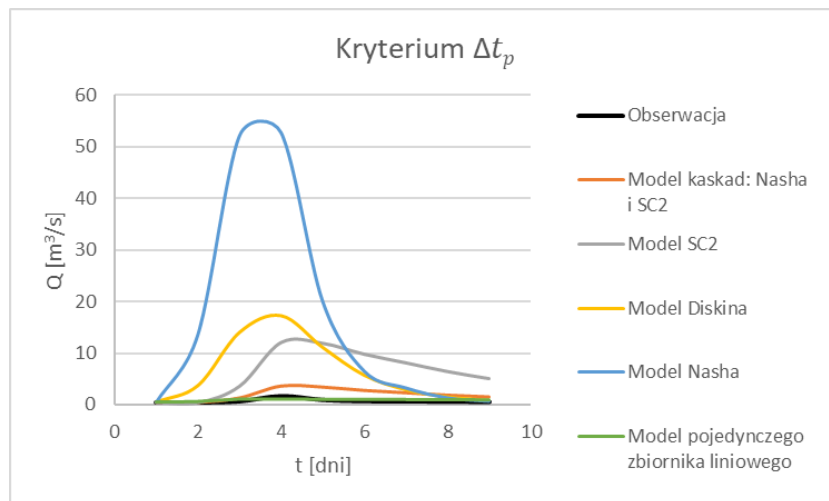


Rysunek 97. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Piotrówka – wydarzenie 1

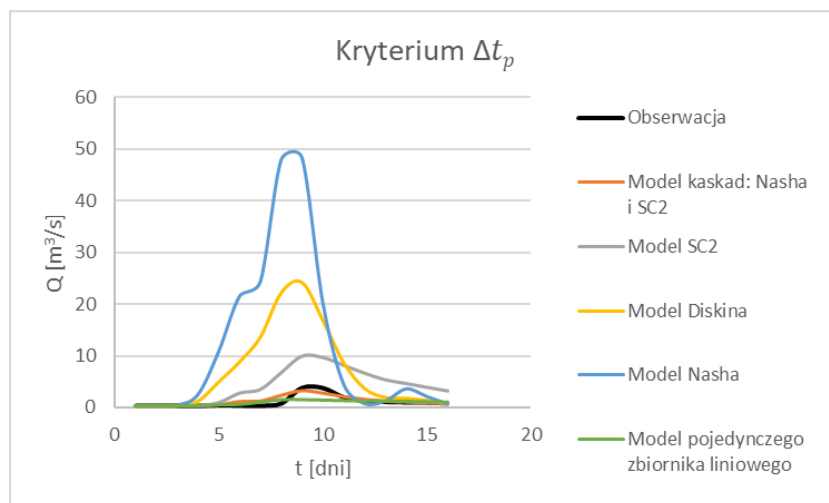
Powyższy przykład dowodzi, jak istotnym problemem jest odpowiedni dobór funkcji celu podczas identyfikacji parametrów modelu.

Analiza przebiegów hydrogramów otrzymanych dla tego samego kryterium estymacji za pomocą różnych struktur modeli konceptualnych umożliwiła dokonanie następujących spostrzeżeń:

- 1) Model kaskady Nasha uzyskuje najbardziej zawyżone wartości wysokości szczytów przy identyfikacji parametrów za pomocą kryterium zgodności czasu występowania szczytu wezbrania Δt_p (rys.98, 99)

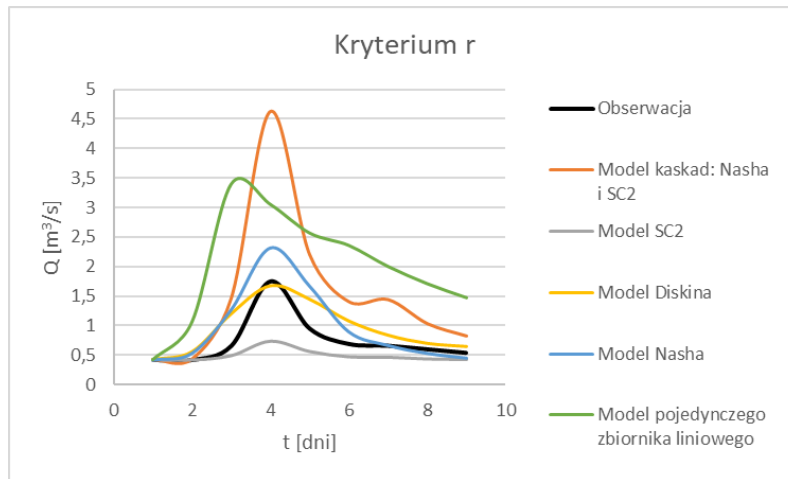


Rysunek 98. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δt_p ; Czerwona Woda – wydarzenie 3

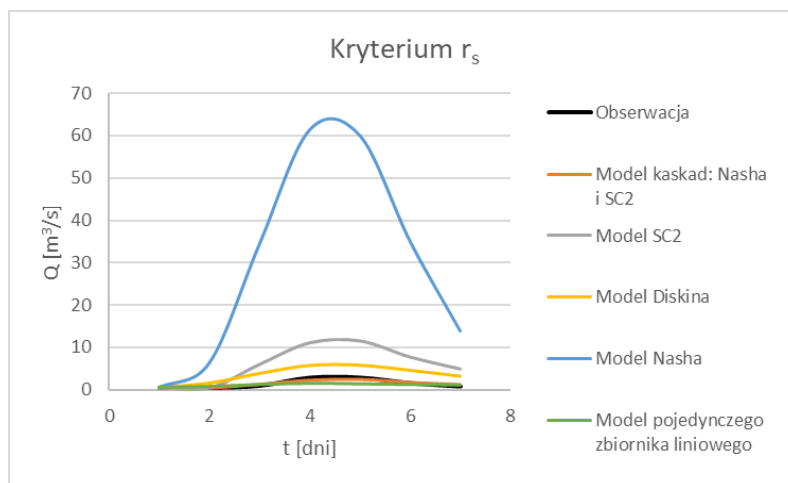


Rysunek 99. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δt_p ; Brynica – wydarzenie 2

- 2) Dla różnych wydarzeń kryteria r i r_s znacząco zawyżają albo zaniżają wartości przepływów uwzględniając jedynie dynamikę (proporcję) zmian wartości przepływów, co widoczne jest na rys. 100 i 101. Zauważyli to również w swoich badaniach Krause i inni (2005) wykazując, że kryterium korelacji liniowej nie jest w stanie wykryć błędu systematycznego polegającego na celowo sztucznie zaniżonych wartościach przepływów. Największą wadą tego kryterium jest więc brak odniesienia do jakiegokolwiek wielkości bezwzględnej. W konsekwencji rozwiązania uzyskane przy użyciu kryteriów korelacji r i r_s skutkują niesatysfakcjonującymi wartościami innych kryteriów odnoszących się do wartości bezwzględnych (oprócz Δt_p), jak: NSE, RMSE, ME, Δy_{\max} itp.

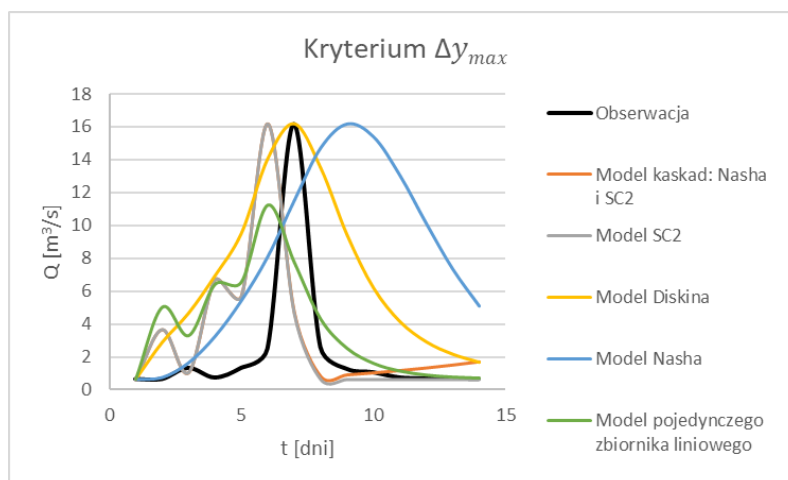


Rysunek 100. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r; Czerwona Woda – wydarzenie 3

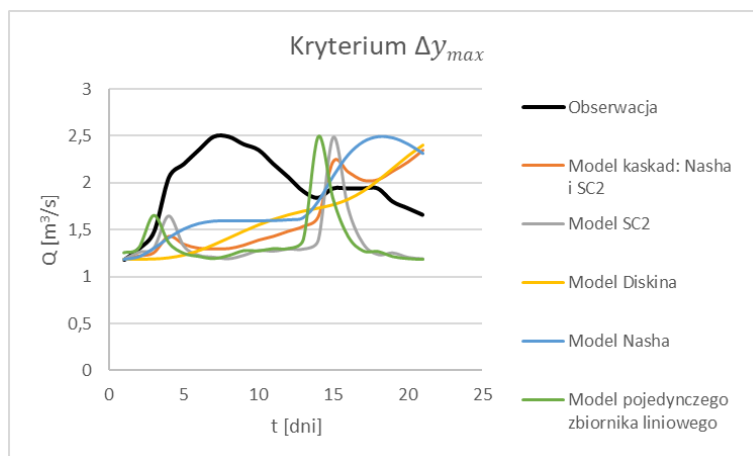


Rysunek 101. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r_s ; Piotrówka – wydarzenie 3

- 3) Kryterium Δy_{\max} oprócz zachowania wartości szczytowych w części przypadków zachowuje nawet kształt hydrogramu, najczęściej dla struktury SC2. Kryterium nie gwarantuje zgodności czasu wystąpienia wezbrania (rys.102 i 103).

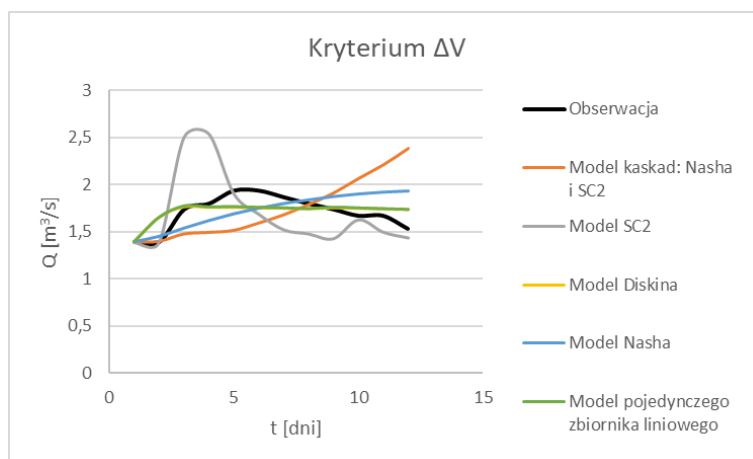


Rysunek 102. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δy_{\max} ; Piotrówka – wydarzenie 4

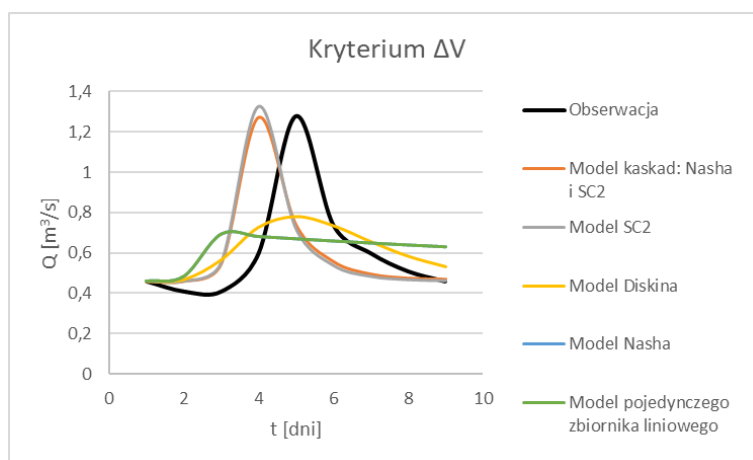


Rysunek 103. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δy_{max} ; Pasłęka – wydarzenie 4

- 4) Kryterium Δt_p nie zachowuje kształtu hydrogramu rzeczywistego ani rzędu wielkości wartości przepływu, co widoczne jest na rysunkach 98–99.
- 5) Kryterium ΔV wykazuje brak wyraźnych tendencji w zakresie dopasowania szczytu, kształtu hydrogramu czy czasu wystąpienia szczytu (rys. 104 i 105)

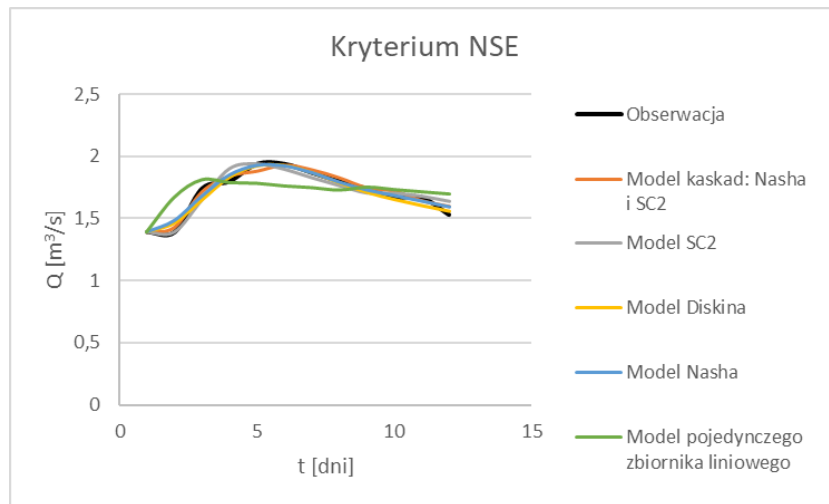


Rysunek 104. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Pasłęka – wydarzenie 6

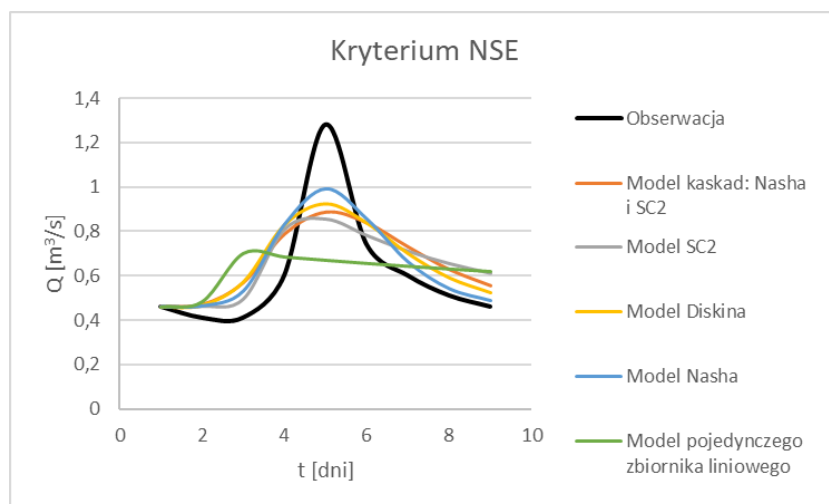


Rysunek 105. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Żebrówka – wydarzenie 3

- 6) Kryterium NSE (MSE, RMSE, SSE) gwarantuje zgodność czasową, możliwie dobrze odwzorowany kształt hydrogramu rzeczywistego oraz zadowalające dopasowanie w zakresie wartości szczytowych (rys. 106 i 107).

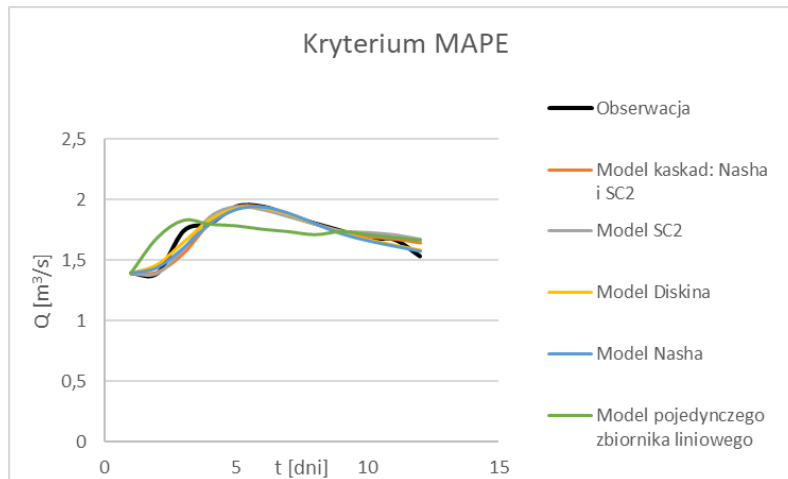


Rysunek 106. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 6

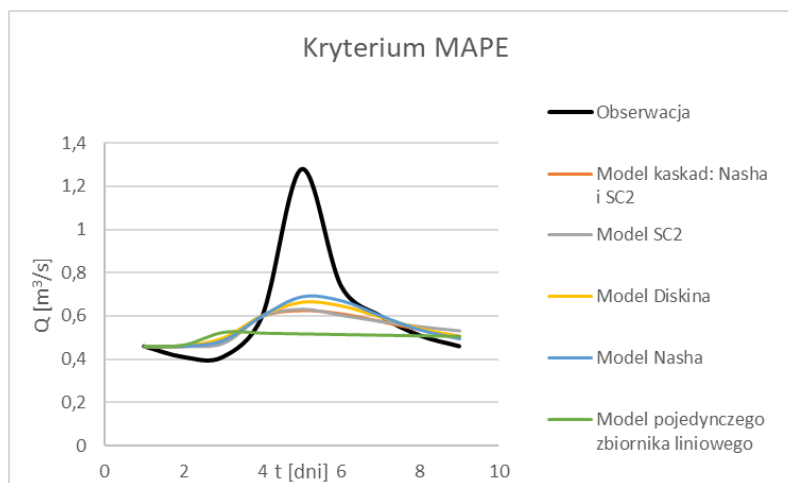


Rysunek 107. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Żebrówka – wydarzenie 3

- 7) Kryterium MAPE wyróżnia się większą zgodnością w zakresie przepływów średnich i niskich kosztem słabego dopasowania wartości szczytowych. Zazwyczaj zachowana jest zgodność czasu wystąpienia szczytu wezbrania (rys. 108 i 109).

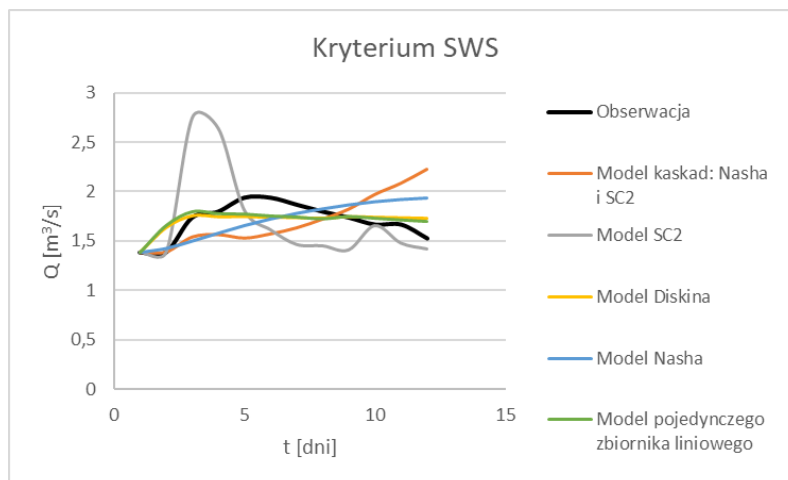


Rysunek 108. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAPE; Pasłęka – wydarzenie 6

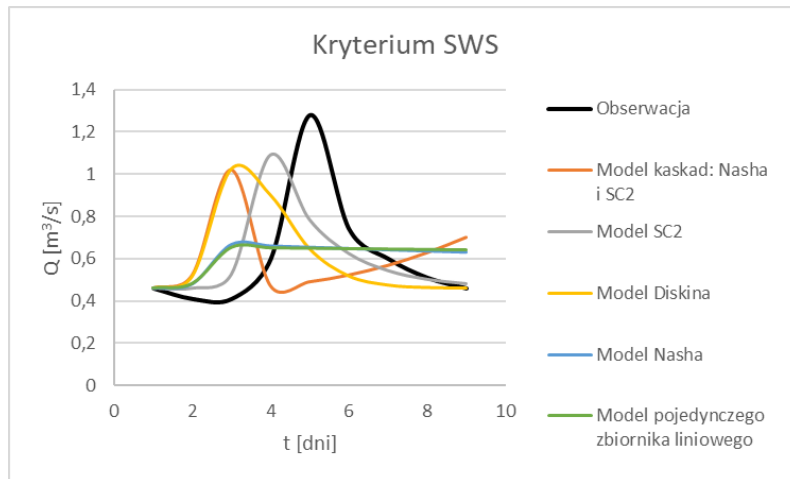


Rysunek 109. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAPE; Żebrówka – wydarzenie 3

- 8) Kryterium SWS nie gwarantuje zgodności wartości szczytowych, zgodności czasu wystąpienia szczytu, ani dobrego odwzorowania kształtu hydrogramu (rys.110-111).

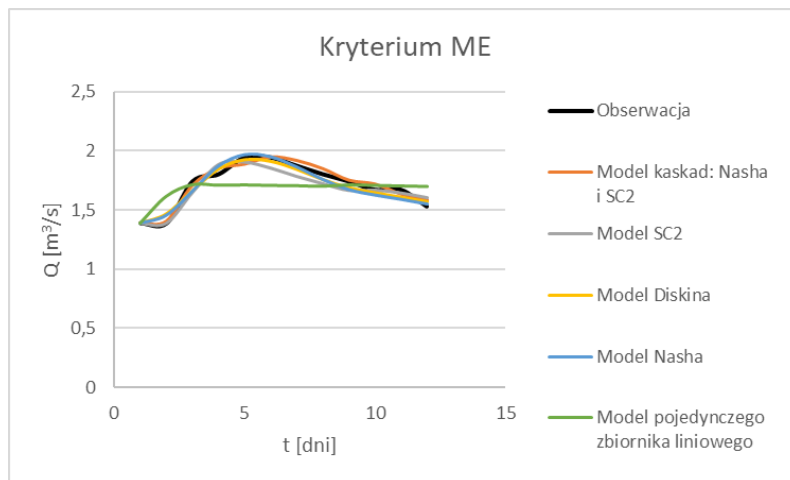


Rysunek 110. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium SWS; Pasłęka – wydarzenie 6

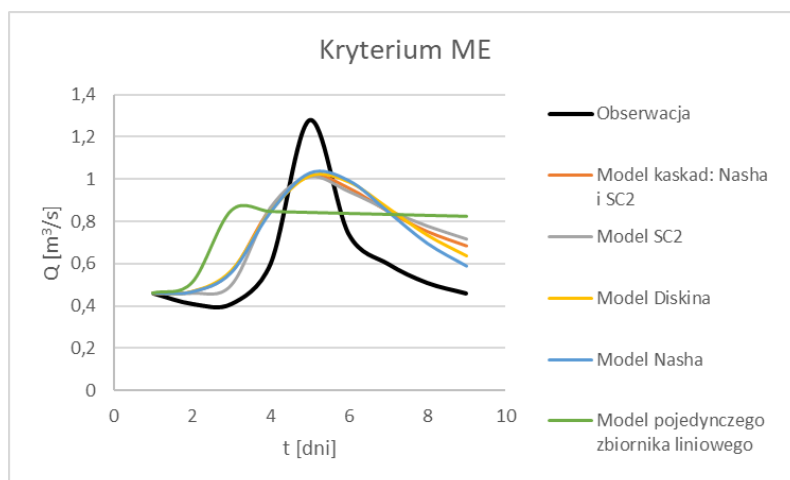


Rysunek 111. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium SWS; Żebrówka – wydarzenie 3

9) Kryterium ME pozwala uzyskać hydrogramy o tych samych cechach, co hydrogramy uzyskane za pomocą NSE (rys. 112 i 113).

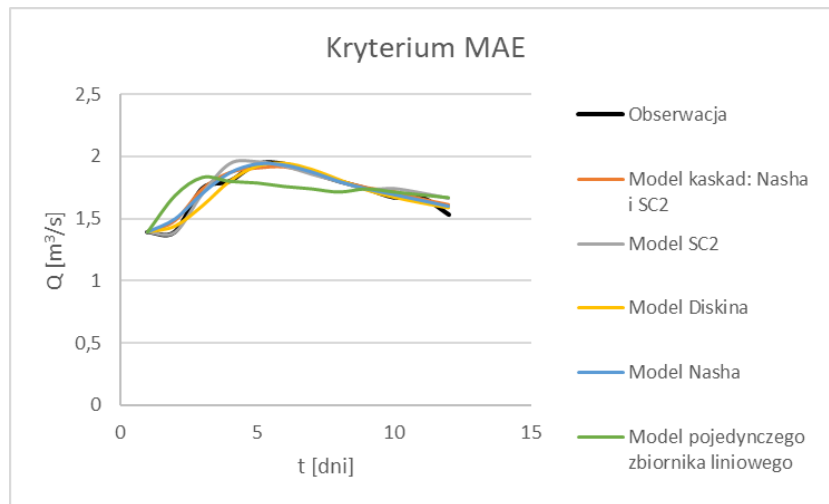


Rysunek 112. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ME; Pasłęka – wydarzenie 6

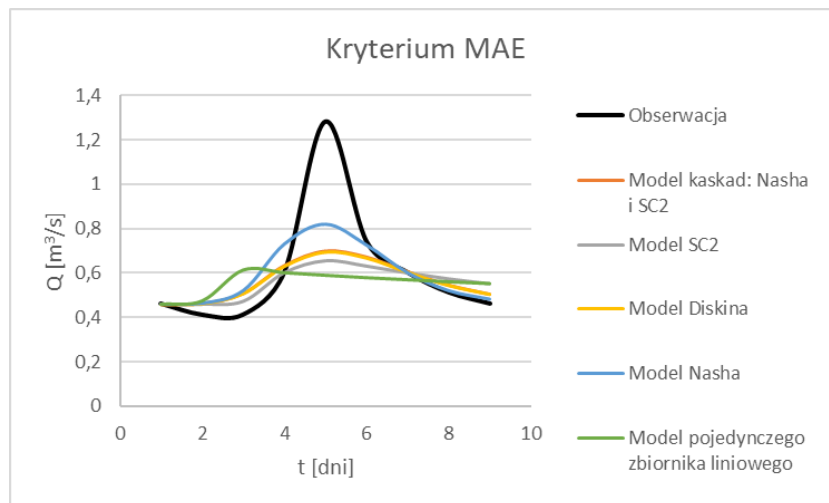


Rysunek 113. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ME; Żebrówka – wydarzenie 3

10) Kryterium MAE swoim działaniem zbliżony jest do NSE, z tym że wartości szczytowe zazwyczaj są zaniżone kosztem większego dopasowania w zakresie niskich przepływów (rys. 114 i 115).

