

Zastosowanie modelowania matematycznego w analizie warunków przepływu wody w korycie rzecznym

Sebastian R. BIELAK



Biebrzańskie Bagna w granicach Basenu Dolnego Biebrzy

Wostatniej dekadzie coraz powszechniej w badaniach naukowych wykorzystuje się metody symulacji komputerowych, dotyczy to zwłaszcza badań nad jakością środowiska wodnego. W ocenie wód płynących bardzo popularnym narzędziem stało się modelowanie, w którym na bazie matematycznego odwzorowania geometrii oraz warunków hydraulicznych koryta rzeczno symuluje się procesy fizyczno-chemiczne i biologiczne, wpływające na stężenia związków chemicznych obecnych w wodzie. Przy ocenie jakości fizyczno-chemicznej rzeki rozkład stężeń zanieczyszczeń, określony za pomocą modelu matematycznego, stanowi istotne i zazwyczaj bardzo obszerne uzupełnienie bezpośrednich pomiarów terenowych. Ma to szczególne znaczenie albo w przypadku długich odcinków cieku albo w sytuacji, gdy bezpośrednie pomiary terenowe zostały ograniczone do kilku stanowisk, np. ze względów finansowych lub logistycznych.

Matematyczny model rzeki może mieć różnorodne zastosowanie praktyczne i raz skalibrowany, a następnie zweryfikowany, staje się wartościowym narzędziem analitycznym. Sprawdzony w działaniu model stanowi naukową podstawę do przedsięwzięcia konkretnych działań, których celem może być zarówno utrzymanie istniejącego stanu środowiska wodnego, jak też i jego poprawa w zadanym horyzoncie czasowym, w zależności od zmieniającej

się presji człowieka na środowisko naturalne. Najprostsze i najczęściej stosowane w analizie zmian jakości wód rzecznych są modele jednowymiarowe, w których zakłada się, że istotne zmiany wartości parametrów decydujących o jakości wody zachodzą jedynie wzdłuż profilu podłużnego cieku.

Modelowanie w dolinie Biebrzy

Do niedawna, gdy planowano analizę jakościową konkretnego cieku, tworzono dla niego odrębny model matematyczny, co było pracochłonne oraz kosztowne. Obecnie zaprzestano już takiej praktyki i w modelowaniu jakości wód płynących wykorzystuje się istniejące programy (moduły), które w zależności od potrzeb i specyfiki danego cieku poddaje się niezbędnym modyfikacjom. Już pod koniec lat 90. XX w. szacowano, że na świecie funkcjonowało co najmniej kilka tysięcy modeli jakości wód powierzchniowych powstałych na bazie ogólnodostępnych lub komercyjnych modułów podstawowych. Obecnie liczba ta jest wielokrotnie wyższa i stale wzrasta. Jako przykład matematycznego modelowania przepływu wody w korycie rzeczno może posłużyć jednowymiarowy model nizinnej rzeki Biebrzy, który został skonstruowany na bazie programu Qual2k. Program ten został opracowany przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska US EPA.

Jednowymiarowy model obejmował 50-kilometrowy odcinek Biebrzy Dolnej, rozciągający się od Osowca aż po ujście do Narwi. Hydraulicznie rzecz ujmując za-

stosowanie modelu zostało ograniczone do symulacji krótkich przedziałów czasowych trwających 1-2 doby, w których założono, że przepływ wody w poszczególnych przekrojach cieku i w ujściowych odcinkach jego dopływów punktowych, były stałe. Program Qual2k został użyty do stworzenia serii trzech symulacji stanu ustalonego, które razem stanowiły substytut modelu dynamicznego opisującego zachowanie rzeki w dłuższym horyzoncie czasowym. Model przepływu wody w korycie powstał jako baza do późniejszej konstrukcji dwóch modeli jakościowych, opisujących przemiany biochemiczne i fizyczne substancji chemicznych transportowanych w wodzie i zgromadzonych w osadach dennych Biebrzy.

Dane niezbędne do skonstruowania i kalibracji modelu hydraulicznego Biebrzy zostały zgromadzone w trakcie trzech kampanii pomiarowych: 26-28 lipca i 21-24 września 2007 r. oraz 19-22 lipca 2008 r., na terenie Basenu Dolnego Biebrzańskie Parku Narodowego. W badaniach terenowych wykonano pomiary hydrometryczne i geodezyjne. Pomiary hydrometryczne polegały na wykonaniu 15 przekrojów poprzecznych Biebrzy Dolnej oraz po jednym przekroju poprzecznym w ujściowych odcinkach jej dopływów punktowych (Kanał Rudzki, Klimaszewnica, Wissa i Kosódką), celem zdefiniowania geometrii koryt rzecznych. Ponadto obejmowały pomiary prędkości przepływu wody w przekrojach, umożliwiające obliczenie wielkości przepływu. Pomiary

ry geodezyjne, wykonane w trybie RTK DGPS, pozwoliły na precyzyjny odczyt współrzędnych wysokościowych zwierciadła wody oraz współrzędnych geograficznych poszczególnych przekrojów poprzecznych. Badania terenowe wykonano z wykorzystaniem elektromagnetycznego czujnika przepływu wody C2000 Nautilus, zestawu GPS Topcon Legacy oraz sond do pomiaru głębokości.

Konstrukcja modelu

Biebrza Dolna została przedstawiona w modelu przepływu wody jako ciąg 14 odcinków o różnej długości, wahającej się od 2,3 do 8 km, zawartych między badawczymi przekrojami poprzecznymi koryta. Numeracja odcinków odbyła się zgodnie z naturalnym biegiem rzeki w taki sposób, że odcinek nr 1 rozpoczynał się w pierwszym przekroju pomiarowym, a odcinek nr 14 kończył w ostatnim. Naturalne koryto Biebrzy cechowało się dużą nieregularnością kształtów i dlatego zostało uproszczone do koryta trapezoidalnego, z zachowaniem zmierzonych w terenie (lub obliczonych) wymiarów geometrycznych, takich jak: szerokość koryta, szerokość dna, nachylenie skarp czy też pole powierzchni przekroju poprzecznego oraz parametrów hydraulicznych (obwód zwilżony, promień hydrauliczny, natężenie przepływu, średnia prędkość przepływu, napelnienie koryta i współczynnik szorstkości dna). W opracowanym w ten sposób modelu hydraulicznym Biebrza została przedstawiona jako ciek główny, natomiast Kanał Rudzki, Klimaszewnica, Kosódka i Wissa, jako punktowe dopływy wody do cieku głównego.

Obszarowe dopływy oraz obszarowe odpływy wody z rzeki zostały zdefiniowane jako przepływy zachodzące w kierunku prostopadłym między korytem rzeczny, a jego otoczeniem, na wybranym odcinku określonym przez podanie kilometra biegu rzeki początku i końca dopływu lub odpływu. Analiza przepływu wody w rzekach jest bardzo złożona ze względu na naturalną zmienność przekrojów poprzecznych koryta i spadku dna na długości cieku oraz dodatkowo ze względu na zmienność natężenia przepływu w korycie, zarówno na długości, jak również w czasie. Wiele zagadnień inżynierskich rozwiązuje się przy założeniu niezmienności kształtu i spadku dna koryta oraz natężenia przepływu wody w czasie. Takie założenia pozwalają zdefiniować przepływ wody w korycie jako jednostajny i ustalony, charakteryzujący się stałą głębokością przepływu, jednakowym rozkładem prędkości w przekrojach po-



Rzeka Biebrza w okolicach wsi Jasionowo

przecznych oraz równoległością linii dna koryta i linii zwierciadła wody, co oznacza, że spadek dna (S_0) jest równy co do wartości spadkowi zwierciadła wody (i).