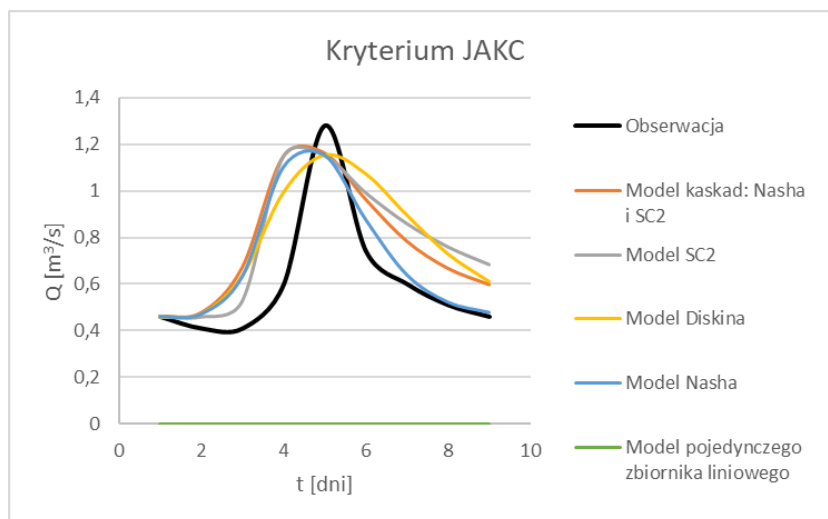


Rysunek 114. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAE; Pasłęka – wydarzenie 6

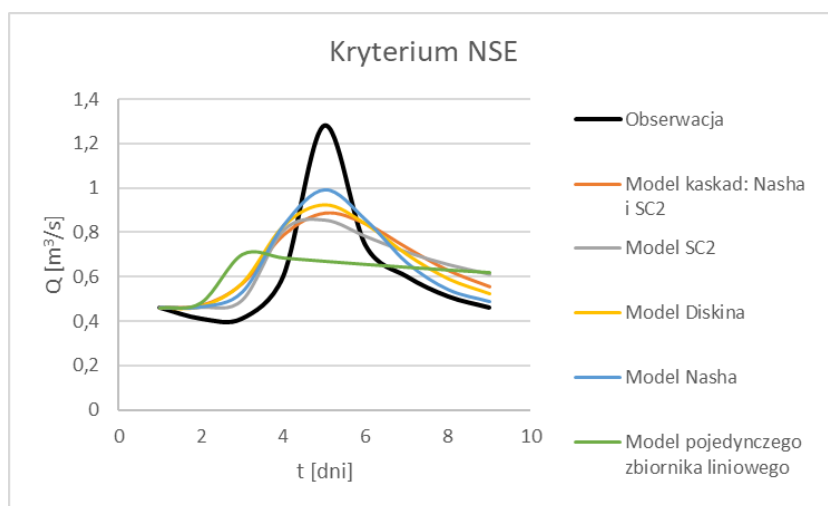


Rysunek 115. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAE; Żebrówka – wydarzenie 3

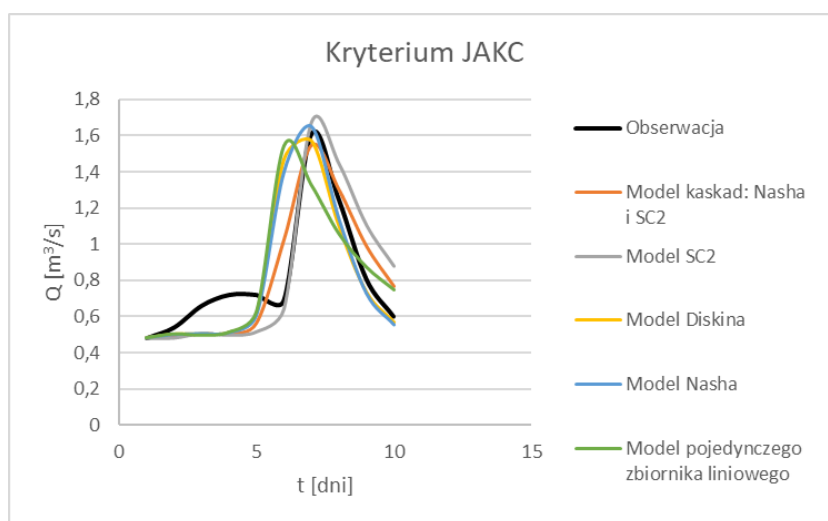
11) JAKC generuje hydrogramy mniej smukłe w porównaniu z kryteriami NSE i ME. Przy założonych wartościach błędów kryteriów składowych generowane hydrogramy często osiągają lepszą zgodność wartości szczytowych niż NSE czy ME, jednak dopasowanie w zakresie średnich i niskich przepływów jest gorsze niż w przypadku kryteriów ME i NSE. Jest to widoczne między innymi na rys. 116-119.



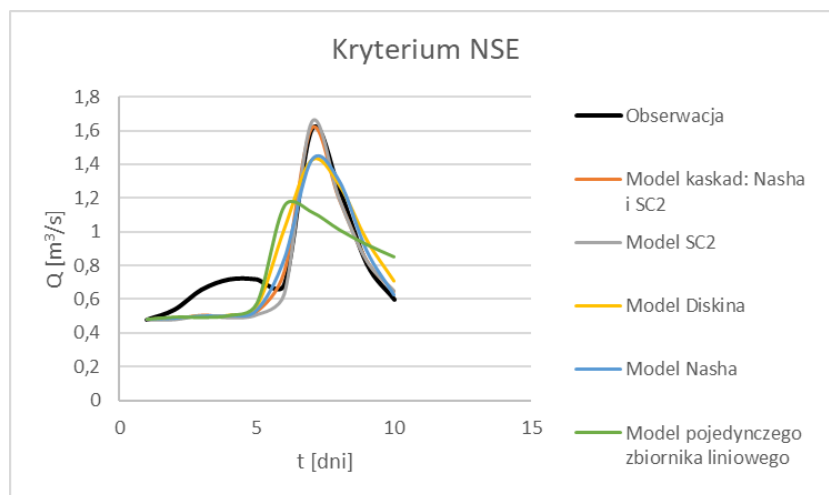
Rysunek 116. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Żebrowka – wydarzenie 3



Rysunek 117. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Żebrowka – wydarzenie 3

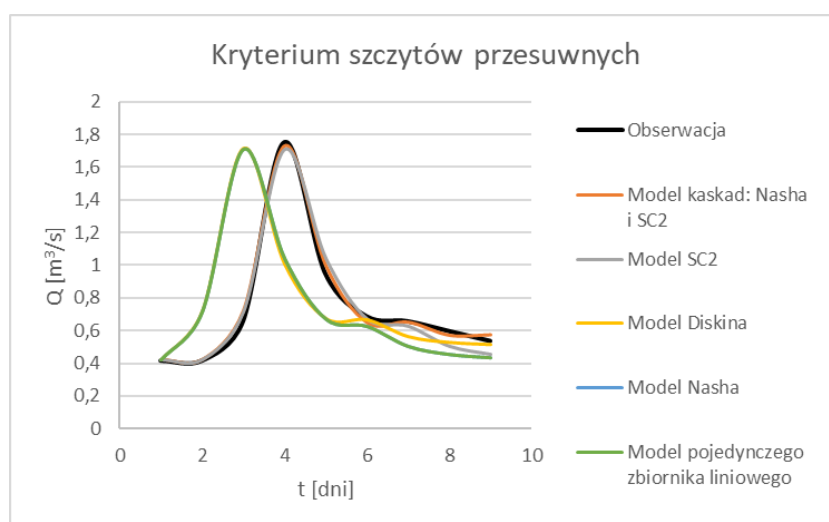


Rysunek 118. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Czerwona Woda – wydarzenie 1

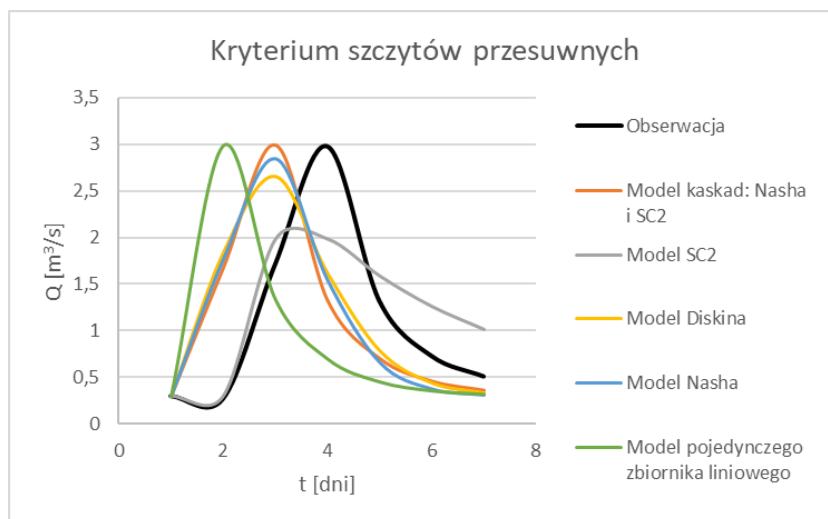


Rysunek 119. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Czerwona Woda – wydarzenie 1

12) Kryterium szczytów przesuwnych umożliwia sprawdzenie możliwości struktury w zakresie odtworzenia kształtu hydrogramu rzeczywistego (rys. 122 i 123), choć w dalszych badaniach wymaga jeszcze wprowadzenia poprawek eliminujących sytuacje, w których hydrogram symulowany nie uwzględnia recesji wezbrania (rys. 97). Dla niektórych przypadków, np. Żebrówka – wydarzenie 1, udało się osiągnąć dokładność odwzorowania kształtu hydrogramu rzeczywistego w stopniu niemożliwym do osiągnięcia przy innych kryteriach estymacji parametrów. Wszystkie przeprowadzone symulacje wydarzenia 1 na Żebrówce zostały przedstawione w załączniku 4.

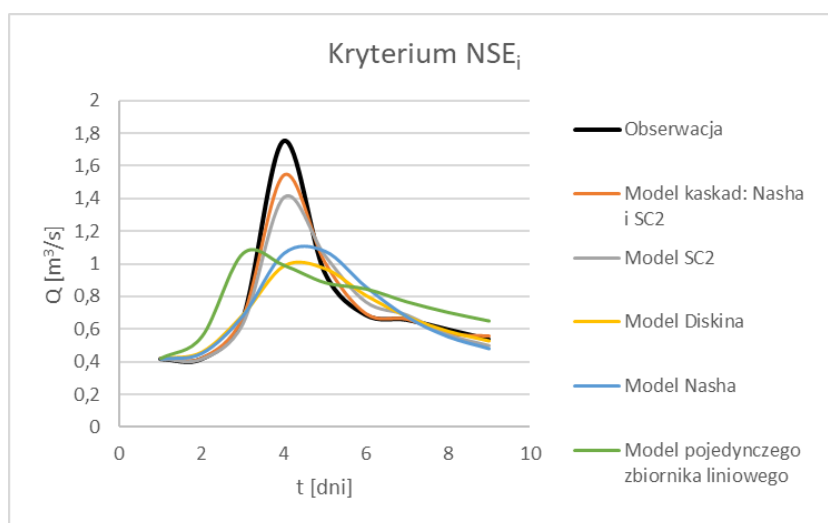


Rysunek 120. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Czerwona Woda – wydarzenie 3

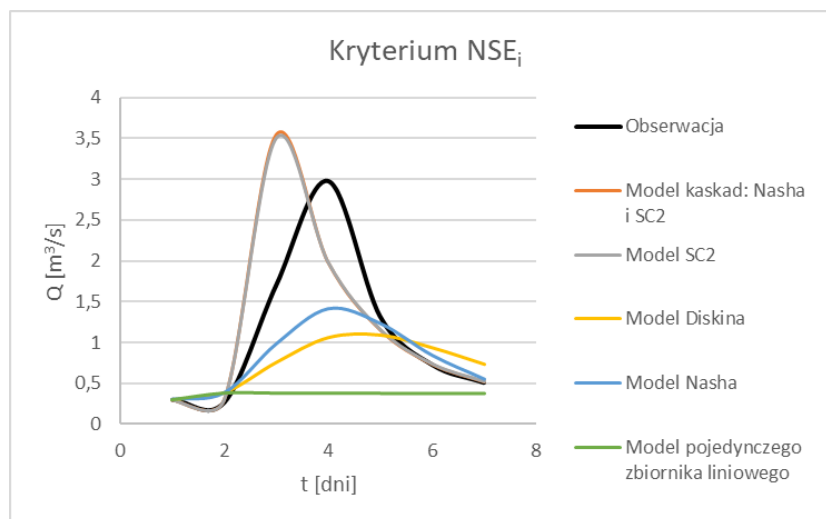


Rysunek 121. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Brynica – wydarzenie 3

13) NSE_i cechuje się dużym dopasowaniem do hydrogramów rzeczywistych w obszarze niskich wartości przepływów z wyraźnym pominięciem dopasowania szczytów (rys.124 i 125).



Rysunek 122. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE_i ; Czerwona Woda – wydarzenie 3



Rysunek 123. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE_i ; Brynica – wydarzenie 3

Przedstawione spostrzeżenia dotyczące kryteriów Δy_{max} , RMSE, ΔV zgadzają się z obserwacjami dokonanymi przez Mousse & Chahiniana (2009) dla tych kryteriów.

Klasyfikacja kryteriów estymacji parametrów modeli opad-odpływ jest istotnym i zasadnym ale również skomplikowanym zagadnieniem, gdyż trudno wskazać wspólny punkt odniesienia dla wszystkich kryteriów. Najlepszym rozwiązaniem w takiej sytuacji jest odniesienie się w klasyfikacji do możliwych celów wykorzystania modeli hydrologicznych relacji opad odpływ.

Tabela 15. Klasyfikacja kryteriów estymacji ze względu na cel modelowania

Cel modelowania w ramach modeli pojedynczych wydarzeń	Kryteria estymacji
Określenie szczytowych wartości wezbrania do celów przeciwpowodziowych	Δy_{max} , JAKC, Szczyty przesuwne, NSE (MSE, RMSE, SSE), ME
Predykcja czasu wystąpienia szczytu wezbrania	Δt_p , JAKC, NSE (MSE, RMSE, SSE), MAPE, r, ME, MAE, r_s , NSE_i
Określenie wartości szczytowej i czasu wystąpienia fali wezbraniowej	JAKC, NSE (MSE, RMSE, SSE), ME
Obsługa pracy zbiornika retencyjnego dla celów przeciwpowodziowych	ΔV , JAKC, Szczyty przesuwne, Δy_{max} , NSE (MSE, RMSE, SSE), ME
Modelowanie przepływów niżówkowych	NSE_i , Szczyty przesuwne, MAE, MAPE
Uzyskanie najwierniejszego dopasowania kształtu wezbrania hydrogramu modelowanego i rzeczywistego	Szczyty przesuwne

Alternatywny podział kryteriów estymacji przedstawia tabela 16.

Tabela 16. Podział kryteriów estymacji parametrów

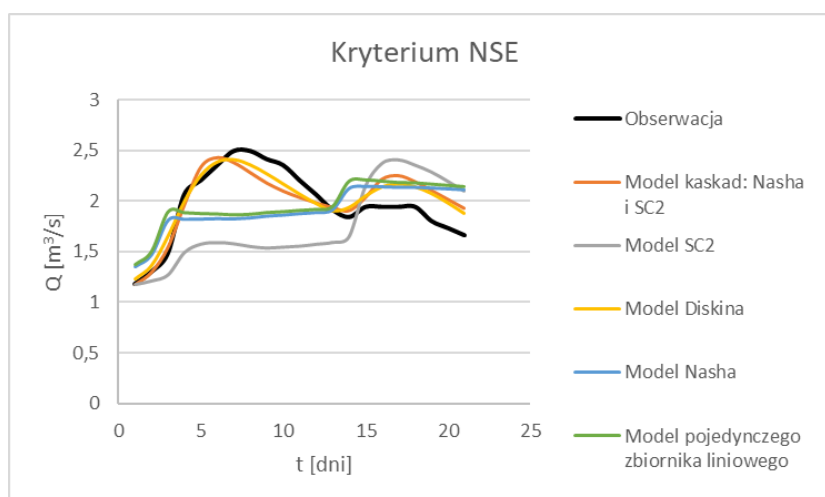
Kryterium podziału kryteriów	Podział kryteriów estymacji
Rodzaj zastosowanej miary zmienności	Względne: Δy_{\max} , Δt_p , ΔV , MSE, RMSE, ME, MAE, SSE, JAKC, kryterium szczytów przesuwnych
	Bezwzględne: NSE, MAPE, SWS, r , R^2 , r_s , NSE_i
Zakres dopasowania wartości przepływów modelu	Zgodność w zakresie wartości szczytowych: Δy_{\max} , MSE, RMSE, ME, SSE, JAKC, kryterium szczytów przesuwnych, NSE
	Zgodność w zakresie wartości niżówkowych: MAPE, NSE_i , MAE, kryterium szczytów przesuwnych
Zgodność czasowa modelu	Zachowujące zgodność czasową wezbrań: Δt_p , MSE, RMSE, ME, MAE, SSE, JAKC, NSE, MAPE, SWS, r , R^2 , r_s , NSE_i
	Niezachowujące zgodności czasowej wezbrań: Δy_{\max} , ΔV , kryterium szczytów przesuwnych

Analiza wyników końcowych otrzymanych każdym z modeli konceptualnych wskazuje, że najlepsze wartości kryteriów estymacji najczęściej osiągnano przy użyciu modelu NCSC2, tj. 270 z 450 rozpatrywanych przypadków. Drugim najlepszym jakościowo modelem okazał się model Diskina, którym osiągnięto najbardziej satysfakcjonujący wynik dla 164 przypadków. Najmniej, bo tylko 24 razy najlepszy wynik udało się osiągnąć za pomocą modelu pojedynczego zbiornika liniowego. Struktura kaskady zbiorników zatopionych umożliwiła uzyskanie najlepszych wyników dla 79 przypadków, zaś kaskada Nasha dla 114.

Z drugiej strony wartości kryteriów informacyjnych, uzyskane jako średnia ze wszystkich wartości obliczanych na podstawie kolejnych analizowanych kryteriów estymacji wskazuje, że najefektywniejszą metodą jest model pojedynczego zbiornika liniowego (AIC=2,12, BIC=2,69). Niewiele wyższe wartości uzyskano dla kaskady Nasha. Najwyższe wartości BIC i AIC i tym samym najniższą efektywność uzyskano dla rozbudowanych modeli

dwukaskadowych, przy czym autorska koncepcja NCSC2 osiąga niższe wartości kryteriów informacyjnych, niż powszechnie wykorzystywany model Diskina. Uzyskana ocena struktur modeli jest więc odwrotna do oceny wynikającej z porównania wartości kryteriów estymacji. Można zatem stwierdzić, że kryteria AIC i BIC są bardziej czułe na liczbę parametrów niż na jakość uzyskiwanych symulacji.

Największe rozbieżności symulacji uzyskiwano dla wezbrań występujących na Pasłęce. Wypłaszczone wezbrania o długim czasie przejścia fali, charakterystyczne dla nizinnego typu hydrologicznego rzeki, są trudne do zasymulowania za pomocą matematycznych modeli konceptualnych, co można zaobserwować na rys. 126. Powierzchnia zlewni Pasłęki jest również największą z rozpatrywanych podczas badań, co również może wpływać na wydłużony proces formowania się odpływu powierzchniowego.



Rysunek 124. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 4

Istotnym problemem jest wybór warunków początkowych modelu. W przypadku, gdy wartości przepływów obserwowanych osiągają wielkości mniejsze niż przyjęte $Q(t_0)$, niemożliwe jest uzyskanie tego zjawiska na hydrogramie symulowanym. Taka sytuacja powoduje, że niektóre symulacje zaniżają wartości szczytowe wezbrań.

6. Podsumowanie

6.1 Wnioski

Modelowanie hydrologiczne pod wieloma względami przypomina bardziej sztukę, niż naukę (Feldman, 2000). Użyteczność otrzymanych podczas modelowania wyników w znacznej mierze zależy od doświadczenia i talentu hydrologa nadzorującego oraz zrozumienia niuansów zarówno matematycznych modelu jaki i hydrologicznych zlewni. Jest to szczególnie zauważalne podczas wyboru odpowiedniej struktury modelu i procedury identyfikacji parametrów modelu.

W pracy przeanalizowano wpływ 15 kryteriów estymacji parametrów modelu relacji opad-odpływ na kształty hydrogramów wynikowych pięciu liniowych modeli konceptualnych: pojedynczego zbiornika liniowego, kaskady Nasha, SC2, modelu Diskina, NCSC2. Badania przeprowadzono dla 30 wydarzeń wezbraniowych mających miejsce w zlewniach rzek: Pasłki, Żebrówki, Brynicy, Czerwonej Wody i Piotrówki. Podobnie jak w pracy van Dijka (2010) symulacje wykonywano z dziennym krokiem czasowym. Do wyznaczenia wysokości opadu efektywnego posłużono się metodą chwilowego współczynnika spływu.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy piśmiennictwa stwierdza się, że:

1. Na obecnym etapie zaawansowania prac nad konceptualnymi matematycznymi modelami relacji opad-odpływ brak jest uniwersalnych kryteriów estymacji parametrów tych modeli. Różne kryteria, zastosowane do tego samego pojedynczego wydarzenia opadowego, prowadzą do różnorodnych zestawów tych parametrów i przez to do zróżnicowanych kształtów modelowanych hydrogramów odpływu.
2. Brak uniwersalizmu kryteriów estymacji parametrów wymusza indywidualizację zastosowań kryteriów w zależności od celu modelowania i zmusza do szczególnie wnikliwej analizy zasadności przyjmowania określonego kryterium przy założonym celu. Niewskazany jest mechaniczne stosowanie określonego, nawet powszechnie uznanego kryterium (np. NSE) bez uwzględnienia praktycznego celu modelowania.
3. Porównawcza ocena jakości modeli dokonana za pomocą kryteriów informacyjnych może w istotny sposób różnić się od oceny dokonanej za pomocą kryteriów nieuwzględniających liczby parametrów modelu. Świadczy to o bardzo dużym znaczeniu liczby parametrów modelu w ogólnej ocenie jego jakości.

4. Kryteria: NSE, MSE, RWSE i SSE mogą być używane zamiennie. Wynika stąd, że bardzo powszechnie stosowane kryterium NSE nie musi być traktowane w kategoriach obowiązującego kanonu modelowania.
5. Dla szeregu kryteriów , tj. Δt_p , ΔV , r , r_s , występuje zjawisko ekwifinalności, polegające na uzyskiwaniu zbliżonych lub nawet jednakowych wartości zmiennej kryterialnej przy różnych zestawach parametrów modelu. W przypadku wystąpienia takiego zjawiska należy przeanalizować celowość wprowadzenia dodatkowego kryterium uściślającego wartości optymalnych parametrów lub alternatywnie zaakceptować istnienie przedziału tych wartości.
6. W przypadku kryterium ΔV obserwuje się wystąpienie licznych lokalnych ekstremów (rozwiązań quasi-optymalnych), co znacznie utrudnia lub nawet uniemożliwia znalezienie ekstremum globalnego. Kryterium ΔV nie powinno być zatem jedynym kryterium wykorzystywanym do estymacji parametrów modelu.
7. Analiza zmienności wartości niektórych kryteriów, zastosowanych w modelach dwuparametrowych, wykazuje istnienie regularności dotyczących lokalizacji quasi-optymalnych wartości tych parametrów w macierzach obejmujących zakres ich zmienności. W szczególności:
 - a) model pojedynczego zbiornika liniowego dla większości kryteriów wykazuje istnienie obszarów quasi-optymalnych wartości o lokalizacjach tworzących wspólnie kształty zbliżone do pojedynczej hiperboli;
 - b) model kaskady Nasha wykazuje istnienie obszarów quasi-optymalnych o lokalizacjach tworzących podobne kształty jak w przypadku modelu pojedynczego zbiornika, ale w postaci wiązek hiperbol;
 - c) nie obserwuje się istnienia tych regularności w przypadku kryteriów: Δt_p , r , r_s , JAKC oraz w przypadku kaskady SC2.
8. Autorskie kryterium JAKC, wbrew oczekiwaniom, nie umożliwia dokładniejszego odwzorowania kształtów hydrogramów, choć wartości szczytowe często są lepiej dopasowane do wartości rzeczywistych niż w przypadku kryteriów NSE i ME. Przypuszcza się, że przyczyną jest przyjęcie zbyt dużej dopuszczalnej granicy błędu wartości szczytowych, która skutkuje zawyżeniem wartości symulacji w zakresie średnich i/lub niskich przepływów, gdyż ostatecznym składowym kryterium dopasowania jest ΔV .
9. Autorskie kryterium szczytów przesuwnych umożliwia ocenę zdolności modelu do odtworzenia przebiegu hydrogramu rzeczywistego i przez to może być uznane jako

podstawa utworzenia kryterium o bardzo szerokim spektrum stosowania przy założeniu, że odtworzenie czasu wystąpienia szczytu nie jest istotnym celem modelowania.

10. Autorska koncepcja modelu NCSC2 na etapie kalibracji okazała się statystycznie najlepszą strukturą modelu, gdyż najczęściej uzyskiwano dla niej najbardziej satysfakcjonujące wartości stosowanych kryteriów estymacji. Zastąpienie w modelu Diskina jednej z kaskad Nasha kaskadą zbiorników zatopionych, jako elementem imitującym odpływ podpowierzchniowy, zwiększyło jakość symulacji, co świadczy o tym, iż struktura modelu wierniej przedstawia pracę systemu zlewni.

6.2 Wytyczne do dalszych badań

1. Z uwagi na korzystne cechy kryterium szczytów przesuwnych należy kontynuować prace nad jego zastosowaniem, zwłaszcza w zakresie wyeliminowania rozwiązań ograniczających symulacje wyłącznie do gałęzi wznoszącej wezbrania.
2. Należy kontynuować prace nad kryterium JAKC przeprowadzając ponowne obliczenia przy założeniu mniejszej granicy błędu wartości szczytowych.
3. Regularności występujące w macierzach wartości kryterialnych wymagają dokładnej analizy, zarówno ze względu na walory poznawcze, jak i zastosowania praktyczne. W szczególności pożądanym jest ustalenie przyczyn ich występowania oraz związków pomiędzy tymi przyczynami a przydatnością praktyczną poszczególnych kryteriów.
4. Zgodnie z sugestiami Sefe i Boughtona (1982) celem jest przeanalizowanie grupowych tendencji zachodzących między poszczególnymi kryteriami, co pozwoliłoby zawęzić zakres różnorodności praktycznie stosowanych kryteriów.
5. Nową jakością badań nad kryteriami może okazać się koncepcja stosowania odrębnych kryteriów dla gałęzi wznoszącej oraz opadającej hydrogramów, co sugerowali Krause i inni (2005). Pozwoliłoby to na uzyskanie lepszej całościowej zgodności pomiędzy hydrografami obserwowanymi i modelowanymi, aczkolwiek stworzyłoby dodatkowe problemy związane z ciągłością hydrogramów w punktach szczytowych.
6. Odrębnym kierunkiem poszukiwań jest ocena wpływu metody separacji przepływu bazowego na wyniki modelowania relacji opad-odpływ.

Bibliografia

Andreassian, V. i inni, 2009. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, iss. 10, pp. 1757-1764.

Bagiński, R., 1959. *Hydrologia*. Szczecin: Wydaw. Politechniki Szczecińskiej.

Balistrocchi, M. i Bacchi, B., 2011. Modelling the statistical dependence of rainfall event variables through copula functions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 czerwiec, vol. 15, iss. 6, pp. 1959-1977.

Banasik, K. i Barszcz, M., 2004. Porównanie ocen opóźnień odpływu wezbraniowego dla wybranych małych zlewni rzecznych. *Przegląd naukowy, inżynieria i kształtowanie środowiska*, vol. 13, iss. 2[29], pp. 5-13.

Banasik, K., Górski, D. i Ignar, S., 2000. Hydrogram jednostkowy – funkcja transformująca opad efektywny w odpływ bezpośredni. W: *Modelowanie wezbrań opadowych i jakość odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych*. Warszawa: SGGW, pp. 24-35.

Bardossy, A., 2006. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 3, pp. 1105-1124.

Bardossy, A., 2007. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, iss. 2, pp. 703-710.

Boneh, A. i Diskin, M. H., 1973. Comments on 'Determination of Nonlinear Functional Response Functions in Rainfall-Runoff Processes', by J. Amorocho and A. Brandstetter. *Water Resources Research*, vol. 4, iss. 3, pp. 764-765.

Bulygina, N., McIntyre, N. i Wheeler, H., 2009. Conditioning rainfall-runoff model parameters for ungauged catchments and land management impacts analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, iss. 6, pp. 893-904.

Byczkowski, A., 1996. Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego w hydrologii. W: *Hydrologia Tom II*. Warszawa: SGGW, pp. 268-294, ISBN 83-00-02925-7.

Chiew, F. H. S., Stewardson, M. J. i McMahon, T. A., 1993. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. *Journal of Hydrology*, vol. 147, iss. 1, pp. 1-36.

Chowdary, V. M. i inni, 2012. Runoff simulation using distributed hydrological modeling approach, remote sensing and GIS techniques: A case study from an Indian agricultural watershed. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 39 B-8, pp. 203-207.

Cichocka, M., 1996. Wodopójki (Hydracarina) rzeki Pasłęki. *Fragmenta faunistica*, vol. 39, iss. 14, pp. 179-205.

Crooks, S. M. i Naden, P. S., 2007. CLASSIC: a semi-distributed rainfall-runoff modelling system. *Hydrology & Earth System Sciences*, vol. 11, iss. 1, pp. 516-531.

Czerwona Woda (dopływ Nysy Łużckiej) [online], 2020. Dostępny w: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Czerwona_Woda_\(dop%C5%82yw_Nysy_%C5%81u%C5%BCyckiej\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Czerwona_Woda_(dop%C5%82yw_Nysy_%C5%81u%C5%BCyckiej)) [Data uzyskania dostępu: 16 Marzec 2022].

Ding, J. Y., 2011. A measure of watershed nonlinearity: interpreting a variable instantaneous unit hydrograph model on two vastly different sized watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, iss. 1, pp. 405-423.

- Diskin, M. H., 1980. *Estimation of urbanization effects by a parallel cascades model*. Proc. Helsinki Symposium, Czerwiec, IAHS–AISH Publ. no. 130, pp. 7-42.
- Diskin, M. H., Buras, N. i S., Z., 1973. Application of a Simple Hydrologic Model for Rainfall-Run Relations of the Dalton Watershed. *Water Resources Research*, vol. 9, iss. 4, pp. 927-936.
- Diskin, M. H. i Nazimov, N., 1995. Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. *Journal of Hydrology*, vol. 172, iss. 1, pp. 313-330.
- Diskin, M. H. i Nazimov, N., 1996. Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall. *Journal of Hydrology*, vol. 178, iss. 1-4, pp. 369-380.
- Diskin, M. H. i Pegram, G. G. S., 1987. A Study of Cell Models 3. A Pilot Study on the Calibration of Manifold Cell Models in the Time Domain and in the Laplace Domain. *Water Resources Research*, vol. 23, iss. 4, pp. 663-673.
- Diskin, M. H., Wyseure, G. i Feyen, J., 1984. Application of a Cell Model. *Nordic Hydrology*, vol. 15, pp. 25-38.
- Dooge, J. C. I., 1974a. Modele matematyczne systemów hydrologicznych. W: K. Nasuszny, red. *Matematyczne modele zlewni*. Wrocław: Ossolineum Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, pp. 53-79.
- Dooge, J. C. I., 1974b. Wybór modelu deterministycznego. W: K. Nasuszny, red. *Matematyczne modele zlewni*. Wrocław: Ossolineum, pp. 80-110.
- Feldman, A. D., 2000. *Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical Reference manual*. Waszyngton: U.S. Army Corps of Engineers.
- Fenicia, F., Savenije, H. H. G., Matgen, P. i Pfister, L., 2006. Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, iss. 1, pp. 139-150.
- Flügel, W. A. i Lüllwitz, T., 1993. *Using a distributed hydrologic model with the aid of GIS for comparative hydrological modelling of micro- and mesoscale catchments in the USA and in Germany*. Yokohama, IAHS.
- Fovet, O. i inni, 2015. Hydrological hysteresis and its value for assessing process consistency in catchment conceptual models. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, iss. 1, pp. 105-123.
- Fujimura, K., 2004. Analysis of hydrological cycle considering the infiltration variation in an urban hills basin.
- Gironás, J. i inni, 2009. A morpho-climatic instantaneous unit hydrograph model for urban catchments based on the kinematic wave approximation. *Journal of Hydrology*, vol. 377, iss. 3-4, pp. 317-334.
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2020. *Geoportal-centralny węzeł Infrastruktury Informacji Przestrzennej* [Online]. Dostępny w: www.geoportal.gov.pl [Data uzyskania dostępu: 15 kwiecień 2022].
- Guilford, J. P., 1942. *Fundamental statistics in psychology and education*. New York: McGraw-Hill.
- Helwig, M., 2008. *Wody* [online]. Dostępny w: <http://brzeg.refy.pl/wody/zb-wody.htm> [Data uzyskania dostępu: 16 Marzec 2016].
- Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1971. *Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych; Dorzecze Odry i rzeki Przymorza między Odrą i Wisłą 1968*. wydanie pierwsze red. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974. *Opady Atmosferyczne 1968*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974. *Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych; Dorzecze Odry i rzeki Przymorza między Odrą i Wisłą 1971*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977. *Opady Atmosferyczne 1971*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1982. *Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych; Dorzecze Odry i rzeki Przymorza między Odrą i Wisłą 1978*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984. *Opady Atmosferyczne 1978*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1985. *Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych; Dorzecze Wisły i rzeki Przymorza na wschód od Wisły 1980*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1986. *Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych; Dorzecze Wisły i rzeki Przymorza na wschód od Wisły 1981*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987. *Opady Atmosferyczne 1980*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989. *Opady Atmosferyczne 1981*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Instytut na rzecz Ekorozwoju, 2009. *Rzeka Pasłęka* [online]. Dostęp w: http://ine.eko.org.pl/index_areas.php?rek=213. [Data uzyskania dostępu: 16 Marzec 2022].

Jacquin, A. P. i Shamseldin, A. Y., 2009. Sensitivity analysis of Takagi-Sugeno-Kang rainfall-runoff fuzzy models. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, iss. 1, pp. 41-55.

Karnieli, A. M., Diskin, M. H. i Lane, L. J., 1994. CELMOD5 semi-distributed cell model for conversion of rainfall into runoff in semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, vol. 157, iss. 1, pp. 61-85.

Kavetski, D., Kuczera, G. i Franks, S. W., 2003. Semidistributed hydrological modeling: A "saturation path" perspective on TOPMODEL and VIC. *Water Resources Research*, vol. 39, iss. 9, pp. 8.1-8.8.

Kordas, B., 1974. Hydrodynamika zlewni. W: K. Nasuszny, red. *Matematyczne modele zlewni*. Wrocław: Ossolineum Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, pp. 5-52.

Krause, P., Boyle, D. P. i Base, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. *Advances in Geosciences*, vol. 5, pp. 89-97.

Kukier, Ł., Szydłowski, M. i Tambor, P., 2009. Kryterium Akaike: prostota w języku statystyki. *Roczniki Filozoficzne*, vol. 57, iss. 1, pp. 91-126.

Kundzewicz, Z., 1979. Modele matematyczne w hydrologii. *Roczniki Polskiego Towarzystwa Matematycznego seria III: Matematyka stosowana*, vol. 14, pp. 49-61.

- Kundzewicz, Z. W. i Napiórkowski, J. J., 1986. Nonlinear models of dynamic hydrology. *Hydrological Sciences*, vol. 31, iss. 2, pp. 163-185.
- Kurnatowski, J., 2017. Technical note: Cascade of submerged reservoirs as a rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, iss. 9, pp. 4649-4661.
- Kurnatowski, J. i Laskowski, N., 2017. *Zastosowanie wielomianów ortogonalnych Czebyszewa w modelowaniu relacji opad-odpływ*. Kobyla Góra, Katedra Matematyki Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu.
- Lambor, J., 1971. *Hydrologia inżynierska*. Warszawa: Arkady.
- Littlewood, I., 2002. Improved unit hydrograph characterisation of daily flow regime (including low flows) for the River Teifi, Wales: towards better rainfall-streamflow models for regionalisation. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, iss. 5, pp. 899-911.
- Liu, Z. i Todini, E., 2002. Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, iss. 5, pp. 859-881.
- Mańko, R. i Laskowski, N., 2018. Comparative analysis of the effectiveness of the conceptual rainfall-runoff hydrological models on the selected rivers in Odra and Vistula basins. *ITM Web of Conferences* [online], vol. 23, Dostęp w: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2018/08/itmconf_sam2018_00025.pdf [Data uzyskania dostępu: 8 Maj 2022].
- Moore, R. J., 2007. The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, iss. 1, pp. 483-499.
- Moussa, R. i Chahinian, N., 2009. Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, iss. 4, pp. 519-535.
- Napiórkowski, J. J., 1983. *The optimization of a third-order surface runoff model*. Scientific Procedures Applied to Planning, Design and Management of Water Resources Systems. Proc. Hamburg Symposium, Sierpień, IAHS Publ. no.147, 161-172.
- Nash, J. E., 1957. The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph. *Publications—International Association of Hydrological Sciences*, vol. 45, pp. 114-121.
- Nash, J. E. i Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, iss. 3, pp. 282-290.
- Nourani, V., 2008. A comparative study on calibration methods of Nash's rainfall-runoff model to Ammameh watershed, Iran. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, vol. 2, iss. 1, pp. 14-20.
- Nowak, W. A. i Pydziński, B., 1968. Dorzecze Żebrówki jako przykład stosunków wodnych na pograniczy Wyżyny Częstochowskiej i Niecki Nidziańskiej. *Prace geograficzne IV*, vol. 30, pp. 213-223.
- Ogden, F. L., 1993. Runoff sensitivity to temporal and spatial rainfall variability at runoff plane and small basin scales. *Water Resources Research*, vol. 29, iss. 8, pp. 2589-2597.
- Onyando, J. O., Schumann, A. H. i Schultz, G. A., 2003. Simulation of flood hydrographs based on lumped and semi-distributed models for two tropical catchments in Kenya. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, iss. 4, pp. 511-524.

Ozga-Zielińska, M. i Brzeziński, J., 1997. Współczesne metody opracowań hydrologicznych. W: K. W. Mirosława Rajpert, red. *Hydrologia stosowana*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, pp. 88-174, ISBN 83-01-12194-7.

Parmentier, B., Dooge, J. C. I. i Bruen, M., 2003. Root selection methods in flood analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 7, iss. 2, pp. 151-161.

Patil, S. R., 2008. *Regionalization of an event based Nash Cascade Model for flood predictions in ungauged basins*. Stuttgart: Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-79-8.

Pazdro, Z., 1983. *Hydrogeologia ogólna*. trzecie red. Warszawa: Wydawnictwa geologiczne.

Pedersen, J. T., Peters, J. C. i Helweg, O. J., 1980. *Hydrographs by Single Linear Reservoir Model*, [b.m]: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

Pegram, G. G. S. i Diskin, M. H., 1987a. A Study of Cell Models 1. A Manifold Cell Model for Distributed Surface Runoff System. *Water Resources Research*, vol. 23, iss. 4, pp. 646-654.

Pegram, G. G. S. i Diskin, M. H., 1987b. Functions, A Study of Cell Models 2. The Effect of Time Delay on the Limiting Forms of Cascade and Manifold Cell Model Response. *Water Resources Research*, vol. 23, iss. 4, pp. 655-662.

Perrin, C., Michel, C. i Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, vol. 242, iss. 3, pp. 275-301.

Pietrówka, 2022. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pietr%C3%B3wka> [Data uzyskania dostępu: 16 Marzec 2022].

Plate, E. J., 2009. Classification of hydrological models for flood management. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, iss. 10, pp. 1939-1951.

Reed, S. i inni, 2004. Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, vol. 298, iss. 1-4, pp. 27-60.

Refsgaard, J. C. i Knudsen, J., 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, vol. 32, iss. 7, pp. 2189-2202.

Rodda, H. J. E. i Little, M. A., 2015. *Understanding mathematical and statistical techniques in hydrology: an examples-based approach*. Chichester: Wiley Blackwell.

Rodriguez-Rincon, J. P., Pedrozo-Acuna, A. i Brena-Naranjo, J. A., 2015. Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, iss. 7, pp. 2981-2998.

Rzetała, M. i Machowski, R., 2017. Zlewnia Pilicy. W: R. Kaczmarek, red. *Encyklopedia Województwa Śląskiego*. ISBN 978-83-64210-47-1. http://ibrbs.pl/mediawiki/index.php/Zlewnia_Pilicy. [Data uzyskania dostępu: 16 Marzec 2022].

Schuermans, J. M. i Bierkens, M. F. P., 2007. Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, iss. 2, pp. 677-693.

Sefe, F. T. i Boughton, W. C., 1982. Variation of model parameter values and sensitivity with type of objective function. *Journal of Hydrology*, vol. 21, iss. 2, pp. 117-132.

Shamseldin, A. Y. i Nash, J. E., 1998. The geomorphological unit hydrograph- a critical review. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 2, iss. 1, pp. 1-8.

Shaw, E. M., 1994. Rainfall-runoff relationship. W: *Hydrology in practice*. Londyn: Chapman & Hall, pp. 328-356.

Sikorska, A. E., Scheidegger, A., Banasik, K. i Rieckermann, J., 2012. Bayesian uncertainty assessment of flood predictions in gauged urban basins for conceptual rainfall-runoff models. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, iss. 4, pp. 1221-1236.

Sikorska, A. E., Scheidegger, A., K., B. i Rieckermann, J., 2013. Considering rating curve uncertainty in water level predictions. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, iss. 11, pp. 4415-4427.

Singh, V. P., 1976. Comparison of two mathematical models of surface runoff. *Hydrological Sciences*, vol. 21, iss. 2, pp. 285-299.

Soczyńska, U., 1990. *Podstawy hydrologii dynamicznej*. Warszawa: Wydawnictwo WUW, ISBN 83-230-0394-7.

Spada, E. i inni, 2015. Computation of vertically averaged velocities in irregular sections of straight channels. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, iss. 9, pp. 3857-3873.

Spolia, S. K., 1980. *Time-varying cascade model for flow forecasting*. Prévisions hydrologiques. Proc. Oxford Symposium, kwiecień, Oxford, IAHS-AISH Publ. no. 129, pp. 319-324.

Srinivas, R. G. i Ramachandra, R. A., 1984. Nonlinear Stochastic Model of Rainfall Runoff Process. *Water Resources Research*, vol. 20, iss. 2, pp. 297-309.

Stoelzle, M., Stahl, K. i Weiler, M., 2012. Are streamflow recession characteristics really characteristic?. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, pp. 10563-10593.

Szczepanek, R., 2003. *Czasoprzestrzenna struktura opadu atmosferycznego w zlewni górskiej*. Kraków: Biblioteka Cyfrowa Politechniki Krakowskiej.

Szilagyi, J., 1999. On the use of semi-logarithmic plots for baseflow separation. *Ground Water*, vol. 37, iss. 5, pp. 660-662.

Szilagyi, J., 2003. State-Space Discretization of the Kalinin-Milyukov-Nash-Cascade in a Sample-Data System Framework for Streamflow Forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 8, iss. 6, pp. 339-347.

Szilagyi, J., 2004. Heuristic Continuous Base Flow Separation. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 9, iss. 4, pp. 311-318.

Szilagyi, J., 2005. Discrete state-space approximation of the continuous Kalinin-Milyukov-Nash cascade of noninteger storage elements. *Journal of Hydrology*, vol. 328, iss. 1-2, pp. 132-140.

Szilagyi, J. i Parlange, M. B., 1998. Baseflow separation based on analytical solution of the Boussinesq equation. *Journal of Hydrology*, vol. 204, iss. 1-4, pp. 251-260.

Szilagyi, J., Parlange, M. B. i Albertson, J. D., 1998. Recession flow analysis for aquifer parameter determination. *Water Resources Research*, vol. 37, iss. 7, pp. 1851-1857.

Szymczak, T., 1992. *Modelowanie odpływu rzecznoego w małych niekontrolowanych zlewniach nizinnych na przykładzie Górnej Mławki*. Falenty: Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach. (niepublikowana)

Todini, E., 2002. The CLS model. W: V. P. Singh i F. D. K., redaktorzy *Mathematical models of large watershed hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, pp. 861-886.

Todini, E., 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, iss. 1, pp. 468-482.

Todini, E. i Biondi, D., 2017. Calibration, parameter estimation, uncertainty, data assimilation, sensitivity analysis, and validation. W: V. Singh, red. *Handbook of Applied Hydrology: second edition*. Nowy Jork: McGraw-Hill, pp. 22-1-22-19, ISBN 978-0-07-183509-1.

van der Kloet, P., van der Wal, M. i Zondervan, J. G., 1977. Calculation of instantaneous unit hydrographs in an urban area. W: *UNESCO Symposium on the Effects of Urbanization and Industrialization on the Hydrologic Regime and Water Quality Amsterdam, IAHS publication 123*. pp.124-144.

van Dijk, A. I. J. M., 2010. Selection of an appropriately simple storm runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, iss. 3, pp. 447-458.

van Esse, W. R. i inni, 2013. The influence of conceptual model structure on model performance: a comparative study for 237 French catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, iss. 10, pp. 4227-4239.

Wichwerek, S., 1995. *Spyw podpowierzchniowy i jego wplyw na wezbranie i poziom wód gruntowych*. *Sylwan*, vol. 139, iss. 12, pp. 47-50.

Zhang, G. P. i Savenije, H. H. G., 2005. Rainfall-runoff modelling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, iss. 3, pp. 243-261.

Wykaz tabel

Tabela 1. Przyjęte w kolejnych cyklach obliczeniowych dokładności wartości parametrów	43
Tabela 2. Analizowane kryteria estymacji parametrów	53
Tabela 3. Klasyfikacja modeli wg. Guilforda (1942)	55
Tabela 4. Charakterystyka hydrologiczna modelowanych rzek	61
Tabela 5. Pojedynczy zbiornik liniowy, Brynica – wyniki estymacji parametrów	80
Tabela 6. Kaskada Nasha, Brynica – wyniki estymacji parametrów.....	80
Tabela 7. SC2, Brynica – wyniki estymacji parametrów	81
Tabela 8. Model Diskina, Brynica – wyniki estymacji parametrów.....	81
Tabela 9. NSC2, Brynica – wyniki estymacji parametrów	82
Tabela 10. Wartości kryteriów estymacji otrzymane dla różnych dokładności wartości parametrów pojedynczego zbiornika liniowego wynikających z przyjętych przedziałów poszukiwania, Czerwona Woda	83
Tabela 11. Wartości kryteriów estymacji otrzymane dla różnych dokładności wartości parametrów kaskady Nasha wynikających z przyjętych przedziałów poszukiwania, Czerwona Woda.....	84
Tabela 12. Wartości kryteriów estymacji otrzymane dla różnych dokładności wartości parametrów SC2 wynikających z przyjętych przedziałów poszukiwania, Czerwona Woda.....	85
Tabela 13. Średnie wartości AIC i BIC otrzymane dla poszczególnych struktur liniowych modeli zbiornikowych	94
Tabela 14. Otrzymane zakresy wartości poszczególnych kryteriów estymacji	100
Tabela 15. Klasyfikacja kryteriów estymacji ze względu na cel modelowania.....	113
Tabela 16. Podział kryteriów estymacji parametrów	114
Tabela 17. Pojedynczy zbiornik liniowy, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów	141
Tabela 18. Pojedynczy zbiornik liniowy, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów	142
Tabela 19. Pojedynczy zbiornik liniowy, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów.....	143
Tabela 20. Pojedynczy zbiornik liniowy, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów.....	144
Tabela 21. Kaskada Nasha, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów	145
Tabela 22. Kaskada Nasha, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów.....	146
Tabela 23. Kaskada Nasha, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów	147
Tabela 24. Kaskada Nasha, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów	148
Tabela 25. Model SC2, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów	149
Tabela 26. Model SC2, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów	150
Tabela 27. Model SC2, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów.....	151
Tabela 28. Model SC2, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów	152
Tabela 29. Model Diskina, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów	153
Tabela 30. Model Diskina, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów.....	154
Tabela 31. Model Diskina, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów	155
Tabela 32. Model Diskina, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów	156
Tabela 33. Model NCSC2, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów	157
Tabela 34. Model NCSC2, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów.....	158
Tabela 35. Model NCSC2, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów	159
Tabela 36. Model NCSC2, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów	160

Wykaz rysunków

Rysunek 1. Klasyfikacja modeli hydrologicznych relacji opad-odpływ [opracowano na podstawie (Ozga-Zielińska & Brzeziński, 1997)].....	12
Rysunek 2. Schemat blokowy wyznaczania optymalnego zestawu wartości parametrów modelu dla pojedynczego wydarzenia	41
Rysunek 3. Macierz zmienności wartości kryterium estymacji w układzie parametrów (m, k).....	43
Rysunek 4. Koncepcja zlewni jako zbiornika retencyjnego	44
Rysunek 5. Model pojedynczego zbiornika liniowego: a) zbiornik b) hydrogram wypływu ze zbiornika	45
Rysunek 6. Konceptualny model kaskady Nasha	46
Rysunek 7. Schemat modelu zbiorników zatopionych.....	49
Rysunek 8. Różnice kształtów chwilowych hydrogramów jednostkowych IUH dla SC2 i kaskady Nasha (Kurnatowski, 2017)	50
Rysunek 9. Schemat modelu Diskina.....	51
Rysunek 10. Koncepcja modelu NCSC2	52
Rysunek 11. Koncepcja kryterium szczytów przesuwnych.....	57
Rysunek 12. Przebiegi czasowe $y_m(t)$ i $y_p(t)$ oraz zależność pomiędzy y_m i y_p	57
Rysunek 13. Zmienność chwilowego współczynnika spływu (Soczyńska, 1990)	59
Rysunek 14. Lokalizacja obiektów badawczych	60
Rysunek 15. Fragment mapy rastrowej ukazujący odcinek rzeki Pasłęki od źródła do miejscowości Tomaryny; Źródło: www.geoportal.gov.pl	62
Rysunek 16. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Żebrówkę od źródła do ujścia do rzeki Krztynia przy miejscowości Bonowice; Źródło: www.geoportal.gov.pl	63
Rysunek 17. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Brynicę od źródła do wodowskazu Brynica; Źródło: www.geoportal.gov.pl	63
Rysunek 18. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Czerwoną Wodę od źródła do ujścia do Nysy Łużyckiej; Źródło: www.geoportal.gov.pl	64
Rysunek 19. Fragment mapy rastrowej ukazujący rzekę Piotrówkę od źródła do ujścia do rzeki Olzy; Źródło: www.geoportal.gov.pl	65
Rysunek 20. Pasłęka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	66
Rysunek 21. Pasłęka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	66
Rysunek 22. Pasłęka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	66
Rysunek 23. Pasłęka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	67
Rysunek 24. Pasłęka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	67
Rysunek 25. Pasłęka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	67
Rysunek 26. Żebrówka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	68
Rysunek 27. Żebrówka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	68
Rysunek 28. Żebrówka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	68
Rysunek 29. Żebrówka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	69
Rysunek 30. Żebrówka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	69
Rysunek 31. Żebrówka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	69
Rysunek 32. Brynica – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	70
Rysunek 33. Brynica – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	70
Rysunek 34. Brynica – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989;1986)	70

Rysunek 35. Brynica – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	71
Rysunek 36. Brynica – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	71
Rysunek 37. Brynica – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)	71
Rysunek 38. Czerwona Woda – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	72
Rysunek 39. Czerwona Woda – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	72
Rysunek 40. Czerwona Woda – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	72
Rysunek 41. Czerwona Woda – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	73
Rysunek 42. Czerwona Woda – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971).....	73
Rysunek 43. Czerwona Woda – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971).....	73
Rysunek 44. Piotrówka – wydarzenie 1 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)	74
Rysunek 45. Piotrówka – wydarzenie 2 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)	74
Rysunek 46. Piotrówka – wydarzenie 3 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)	74
Rysunek 47. Piotrówka – wydarzenie 4 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)	75
Rysunek 48. Piotrówka – wydarzenie 5 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)	75
Rysunek 49. Piotrówka – wydarzenie 6 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)	75
Rysunek 50. Przykładowy rozkład wartości kryterium ΔV otrzymane dla struktury pojedynczego zbiornika liniowego dla wydarzenia 5 na rzece Żebrówka	79
Rysunek 51. Przykładowy rozkład wartości kryterium r otrzymane dla struktury kaskady Nasha dla wydarzenia 5 na rzece Żebrówka	79
Rysunek 52. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Piotrówka – wydarzenie 3.....	86
Rysunek 53. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Piotrówka – wydarzenie 3.....	86
Rysunek 54. Hydrogramy symulowane przez pojedynczy zbiornik liniowy przy zastosowaniu kryterium 14; Piotrówka – wydarzenie 3	87
Rysunek 55. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Pasłęka – wydarzenie 6	87
Rysunek 56. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Pasłęka – wydarzenie 6	87
Rysunek 57. Hydrogramy symulowane przez model NCSC2 przy zastosowaniu kryterium 14; Pasłęka – wydarzenie 6	88
Rysunek 58. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Żebrówka – wydarzenie 3	88
Rysunek 59. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Żebrówka – wydarzenie 3	88
Rysunek 60. Hydrogramy symulowane przez kaskadę Nasha przy zastosowaniu kryterium 14; Żebrówka – wydarzenie 3	89

Rysunek 61. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Czerwona Woda – wydarzenie 1	89
Rysunek 62. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Czerwona Woda – wydarzenie 1	89
Rysunek 63. Hydrogramy symulowane przez model Diskina przy zastosowaniu kryterium 14; Czerwona Woda – wydarzenie 1	90
Rysunek 64. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryteriów 1-8; Brynica – wydarzenie 4	90
Rysunek 65. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryteriów 9-13,15; Brynica – wydarzenie 4	90
Rysunek 66. Hydrogramy symulowane przez model SC2 przy zastosowaniu kryterium 14; Brynica – wydarzenie 4	91
Rysunek 67. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych modelem SC2 przy kryterium Δy_{max} ; Czerwona Woda – wydarzenie 1	91
Rysunek 68. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych modelem Diskina przy kryterium szczytów przesuwnych; Czerwona Woda – wydarzenie 1	91
Rysunek 69. Zestawienie wartości y_p i y_m otrzymanych kaskadą Nasha przy kryterium r ; Czerwona Woda – wydarzenie 1	92
Rysunek 70. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Piotrówka – wydarzenie 3	92
Rysunek 71. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE _i ; Piotrówka – wydarzenie 3	92
Rysunek 72. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Szczytów przesuwnych; Piotrówka – wydarzenie 3	93
Rysunek 73. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r ; Piotrówka – wydarzenie 3	93
Rysunek 74. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Piotrówka – wydarzenie 3	93
Rysunek 75. Rozkład wartości kryterium Δy_{max} otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	95
Rysunek 76. Obszar A: Przybliżenie rozkładu wartości Δy_{max} uzyskanych dla małych wartości parametru $k <0,1;4,0>$ przy użyciu pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	95
Rysunek 77. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 2	95
Rysunek 78. Rozkład wartości kryterium NSE _i otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 2	95
Rysunek 79. Rozkład wartości kryterium ME otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 2	96
Rysunek 80. Przybliżenie rozkładu wartości ME uzyskanych dla małych wartości parametru k <0,1;4,0> przy użyciu kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	96
Rysunek 81. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	96
Rysunek 82. Rozkład wartości kryterium r otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 4	97

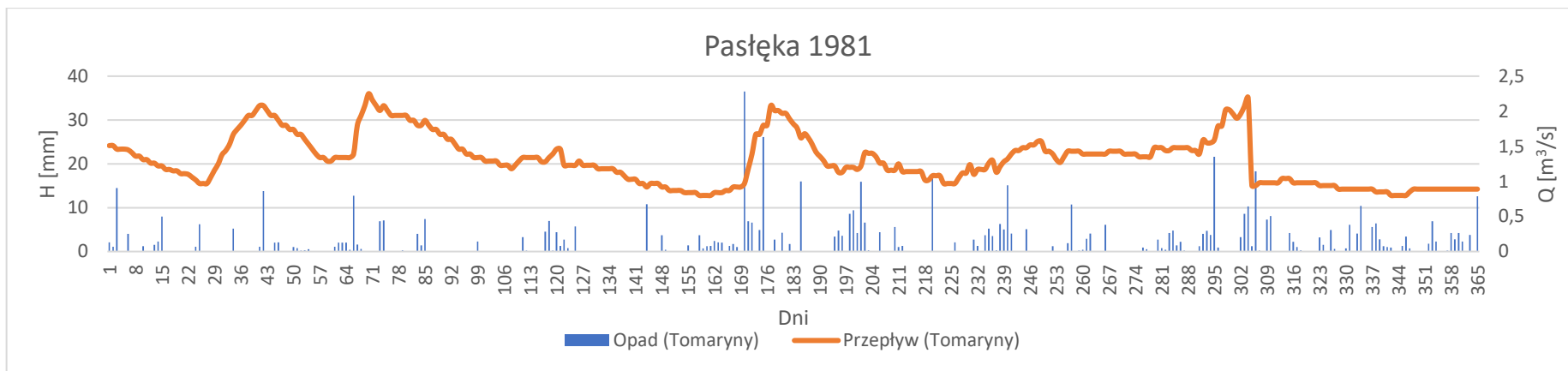
Rysunek 83. Rozkład wartości kryterium r_s otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 3	97
Rysunek 84. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 3	97
Rysunek 85. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 4	98
Rysunek 86. Rozkład wartości kryterium MAPE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Czerwona Woda – wydarzenie 3	98
Rysunek 87. Rozkład wartości kryterium szczytów przesuwnych otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Czerwona Woda – wydarzenie 3	98
Rysunek 88. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	99
Rysunek 89. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	99
Rysunek 90. Przybliżenie rozkładu wartości SWS uzyskanych dla małych wartości parametru $k < 0,2; 8,0 >$ przy użyciu kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	99
Rysunek 91. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymany dla modelu SC2; Żebrówka – wydarzenie 1	99
Rysunek 92. Rozkład wartości kryterium Δy_{\max} otrzymany dla modelu SC2; Żebrówka – wydarzenie 3	100
Rysunek 93. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla modelu SC2; Żebrówka – wydarzenie 1	100
Rysunek 94. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 3	101
Rysunek 95. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Piotrówka – wydarzenie 1	101
Rysunek 96. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Piotrówka – wydarzenie 1	102
Rysunek 97. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Piotrówka – wydarzenie 1	102
Rysunek 98. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δt_p ; Czerwona Woda – wydarzenie 3	103
Rysunek 99. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δt_p ; Brynica – wydarzenie 2	103
Rysunek 100. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r ; Czerwona Woda – wydarzenie 3	104
Rysunek 101. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium r_s ; Piotrówka – wydarzenie 3	104
Rysunek 102. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δy_{\max} ; Piotrówka – wydarzenie 4	104
Rysunek 103. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium Δy_{\max} ; Pasłęka – wydarzenie 4	105
Rysunek 104. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Pasłęka – wydarzenie 6	105

Rysunek 105. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ΔV ; Żebrówka – wydarzenie 3	105
Rysunek 106. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 6	106
Rysunek 107. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Żebrówka – wydarzenie 3	106
Rysunek 108. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAPE; Pasłęka – wydarzenie 6	107
Rysunek 109. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAPE; Żebrówka – wydarzenie 3	107
Rysunek 110. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium SWS; Pasłęka – wydarzenie 6	107
Rysunek 111. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium SWS; Żebrówka – wydarzenie 3	108
Rysunek 112. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ME; Pasłęka – wydarzenie 6	108
Rysunek 113. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium ME; Żebrówka – wydarzenie 3	108
Rysunek 114. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAE; Pasłęka – wydarzenie 6	109
Rysunek 115. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium MAE; Żebrówka – wydarzenie 3	109
Rysunek 116. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Żebrówka – wydarzenie 3	110
Rysunek 117. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Żebrówka – wydarzenie 3	110
Rysunek 118. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium JAKC; Czerwona Woda – wydarzenie 1.....	110
Rysunek 119. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Czerwona Woda – wydarzenie 1.....	111
Rysunek 120. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Czerwona Woda – wydarzenie 3.....	111
Rysunek 121. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium szczytów przesuwnych; Brynica – wydarzenie 3	112
Rysunek 122. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Czerwona Woda – wydarzenie 3.....	112
Rysunek 123. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Brynica – wydarzenie 3	113
Rysunek 124. Modelowane hydrogramy wynikowe przy zastosowaniu kryterium NSE; Pasłęka – wydarzenie 4	115
Rysunek 125. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Pasłęki 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986).....	135
Rysunek 126. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Pasłęki 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985).....	135

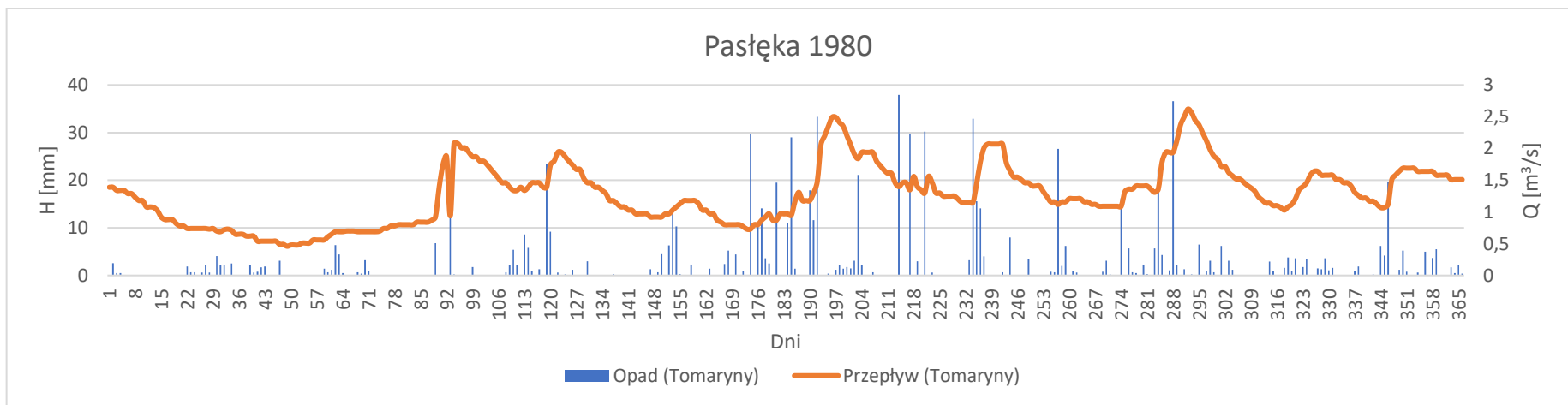
Rysunek 127. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Żebrówki 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986).....	136
Rysunek 128. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Żebrówki 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985).....	136
Rysunek 129. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Brynicy 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986).....	137
Rysunek 130. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Brynicy 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985).....	137
Rysunek 131. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Czerwonej Wody 1978 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	138
Rysunek 132. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Czerwonej Wody 1968 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971).....	138
Rysunek 133. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Piotrówki 1978 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982).....	139
Rysunek 134. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Piotrówki 1971 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974).....	139
Rysunek 135. Rozkład wartości kryterium Δy_{\max} otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	162
Rysunek 136. . Rozkład wartości kryterium Δy_{\max} otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	162
Rysunek 137. . Rozkład wartości kryterium Δt_p otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	162
Rysunek 138. . Rozkład wartości kryterium Δt_p otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1.....	162
Rysunek 139. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	163
Rysunek 140. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	163
Rysunek 141. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	163
Rysunek 142. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1.....	163
Rysunek 143. Rozkład wartości kryterium MAPE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	164
Rysunek 144. Rozkład wartości kryterium MAPE otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	164
Rysunek 145. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	164
Rysunek 146. Rozkład wartości kryterium SWS otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1.....	164
Rysunek 147. Rozkład wartości kryterium r otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	165
Rysunek 148. Rozkład wartości kryterium r otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	165

Rysunek 149. Rozkład wartości kryterium ME otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	165
Rysunek 150. Rozkład wartości kryterium ME otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	165
Rysunek 151. Rozkład wartości kryterium MAE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	166
Rysunek 152. Rozkład wartości kryterium MAE otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	166
Rysunek 153. Rozkład wartości kryterium r_s otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	166
Rysunek 154. Rozkład wartości kryterium r_s otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	166
Rysunek 155. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	167
Rysunek 156. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	167
Rysunek 157. Rozkład wartości kryterium szczytów przesuwanych otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	167
Rysunek 158. Rozkład wartości kryterium szczytów przesuwanych otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	167
Rysunek 159. Rozkład wartości kryterium NSE_i otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1	168
Rysunek 160. Rozkład wartości kryterium NSE_i otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1	168
Rysunek 161. Symulacje przeprowadzone dla Żebrówki – wydarzenie 1; kryteria 1-8	170
Rysunek 162. Symulacje przeprowadzone dla Żebrówki – wydarzenie 1; kryteria 9-15	171

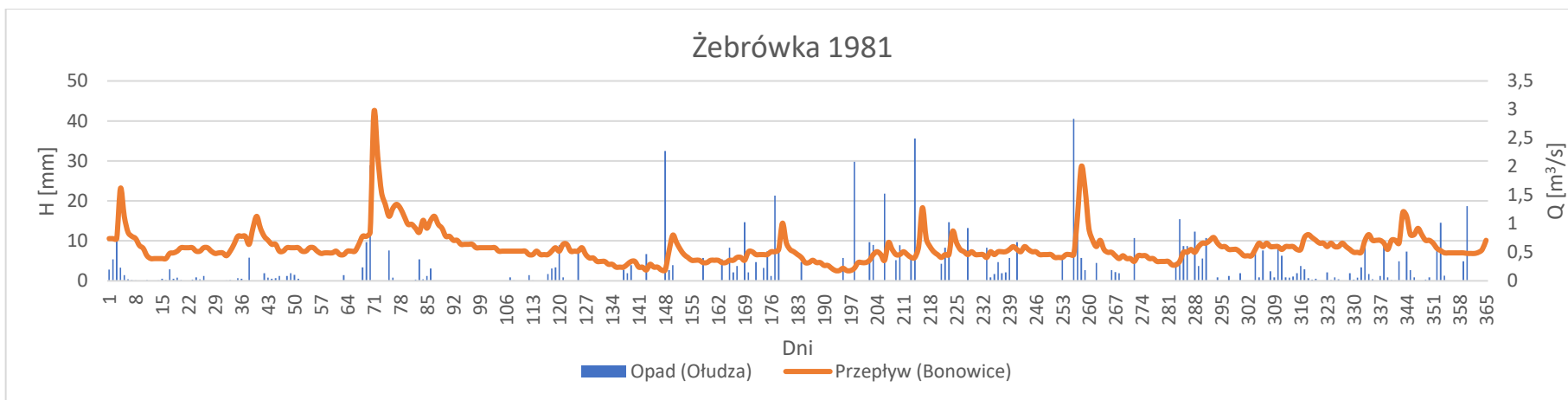
**Załącznik nr 1. Zestawienie wysokości dobowych opadów i wielkości
przepływów dla analizowanych rzek**



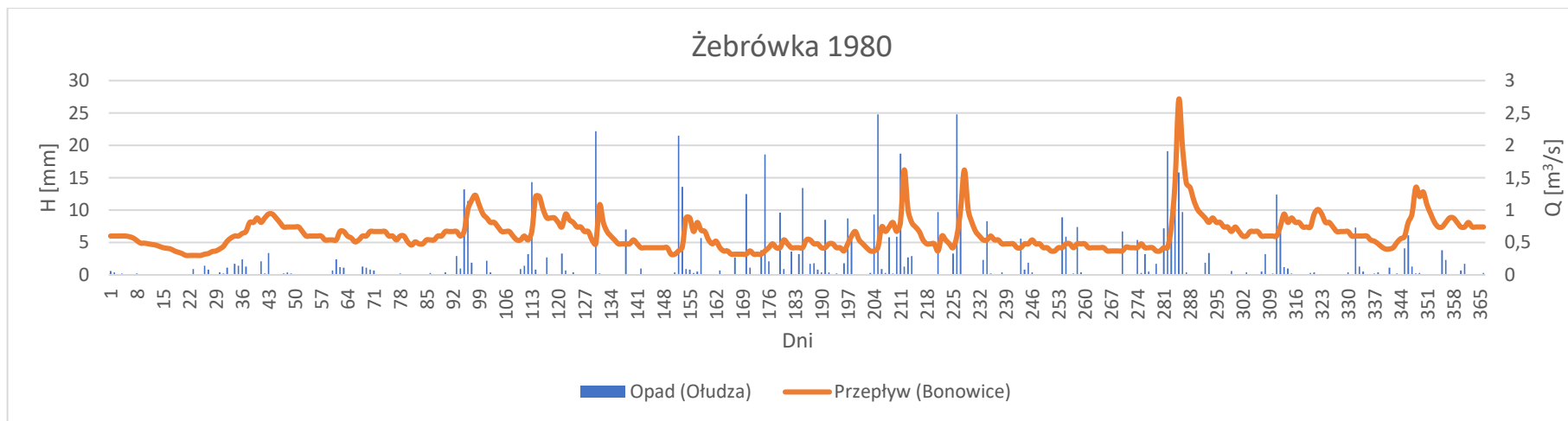
Rysunek 125. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Pasłęki 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986)



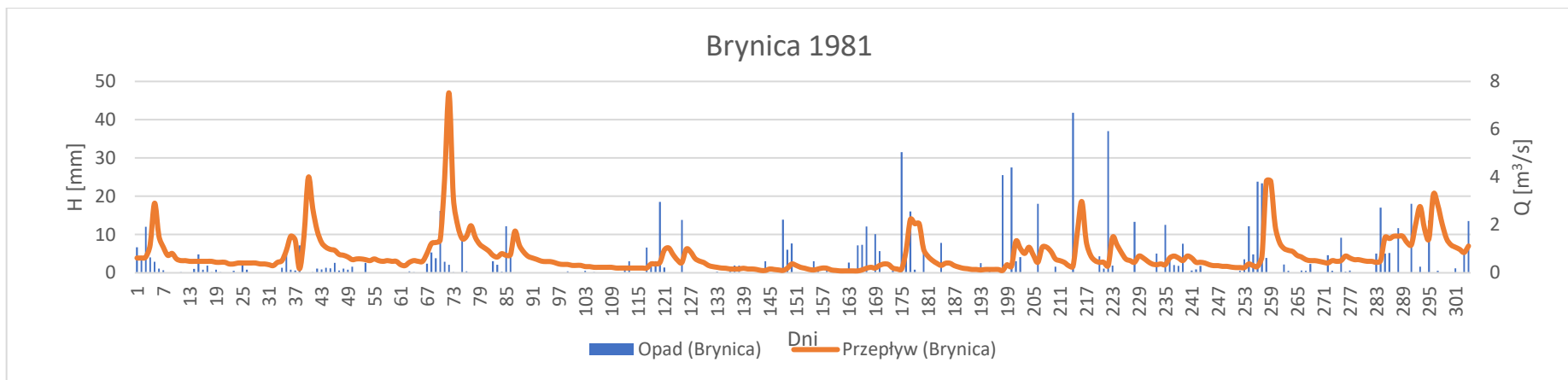
Rysunek 126. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Pasłęki 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



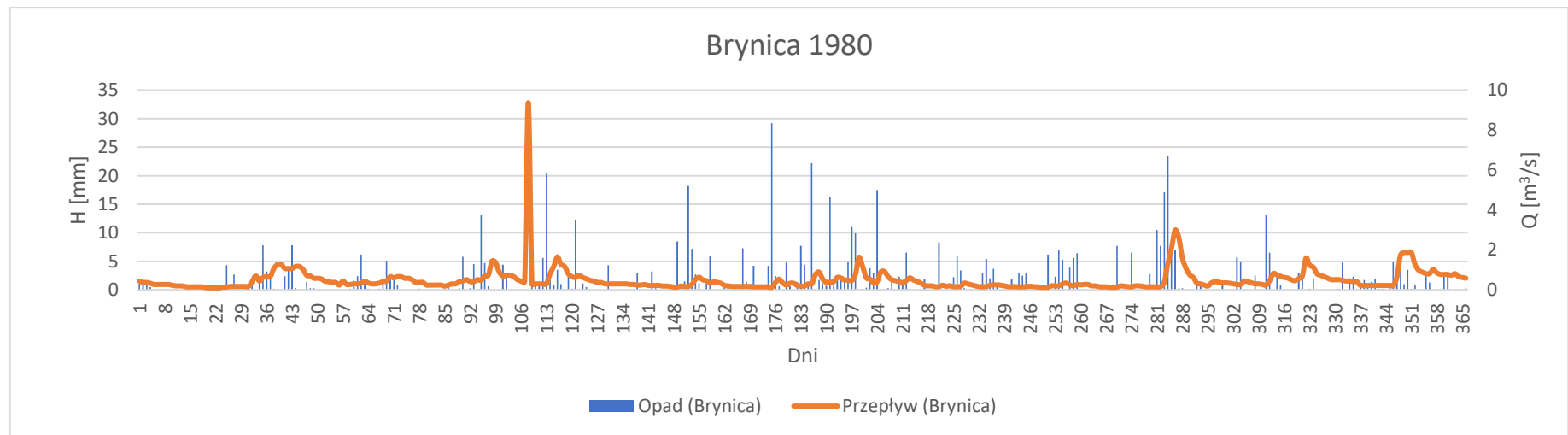
Rysunek 127. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Żebrówka 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986)



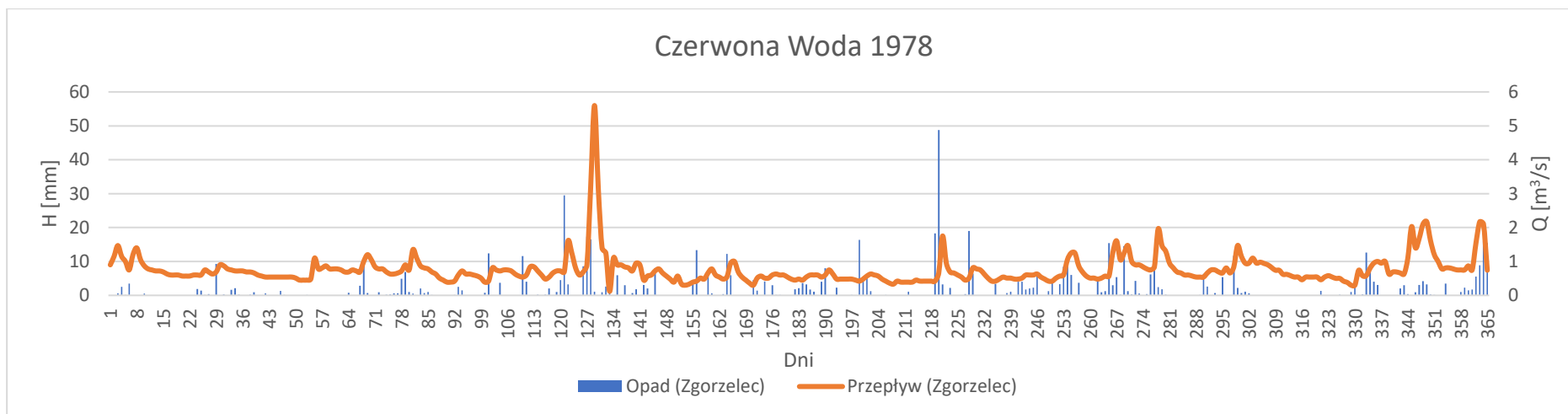
Rysunek 128. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Żebrówka 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



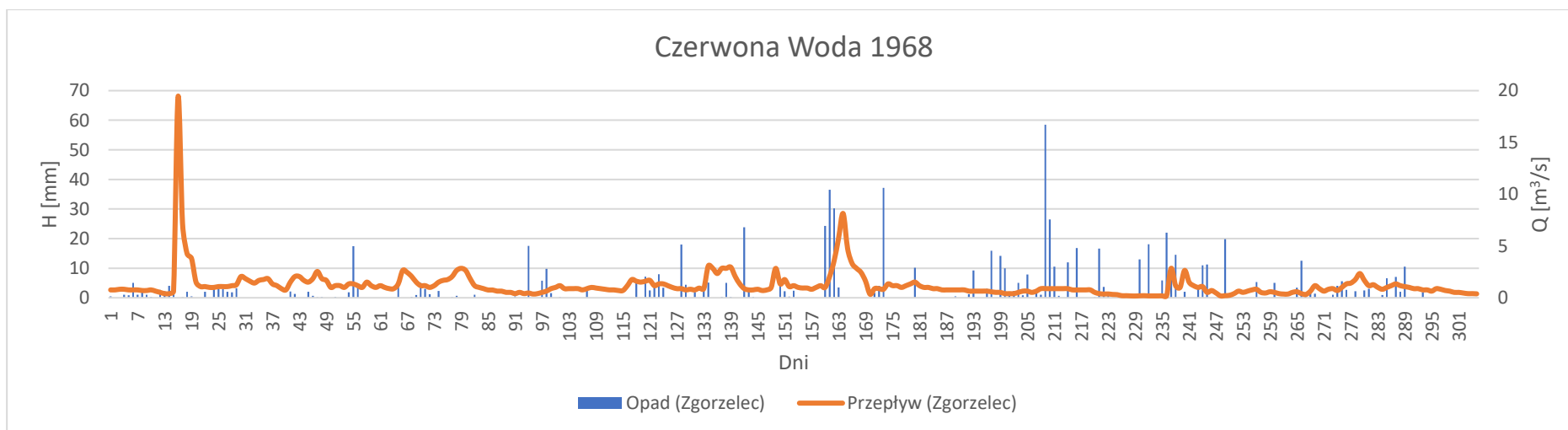
Rysunek 129. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Brynicy 1981 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1989; 1986)



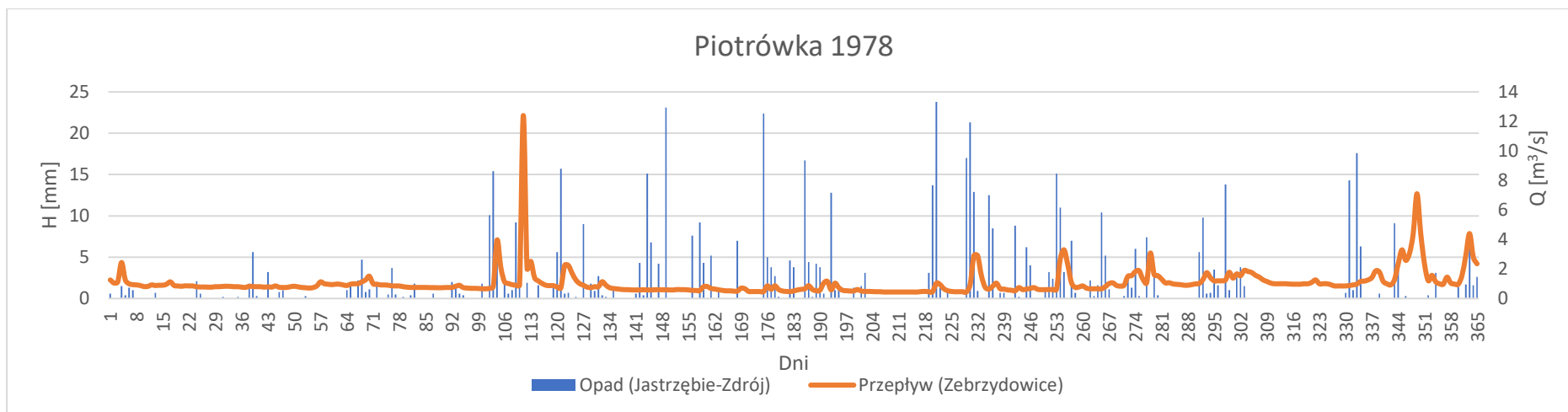
Rysunek 130. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Brynicy 1980 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1987; 1985)



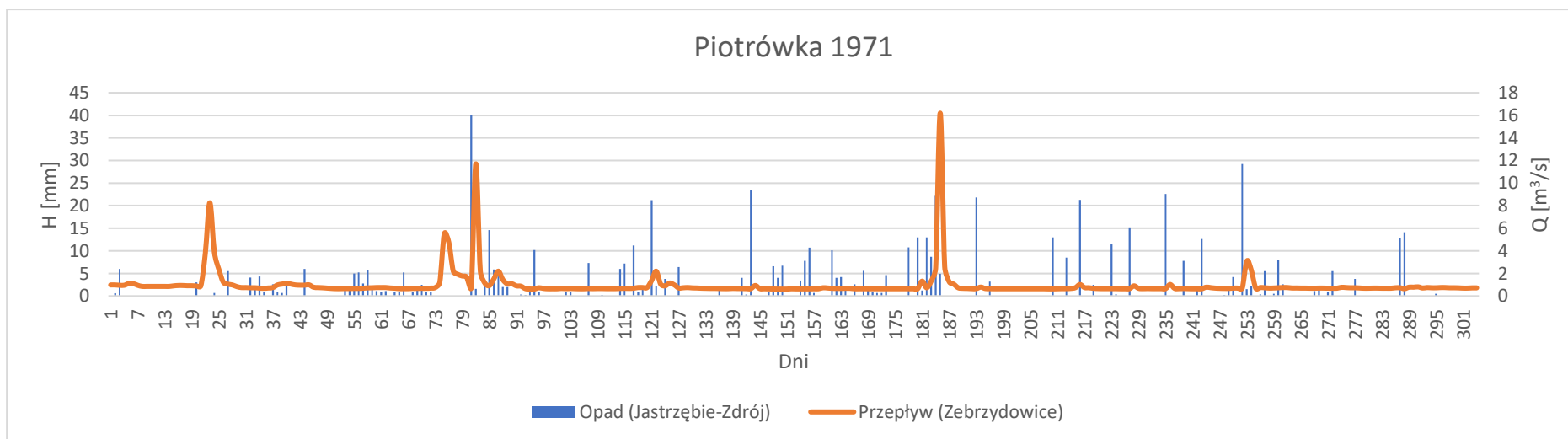
Rysunek 131. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Czerwonej Wody 1978 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



Rysunek 132. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Czerwonej Wody 1968 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1974; 1971)



Rysunek 133. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Piotrówki 1978 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1984; 1982)



Rysunek 134. Wysokości dobowe opadów i wielkości przepływów dla rzeki Piotrówki 1971 (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 1977; 1974)

**Załącznik nr 2. Wyniki estymacji parametrów dla rzek: Pasłęki, Żebrówki,
Czerwonej Wody i Piotrówki**

Tabela 17. Pojedynczy zbiornik liniowy, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów

Pasłęka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
18.06-03.07.1981 r.	m	5,35	1,35	1,00	2,80	2,80	3,85	2,00	2,20	3,70	4,35	2,80	11,45	9,70	3,25	4,95
	k	23,80	0,05	63,50	41,55	41,55	34,55	49,90	37,75	34,30	31,10	41,55	6,50	14,05	32,15	29,05
	Wartość	0,0001	2	52,62	0,838	0,0209	7,49	1,0000	0,917	0,28	0,12	0,3345	0,801	116,97	0,5801	0,846
16.07-27.07.1981 r.	m	42,75	10,50	97,35	99,60	99,60	120,00	53,25	4,30	108,25	142,20	99,60	2,80	97,35	106,60	107,40
	k	10,10	2,25	6,65	5,50	5,50	12,10	19,15	6,65	4,40	8,05	5,50	17,30	6,65	2,10	5,50
	Wartość	0,0000	0	1,39	0,367	0,0052	4,65	1,0000	0,667	0,11	0,06	0,0629	0,836	1,39	0,0402	0,360
26.04-04.05.1981 r.	m	3,85	10,05	69,70	75,15	75,15	92,15	30,00	0,05	84,20	92,95	75,15	2,60	53,20	75,15	84,65
	k	52,25	0,05	4,90	0,90	0,90	0,85	20,50	1,95	3,90	0,90	0,90	1,05	7,90	0,90	0,85
	Wartość	0,0000	0	1,91	0,108	0,0071	5,19	1,0000	0,495	0,12	0,07	0,0642	0,517	2,39	0,0642	0,104
08.07-29.07.1980 r.	m	55,15	0,00	4,35	0,20	0,20	0,45	3,00	0,05	0,45	0,45	0,20	0,25		11,05	0,35
	k	1,05	0,00	28,65	80,00	80,00	103,00	38,00	15,75	68,00	102,30	80,00	8,85		15,10	79,00
	Wartość	0,0001	0	87,89	-0,142	0,2281	15,08	1,0001	0,396	0,59	0,32	3,1792	0,423		0,7748	0,249
19.08-05.09.1980 r.	m	6,80	15,00	2,90	13,85	13,85	25,35	18,80	0,35	0,35	25,05	13,85	0,80	13,70	18,05	1,90
	k	21,15	8,40	60,20	12,45	12,45	7,75	6,65	17,25	104,90	6,90	12,45	20,25	12,90	5,70	80,65
	Wartość	0,0000	1	39,85	0,407	0,0640	11,80	1,0000	0,754	0,34	0,22	1,1522	0,835	13,79	0,6280	0,567
27.04-08.05.1980 r.	m	2,20	4,35	1,95	5,30	5,30	6,90	4,95	4,00	1,00	6,85	5,30	5,55	1,95	10,55	5,10
	k	28,25	1,25	44,70	18,15	18,15	13,20	20,40	19,75	71,00	13,30	18,15	15,10	44,70	5,45	20,35
	Wartość	0,0002	2	88,78	0,503	0,0162	5,71	1,0000	0,725	0,23	0,10	0,1938	0,802	88,78	0,1453	0,525

Tabela 18. Pojedynczy zbiornik liniowy, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów

Żebrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.05-06.06.1981	m	33,95	10,45	10,90	19,60	19,60	25,75	12,10	150,95	5,05	24,10	25,75	23,85	10,90	31,75	9,05
	k	1,95	6,00	24,90	10,25	10,25	8,60	22,45	11,95	47,60	6,70	8,60	32,00	24,90	2,45	44,15
	Wartość	0,0000	0	5,83	0,459	0,0173	24,20	1,0000	0,699	0,28	0,08	0,2077	0,956	5,83	0,0951	0,511
10.09-22.09.1981	m	12,15	10,90	27,80	31,75	31,75	43,70	8,25	8,55	18,55	43,35	31,75	12,10	27,80	30,60	49,95
	k	6,70	7,00	7,25	3,70	3,70	3,40	37,60	4,30	7,50	3,35	3,70	9,85	7,25	1,75	4,10
	Wartość	0,0002	0	26,54	0,535	0,1048	21,66	1,0000	0,747	0,69	0,20	1,3626	0,955	0,92	0,3239	0,708
31.07-08.08.1981	m	13,20	0,05	16,00	19,85	19,85	60,20	3,40	93,25	1,00	38,00	19,85	2,95	16,00	31,55	18,10
	k	5,65	0,05	19,00	14,55	14,55	17,75	93,90	15,95	82,00	11,85	14,55	2,75	19,00	1,00	30,30
	Wartość	0,0000	2	2,99	0,137	0,0576	18,84	1,0467	0,378	0,53	0,14	0,5184	0,363	2,99	0,0071	0,310
01.04-14.04.1980	m	24,95	13,55	9,50	25,80	25,80	34,10	18,70	3,80	17,85	32,40	25,80	2,90	19,50	29,30	30,60
	k	3,35	9,50	28,50	5,05	5,05	4,55	13,05	6,60	8,85	4,55	5,05	11,40	11,50	1,80	4,90
	Wartość	0,0000	1	0,98	0,621	0,0143	10,23	1,0000	0,832	0,21	0,09	0,2004	0,940	11,14	0,1289	0,643
11.08-19.08.1980	m	7,90	6,55	0,65	14,65	14,65	23,95	0,55	150,50	5,40	17,65	14,65	9,45	0,65	18,35	19,40
	k	6,10	1,50	69,45	6,15	6,15	3,90	75,20	7,00	14,90	6,15	6,15	11,90	69,45	2,25	6,40
	Wartość	0,0000	1	15,56	0,492	0,0624	17,02	1,0000	0,723	0,43	0,16	0,5614	0,950	15,56	0,1371	0,735
07.10-17.10.1980	m	2,45	2,90	2,10	14,35	14,35	15,90	1,10	7,15	12,30	15,05	14,35	7,45	11,50	11,80	14,25
	k	16,60	0,05	38,05	3,30	3,30	5,90	51,10	3,90	3,40	3,95	3,30	3,85	1,00	6,55	8,75
	Wartość	0,0001	0	15,76	0,795	0,0841	15,54	1,0001	0,905	0,49	0,17	0,9249	0,977	39,02	1,4560	0,836

Tabela 19. Pojedynczy zbiornik liniowy, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów

Czerwona Woda																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-05.05.1978	m	29,35	10,90	15,45	28,00	28,00	0,35	6,45	150,05	11,00	34,75	28,00	18,05	15,45	35,65	37,00
	k	2,45	8,85	9,75	5,55	5,55	112,90	25,55	5,05	15,60	2,45	5,55	28,50	9,75	1,40	2,65
	Wartość	0,0000	0	5,44	0,381	0,0689	22,10	1,0000	0,651	0,45	0,20	0,6886	0,839	5,44	0,1338	0,313
05.05-13.05.1978	m	1,85	0,85	0,45	5,00	5,00	151,00	3,10	0,05	4,15	6,90	5,00	2,85	3,60	3,85	151,00
	k	3,40	0,05	17,75	3,35	3,35	151,00	9,25	4,05	2,00	2,15	3,35	3,70	0,80	1,25	151,00
	Wartość	0,0001	1	19,85	0,332	1,8556	90,08	1,0000	0,653	2,40	0,96	16,7003	0,733	202,32	3,2019	0,177
06.08-14.08.1978	m	27,40	11,70	14,95	30,35	30,35	41,90	3,95	5,85	6,85	45,80	30,35	12,70	14,95	29,00	40,65
	k	1,40	13,85	15,65	4,15	4,15	9,45	64,65	4,90	19,50	4,95	4,15	28,85	15,65	1,10	4,85
	Wartość	0,0000	0	3,70	0,395	0,0904	14,42	1,0000	0,642	0,54	0,17	0,8137	0,975	3,70	0,0314	0,740
01.10-12.10.1978	m	1,40	8,30	1,55	16,70	16,70	151,00	2,10	150,85	6,85	23,85	16,70	7,95	1,55	10,95	28,05
	k	11,20	4,40	75,40	2,50	2,50	151,00	77,30	3,35	8,15	1,90	2,50	4,85	75,40	0,95	1,85
	Wartość	0,0000	0	0,40	0,397	0,0901	21,69	1,0000	0,718	0,54	0,24	1,0814	0,714	0,40	0,3285	0,377
08.06-18.06.1968	m	2,75	12,85	3,25	2,95	2,95	8,10	3,00	150,25	1,50	3,25	2,95	18,85	2,95	3,50	6,20
	k	2,85	12,50	4,95	5,85	5,85	3,60	7,00	7,90	7,80	5,10	5,85	40,50	1,60	1,60	2,15
	Wartość	0,0012	1	403,18	0,487	2,3824	58,41	1,0001	0,773	2,77	1,13	26,2063	0,945	97,88	3,4178	0,359
21.08-26.08.1968	m	1,20	0,05	8,00	0,05	0,05	12,95	0,80	0,05	0,80	14,80	0,05	6,00	6,65	2,95	8,30
	k	12,35	0,05	0,50	34,50	34,50	56,55	29,40	5,10	18,00	5,30	34,50	2,25	7,10	0,35	26,45
	Wartość	0,0001	1	43,97	0,290	0,6337	42,07	1,0001	0,557	0,54	0,43	3,8021	0,943	29605,31	1,4383	0,808

Tabela 20. Pojedynczy zbiornik liniowy, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów

Piotrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
07.03-12.03.1978	m	3,80	9,95	9,95	9,00	9,00	23,75	0,75	150,80	8,00	11,45	9,00	7,65	9,95	1,95	11,80
	k	3,80	3,50	2,85	3,65	3,65	2,20	29,00	3,60	2,70	6,40	3,65	5,25	2,85	0,35	2,70
	Wartość	0,0001	0	8,18	0,417	0,0204	8,17	1,0000	0,672	0,21	0,11	0,1223	0,943	8,18	0,0378	0,472
28.04-08.05.1978	m	3,75	0,05	2,30	4,05	4,05	5,45	5,00	149,10	0,25	10,50	4,05	21,70	2,30	8,40	3,35
	k	6,65	0,05	19,55	12,90	12,90	59,55	11,50	14,15	34,25	5,15	12,90	37,85	19,55	2,55	28,85
	Wartość	0,0001	1	10,44	0,322	0,2258	25,20	1,0000	0,580	0,76	0,37	2,0321	0,775	10,44	0,4904	0,399
16.08-22.08.1978	m	1,50	5,45	6,30	7,55	7,55	24,25	2,25	150,80	5,85	7,45	7,55	11,70	6,30	6,85	8,80
	k	12,20	1,00	6,25	4,00	4,00	3,75	18,60	4,40	6,05	2,35	4,00	5,50	6,25	0,95	11,20
	Wartość	0,0006	0	5,92	0,605	0,3919	31,35	1,0002	0,825	0,85	0,50	2,7433	0,955	5,92	0,4349	0,773
28.06-11.07.1971	m	0,05	10,65	3,70	3,80	3,80	65,65	1,50	150,90	0,05	17,85	3,80	6,85		1,55	21,00
	k	1,50	6,35	1,20	2,60	2,60	2,55	16,00	3,15	2,75	2,25	2,60	2,50		0,90	2,15
	Wartość	4,9598	0	209,41	0,308	10,6863	27,38	1,0001	0,616	7,70	1,21	10,6863	0,852		82,3941	0,869
08.09-12.09.1971	m	1,55	0,05	4,70	3,50	3,50	151,00	4,75	8,30	0,45	1,80	3,50	8,55	4,70	5,35	11,20
	k	6,00	0,05	0,70	8,05	8,05	151,00	5,55	7,65	20,10	8,15	8,05	12,75	0,70	0,95	6,75
	Wartość	0,0004	1	11,86	0,175	0,8474	30,34	1,0000	0,420	1,20	0,78	4,2369	0,600	11,86	0,8520	0,426
21.03-24.03.1971	m	1,05	10,60	2,10	0,05	0,05	151,00	1,75	53,90	0,05	1,10	0,05	18,45	0,15	0,05	151,00
	k	1,20	16,40	3,05	10,75	10,75	151,00	4,60	125,25	7,20	50,60	10,75	33,50	0,45	0,45	151,00
	Wartość	0,0020	0	246,95	0,099	17,6748	58,16	1,0000	0,344	5,70	2,73	70,6990	0,800	107128,02	1,9213	0,402

Tabela 21. Kaskada Nasha, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów

Pasłęka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
18.06-03.07.1981 r.	m	52,90	1,55	22,70	20,90	20,90	17,80	2,90	0,05	0,65	17,25	20,90	37,70	33,05	27,05	20,50
	k	2,05	0,45	1,90	2,90	2,90	3,40	41,00	3,55	39,70	3,45	2,90	1,00	1,25	2,50	1,90
	N	5,75	7,00	4,30	2,35	2,35	2,15	1,00	2,70	1,25	2,10	2,35	5,75	3,45	6,50	3,15
	Wartość	0,0000	0	0,20	0,902	0,0126	4,37	1,0000	0,989	0,24	0,07	0,2011	0,984	214,87	0,0992	0,954
16.07-27.07.1981 r.	m	75,90	1,65	49,35	132,15	132,15	121,00	25,50	3,50	124,40	121,00	130,30	4,00	91,40	1,45	140,65
	k	3,80	0,25	6,00	0,55	0,55	0,55	18,00	0,60	2,00	0,55	0,50	2,45	6,40	3,30	0,55
	N	2,80	6,45	2,70	7,00	7,00	7,00	1,50	6,90	1,80	7,00	8,00	2,20	1,10	9,95	7,00
	Wartość	0,0000	0	0,08	0,708	0,0024	2,66	1,0000	0,893	0,10	0,03	0,0286	0,867	0,05	0,0117	0,673
26.04-04.05.1981 r.	m	28,00	0,75	54,05	81,00	81,00	92,70	107,70	0,05	130,70	92,50	80,00	1,00	74,25	6,90	95,50
	k	1,50	0,35	6,50	0,70	0,70	0,45	1,20	0,55	0,50	0,60	0,70	0,50	0,45	1,40	0,65
	N	8,75	8,65	1,10	1,50	1,50	1,60	7,80	4,45	4,00	1,35	1,50	10,00	1,80	9,05	1,65
	Wartość	0,0000	0	0,22	0,112	0,0071	5,16	1,0000	0,610	0,12	0,07	0,0639	0,425	1,16	0,0005	0,108
08.07-29.07.1980 r.	m	33,85	0,05	20,40	0,05	0,05	0,05	38,10	0,05	0,45	0,05	0,05	0,05		48,25	0,05
	k	3,10	0,70	2,40	78,50	78,50	101,05	1,60	2,35	68,00	100,85	78,50	2,65		0,90	79,00
	N	2,85	8,25	5,5000	1,05	1,05	1,05	7,65	3,40	1,00	1,05	1,05	3,00		9,25	1,05
	Wartość	0,0000	0	0,00	-0,129	0,1429	14,91	1,0000	0,975	0,59	0,31	3,1432	0,971		0,2036	0,265
19.08-05.09.1980 r.	m	39,00	2,10	8,10	21,30	21,30	22,45	9,40	0,05	29,70	21,75	21,30	0,05	21,60	2,75	21,90
	k	1,85	0,40	3,70	1,60	1,60	1,55	4,60	2,25	1,50	1,60	1,60	0,95	3,20	3,90	1,55
	N	9,50	10,00	5,20	4,00	4,00	4,00	5,85	3,25	4,25	4,00	4,00	6,70	2,10	9,95	4,00
	Wartość	0,0000	0	2,33	0,871	0,0139	5,68	1,0000	0,984	0,22	0,10	0,2504	0,985	26,33	0,1057	0,905
27.04-08.05.1980 r.	m	19,50	1,85	3,00	14,45	14,45	13,45	4,30	86,65	37,15	12,00	14,45	0,05	15,50	49,15	20,55
	k	1,20	0,35	9,90	1,80	1,80	1,40	8,00	1,80	1,30	1,90	1,80	0,45	2,35	0,90	1,60
	N	4,20	9,90	2,15	3,15	3,15	4,00	2,40	3,15	3,90	3,00	3,15	9,95	2,40	7,65	3,45
	Wartość	0,0000	0	3,95	0,948	0,0017	1,80	1,0000	0,977	0,08	0,03	0,0017	0,991	6,79	0,0267	0,942

Tabela 22. Kaskada Nasha, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów

Żebrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.05-06.06.1981	m	3,90	0,05	36,30	47,45	47,45	50,75	83,90	0,05	38,90	50,70	47,45	23,85	82,85	36,55	35,15
	k	21,90	0,35	1,10	0,75	0,75	1,00	1,40	0,55	0,50	1,00	0,75	32,00	0,80	1,50	0,80
	N	1,10	7,85	4,00	5,15	5,15	4,25	5,70	6,85	8,00	4,25	5,15	1,00	3,75	2,10	6,00
	Wartość	0,0000	0	0,88	0,860	0,0045	15,03	1,0000	0,936	0,11	0,05	0,0538	0,956	1,17	0,0392	0,788
10.09-22.09.1981	m	19,15	0,05	26,05	42,90	42,90	71,95	6,00	17,15	40,75	39,65	42,90	9,10	68,70	44,15	88,55
	k	3,05	0,35	4,35	0,40	0,40	0,50	5,10	0,35	0,50	0,40	0,40	0,50	0,45	0,50	0,50
	N	3,60	6,85	2,25	7,00	7,00	6,25	4,75	8,30	6,00	7,00	7,00	6,50	6,25	4,00	6,30
	Wartość	0,0000	0	2,07	0,948	0,0117	9,63	1,0000	0,984	0,24	0,07	0,1515	0,988	106,55	0,0908	0,954
31.07-08.08.1981	m	35,50	0,05	16,00	44,60	44,60	108,60	11,00	109,40	41,65	116,15	44,60	17,15	21,10	31,55	77,65
	k	1,30	0,50	19,00	0,50	0,50	0,65	31,50	0,50	0,80	0,55	0,50	0,60	7,25	1,00	0,55
	N	5,65	6,15	1,00	7,00	7,00	6,15	1,00	7,00	5,20	6,35	7,00	6,45	1,45	1,00	7,00
	Wartość	0,0000	0	2,99	0,712	0,0192	11,25	1,0000	0,870	0,25	0,09	0,1731	0,921	0,54	0,0071	0,784
01.04-14.04.1980	m	6,65	0,05	29,90	72,00	72,00	70,40	71,00	9,60	35,25	70,40	74,10	5,95	80,70	59,20	36,55
	k	15,05	0,50	2,50	0,80	0,80	0,80	0,90	1,00	1,00	0,80	1,00	0,85	1,10	1,00	0,75
	N	1,05	6,85	1,0000	4,55	4,55	4,55	3,60	3,95	4,00	4,55	3,75	4,55	3,75	2,80	5,00
	Wartość	0,0000	0	0,28	0,937	0,0024	4,95	1,0000	0,983	0,09	0,04	0,0402	0,966	2,65	0,0353	0,886
11.08-19.08.1980	m	16,95	0,05	7,45	39,30	39,30	50,50	19,95	126,55	24,90	50,50	39,30	0,05	39,70	28,65	65,55
	k	1,70	0,50	15,60	0,50	0,50	0,60	2,90	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	1,00	0,70	0,60
	N	2,70	5,40	1,05	6,25	6,25	5,35	2,45	6,20	6,00	5,35	6,25	6,50	3,45	3,10	5,55
	Wartość	0,0000	0	3,61	0,904	0,0117	7,69	1,0000	0,952	0,19	0,07	0,1057	0,975	4,33	0,0858	0,938
07.10-17.10.1980	m	27,30	2,90	12,60	14,35	14,35	18,90	39,15	7,15	14,10	15,05	14,35	7,10	11,50	1,65	19,30
	k	0,75	0,05	3,90	3,30	3,30	2,85	0,40	3,90	1,65	3,95	3,30	2,75	1,00	3,60	0,80
	N	2,75	1,00	2,90	1,00	1,00	1,70	3,65	1,00	1,65	1,00	1,00	1,35	1,00	6,95	5,00
	Wartość	0,0000	0	21,08	0,795	0,0841	14,96	1,0000	0,905	0,48	0,17	0,9249	0,977	39,02	0,5835	0,903

Tabela 23. Kaskada Nasha, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów

Czerwona Woda																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-05.05.1978	m	48,45	3,05	15,45	51,55	51,55	78,85	55,05	0,05	46,50	76,00	51,55	2,80	15,45	40,85	75,70
	k	0,60	0,30	9,75	0,45	0,45	0,40	0,50	0,35	0,40	0,40	0,45	0,40	9,75	0,90	0,40
	N	5,20	5,85	1,00	6,00	6,00	6,25	6,15	7,35	7,00	6,25	6,00	4,95	1,00	1,70	6,25
	Wartość	0,0000	0	5,44	0,841	0,0176	13,13	1,0000	0,961	0,22	0,10	0,1764	0,876	5,44	0,1277	0,522
05.05-13.05.1978	m	3,20	0,15	5,00	6,50	6,50	103,40	14,30	1,75	6,85	19,50	6,50	2,05	10,85	7,15	125,65
	k	2,40	0,35	3,65	0,40	0,40	32,35	0,30	0,40	0,50	0,40	0,40	0,95	0,40	0,40	0,45
	N	3,80	6,60	1,05	7,00	7,00	7,00	5,20	7,00	6,00	6,55	7,00	3,45	6,25	4,00	7,00
	Wartość	0,0002	0	1,09	0,836	0,4555	89,68	1,0001	0,951	1,51	0,48	4,0992	0,950	144652,04	2,5682	0,197
06.08-14.08.1978	m	10,50	0,05	34,10	45,50	45,50	105,70	2,50	146,40	47,35	93,50	45,50	1,25	14,95	29,00	76,85
	k	2,00	0,35	1,90	0,40	0,40	1,40	65,50	0,35	0,40	0,75	0,40	0,45	15,65	1,10	0,60
	N	4,00	5,45	1,30	6,00	6,00	2,80	1,10	6,95	6,00	4,35	6,00	6,70	1,00	1,00	5,25
	Wartość	0,0000	0	0,04	0,822	0,0266	10,06	1,0000	0,926	0,30	0,12	0,2390	0,992	3,70	0,0314	0,897
01.10-12.10.1978	m	5,70	0,05	4,60	31,30	31,30	68,60	67,35	4,45	23,10	32,05	31,30	0,05	31,90	19,70	65,00
	k	2,60	0,35	9,65	0,40	0,40	0,40	0,85	0,40	0,50	0,40	0,40	0,40	0,50	0,45	0,40
	N	3,40	5,50	2,4500	6,30	6,30	6,65	3,65	6,95	6,25	6,25	6,30	7,00	5,00	3,05	6,50
	Wartość	0,0000	0	0,23	0,732	0,0400	17,62	1,0000	0,930	0,33	0,15	0,4801	0,778	7,85	0,3028	0,583
08.06-18.06.1968	m	19,10	1,25	6,60	7,85	7,85	5,55	1,35	144,65	6,25	6,40	7,85	3,85	19,10	3,50	3,65
	k	0,30	0,50	2,70	0,60	0,60	0,75	7,50	0,55	0,60	0,95	0,60	0,50	0,55	1,60	0,50
	N	5,65	7,00	3,95	6,25	6,25	5,00	1,75	6,75	6,15	4,20	6,25	7,00	6,75	1,00	7,00
	Wartość	0,0001	0	38,76	0,915	0,3936	32,55	1,0000	0,957	0,95	0,47	4,3301	0,991	1632,88	3,4178	0,463
21.08-26.08.1968	m	4,80	0,05	9,60	31,45	31,45	15,75	16,75	0,05	23,00	40,65	31,45	0,20		0,30	10,30
	k	3,30	0,05	3,35	0,40	0,40	0,80	1,05	0,35	0,40	0,40	0,40	0,35		1,75	1,00
	N	1,35	1,00	1,30	5,25	5,25	7,00	1,65	6,45	5,25	5,15	5,25	5,75		6,95	6,95
	Wartość	0,0000	1	0,08	0,442	0,4982	23,57	1,0000	0,787	1,00	0,40	2,9893	1,000		0,7759	0,948

Tabela 24. Kaskada Nasha, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów

Piotrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
07.03-12.03.1978	m	6,80	0,05	9,70	23,65	23,65	24,65	17,90	88,65	15,30	24,65	23,65	11,45	6,05	2,95	17,60
	k	1,50	0,45	2,00	0,40	0,40	0,40	0,65	0,50	0,40	0,40	0,40	0,95	5,60	2,20	0,40
	N	4,55	6,60	2,55	6,25	6,25	6,15	4,10	5,05	5,15	6,15	6,25	2,90	1,10	4,90	6,00
	Wartość	0,0000	0	1,17	0,522	0,0167	6,27	1,0000	0,733	0,20	0,08	0,1002	0,943	0,89	0,0013	0,565
28.04-08.05.1978	m	4,20	0,05	0,10	29,75	29,75	31,50	1,00	25,00	12,85	16,85	29,75	0,65	14,30	14,25	18,65
	k	4,30	0,35	20,65	0,50	0,50	0,50	17,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,65	0,70	0,70	0,55
	N	1,20	5,50	1,20	6,50	6,50	6,50	1,25	6,65	7,00	6,20	6,50	5,90	4,00	3,15	7,00
	Wartość	0,0000	0	5,18	0,865	0,0450	13,81	1,0000	0,949	0,44	0,12	0,4047	0,817	6,07	0,2555	0,751
16.08-22.08.1978	m	8,55	0,05	3,20	19,75	19,75	27,15	7,60	147,95	20,35	12,70	19,75	0,05	6,30	14,20	31,60
	k	1,45	0,35	7,10	0,40	0,40	0,45	2,80	0,40	0,55	0,40	0,40	0,40	6,25	0,40	0,45
	N	2,10	5,00	1,40	6,25	6,25	6,25	2,10	6,50	5,35	6,05	6,25	6,80	1,00	3,10	6,25
	Wartość	0,0000	0	2,69	0,905	0,0947	19,39	1,0000	0,971	0,54	0,22	0,6629	0,955	5,92	0,4337	0,933
28.06-11.07.1971	m	0,30	0,05	2,70	18,40	18,40	57,00	20,10	150,90	5,45	27,85	18,40	2,45	10,65	6,80	53,65
	k	1,10	0,35	8,60	0,40	0,40	0,50	0,40	0,35	0,40	0,40	0,40	0,45	0,35	0,25	0,40
	N	5,40	5,60	1,1500	5,70	5,70	5,50	4,65	6,50	6,20	6,25	5,70	7,00	5,65	2,95	6,50
	Wartość	0,0002	0	13,43	0,546	7,0089	17,55	1,0000	0,778	5,41	1,05	98,1243	0,937	2050271,05	46,2249	0,944
08.09-12.09.1971	m	0,60	0,05	11,10	11,00	11,00	90,15	5,80	0,05	9,80	9,15	11,00	0,95	14,20	15,90	35,10
	k	4,30	0,35	0,90	0,40	0,40	13,00	2,35	0,35	0,40	0,40	0,40	0,35	0,60	0,40	0,40
	N	1,70	5,05	3,35	6,15	6,15	7,00	2,85	6,85	6,00	6,10	6,15	6,00	3,35	3,50	6,30
	Wartość	0,0000	0	0,17	0,732	0,2758	30,26	1,0000	0,947	0,70	0,39	1,3790	0,700	28,07	0,6210	0,675
21.03-24.03.1971	m	3,30	0,05	5,60	4,20	4,20	22,85	0,65	0,05	3,20	40,15	4,20	0,05	8,30	0,90	12,60
	k	0,40	0,35	0,50	0,35	0,35	1,05	6,70	0,35	0,40	0,30	0,35	0,35	0,35	0,15	0,50
	N	6,30	5,10	5,30	6,15	6,15	6,95	1,10	6,40	6,00	6,95	6,15	6,15	6,50	2,95	7,00
	Wartość	0,0007	0	14,06	0,532	9,1753	52,01	1,0000	0,829	3,70	2,50	36,7010	0,800	203828,02	0,8476	0,491

Tabela 25. Model SC2, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów

Pasłęka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
18.06-03.07.1981 r.	m	42,00	0,05	13,00	15,95	15,95	15,10	8,80	0,30	13,00	15,60	15,95	13,25	18,10	11,50	15,55
	N	7,00	2,00	6,00	4,00	4,00	2,00	5,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	7,00
	k	32,00	0,20	19,30	1,10	1,10	0,25	18,10	0,70	0,55	0,55	1,10	1,00	1,60	0,35	3,75
	Wartość	0,0000	0	33,80	0,860	0,0180	5,34	1,0000	0,993	0,27	0,09	0,2875	0,993	2,27	0,1685	0,937
16.07-27.07.1981 r.	m	40,80	0,05	86,40	121,05	121,05	118,00	122,60	4,65	143,95	118,00	121,05	0,15	62,10		128,55
	N	5,00	1,00	6,00	3,00	3,00	7,00	4,00	6,00	4,00	7,00	3,00	2,00	7,00		3,00
	k	32,35	0,05	23,10	1,45	1,45	8,45	6,70	4,75	3,60	8,45	1,45	0,40	41,95		1,40
	Wartość	0,0000	0	0,06	0,622	0,0031	3,37	1,0000	0,850	0,78	0,04	0,0375	0,869	0,41		0,585
26.04-04.05.1981 r.	m	30,70	7,65	36,05	0,15	0,15	1,35	76,55	0,05	76,00	1,35	0,15	35,65	151,00		0,05
	N	7,00	1,00	4,00	2,00	2,00	5,00	7,00	7,00	7,00	5,00	2,00	2,00	1,00		6,00
	k	35,10	0,30	16,35	10,35	10,35	59,65	29,75	17,60	5,05	59,65	10,35	60,50	0,50		91,30
	Wartość	0,0000	0	1,01	0,153	0,0068	4,29	1,0000	0,503	0,14	0,06	0,0610	0,675	12216,27		0,165
08.07-29.07.1980 r.	m	68,45	0,05	51,75	17,35	17,35	35,60	19,30	0,05	11,30	35,55	17,35	0,05			12,60
	N	7,00	3,00	1,00	2,00	2,00	2,00	4,00	4,00	5,00	2,00	2,00	6,00			2,00
	k	23,40	0,35	1,0000	0,20	0,20	0,30	2,90	0,85	0,95	0,30	0,20	2,00			0,30
	Wartość	0,0000	0	160,95	-1,381	0,3014	19,41	1,0000	0,878	0,79	0,43	6,6316	0,851			-0,332
19.08-05.09.1980 r.	m	31,20	0,05	13,00	19,05	19,05	19,00	19,10	0,05	17,35	18,95	19,05	0,05	21,50	19,05	19,85
	N	5,00	2,00	6,00	5,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	7,00	5,00	4,00
	k	13,00	0,20	22,00	1,75	1,75	0,65	13,05	0,95	0,85	1,15	1,75	1,45	4,60	1,75	1,15
	Wartość	0,0000	0	0,91	0,741	0,0279	7,26	1,0000	0,963	0,30	0,12	0,5031	0,975	6,46	0,5031	0,828
27.04-08.05.1980 r.	m	4,50	0,05	12,00	10,90	10,90	10,00	10,00	0,05	12,25	9,55	10,90	0,25	10,10	8,50	11,30
	N	5,00	2,00	7,00	3,00	3,00	4,00	6,00	4,00	3,00	2,00	3,00	3,00	7,00	7,00	3,00
	k	41,50	0,25	16,00	0,70	0,70	1,10	16,00	1,15	0,75	0,30	0,70	0,65	3,35	2,50	0,75
	Wartość	0,0000	0	10,76	0,904	0,0031	2,39	1,0000	0,962	0,09	0,04	0,0373	0,969	11,02	0,0313	0,923

Tabela 26. Model SC2, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów

Żebrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.05-06.06.1981	m	13,35	0,05	2,00	30,60	30,60	33,75	24,10	0,05	26,45	33,80	30,60	0,05	33,75	30,60	32,40
	N	7,00	1,00	4,00	7,00	7,00	6,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	6,00	7,00	7,00
	k	72,30	0,05	27,00	5,45	5,45	3,70	23,45	4,90	5,10	5,05	5,45	2,30	4,40	5,45	5,25
	Wartość	0,0000	0	1,80	0,909	0,0029	9,56	1,0000	0,968	0,09	0,04	0,0349	0,988	5,87	0,0349	0,884
10.09-22.09.1981	m	13,00	0,30	30,50	35,70	35,70	51,65	31,45	8,10	34,60	45,40	35,70	2,75	38,50	35,70	43,65
	N	4,00	1,00	5,00	2,00	2,00	3,00	7,00	2,00	5,00	2,00	2,00	2,00	5,00	2,00	3,00
	k	18,75	0,05	11,50	1,00	1,00	2,00	21,40	0,90	4,80	1,00	1,00	0,60	6,90	1,00	2,30
	Wartość	0,0000	0	8,59	0,896	0,0234	7,76	1,0000	0,951	0,30	0,10	0,3039	0,993	1,90	0,3039	0,969
31.07-08.08.1981	m	40,10	0,05	36,95	34,25	34,25	74,20	48,95	136,15	21,45	60,60	34,25	17,15	40,30	40,00	55,55
	N	7,00	2,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	7,00	7,00	7,00
	k	19,90	0,25	24,00	5,10	5,10	4,70	13,55	4,85	4,30	4,25	5,10	2,15	4,80	20,00	5,80
	Wartość	0,0000	0	0,07	0,517	0,0323	13,82	1,0000	0,766	0,27	0,11	0,2904	0,942	6,68	0,0097	0,692
01.04-14.04.1980	m	21,10	1,15	23,80	32,05	32,05	28,15	12,00	1,15	33,25	28,75	32,05	0,95	29,55	30,05	34,25
	N	6,00	2,00	7,00	4,00	4,00	3,00	5,00	6,00	7,00	6,00	4,00	2,00	6,00	7,00	3,00
	k	32,90	0,25	25,6000	2,40	2,40	1,35	23,25	4,35	7,00	5,25	2,40	0,40	3,10	5,65	1,45
	Wartość	0,0000	0	10,39	0,895	0,0040	6,68	1,0000	0,975	0,10	0,05	0,0556	0,963	2,93	0,0780	0,862
11.08-19.08.1980	m	11,00	0,05	6,90	21,75	21,75	24,10	4,70	149,90	18,35	24,25	21,75	0,05	23,40	21,75	23,70
	N	3,00	2,00	6,00	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	7,00	6,00	3,00	5,00	7,00	3,00	4,00
	k	9,00	0,30	37,40	1,70	1,70	3,25	30,30	2,85	7,15	7,25	1,70	2,70	9,05	1,70	3,25
	Wartość	0,0000	0	15,23	0,888	0,0138	7,13	1,0000	0,945	0,19	0,07	0,1241	0,992	1,61	0,1241	0,943
07.10-17.10.1980	m	49,40	0,05	7,65	19,70	19,70	22,85	9,90	0,90	11,75	20,35	19,70	7,65	0,70	14,30	18,60
	N	1,00	1,00	4,00	7,00	7,00	7,00	6,00	7,00	2,00	7,00	7,00	1,00	4,00	7,00	7,00
	k	1,00	0,15	12,90	11,25	11,25	7,10	23,20	8,30	2,55	8,60	11,25	0,10	23,50	4,10	7,10
	Wartość	0,0009	0	29,80	0,567	0,1771	16,00	1,0000	0,818	0,76	0,27	1,9483	0,973	188,44	1,1683	0,931

Tabela 27. Model SC2, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów

Czerwona Woda																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-05.05.1978	m	7,00	0,05	16,20	44,90	44,90	42,40	20,60	0,05	34,95	46,50	44,90	8,20	35,40	44,90	24,40
	N	4,00	2,00	6,00	6,00	6,00	2,00	5,00	2,00	7,00	5,00	6,00	2,00	6,00	6,00	3,00
	k	27,00	0,50	30,75	10,50	10,50	1,30	17,55	1,35	11,15	7,45	10,50	2,35	7,80	10,50	4,00
	Wartość	0,0000	0	1,34	0,880	0,0133	11,69	1,0000	0,975	0,22	0,08	0,1334	0,852	0,04	0,1334	0,547
05.05-13.05.1978	m	4,40	0,05	4,45	4,85	4,85	37,45	95,05	2,65	5,10	4,50	4,85	0,05	4,45	4,85	0,05
	N	6,00	2,00	7,00	2,00	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	6,00	2,00	6,00	7,00	2,00	4,00
	k	13,20	0,35	24,30	1,40	1,40	37,00	4,00	2,60	2,20	13,05	1,40	6,95	24,30	1,40	39,15
	Wartość	0,0001	0	144,59	0,870	0,3608	89,68	1,0000	0,951	1,28	0,41	3,2469	0,950	144,59	3,2469	0,200
06.08-14.08.1978	m	34,40	0,05	33,55	36,70	36,70	42,25	0,45	149,75	35,85	35,50	36,70	5,25	23,45	36,70	43,50
	N	4,00	2,00	7,00	6,00	6,00	7,00	6,00	7,00	2,00	5,00	6,00	2,00	5,00	6,00	7,00
	k	7,65	0,45	20,40	13,35	13,35	14,00	72,60	19,85	1,50	9,05	13,35	0,85	16,50	13,35	11,95
	Wartość	0,0000	0	3,90	0,977	0,0035	5,72	1,0000	0,990	0,09	0,04	0,0315	0,996	10,38	0,0315	0,973
01.10-12.10.1978	m	11,10	3,10	25,10	14,00	14,00	11,85	19,00	150,65	14,55	11,90	14,00	77,65	25,10	14,00	18,25
	N	7,00	1,00	6,00	6,00	6,00	7,00	7,00	5,00	7,00	7,00	6,00	2,00	6,00	6,00	6,00
	k	10,90	0,10	12,6500	15,65	15,65	23,60	29,00	8,45	9,90	23,25	15,65	55,90	12,65	15,65	16,85
	Wartość	0,0000	0	2,16	0,818	0,0272	15,56	1,0000	0,958	0,30	0,11	0,3266	0,837	2,16	0,3266	0,612
08.06-18.06.1968	m	0,90	0,05	3,00	4,00	4,00	4,60	21,00	52,00	3,50	4,60	4,00	0,05	2,75	4,60	3,15
	N	7,00	2,00	5,00	6,00	6,00	3,00	1,00	6,00	6,00	5,00	6,00	2,00	7,00	5,00	5,00
	k	50,20	0,25	11,00	4,70	4,70	1,55	2,00	4,50	4,70	3,10	4,70	0,45	5,20	6,60	7,45
	Wartość	0,0019	0	230,68	0,844	0,7243	40,90	1,0001	0,933	1,51	0,51	7,9675	0,982	687285,71	4,7687	0,428
21.08-26.08.1968	m	6,65	0,05	12,90	0,05	0,05	9,25	4,10	0,05	0,05	0,10	0,05	0,05	4,10	0,05	4,95
	N	6,00	2,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	4,00	5,00	2,00	7,00	3,00	5,00	7,00	7,00
	k	24,55	1,25	11,00	78,15	78,15	2,65	59,45	18,70	40,45	6,20	78,15	2,65	28,90	78,15	3,00
	Wartość	0,0001	0	4,89	0,820	0,1604	22,47	1,0001	0,916	0,57	0,28	0,9627	0,943	0,64	0,9627	0,955

Tabela 28. Model SC2, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów

Piotrówka																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
07.03-12.03.1978	m	5,45	0,85	1,45	9,65	9,65	0,05	11,60	0,05	9,75	0,05	9,65	0,05	4,35	0,05	14,05
	N	5,00	1,00	6,00	1,00	1,00	6,00	4,00	2,00	2,00	6,00	1,00	2,00	5,00	7,00	2,00
	k	21,40	0,05	48,75	0,10	0,10	68,45	2,90	0,85	1,60	68,45	0,10	1,70	3,50	1,85	1,35
	Wartość	0,0000	0	1,77	0,413	0,0205	6,28	1,0000	0,666	0,25	0,09	0,1230	0,900	58815,81	0,0055	0,426
28.04-08.05.1978	m	6,20	0,05	10,20	10,05	10,05	12,00	12,30	149,00	9,40	9,50	10,05	13,85	10,20	10,05	14,05
	N	3,00	2,00	6,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	6,00	3,00	3,00	2,00	6,00	3,00	7,00
	k	9,85	0,45	15,40	1,55	1,55	3,30	4,05	2,50	4,10	1,45	1,55	60,05	15,40	1,55	6,05
	Wartość	0,0000	0	0,68	0,855	0,0484	14,60	1,0000	0,947	0,39	0,15	0,4358	0,933	0,68	0,4358	0,737
16.08-22.08.1978	m	6,40	2,65	5,00	9,90	9,90	8,95	5,40	148,05	10,50	9,20	9,90	0,05	1,50	9,25	14,05
	N	7,00	1,00	4,00	6,00	6,00	7,00	6,00	7,00	5,00	7,00	6,00	2,00	5,00	7,00	6,00
	k	36,00	0,05	13,50	13,20	13,20	21,25	28,50	17,15	6,85	20,10	13,20	0,85	31,70	22,00	12,45
	Wartość	0,0000	0	3,76	0,953	0,0469	12,00	1,0000	0,982	0,39	0,12	0,3286	0,991	50,58	0,4071	0,980
28.06-11.07.1971	m	94,15	0,05	127,70	2,30	2,30	12,70	129,35	95,90	1,55	8,30	2,30	44,65	0,65	117,15	15,25
	N	1,00	1,00	1,00	7,00	7,00	7,00	1,00	2,00	5,00	7,00	7,00	2,00	6,00	1,00	6,00
	k	8,65	0,05	7,5500	25,00	25,00	20,45	7,65	59,25	8,60	25,55	25,00	1,30	19,45	8,65	13,45
	Wartość	0,0005	0	160,60	0,662	5,2234	14,18	1,0000	0,935	4,69	0,95	73,1279	0,991	1054457,37	37,3209	0,975
08.09-12.09.1971	m	31,05	0,05	6,90	6,95	6,95	0,20	92,75	0,05	5,50	5,85	6,95	0,05	6,90	6,95	9,60
	N	1,00	2,00	6,00	7,00	7,00	7,00	1,00	2,00	6,00	2,00	7,00	2,00	6,00	7,00	7,00
	k	1,00	0,50	8,40	20,95	20,95	81,40	4,00	1,55	20,10	1,10	20,95	0,50	8,40	20,95	28,75
	Wartość	0,0015	0	4,91	0,831	0,1737	19,16	1,0001	0,934	0,66	0,25	0,8683	0,720	59940,34	0,8683	0,775
21.03-24.03.1971	m	1,70	0,05	47,20	0,10	0,10	0,05	112,55	2,70	0,90	0,35	0,10	0,05	1,55	128,00	0,05
	N	5,00	2,00	1,00	6,00	6,00	7,00	1,00	2,00	5,00	7,00	6,00	2,00	7,00	1,00	7,00
	k	8,50	0,50	4,10	37,00	37,00	56,75	10,05	57,85	22,20	47,15	37,00	1,15	37,15	12,60	61,70
	Wartość	0,0011	0	26,87	0,983	0,3261	37,66	1,0000	1,000	0,92	0,44	1,3043	1,000	32,77	0,8515	0,608

Tabela 29. Model Diskina, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów

Pasłęka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
18.06-03.07.1981 r.	m	21,00	11,00	21,00	11,00	11,00	11,00	11,00	1,00	11,00	11,00	11,00	31,00	21,00	1,00	11,00	
	k1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,00	1,00	
	N1	2,00	2,00	4,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	1,00	5,00	
	k2	61,00	1,00	1,00	21,00	21,00	21,00	81,00	11,00	11,00	21,00	21,00	11,00	1,00	41,00	11,00	
	N2	2,00	5,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	1,00	3,00	4,00	2,00	2,00	
	β	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50
	Wartość	0,0001	0	61,94	0,898	0,0131	5,46	1,0001	0,976	0,23	0,09	0,2094	0,988	61,94	0,1962	0,961	
16.07-27.07.1981 r.	m	61,00	0,60	17,00	31,10	31,10	81,50	83,40	4,50	81,50	81,00	31,10	8,60	85,00	1,70	33,20	
	k1	1,00	0,10	29,00	0,80	0,80	91,40	52,80	0,90	0,80	74,60	0,80	0,90	22,50	7,60	0,80	
	N1	3,00	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	
	k2	80,60	0,40	51,20	94,00	94,00	0,80	4,00	0,80	80,50	0,80	94,00	14,10	4,50	7,50	104,60	
	N2	1,00	4,50	3,00	5,00	5,00	5,00	1,50	5,00	3,00	5,00	5,00	2,50	1,00	5,00	5,00	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,20	0,682	0,0026	3,10	1,0000	0,888	0,09	0,04	0,0316	0,867	0,69	0,0222	0,647	
26.04-04.05.1981 r.	m	15,80	10,50	4,50	19,00	19,00	69,20	90,80	0,10	91,50	74,00	19,00	2,20	56,10	1,10	21,50	
	k1	9,30	0,10	62,50	0,70	0,70	49,60	52,20	0,60	57,50	54,10	0,70	0,60	93,10	4,30	0,70	
	N1	2,50	1,00	1,50	1,50	1,50	5,00	3,00	4,50	3,00	5,00	1,50	3,00	3,00	5,00	1,50	
	k2	6,00	0,60	64,50	117,60	117,60	0,50	1,00	0,60	0,80	0,40	117,60	0,70	1,00	4,20	113,10	
	N2	1,50	2,50	1,00	5,00	5,00	1,50	3,00	3,50	3,00	4,00	5,00	3,50	1,00	5,00	5,00	
	β	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,19	0,118	0,0070	5,16	1,0000	0,607	0,12	0,07	0,0634	0,725	17,46	0,0018	0,113	
08.07-29.07.1980 r.	m	13,80	0,10	5,70	0,70	0,70	0,80	1,00	0,10	1,00	0,70	0,70	0,10	1,70	23,70	0,90	
	k1	2,70	0,10	9,20	2,60	2,60	1,90	26,00	3,60	19,90	2,00	2,60	2,10	3,10	1,50	2,60	
	N1	5,50	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	1,00	2,00	1,00	4,00	3,00	2,00	2,00	4,50	3,00	
	k2	43,50	1,30	23,60	94,00	94,00	124,00	30,20	1,70	91,80	124,00	94,00	1,70	2,10	5,20	113,80	
	N2	3,00	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00	4,00	1,50	5,00	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	3,59	0,811	0,0239	5,84	1,0000	0,979	0,56	0,11	0,5265	0,992	3483371,17	0,2905	0,862	
19.08-05.09.1980 r.	m	34,00	2,10	8,40	3,50	3,50	16,80	6,00	0,10	3,10	3,70	3,50	4,00	10,00	1,80	3,80	
	k1	2,50	0,10	1,20	2,30	2,30	78,70	2,00	3,70	2,30	2,20	2,30	4,10	3,50	5,60	1,60	
	N1	2,50	1,00	1,50	3,00	3,00	5,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	1,50	2,00	1,50	4,00	
	k2	0,40	0,90	91,40	35,00	35,00	1,50	49,00	2,10	17,10	49,00	35,00	2,20	65,00	123,90	37,00	
	N2	4,00	5,00	2,50	5,00	5,00	4,00	1,50	3,50	5,00	5,00	5,00	3,50	1,50	5,00	4,00	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,22	0,948	0,0057	5,40	1,0000	0,983	0,15	0,06	0,1017	0,980	0,15	0,2361	0,971	
27.04-08.05.1980 r.	m	0,50	0,10	1,00	5,10	5,10	5,10	2,00	4,60	11,80	6,60	5,10	3,00	11,00	11,60	12,70	
	k1	16,00	0,10	46,00	1,60	1,60	1,60	16,40	2,00	13,10	1,40	1,60	0,70	56,70	1,50	0,60	
	N1	2,50	1,00	1,00	3,50	3,50	3,50	3,00	3,00	3,00	4,00	3,50	3,00	1,00	3,50	5,00	
	k2	38,50	0,80	91,00	38,10	38,10	21,00	33,90	51,70	1,50	23,50	38,10	2,00	1,00	29,10	1,30	
	N2	1,00	5,00	1,00	4,00	4,00	3,00	1,00	5,00	3,50	2,50	4,00	3,50	4,00	1,50	5,00	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	
	Wartość	0,0000	0	6,72	0,945	0,0018	1,73	1,0000	0,977	0,08	0,03	0,0215	0,991	5,53	0,0224	0,949	

Tabela 30. Model Diskina, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów

Żebrówka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
26.05-06.06.1981	m	1,00	0,10	14,00	20,90	20,90	10,10	10,00	0,10	31,50	10,20	20,90	0,10			20,00	
	k1	31,00	0,10	2,00	0,70	0,70	0,80	2,00	0,80	1,50	0,70	0,70	0,80			0,90	
	N1	3,00	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	3,50			5,00	
	k2	39,50	0,70	49,00	10,60	10,60	4,90	26,00	6,60	0,80	4,60	10,60	2,60			7,50	
	N2	1,00	4,50	5,00	2,50	2,50	5,00	4,00	4,50	5,00	5,00	2,50	3,50			3,50	
	β	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25			0,50
	Wartość	0,0000	0	0,81	0,891	0,0035	10,54	1,0000	0,970	0,11	0,04	0,0420	0,977				0,803
10.09-22.09.1981	m	21,00	0,10	30,00	39,50	39,50	41,50	41,50	5,50	37,00	52,50	39,50	0,10	22,00	39,00	56,60	
	k1	35,10	0,10	30,50	0,60	0,60	102,10	0,50	0,60	1,10	0,70	0,60	0,70	1,00	1,00	0,60	
	N1	2,00	1,00	3,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	4,00	5,00	4,00	3,00	1,50	5,00	
	k2	1,00	0,60	1,50	0,60	0,60	0,80	2,00	0,60	0,60	0,80	0,60	5,30	36,50	0,70	0,70	
	N2	3,00	4,50	3,00	5,00	5,00	4,00	2,00	5,00	5,00	4,00	5,00	2,50	2,00	3,00	5,00	
	β	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	
	Wartość	0,0000	0	0,50	0,909	0,0205	12,51	1,0000	0,958	0,29	0,12	0,2671	0,993	11,91	0,1519	0,931	
31.07-08.08.1981	m	1,00	0,10	26,00	41,50	41,50	84,60	53,00	118,60	27,50	78,00	41,50	0,10	26,00	30,90	52,10	
	k1	33,80	0,10	1,00	0,70	0,70	0,90	0,50	0,70	1,30	0,80	0,70	0,60	1,00	0,20	60,60	
	N1	1,00	1,00	4,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	2,50	5,00	
	k2	44,30	0,70	11,00	0,80	0,80	0,80	0,50	0,80	0,80	0,80	0,80	1,10	11,00	1,20	0,80	
	N2	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	1,00	5,00	
	β	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,35	0,600	0,0267	12,60	1,0000	0,821	0,26	0,10	0,2402	0,921	0,35	0,0064	0,714	
01.04-14.04.1980	m	31,00	4,90	14,00	16,30	16,30	16,10	2,90	7,90	26,30	15,70	16,30	4,00	13,60	32,40	36,50	
	k1	79,40	0,10	2,00	0,80	0,80	0,80	24,80	0,60	30,60	0,80	0,80	0,60	1,30	1,60	0,70	
	N1	1,00	1,00	1,00	4,50	4,50	4,50	4,00	5,00	5,00	4,50	4,50	3,00	3,00	1,00	5,00	
	k2	1,00	0,70	111,60	53,90	53,90	54,00	54,90	1,00	1,00	54,00	53,90	1,60	12,80	1,00	0,80	
	N2	2,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	1,00	4,50	4,00	5,00	5,00	3,50	2,00	3,00	5,00	
	β	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	
	Wartość	0,0000	0	0,49	0,937	0,0024	4,82	1,0000	0,983	0,09	0,04	0,0335	0,966	28,70	0,0332	0,886	
11.08-19.08.1980	m	1,00	0,10	1,00	24,00	24,00	28,60	10,00	123,70	4,30	26,30	24,00	3,10	11,20	24,00	27,90	
	k1	51,30	0,10	31,50	0,70	0,70	1,30	10,00	1,50	0,90	1,40	0,70	0,10	2,10	1,50	0,80	
	N1	1,00	1,00	4,00	5,00	5,00	4,00	1,00	5,00	4,00	5,00	5,00	1,00	2,00	2,00	4,00	
	k2	21,00	0,70	46,80	0,60	0,60	0,60	17,00	0,60	12,50	0,60	0,60	1,70	14,00	0,70	0,70	
	N2	1,00	4,50	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	4,50	5,00	5,00	2,50	2,50	3,00	5,00	
	β	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	
	Wartość	0,0001	0	1,73	0,878	0,0149	6,65	1,0000	0,944	0,25	0,07	0,1343	0,975	6,03	0,0881	0,896	
07.10-17.10.1980	m	11,50	1,90	1,00	13,60	13,60	12,60	1,50	124,00	14,90	13,00	13,60	3,00	4,70	8,60	11,00	
	k1	35,30	0,10	5,00	0,50	0,50	2,00	16,50	0,50	0,50	1,20	0,50	0,30	0,90	0,50	0,70	
	N1	1,00	1,00	3,00	2,50	2,50	2,00	1,00	1,50	4,00	1,50	2,50	3,00	1,00	3,00	5,00	
	k2	1,00	0,30	10,50	4,30	4,30	7,00	87,10	16,60	3,60	6,60	4,30	1,70	13,70	18,70	6,70	
	N2	3,00	2,00	3,00	1,50	1,50	3,50	1,00	1,00	1,50	1,00	1,50	3,50	3,50	1,00	3,50	
	β	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	
	Wartość	0,0000	0	5,28	0,807	0,0789	14,60	1,0001	0,934	0,46	0,16	0,8675	0,995	13,85	0,9449	0,911	

Tabela 31. Model Diskina, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów

Czerwona Woda																
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i
26.04-05.05.1978	m	2,00	0,10	16,00	22,00	22,00	30,60	9,60	0,10	41,90	39,30	22,00	0,10	12,50	37,70	12,40
	k1	40,50	0,10	1,00	0,70	0,70	0,60	0,80	0,50	0,50	0,50	0,70	0,10	1,50	0,70	0,70
	N1	1,00	1,00	4,00	4,00	4,00	4,50	3,00	5,00	5,00	5,00	4,00	1,00	2,50	3,00	4,00
	k2	8,50	0,60	104,00	62,60	62,60	58,60	41,70	0,60	1,00	1,10	62,60	0,70	71,50	1,10	99,60
	N2	1,50	3,50	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	4,50	4,00	2,00	5,00	4,50	1,00	1,00	5,00
	β	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25
	Wartość	0,0000	0	43,19	0,753	0,0274	16,02	1,0000	0,908	0,23	0,13	0,2744	0,864	15,80	0,1285	0,478
05.05-13.05.1978	m	3,50	0,10	1,00	2,20	2,20	118,00	2,00	0,70	1,00	3,00	2,20	0,10	1,50	2,80	61,50
	k1	19,50	0,10	90,50	0,70	0,70	44,40	3,00	0,60	0,80	0,70	0,70	0,60	0,70	0,40	0,60
	N1	1,50	1,00	1,00	4,00	4,00	5,00	1,00	5,00	3,50	4,00	4,00	2,00	4,00	4,00	5,00
	k2	0,20	0,60	11,00	109,60	109,60	80,90	15,00	0,60	109,10	88,10	109,60	1,10	32,50	63,10	79,60
	N2	4,00	4,50	1,00	5,00	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00
	β	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50
	Wartość	0,0000	0	14,27	0,726	0,7605	89,68	1,0000	0,929	1,56	0,62	6,8441	0,950	367370,71	2,3293	0,189
06.08-14.08.1978	m	20,90	0,10	14,20	40,50	40,50	59,50	1,50	7,00	33,30	39,00	40,50	1,60	11,50	15,10	55,10
	k1	33,40	0,10	6,20	0,50	0,50	0,70	28,00	0,70	0,50	3,30	0,50	0,10	0,50	0,90	2,50
	N1	2,50	1,00	1,00	5,00	5,00	4,50	2,00	4,00	5,00	4,50	5,00	1,00	4,00	1,00	2,50
	k2	1,10	0,60	18,20	0,60	0,60	3,90	77,00	4,60	1,00	0,70	0,60	0,70	22,00	41,10	0,60
	N2	2,00	4,00	2,50	5,00	5,00	4,50	1,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,50	3,50	1,00	5,00
	β	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25
	Wartość	0,0000	0	0,20	0,766	0,0350	8,65	1,0000	0,866	0,33	0,12	0,3151	0,992	1,17	0,0097	0,911
01.10-12.10.1978	m	1,80	0,80	31,50	19,10	19,10	51,10	2,50	12,00	11,10	17,50	19,10	3,60	24,10	13,00	15,60
	k1	4,00	0,10	5,00	0,50	0,50	0,80	69,50	0,70	1,00	0,50	0,50	0,10	20,30	0,50	0,70
	N1	1,00	1,00	2,00	5,00	5,00	4,00	1,00	4,00	3,50	5,00	5,00	2,00	2,50	1,00	4,00
	k2	87,70	0,60	0,50	0,70	0,70	0,70	72,00	0,70	4,60	0,50	0,70	0,90	0,60	0,40	54,00
	N2	1,00	3,50	2,50	4,00	4,00	4,00	1,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,50	4,00	4,00	5,00
	β	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50
	Wartość	0,0000	0	1,26	0,668	0,0497	20,21	1,0000	0,886	0,42	0,17	0,5961	0,750	0,61	0,3025	0,517
08.06-18.06.1968	m	2,50	0,10	0,50	1,70	1,70	2,20	1,00	122,10	1,40	2,00	1,70	0,10	1,30	1,00	10,10
	k1	0,50	0,10	1,50	0,80	0,80	0,80	2,00	0,70	0,80	0,80	0,80	0,10	0,80	1,80	0,70
	N1	3,00	1,00	2,50	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	1,00	5,00
	k2	38,50	0,80	45,60	109,60	109,60	119,10	24,60	0,80	50,80	49,60	109,60	0,80	93,00	49,00	0,70
	N2	2,00	5,00	2,50	5,00	5,00	5,00	4,00	5,00	1,50	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	4,50
	β	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25
	Wartość	0,0000	0	17,70	0,902	0,4532	33,25	1,0000	0,955	1,11	0,47	4,9856	0,991	320577,84	2,5396	0,443
21.08-26.08.1968	m	4,50	0,10	5,00	16,20	16,20	10,00	0,50	0,10	1,50	23,60	16,20	8,60		0,10	5,10
	k1	0,50	0,10	1,00	5,50	5,50	1,00	35,20	0,60	21,90	2,80	5,50	0,10		0,30	1,30
	N1	2,00	1,00	2,00	4,00	4,00	5,00	1,00	4,00	1,50	3,00	4,00	1,00		2,00	5,00
	k2	62,30	0,10	55,50	0,40	0,40	14,00	28,70	0,50	11,30	0,80	0,40	0,60		91,60	1,40
	N2	1,00	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	1,00	5,00	5,00	3,50		5,00	5,00
	β	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25	0,50
	Wartość	0,0000	1	0,38	0,431	0,5076	24,67	1,0000	0,724	1,16	0,47	3,0459	0,943		0,9762	0,933