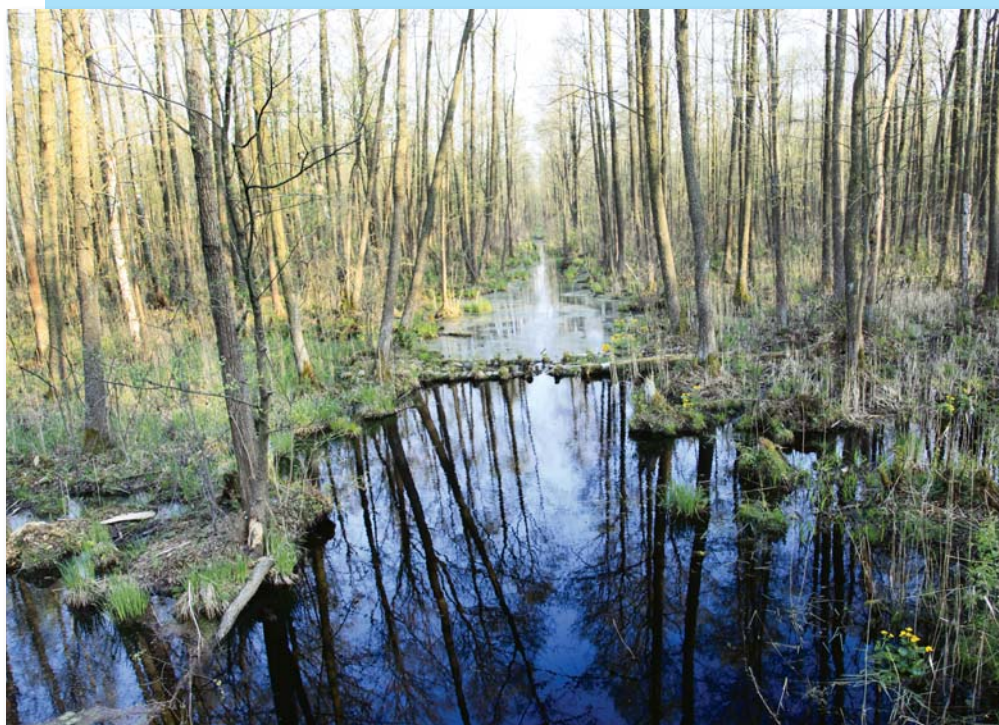
Dlatego też, dla uproszczenia niezwykle skomplikowanych i zmieniających się warunków naturalnych w korycie Biebrzy Dolnej przyjęto, że poszczególne odcinki rzeki mają stałe parametry hydrauliczne oraz geometryczne, zdefiniowane w przekroju zamykającym dany odcinek. Konstrukcja modelu przepływu wody w Biebrzy rozpoczęła się od wyznaczenia, na podstawie danych uzyskanych z pomiarów terenowych, geometrii oraz parametrów hydraulicznych poszczególnych przekrojów poprzecznych, co umożliwiło zdefiniowanie warunków przepływu we wszystkich odcinkach rzeki. Obliczone lub zmierzone bezpośrednio w terenie parametry

hydrauliczne koryta Biebrzy, tj. przepływ (Q), prędkość średnia (v_{sr}), współczynnik szorstkości dna (n), napelnienie koryta (h) oraz spadek podłużny zwierciadła wody, a także jego wymiary geometryczne, tj. pole powierzchni przekroju (A), szerokość przekroju (B), szerokość dna (D), nachylenie skarp (s_1, s_2) na poszczególnych odcinkach zostały ostatecznie wprowadzone do programu Qual2k, tworząc dla każdej z trzech kampanii pomiarowych odrębną symulację przepływu wody. Kolejnym etapem było skalibrowanie modelu, wykorzystując do tego celu obliczenia numeryczne programu.

Kalibracja i weryfikacja modelu

Kalibracja modelu przepływu wody w Biebrzy polegała na dostosowaniu definiujących go parametrów obliczeniowych,

Podmokły ols na Bagnie Ławki





Rzeka Wissa wśród zabudowań wsi Karwowo

np. s_1 , s_2 , n do wartości parametrów uzyskanych w wyniku bezpośrednich pomiarów terenowych (A , B , v_{sr} i in.). Odkazywało się to metodą kolejnych przybliżeń, w których wartość analizowanych parametrów była szacowana w sposób pośredni w oparciu o procedurę numerycznego przybliżania wyników symulacji. Do kalibracji modelu wykorzystano dane pochodzące z kampanii pomiarowych przeprowadzonych w lipcu oraz wrześniu 2007 r., natomiast dane z pomiarów wykonanych w lipcu 2008 r. zostały wykorzystane do weryfikacji skali-browanego modelu. Obliczenia numeryczne wykonywane były za pomocą metody łamanej Eulera, umożliwiającej przybliżone całkowanie równań różniczkowych zwyczajnych.