Tabela 32. Model Diskina, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów

Piotrówka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
07.03-12.03.1978	m	1,50	2,60	11,00	6,40	6,40	10,10	2,50	123,10	10,00	3,80	6,40	3,40	1,20	0,10	5,00	
	k1	3,00	0,10	7,60	0,70	0,70	47,10	15,20	0,90	0,60	0,50	0,70	0,10	1,30	2,50	0,25	
	N1	1,00	1,00	1,00	4,00	4,00	5,00	1,00	1,50	4,00	5,00	4,00	1,00	3,00	4,50	0,65	
	k2	29,40	0,80	1,20	47,10	47,10	0,80	21,00	0,70	1,60	61,60	47,10	1,20	115,10	2,70	21,50	
	N2	2,00	4,00	2,50	5,00	5,00	4,00	1,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2,50	5,00	4,50	0,70	
	β	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	1,50
	Wartość	0,0000	0	0,06	0,503	0,0174	7,20	1,0000	0,729	0,20	0,08	0,1042	0,943	153,59	0,0017	113,100	
28.04-08.05.1978	m	0,90	4,60	4,00	8,00	8,00	21,10	7,00	5,50	5,10	10,50	8,00	0,10	4,00	11,90	5,00	
	k1	3,60	0,10	1,00	13,00	13,00	0,90	0,50	0,50	0,80	0,70	13,00	1,00	1,50	2,00	1,30	
	N1	2,50	1,00	3,00	4,00	4,00	4,50	3,00	6,00	5,00	5,00	4,00	4,00	2,50	2,00	5,00	
	k2	39,30	0,60	39,00	0,70	0,70	4,70	3,00	0,80	14,00	0,60	0,70	12,60	14,00	0,50	0,25	
	N2	1,00	4,00	1,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	3,00	2,00	4,00	0,95	
	β	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,00
	Wartość	0,0000	0	6,41	0,800	0,0665	19,23	1,0000	0,932	0,50	0,15	0,5981	0,842	4,19	0,2626	0,000	
16.08-22.08.1978	m	0,20	4,20	4,00	11,50	11,50	24,00	4,50	123,50	6,40	11,10	11,50	1,60	3,90	3,70	0,80	
	k1	5,40	0,10	1,50	0,70	0,70	48,10	1,50	0,50	0,70	0,60	0,70	0,10	3,60	0,80	5,00	
	N1	2,50	1,00	3,00	4,00	4,00	5,00	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	1,00	1,50	1,50	0,25	
	k2	24,20	0,40	24,00	0,70	0,70	0,60	21,50	1,00	10,30	0,50	0,70	1,10	24,30	79,10	0,71	
	N2	1,00	3,50	2,00	4,00	4,00	4,50	2,00	3,50	2,00	5,00	4,00	3,00	1,00	1,50	36,50	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,70	
	Wartość	0,0001	0	1,92	0,829	0,1695	24,82	1,0000	0,918	0,59	0,28	1,1863	0,955	22,45	0,4181	5,000	
28.06-11.07.1971	m	1,00	3,10	0,50	3,00	3,00	25,00	5,00	124,00	0,10	21,20	3,00	0,50		5,00	0,00	
	k1	1,70	0,10	11,00	0,70	0,70	0,80	7,20	0,50	0,50	0,80	0,70	0,60		0,30	0,00	
	N1	3,50	1,00	1,00	3,50	3,50	4,00	1,50	5,00	5,00	3,50	3,50	4,00		2,50	NSE _i	
	k2	0,80	0,60	24,50	89,60	89,60	0,50	3,00	3,60	3,40	0,50	89,60	4,60		0,20	12,40	
	N2	3,50	4,00	1,00	5,00	5,00	5,00	2,50	5,00	2,50	5,00	5,00	3,00		3,50	0,70	
	β	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50		0,25	4,00	
	Wartość	0,0002	0	16,79	0,420	8,9649	18,19	1,0000	0,753	6,01	1,08	125,5080	0,962		49,2514	99,600	
08.09-12.09.1971	m	3,00	0,10	3,00	1,10	1,10	87,50	1,20	0,10	1,30	2,50	1,10	3,60	1,70	1,50	4,00	
	k1	1,00	0,10	2,00	0,70	0,70	34,40	9,00	0,50	0,70	0,60	0,70	0,10	0,60	0,50	54,00	
	N1	3,50	1,00	1,00	4,00	4,00	5,00	1,50	5,00	4,00	4,50	4,00	1,00	4,00	3,00	5,00	
	k2	61,00	0,60	80,90	124,00	124,00	53,20	16,40	0,60	74,60	64,70	124,00	0,60	95,50	60,50	0,50	
	N2	2,50	3,50	1,50	5,00	5,00	5,00	1,00	4,50	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	0,52	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	10,10	
	Wartość	0,0002	0	2,06	0,563	0,4490	30,26	1,0000	0,867	0,92	0,55	2,2452	0,700	330,75	0,5626	0,700	
21.03-24.03.1971	m	3,00	0,10	1,90	1,00	1,00	8,10	0,80	98,10	1,50	13,80	1,00	0,10	1,80	0,40	114,00	
	k1	0,50	0,10	0,90	0,60	0,60	24,60	1,10	0,50	44,00	0,50	0,60	0,10	0,50	35,60	5,00	
	N1	1,50	1,00	3,50	4,00	4,00	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00	4,00	1,00	5,00	5,00	0,50	
	k2	0,50	0,60	8,70	17,00	17,00	1,20	26,50	0,60	0,70	21,60	17,00	0,60	0,70	0,20	0,96	
	N2	2,50	3,50	3,50	4,00	4,00	5,00	2,50	4,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	2,50	17,80	
	β	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	1,30	
	Wartość	0,0003	0	6,23	0,363	12,4971	52,73	1,0000	0,701	4,31	2,64	49,9883	0,800	438009,64	0,8741	5,000	

Tabela 33. Model NCSC2, Pasłęka – wyniki estymacji parametrów

Pasłęka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
18.06-03.07.1981 r.	k1	91,00	0,10	6,00	89,60	89,60	114,90	11,00	68,60	46,50	115,00	89,60	22,60	19,80	37,60	1,00	
	N1	3,00	1,00	3,00	5,00	5,00	4,50	4,00	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00	3,00	4,50	
	m	66,00	0,60	110,00	1,10	1,10	2,00	46,00	1,10	2,10	2,00	1,10	3,60	9,90	65,30	12,20	
	N2	3,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	5,00	2,00	4,00	
	k2	6,00	0,60	8,00	0,80	0,80	1,00	40,40	0,80	1,10	1,00	0,80	1,00	2,40	36,10	0,30	
	β	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,75	0,50	0,75	0,75
	Wartość	0,0000	0	2,28	0,982	0,0024	3,33	1,0000	0,992	0,17	0,06	0,0378	0,993	24,89	0,1295	0,968	
16.07-27.07.1981 r.	k1	1,00	0,10	86,10	0,70	0,70	0,90	81,00	0,90	0,80	0,90	0,70	1,00	60,60	26,50	0,80	
	N1	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	4,50	3,00	5,00	5,00	4,50	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00	
	m	26,00	3,60	6,30	32,00	32,00	81,50	50,80	3,60	91,50	81,50	32,00	5,50	12,50	5,60	66,60	
	N2	4,00	1,00	5,00	2,00	2,00	2,00	4,00	5,00	5,00	2,00	2,00	2,00	5,00	2,00	5,00	
	k2	36,00	0,10	41,50	65,60	65,60	60,00	90,60	46,60	26,50	71,10	65,60	5,80	39,50	40,10	51,60	
	β	0,75	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,75	0,50	0,25	0,50	0,50	0,75	0,75	0,25	0,25	
Wartość	0,0000	0	0,11	0,662	0,0028	3,28	1,0000	0,893	0,09	0,04	0,0335	0,885	0,57	0,0306	0,647		
26.04-04.05.1981 r.	k1	15,70	0,10	7,20	123,80	123,80	124,00	11,00	0,80	1,00	123,70	123,80	0,60	33,00	51,10	124,00	
	N1	3,50	1,00	3,00	7,00	7,00	5,00	4,00	3,00	1,00	5,00	7,00	1,00	4,50	4,00	5,00	
	m	58,80	11,60	75,30	0,30	0,30	1,20	36,00	0,10	49,30	1,30	0,30	1,60	79,00	1,10	0,10	
	N2	2,00	1,00	2,00	5,00	5,00	3,00	4,00	2,00	3,00	3,00	5,00	4,00	1,00	2,00	3,00	
	k2	11,00	0,40	10,90	53,40	53,40	18,80	46,00	8,60	12,30	18,60	53,40	3,40	1,00	41,90	16,70	
	β	0,50	0,25	0,75	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,01	0,153	0,0068	4,30	1,0000	0,592	0,12	0,06	0,0609	0,725	0,67	0,0015	0,165	
08.07-29.07.1980 r.	k1	50,60	1,10	11,00	124,00	124,00	124,00	70,60	124,00	86,50	124,00	124,00	2,10		51,10	124,00	
	N1	3,00	5,00	4,00	7,00	7,00	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	7,00	4,00		5,00	5,00	
	m	91,50	0,60	61,00	0,20	0,20	0,40	66,80	0,10	0,90	0,40	0,20	0,10		1,10	0,60	
	N2	2,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,00		2,00	4,00	
	k2	1,00	0,40	11,00	0,80	0,80	0,80	64,50	0,90	0,60	0,80	0,80	3,60		35,60	0,90	
	β	0,75	0,75	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,50	0,711	0,0366	9,64	1,0000	0,867	0,42	0,19	0,8049	0,987		0,3661	0,753	
19.08-05.09.1980 r.	k1	67,00	0,10	84,50	1,20	1,20	1,50	16,00	124,00	109,50	1,50	1,20	1,40	1,00	41,50	1,20	
	N1	3,00	1,00	4,00	5,00	5,00	4,50	4,00	5,00	5,00	4,50	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	
	m	69,20	41,60	1,00	25,00	25,00	24,10	61,00	0,10	2,40	24,10	25,00	4,50	12,00	1,30	25,90	
	N2	5,00	2,00	5,00	3,00	3,00	5,00	4,00	5,00	5,00	5,00	3,00	4,00	5,00	2,00	3,00	
	k2	4,80	0,30	39,50	10,50	10,50	48,10	31,00	1,50	1,60	35,50	10,50	2,60	41,40	36,90	9,50	
	β	0,75	0,25	0,75	0,25	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	51,36	0,861	0,0150	5,59	1,0000	0,962	0,21	0,09	0,2694	0,985	204,76	0,1984	0,905	
27.04-08.05.1980 r.	k1	54,30	0,10	76,00	1,50	1,50	1,00	86,40	1,50	1,20	2,00	1,50	0,30	1,00	1,00	1,20	
	N1	4,50	1,00	3,00	4,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	2,50	5,00	1,00	5,00	
	m	19,00	0,10	16,00	15,00	15,00	10,60	25,90	3,60	15,20	12,10	15,00	0,10	11,50	9,80	16,00	
	N2	4,00	2,00	5,00	3,00	3,00	5,00	5,00	3,00	3,00	2,00	3,00	2,00	4,00	5,00	5,00	
	k2	4,70	0,30	46,00	12,50	12,50	1,50	11,00	12,70	5,60	8,70	12,50	0,20	1,00	2,00	12,00	
	β	0,75	0,25	0,50	0,50	0,50	0,75	0,25	0,50	0,25	0,75	0,50	0,50	0,50	0,75	0,25	
	Wartość	0,0000	0	2,51	0,959	0,0013	0,04	1,0000	0,985	0,05	0,97	0,0161	0,991	2,30	0,0243	0,970	

Tabela 34. Model NCSC2, Żebrówka – wyniki estymacji parametrów

Żebrówka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
26.05-06.06.1981	k1	14,60	0,10	81,00	0,70	0,70	60,50	9,80	34,60	1,00	29,90	0,70	0,10	1,00	2,00	54,60	
	N1	3,00	1,00	3,00	4,50	4,50	4,00	4,50	5,00	4,00	5,00	4,50	1,00	4,00	2,00	4,00	
	m	59,40	0,10	16,00	30,10	30,10	26,50	17,00	0,10	27,80	16,90	30,10	0,10	36,20	37,60	26,00	
	N2	4,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	2,00	5,00	
	k2	8,50	0,90	71,00	2,40	2,40	2,80	21,40	2,60	2,60	2,80	2,40	1,50	2,30	5,10	3,00	
	β	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,75	0,50	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75
	Wartość	0,0000	0	2,48	0,911	0,0028	9,33	1,0000	0,968	0,09	0,04	0,0342	0,977	2,31	0,0148	0,887	
10.09-22.09.1981	k1	33,30	0,10	6,80	0,70	0,70	124,00	41,00	0,60	0,70	117,60	0,70	0,10	0,70	1,00	123,00	
	N1	3,00	1,00	4,00	4,50	4,50	5,00	4,00	5,00	4,50	5,00	4,50	1,00	5,00	1,50	5,00	
	m	39,80	0,60	32,20	37,40	37,40	10,60	6,00	9,00	34,50	7,80	37,40	14,60	10,70	25,10	9,70	
	N2	5,00	2,00	3,00	5,00	5,00	2,00	5,00	4,00	2,00	5,00	5,00	3,00	3,00	4,00	4,00	
	k2	1,80	0,50	10,30	6,80	6,80	1,00	36,00	3,30	0,90	7,30	6,80	1,50	19,30	12,70	4,10	
	β	0,75	0,25	0,75	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	
	Wartość	0,0000	0	5,65	0,906	0,0212	7,64	1,0000	0,961	0,28	0,10	0,2760	0,993	43,20	0,0565	0,973	
31.07-08.08.1981	k1	81,00	0,10	70,00	0,90	0,90	0,90	11,00	0,80	0,80	0,80	0,90	0,10	39,90	0,80	124,00	
	N1	3,00	1,00	4,00	4,50	4,50	5,00	4,00	5,00	4,50	5,00	4,50	1,00	5,00	2,50	5,00	
	m	21,00	0,10	30,00	31,50	31,50	81,30	61,00	122,10	22,40	36,50	31,50	0,10	21,00	66,90	27,70	
	N2	5,00	4,00	4,00	2,00	2,00	5,00	1,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	3,00	1,00	5,00	
	k2	11,00	1,10	7,00	32,20	32,20	4,10	1,00	37,10	1,70	70,20	32,20	2,00	1,00	1,10	3,00	
	β	0,50	0,25	0,75	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	
	Wartość	0,0000	0	1,41	0,556	0,0296	13,28	1,0000	0,818	0,26	0,10	0,2667	0,921	0,59	0,0064	0,692	
01.04-14.04.1980	k1	51,40	0,10	86,20	0,80	0,80	0,80	14,90	1,00	0,90	1,00	0,80	0,80	38,70	0,80	1,00	
	N1	3,50	1,00	3,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	4,50	4,00	5,00	5,00	4,50	5,00	4,00	
	m	31,70	0,10	60,10	16,80	16,80	18,00	39,40	9,20	26,50	16,40	16,80	6,60	23,80	16,80	35,60	
	N2	4,00	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,00	2,00	5,00	2,00	4,00	5,00	3,00	
	k2	5,20	0,60	1,10	37,60	37,60	32,00	10,80	46,40	31,50	10,00	37,60	6,10	1,50	37,60	2,00	
	β	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	0,58	0,942	0,0022	4,65	1,0000	0,983	0,09	0,04	0,0305	0,966	0,34	0,0305	0,879	
11.08-19.08.1980	k1	29,50	0,10	90,40	0,70	0,70	1,00	9,00	0,60	7,00	0,90	0,70	0,10	63,80	2,00	1,00	
	N1	2,00	1,00	3,00	4,50	4,50	4,00	4,50	5,00	1,00	4,00	4,50	1,00	4,50	1,00	4,00	
	m	90,50	0,10	7,40	21,90	21,90	27,40	14,00	123,80	147,80	23,30	21,90	0,10	11,40	26,50	24,20	
	N2	5,00	2,00	5,00	3,00	3,00	5,00	4,00	5,00	5,00	2,00	3,00	2,00	4,00	5,00	5,00	
	k2	8,50	0,30	54,30	1,70	1,70	6,40	14,00	3,50	6,70	0,90	1,70	0,50	3,00	22,30	5,80	
	β	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	0,50	0,25	0,25	0,75	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,75	
	Wartość	0,0000	0	1,69	0,890	0,0135	6,39	1,0000	0,951	0,41	0,07	0,1212	0,975	0,28	0,0448	0,948	
07.10-17.10.1980	k1	1,00	0,10	34,00	1,10	1,10	43,70	24,80	9,50	1,20	1,00	1,10	0,40	0,80	7,70	28,50	
	N1	3,00	1,00	3,00	1,50	1,50	4,00	3,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,50	2,00	5,00	4,00	
	m	11,00	0,10	34,00	11,40	11,40	12,70	47,60	123,90	17,30	12,60	11,40	11,10	10,60	9,60	15,80	
	N2	5,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	1,00	5,00	4,00	5,00	3,00	4,00	2,00	5,00	
	k2	72,70	0,20	26,00	1,00	1,00	4,10	32,20	21,60	6,00	1,00	1,00	0,40	11,40	33,60	4,50	
	β	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	0,75	
	Wartość	0,0000	0	7,91	0,805	0,0798	13,42	1,0000	0,934	0,46	0,16	0,8775	0,995	2,16	0,7926	0,933	

Tabela 35. Model NCSC2, Czerwona Woda – wyniki estymacji parametrów

Czerwona Woda																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
26.04-05.05.1978	k1	9,10	0,10	73,70	0,70	0,70	1,00	40,10	54,00	1,00	1,00	0,70	0,20	5,70	0,70	74,60	
	N1	3,00	1,00	3,00	3,50	3,50	3,00	4,00	5,00	2,50	3,00	3,50	2,50	4,50	3,50	4,50	
	m	82,80	0,10	0,80	42,10	42,10	44,10	26,70	0,10	38,00	44,10	42,10	1,60	20,60	42,10	0,20	
	N2	5,00	2,00	4,00	3,00	3,00	5,00	5,00	3,00	5,00	5,00	3,00	2,00	4,00	3,00	5,00	
	k2	3,60	0,50	77,70	2,70	2,70	8,80	4,60	3,00	5,00	8,80	2,70	2,80	11,00	2,70	14,10	
	β	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,75	0,25
	Wartość	0,0000	0	0,79	0,887	0,0126	11,42	1,0000	0,975	0,22	0,08	0,1262	0,894	8,23	0,1262	0,651	
05.05-13.05.1978	k1	32,00	0,10	1,00	124,00	124,00	123,50	41,00	124,00	124,00	124,00	124,00	0,10	22,50	15,60	123,80	
	N1	2,00	1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	3,00	5,00	
	m	81,50	1,10	61,00	3,50	3,50	124,00	46,00	2,70	1,50	3,80	3,50	0,10	2,20	44,80	0,10	
	N2	5,00	2,00	1,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	
	k2	37,10	0,60	11,00	8,20	8,20	62,60	41,00	7,10	7,50	2,90	8,20	4,90	14,80	9,70	42,50	
	β	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,75	0,75	0,25	0,75	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	18,63	0,873	0,3530	89,68	1,0000	0,951	1,11	0,42	3,1773	0,950	2,89	1,5310	0,200	
06.08-14.08.1978	k1	1,00	0,10	22,00	19,50	19,50	23,30	43,50	1,00	24,40	0,90	19,50	0,60	39,00	19,50	21,10	
	N1	1,00	1,00	3,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	5,00	4,00	1,00	3,00	4,00	4,00	
	m	21,00	0,10	74,60	26,80	26,80	31,90	26,00	7,70	27,60	26,10	26,80	0,90	43,50	26,80	31,20	
	N2	5,00	2,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	2,00	5,00	4,00	4,00	
	k2	76,80	0,50	34,00	6,90	6,90	8,40	6,00	15,70	6,50	15,90	6,90	0,60	8,00	6,90	5,50	
	β	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,75	0,75	0,75	
	Wartość	0,0000	0	4,84	0,992	0,0011	3,02	1,0000	0,996	0,05	0,03	0,0103	0,992	1,30	0,0103	0,994	
01.10-12.10.1978	k1	29,90	0,10	10,00	124,00	124,00	124,00	31,50	124,00	59,80	124,00	124,00	1,20	109,50	1,00	123,90	
	N1	2,00	1,00	4,50	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	4,00	1,00	5,00	
	m	78,80	0,10	10,50	10,30	10,30	8,60	60,00	123,90	10,70	8,70	10,30	5,60	13,00	9,30	13,60	
	N2	4,00	2,00	5,00	4,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	2,00	5,00	5,00	5,00	
	k2	4,60	0,60	41,00	6,90	6,90	12,10	35,50	5,40	5,10	11,70	6,90	1,10	15,00	27,60	11,60	
	β	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	
	Wartość	0,0000	0	0,86	0,817	0,0274	15,64	1,0000	0,958	0,30	0,12	0,3292	0,753	0,80	0,3166	0,611	
08.06-18.06.1968	k1	11,20	0,10	83,00	124,00	124,00	0,90	36,00	0,80	0,90	124,00	124,00	0,20	0,80	1,00	0,80	
	N1	1,00	1,00	2,00	5,00	5,00	4,50	3,00	5,00	4,50	5,00	5,00	3,00	5,00	3,50	4,50	
	m	41,00	0,10	54,00	2,70	2,70	4,10	41,00	123,10	2,90	3,20	2,70	0,10	2,30	2,10	5,50	
	N2	4,00	3,00	2,00	4,00	4,00	4,00	1,00	2,00	4,00	4,00	4,00	5,00	2,00	4,00	3,00	
	k2	25,80	0,60	16,70	2,10	2,10	34,60	6,00	29,60	37,20	2,00	2,10	2,30	0,50	21,10	3,30	
	β	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	0,25	0,50	0,75	0,75	0,25	0,25	0,75	0,50	
	Wartość	0,0001	0	1,12	0,839	0,7489	33,72	1,0000	0,952	1,15	0,52	8,2379	0,991	385728,03	2,8180	0,440	
21.08-26.08.1968	k1	14,90	0,10	36,00	119,50	119,50	89,00	40,50	124,00	70,50	124,00	119,50	0,30	38,10	124,00	157,00	
	N1	2,00	1,00	2,00	5,00	5,00	4,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,50	4,00	5,00	5,00	
	m	58,80	0,10	35,00	0,10	0,10	12,10	84,00	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	4,00	0,10	7,30	
	N2	2,00	2,00	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	2,00	4,00	4,00	4,00	2,00	3,00	4,00	5,00	
	k2	0,90	1,30	50,10	23,00	23,00	2,00	24,40	5,10	19,40	18,40	23,00	1,10	9,00	23,00	2,00	
	β	0,50	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,75	0,50	0,50	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	
	Wartość	0,0000	0	5,24	0,820	0,1610	22,99	1,0000	0,916	0,59	0,28	0,9658	1,000	3,84	0,9658	0,953	

Tabela 36. Model NCSC2, Piotrówka – wyniki estymacji parametrów

Piotrówka																	
Data	Parametry	Δy_{\max}	Δt_p	ΔV	NSE	MSE	MAPE	SWS	r	ME	MAE	SSE	r_s	JAKC	Szczyty przesuwne	NSE _i	
07.03-12.03.1978	k1	73,00	0,10	67,00	0,80	0,80	54,00	53,40	0,70	1,00	0,80	0,80	0,40	1,00	45,60	1,00	
	N1	2,00	1,00	2,00	3,50	3,50	5,00	2,00	4,00	2,00	3,00	3,50	2,00	3,50	3,00	2,50	
	m	60,00	1,80	69,00	6,50	6,50	0,30	82,00	1,60	10,00	13,70	6,50	31,60	11,10	3,00	19,10	
	N2	2,00	1,00	3,00	2,00	2,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	2,00	2,00	4,00	2,00	2,00	
	k2	3,00	0,10	7,00	34,60	34,60	27,50	40,50	30,90	10,20	9,00	34,60	0,50	2,40	44,60	1,30	
	β	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25	0,75	0,25	0,25
	Wartość	0,0000	0	0,19	0,493	0,0177	6,28	1,0000	0,735	0,20	0,08	0,1063	0,943	5,47	0,0030	0,521	
28.04-08.05.1978	k1	73,00	0,10	17,70	13,00	13,00	13,00	68,00	13,00	53,90	0,80	13,00	0,10	7,50	1,00	124,00	
	N1	2,00	1,00	2,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	5,00	2,00	5,00	
	m	59,00	0,10	65,20	7,40	7,40	9,00	85,00	122,00	6,90	9,60	7,40	3,60	6,00	10,80	10,30	
	N2	2,00	2,00	5,00	3,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,00	3,00	2,00	2,00	4,00	5,00	
	k2	9,00	0,50	9,20	1,60	1,60	5,20	6,00	2,60	2,90	3,10	1,60	0,40	1,00	4,00	3,10	
	β	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,50	0,25	0,75	
	Wartość	0,0000	0	0,98	0,847	0,0509	14,99	1,0000	0,944	0,39	0,15	0,4579	0,842	0,44	0,2648	0,736	
16.08-22.08.1978	k1	35,00	0,10	15,00	54,00	54,00	124,00	112,50	63,20	5,80	64,00	54,00	0,10	1,00	0,70	54,00	
	N1	3,00	1,00	2,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	3,00	2,00	5,00	
	m	2,00	0,10	35,50	7,20	7,20	6,50	51,00	123,90	8,00	6,60	7,20	1,60	9,00	0,10	10,40	
	N2	5,00	1,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	2,00	4,00	4,00	5,00	
	k2	33,90	0,10	30,60	9,10	9,10	10,60	54,30	8,80	5,00	10,30	9,10	0,90	43,80	30,50	8,60	
	β	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75	
	Wartość	0,0000	0	4,03	0,951	0,0488	12,30	1,0000	0,982	0,40	0,12	0,3417	0,955	8,18	0,2779	0,980	
28.06-11.07.1971	k1	73,80	0,10	91,00	120,80	120,80	59,00	51,10	124,00	1,00	39,60	120,80	0,80	0,80	41,20	69,10	
	N1	3,00	1,00	3,00	5,00	5,00	5,00	3,00	4,00	3,50	5,00	5,00	5,00	3,50	4,00	5,00	
	m	49,00	0,10	11,00	1,30	1,30	9,10	21,80	124,00	1,60	5,90	1,30	2,50	1,20	73,40	11,20	
	N2	1,00	2,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	2,00	5,00	1,00	4,00	
	k2	9,00	0,50	11,00	11,30	11,30	6,70	1,30	46,20	8,30	8,20	11,30	2,80	12,10	21,70	6,00	
	β	0,50	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	
	Wartość	0,0000	0	46,04	0,608	6,0570	14,20	1,0000	0,924	4,80	0,96	84,7985	0,997	1459723,01	37,3442	0,974	
08.09-12.09.1971	k1	96,00	0,10	90,70	123,90	123,90	124,00	16,00	54,00	59,00	124,00	123,90	0,30	8,80	0,60	124,00	
	N1	2,00	1,00	2,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,50	3,50	1,00	5,00	
	m	51,00	0,10	21,00	0,90	0,90	0,40	6,00	0,10	0,40	1,00	0,90	4,60	6,50	0,10	0,10	
	N2	5,00	2,00	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00	
	k2	41,10	0,50	21,00	10,00	10,00	18,50	32,00	5,90	7,90	9,80	10,00	0,50	8,00	35,00	18,00	
	β	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	
	Wartość	0,0000	0	2,75	0,862	0,1421	18,72	1,0000	0,934	0,57	0,24	0,7105	0,700	1,56	0,1655	0,824	
21.03-24.03.1971	k1	59,40	0,10	11,00	78,40	78,40	54,00	7,90	31,50	18,00	124,00	78,40	0,10	124,00	52,90	124,00	
	N1	1,00	1,00	3,00	5,00	5,00	5,00	1,50	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	3,50	5,00	5,00	
	m	78,80	0,10	1,00	0,30	0,30	0,10	37,40	6,60	0,30	0,40	0,30	0,10	1,00	66,00	0,10	
	N2	3,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	5,00	5,00	2,00	5,00	1,00	5,00	
	k2	6,40	0,50	26,00	19,00	19,00	29,10	3,30	33,90	7,50	18,00	19,00	0,60	15,00	26,00	28,00	
	β	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	
	Wartość	0,0001	0	5,81	0,963	0,7232	39,91	1,0000	0,997	1,07	0,63	2,8929	0,800	80716,01	0,8515	0,607	

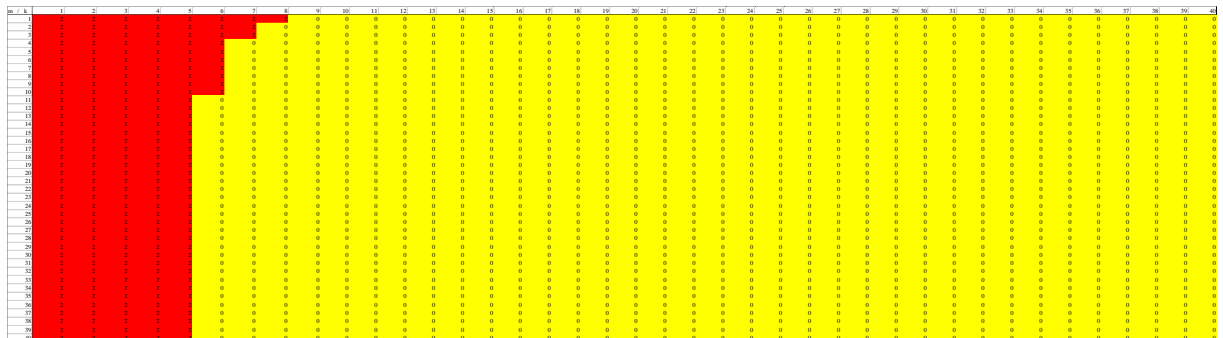
**Załącznik nr 3. Wartości kryteriów estymacji uzyskane modelami
pojedynczego zbiornika liniowego i kaskadą Nasha przedstawione
w układzie parametrów (m, k)**

# / k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40						
1	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931				
2	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931

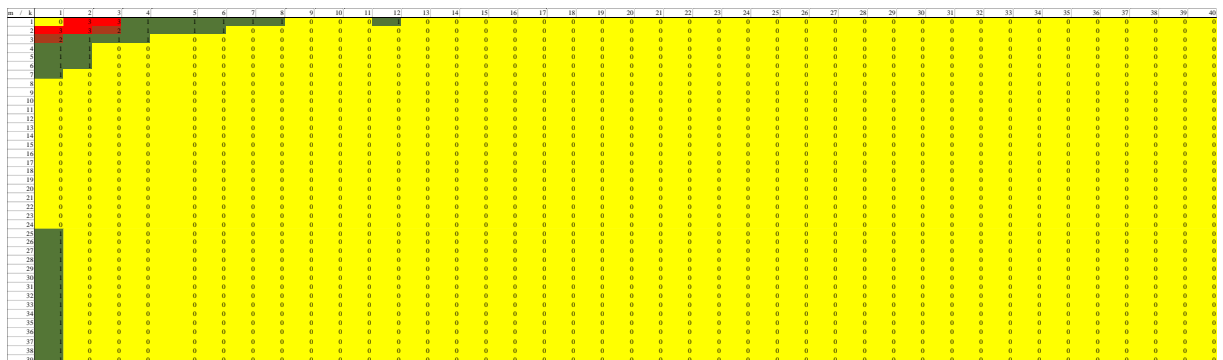
Rysunek 135. Rozkład wartości kryterium Δy_{max} otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1

# / k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40						
1	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022		
2	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022

Rysunek 136. Rozkład wartości kryterium Δy_{max} otrzymane dla kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 1



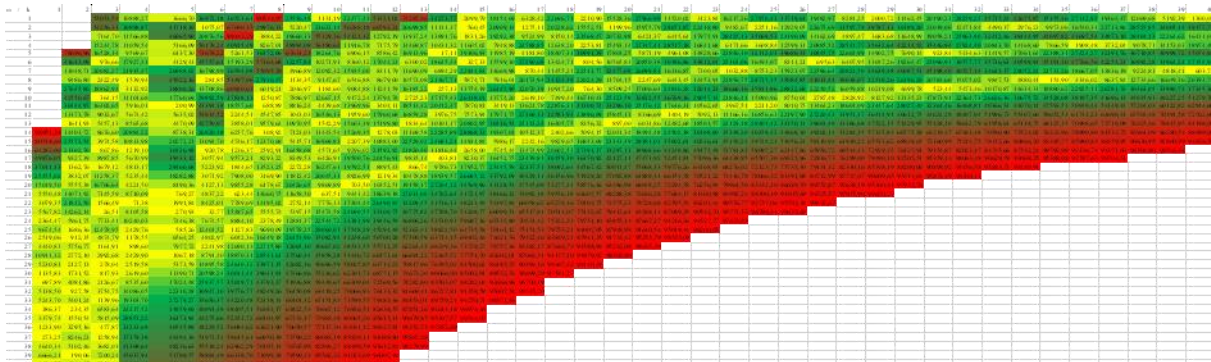
Rysunek 137. Rozkład wartości kryterium Δt_p otrzymane dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1



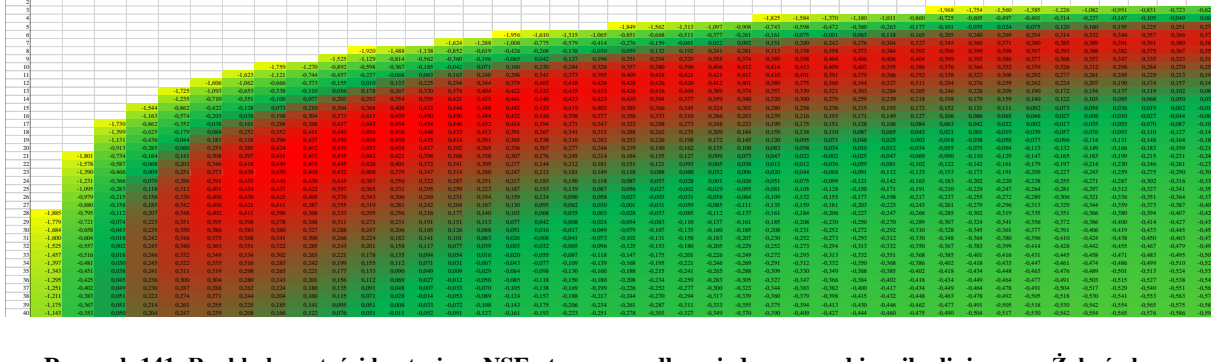
Rysunek 138. Rozkład wartości kryterium Δt_p otrzymane dla kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

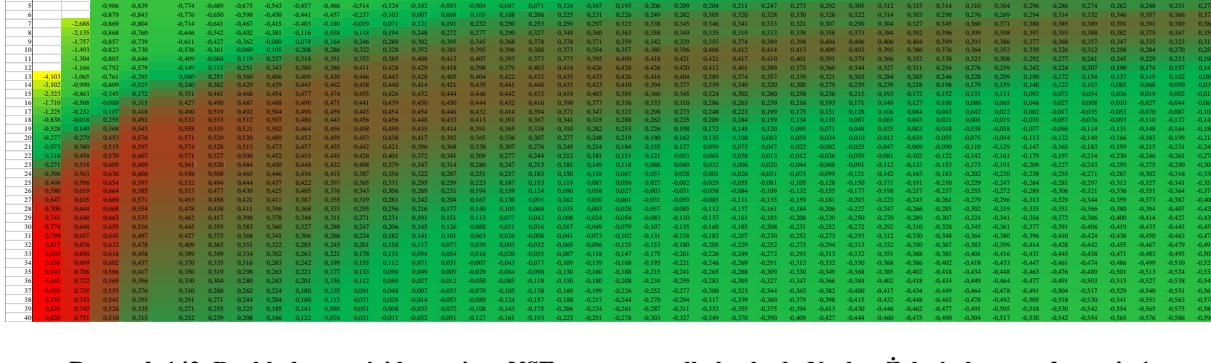
Rysunek 139. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrówka – wydarzenie 1



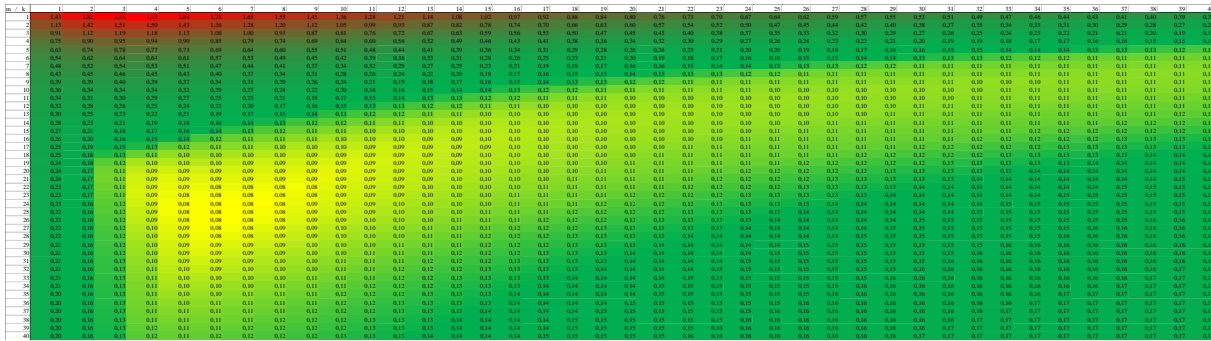
Rysunek 140. Rozkład wartości kryterium ΔV otrzymany dla kaskady Nasha; Żębrówka – wydarzenie 1



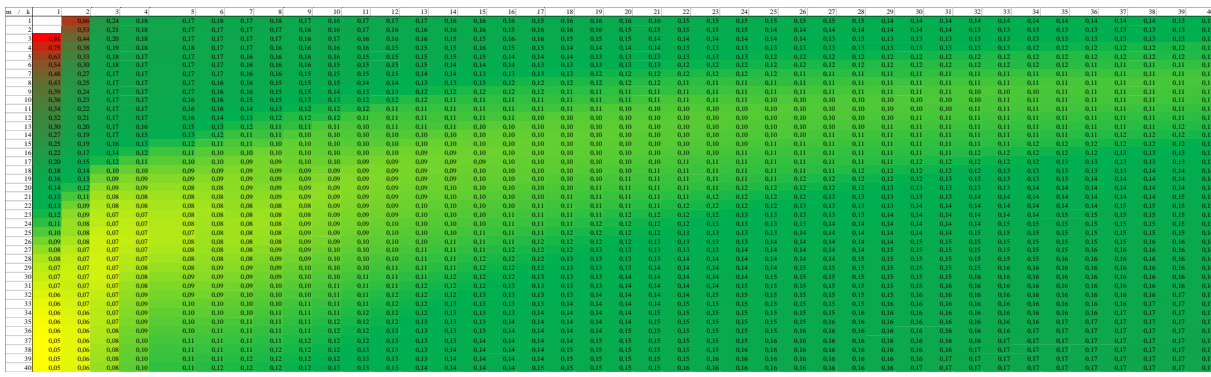
Rysunek 141. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrówka – wydarzenie 1



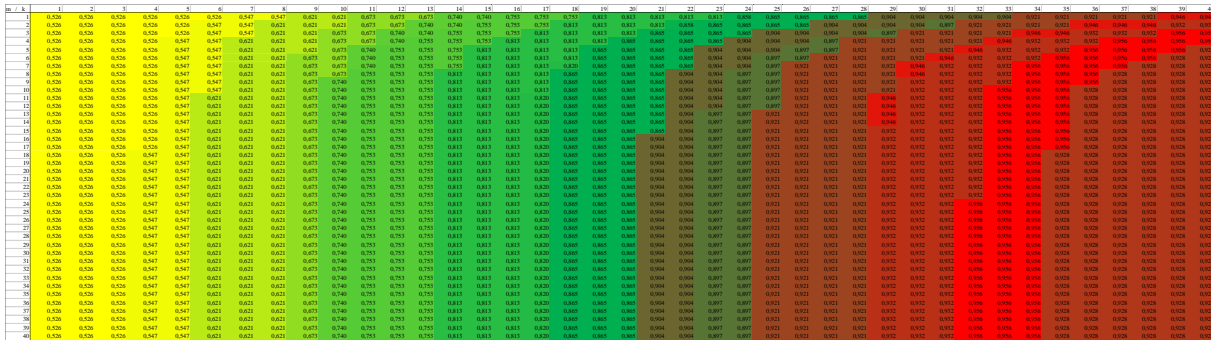
Rysunek 142. Rozkład wartości kryterium NSE otrzymany dla kaskady Nasha; Żębrówka – wydarzenie 1



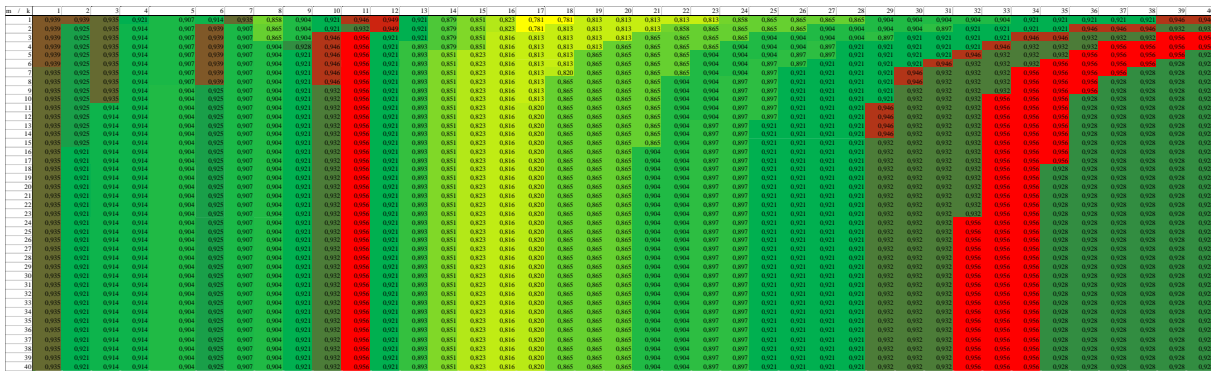
Rysunek 151. Rozkład wartości kryterium MAE otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1



Rysunek 152. Rozkład wartości kryterium MAE otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1



Rysunek 153. Rozkład wartości kryterium r_s otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1



Rysunek 154. Rozkład wartości kryterium r_s otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1

Table with columns labeled 'R' and 'A', and rows containing numerical data. A red box highlights a specific row and column intersection.

Rysunek 155. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1

Table with columns labeled 'R' and 'A', and rows containing numerical data. A red box highlights a specific row and column intersection.

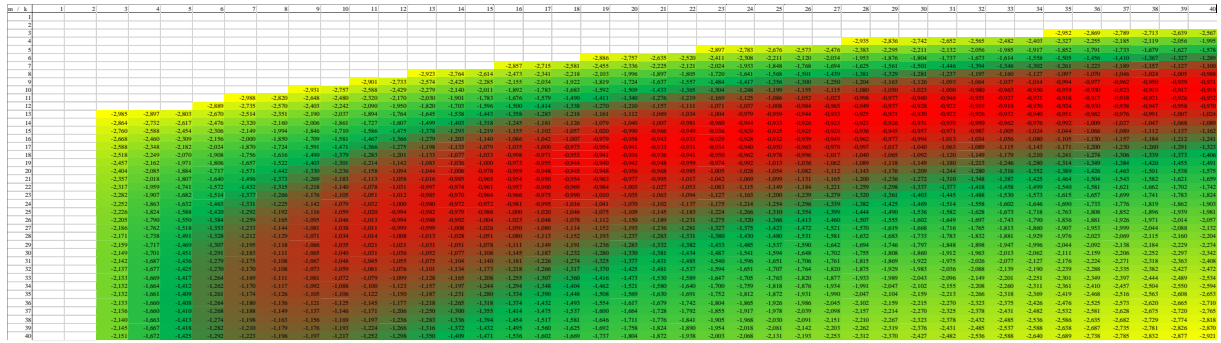
Rysunek 156. Rozkład wartości kryterium JAKC otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1

Table with columns labeled 'R' and 'A', and rows containing numerical data.

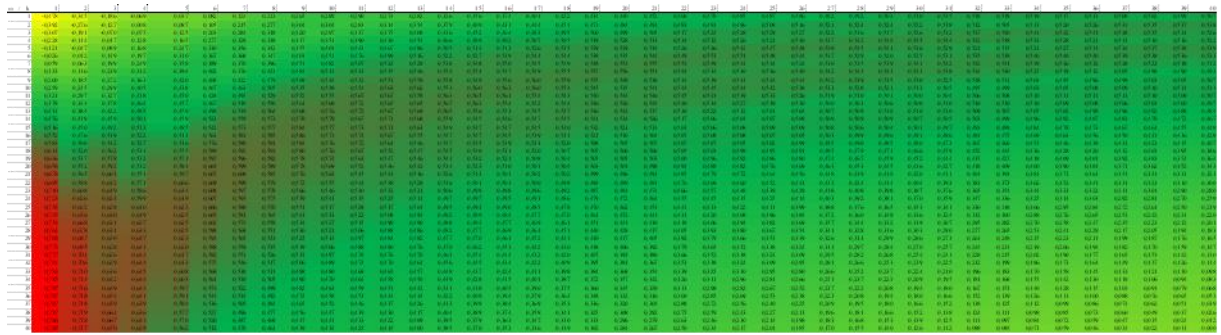
Rysunek 157. Rozkład wartości kryterium przesuwanych otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żebrówka – wydarzenie 1

Table with columns labeled 'R' and 'A', and rows containing numerical data.

Rysunek 158. Rozkład wartości kryterium przesuwanych otrzymany dla kaskady Nasha; Żebrówka – wydarzenie 1

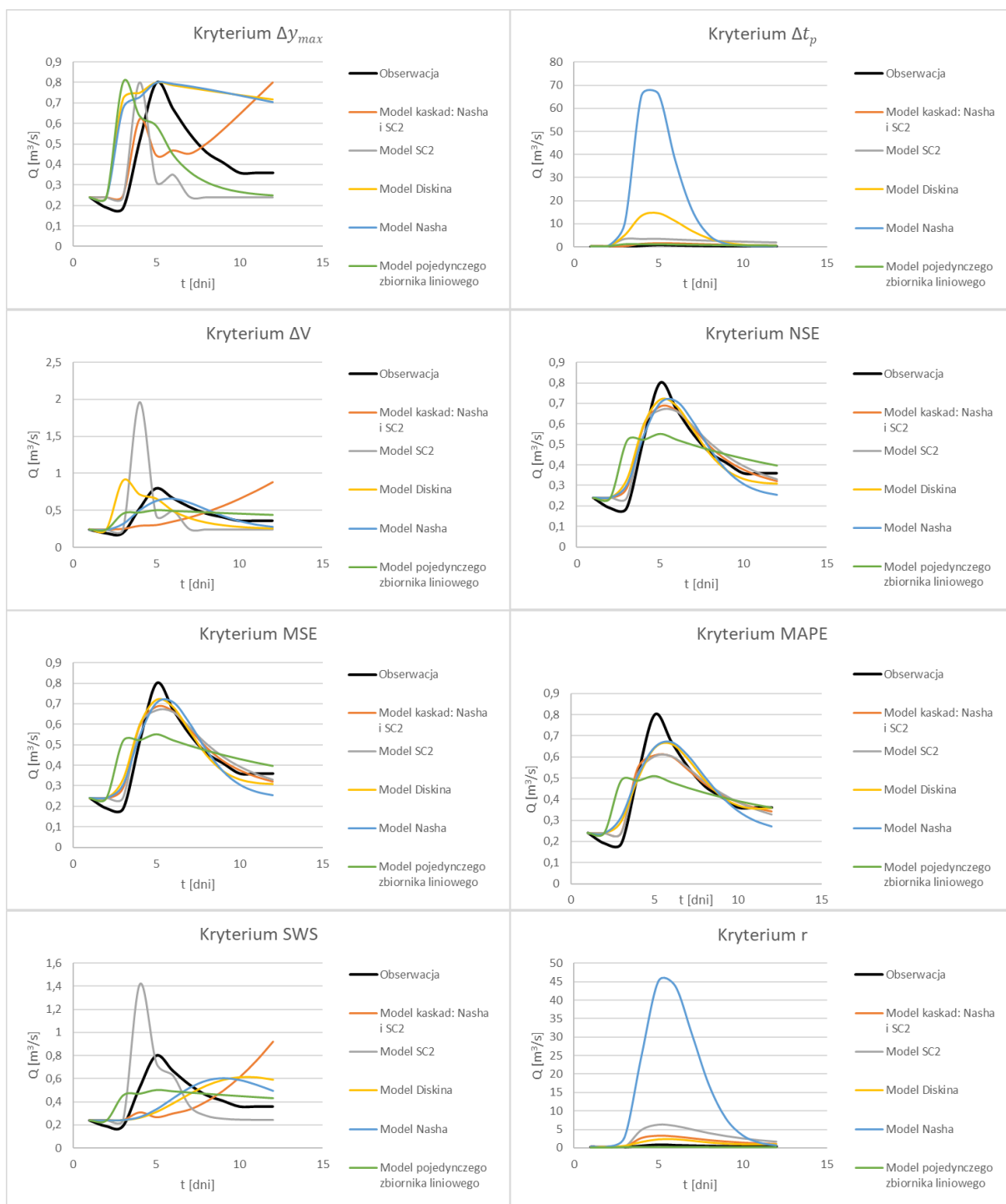


Rysunek 159. Rozkład wartości kryterium NSE₁ otrzymany dla pojedynczego zbiornika liniowego; Żębrowka – wydarzenie 1

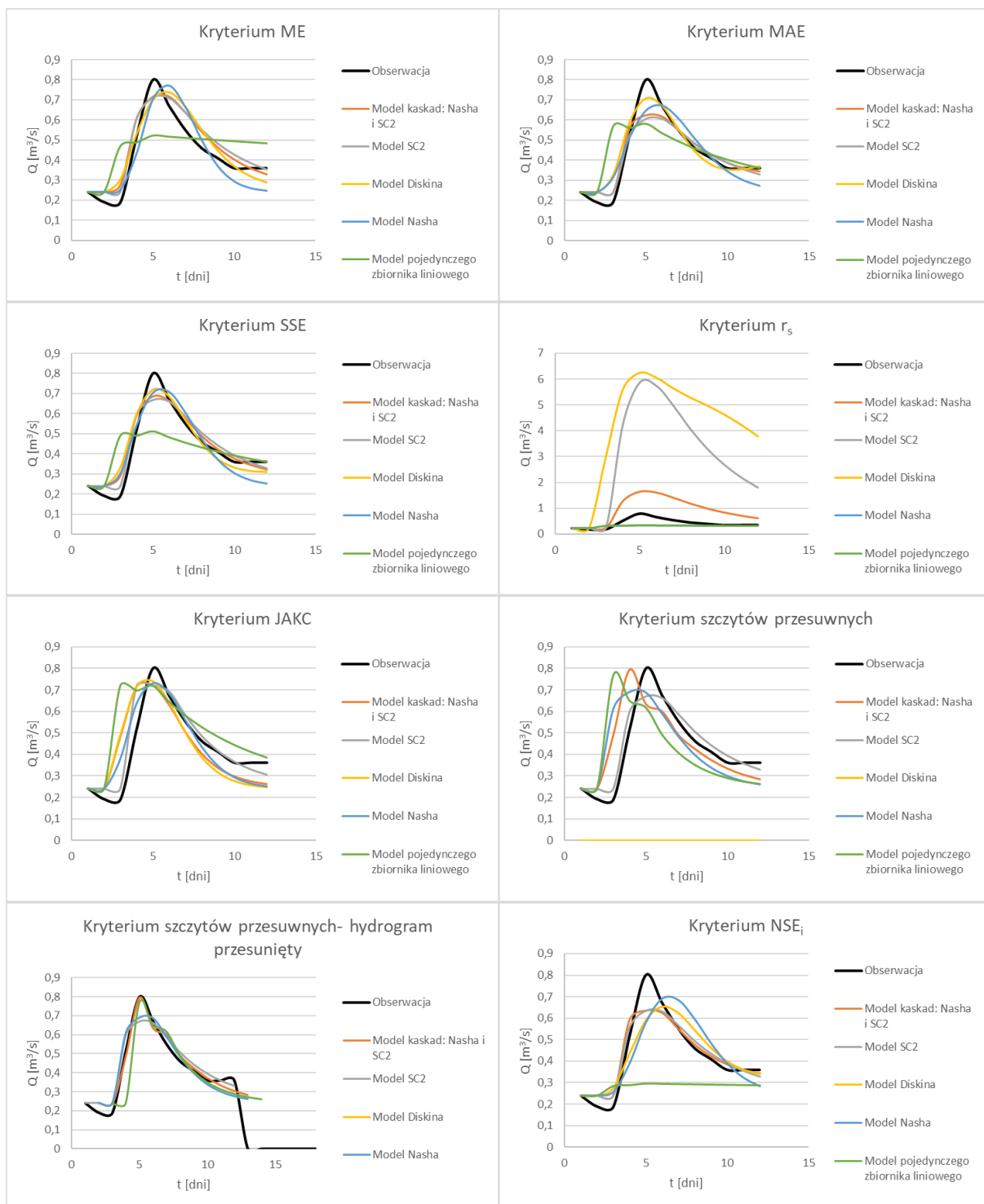


Rysunek 160. Rozkład wartości kryterium NSE₁ otrzymany dla kaskady Nasha; Żębrowka – wydarzenie 1

**Załącznik nr 4. Hydrogramy wynikowe uzyskane dla Żebrówki –
wydarzenie 1 przy użyciu analizowanych kryteriów estymacji**



Rysunek 161. Symulacje przeprowadzone dla Żebrówki – wydarzenie 1; kryteria 1-8



Rysunek 162. Symulacje przeprowadzone dla Żebrówki – wydarzenie 1; kryteria 9-15