Krok obliczeniowy zdefiniowany został jako najkrótszy czas potrzebny na przemieszczenie się pojedynczej cząstki wody na odcinku o długości 100 m, biorąc pod uwagę najwyższą prędkość przepływu wody zmierzoną w danej kampanii pomiarowej. Krok ten wyniósł: 3,5 minuty (lipiec 2007), 3,3 minuty (wrzesień 2007) oraz 3,6 minuty (lipiec 2008). Skalibrowany

model przepływu wody umożliwił obliczenie czasu, jaki pojedyncza cząsteczka wody potrzebowała na przemieszczenie się między początkiem i końcem dowolnego elementu obliczeniowego modelu. Co ciekawe, bez względu na stan wody w korycie Biebrzy Dolnej uzyskany za pomocą symulacji czas transportu masy wody od początku modelu (Osowiec) aż do jego końca (ujście do Narwi) był do siebie zbliżony i wynosił: 32,5 h (lipiec 2007), 31,9 h (wrzesień 2007) oraz 34,3 h (lipiec 2008).

Podsumowanie efektów symulacji

Wyniki badań potwierdziły dużą przydatność programu Qual2k do symulacji jednowymiarowego przepływu wody w korycie rzeczonym. Uzyskane efekty symulacji komputerowych można podsumować w następujący sposób:

Spośród czterech dopływów Biebrzy Dolnej tylko Kanał Rudzki oraz Wissa miały znaczący wpływ na zwiększenie przepływu wody w jej korycie. Dotyczyło to zwłaszcza Kanału Rudzkiego, którego przepływ wynosił od 22 do 60% przepływu

Biebrzy na wysokości jego ujścia (w przypadku Wissy było to od 6 do 8%). Oznacza to, że tylko te dwa ciekі mogą w sposób istotny oddziaływać na jakość ekologiczną Biebrzy, w zależności od dobowego ładunku zanieczyszczeń transportowanych ich korytami.

Zaobserwowano znaczne różnice w wartościach natężenia przepływu wody w korycie Biebrzy (rysunek). Występowały one na poszczególnych odcinkach rzeki w trakcie tych samych symulacji przepływu, przy czym im notowano wyższe stany wody w rzece, tym różnice te były większe. Zjawisko jest dowodem na znaczną wymianę (przepływ obszarowy) wody pomiędzy korytem rzeczonym, a otaczającymi go torfowiskami (mokradłami). Oznacza to, że wraz z podnoszeniem się zwierciadła wody w Biebrzy wzrasta



Potok Klimaszewnica w pobliżu wsi o tej samej nazwie

Kanał Rudzki powyżej ujścia do Biebrzy

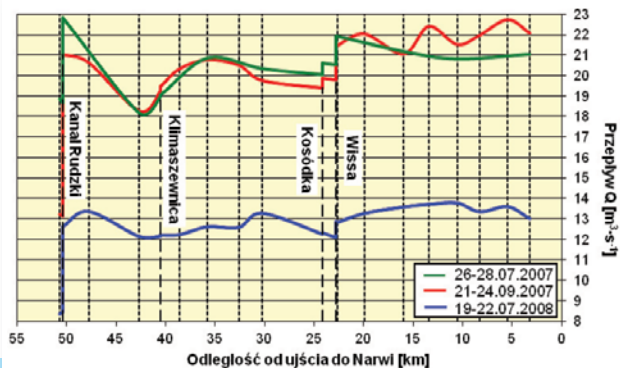


znaczenie odwadnianych torfowisk jako potencjalnego źródła obszarowych oddziaływań na chemizm rzeki.

Dwukierunkowy przepływ obszarowy wody między korytem Biebrzy Dolnej a torfowiskami odbywał się na dwa sposoby:

- przez grawitacyjny spływ powierzchniowy, polegający na przelewaniu się nadmiaru wody poza krawędź brzegów rzeki (dominujący przy wysokich stanach w korycie),
- przez infiltrację płytkich wód gruntowych (dominujący przy niskich stanach).

Całkowita ilość wody wpływającej do Basenu Dolnego, liczona jako suma



Rozkład natężenia przepływu wody w korycie Biebrzy Dolnej w poszczególnych symulacjach modelu



Podmokłe łąki – częsty widok w Dolinie Biebrzy w trakcie wiosennych wzebrań

przepływu w Biebrzy na wysokości wodowskazu Osowiec, oraz przepływów w ujściowych odcinkach jej dopływów punktowych (Kanał Rudzki, Klimaszewka, Kosódka, Wissa) była we wszystkich trzech symulacjach (lipiec i wrzesień 2007, wrzesień 2008) większa od ilości wody wypływającej z basenu, liczonej jako przepływ w Biebrzy w pobliżu jej ujścia do Narwi. Okazało się zatem, że Biebrza Dolna w ostatecznym rozrachunku zawsze pozostawia na torfowiskach część transportowanej przez siebie wody, bez względu na porę roku oraz warunki hydrologiczne („suchy” lub „mokry” rok).

Im notowano wyższe stany wody w Biebrzy Dolnej na wysokości wodowskazu Osowiec (a co za tym idzie większe przepływy), tym większa ilość wody zostawała później wchłonięta obszarowo przez mokradła, np. przy przepływie rzędu 20-21 m³·s⁻¹ wartość ta wynosiła ok. 30-35% przepływu. Powyżej 20-21 m³·s⁻¹ ilość pozostawianej na torfowiskach wody gwałtownie wzrastała, nawet przy niewielkim przyroście Q.

Najwyższą średnią prędkość przepływu wody w Biebrzy Dolnej zaobserwowano w ujściowym jej odcinku, co potwierdza odwadniające działanie Narwi, a także po-

niżej ujścia Kanału Rudzkiego. Ponadto dopływ ten znacznie podnosił w korycie Biebrzy wartość objętościowej dyspersji podłużnej. Oznacza to, że Kanał Rudzki bardzo korzystnie wpływa na mieszanie się wód Biebrzy, co sprzyja lepszemu natlenieniu jej wód oraz rozcieńczeniu stężeń transportowanych zanieczyszczeń.

Badania terenowe wykazały, że Biebrza Dolna jest rzeką o bardzo zmiennej geometrii oraz hydraulice koryta. Zmienność ta widoczna była nie tylko na całej długości koryta, ale również w czasie, a więc można tutaj mówić o zmienności czasoprzestrzennej. Na odcinku o długości blisko 50 km, w zależności od pory roku (lato, jesień) oraz jego charakteru („mokry”, „suchy”), szerokość koryta rzecznej wahała się od 21 do 37 m, szerokość dna od 6 do 33 m, średnia głębokość przepływu od 0,9 do 4,3 m, natomiast średni współczynnik szorstkości dna od 0,022 do 0,052 s·m^{-1/3}. Silnie meandrujące koryto Biebrzy Dolnej charakteryzowało się bardzo wysokim współczynnikiem krętości. ◆

Literatura

J. Boczar (red.) 1995. *Modele matematyczne jakości wody w ujściowym odcinku rzeki*. Wydawnictwo Instytutu Budownictwa Wodnego PAN, Szczecin.



Uregulowane koryto potoku Kosódka w okolicach wsi Dobarz

Turzyce (*Carex* sp.) to rośliny charakterystyczne dla terenów mokradlowych



- P. S. Chapra 1997. *Surface Water – Quality Modeling*. Wydawnictwo McGraw-Hill Companies Inc., New York-Toronto.
- P. S. Chapra, G. J. Pelletier, H. Tao 2008. *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Medford.
- P. Holnicki, Z. Nahorski, A. Żochowski 2000. *Modelowanie procesów środowiska naturalnego*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej i Zarządzania, Warszawa.
- J. Kubrak, E. Nachlik (red.) 2003. *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Dr inż. Sebastian R. Bielak – Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska.