

IZABELA GODYŃ*

ANALIZA I PROGNOZA WODOCHŁONNOŚCI SEKTORÓW GOSPODARKI Z ZASTOSOWANIEM WNIOSKOWANIA ROZMYTEGO

APPLICATION OF FUZZY REASONING IN THE ANALYSIS AND FORECAST OF WATER CONSUMPTION IN ECONOMY

Streszczenie

W artykule zaprezentowano propozycję prognozowania zapotrzebowania na wodę gospodarki przez modelowanie zmian współczynnika wodochłonności produkcji. Modelowanie wodochłonności przeprowadzono z zastosowaniem wnioskowania rozmytego w architekturze Mamdaniego. Modele zmian wodochłonności budowano w zależności od dwóch zmiennych: dynamiki produkcji globalnej i nakładów inwestycyjnych. Zbudowane modele zmian wodochłonności poszczególnych sektorów gospodarki prognozują dla większości sektorów spadki wodochłonności produkcji.

Słowa kluczowe: gospodarka wodna, prognozowanie wodochłonności gospodarki, modelowanie

Abstract

In the paper author presents a proposal of forecasting of water requirements of the economy by modelling of changes of water use coefficients. Simulations of water use changes were done by an application of a fuzzy reasoning in Mamdani's architecture. Models of water demand changes are built depending on two variables: gross output dynamics and investment expenditure dynamics. Created models of water use dynamics in particular sectors predict decreases of water use coefficients for majority of sectors.

Keywords: water management, forecasting of water requirements of economy, fuzzy modelling

* Dr inż. Izabela Godyń, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Prognozowanie zapotrzebowania na wodę gospodarki jest istotnym elementem wspomagania zarządzania zasobami wodnymi, a w szczególności planowania zadań inwestycyjnych dotyczących rozwoju infrastruktury. Wielkością decydującą o poziomie zapotrzebowania na wodę, obok rozwoju gospodarczego, jest wodochłonność produkcji. W ostatnich latach można obserwować spadek poborów towarzyszący wzrostowi produkcji w większości sektorów gospodarki. W niniejszym artykule przedstawiono próbę modelowania zmienności wodochłonności przy wykorzystaniu wnioskowania rozmytego.

2. Wnioskowanie rozmyte – model Mamdaniego

Wnioskowanie rozmyte znajduje zastosowanie w modelowaniu w sytuacji, gdy trudno zapisać matematycznie zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi i objaśnianymi (wejściowymi i wyjściowymi), a jednocześnie dysponuje się wiedzą o odpowiadających sobie wartościach wejść i wyjść. Wnioskowanie rozmyte można przeprowadzić dzięki odpowiedniej wiedzy eksperckiej opisującej dany problem za pomocą zbiorów rozmytych oraz dzięki wykorzystaniu logiki i działań na zbiorach rozmytych.

Modele oparte na wnioskowaniu rozmytym to modele typu „czarna skrzynka”, stosowane do opisywania zjawisk o nieznanym modelu matematycznym, ale o dającym się opisać jakościowo przebiegu. Analizowany problem – zmienność wodochłonności sektorów gospodarki w odpowiedzi na zmienny poziom produkcji, nakładów inwestycyjnych, rozwój/regresję sektora – jest trudny do zamodelowania matematycznego, jednak na podstawie analizy danych można uzyskać pewne informacje dotyczące zależności odpowiadających sobie wartości wejściowych i wyjściowych. Wiedza ta może być wystarczająca do budowy modelu typu „czarna skrzynka”, np. modeli wykorzystujących logikę rozmytą.

Podstawowym elementem wnioskowania rozmytego jest pojęcie zmiennej lingwistycznej (np. „wodochłonność produkcji”), która przyjmuje wartości lingwistyczne, takie jak „bardzo niska”, „niska”, „średnia”, „wysoka”, „bardzo wysoka” itp. Wartościom lingwistycznym są przypisywane odpowiednie zbiory rozmyte, a zależności między zmiennymi lingwistycznymi są rozmytymi zdaniami warunkowymi. Przykładowo, mamy dwie zmienne lingwistyczne L i K takie, że wartość zmiennej L jest zbiorem rozmytym A określonym w X oraz wartość zmiennej K jest zbiorem rozmytym B określonym w Y , wówczas zależność między L i K , a właściwie między wartościami A i B można zapisać jako

$$\text{JEŻELI } L=A \text{ TO } K=B$$

Wnioskowanie rozmyte oparte na logice zbiorów rozmytych polega na wyciąganiu wniosków na podstawie reguł opartych na wartościach lingwistycznych. Najczęściej stosowana jest architektura Mamdaniego, w której na podstawie wiedzy eksperta tworzy się bazę reguł postaci. Przykładowo, dla dwóch zmiennych wejściowych x_1 i x_2 , zmiennej wyjściowej y przyjmujących po trzy wartości lingwistyczne (ujemny U , zero Z , dodatni D) możliwe jest utworzenie 9 reguł odpowiadających wszystkim kombinacjom zmiennych wejściowych. Reguły te mogą, przykładowo, mieć postać:

Jeżeli x_1 przyjmuje wartość „ujemny” i x_2 przyjmuje wartość „ujemny”,
to wielkość wyjściowa y przyjmie wartość „ujemny”, co można zapisać jako

i kolejne reguły

- 1) JEŻELI $x_1=U$ ORAZ $x_2=U$ TO $y=U$
- 2) JEŻELI $x_1=U$ ORAZ $x_2=Z$ TO $y=U$
- 3) JEŻELI $x_1=U$ ORAZ $x_2=D$ TO $y=Z$
- 4) JEŻELI $x_1=Z$ ORAZ $x_2=U$ TO $y=U$
- 5) JEŻELI $x_1=Z$ ORAZ $x_2=Z$ TO $y=Z$
- 6) JEŻELI $x_1=Z$ ORAZ $x_2=D$ TO $y=D$
- 7) JEŻELI $x_1=D$ ORAZ $x_2=U$ TO $y=Z$
- 8) JEŻELI $x_1=D$ ORAZ $x_2=Z$ TO $y=D$
- 9) JEŻELI $x_1=D$ ORAZ $x_2=D$ TO $y=D$

Praca modelu Mamdaniego przebiega następująco: do modelu wprowadzane są ostre wielkości zmiennych wejściowych, które są zamieniane na odpowiednie zbiory rozmyte (dana wartość ostra może odpowiadać jednemu lub dwóm zbiorom rozmytym, np. wartość $-0,001$ będzie w pewnym stopniu przynależała do zbioru „ujemny” oraz do zbioru „zero”), stąd ostre wartości dwóch zmiennych mogą uruchomić od 1 do kilku reguł (w zależności od podziału uniwersum). Każda z tych reguł jest spełniona w pewnym stopniu, ponieważ wejścia miały pewne określone stopnie przynależności do odpowiadających im zbiorów rozmytych. Jeżeli przesłanka reguły składa się z dwóch przesłanek dotyczących dwóch wejść połączonych spójnikiem koniunkcyjnym „oraz”, to stopień przynależności do całej reguły liczy się najczęściej jako stopień przynależności do relacji będącej iloczynem dwóch zbiorów rozmytych. W wyniku uruchomienia przykładowo 4 reguł otrzymujemy 4 konkluzje i odpowiadające im wielkości wyjścia (o różnych stopniach przynależności). Końcowy wynikowy zbiór rozmyty jest otrzymywany jako suma konkluzji poszczególnych reguł, czyli suma zbiorów rozmytych będących wyjściami z poszczególnych reguł. W efekcie końcowym w bloku wnioskowania otrzymywana jest wartość zmiennej wyjściowej w postaci zbioru rozmytego. Ostatnim blokiem modelu jest blok wyostrzania – defuzyfikacji, który pozwala na przekształcenie wyjściowego zbioru rozmytego do wyjścia w postaci wielkości ostrej. Opracowano kilka metod defuzyfikacji, najpopularniejsze to metody: środka maksimum, środka ciężkości, środka sum – szeroko opisane w literaturze (m.in. [4, 6, 7]).

2.1. Matematyczny zapis modelu Mamdaniego

Działanie przykładowego modelu rozmytego o dwóch zmiennych wejściowych i jednej zmiennej wyjściowej zostało przedstawione na schemacie poniżej. Każda ze zmiennych wejściowych (x_1 i x_2) zdefiniowana jest przez dwie wartości lingwistyczne (dwa zbiory rozmyte, odpowiednio, A_1 i A_2 oraz B_1 i B_2).

Rozmywanie wartości ostrych odbywa się poprzez odniesienie ich do zdefiniowanych zbiorów rozmytych reprezentujących poszczególne wartości lingwistyczne – w wyniku tego procesu otrzymywane są wartości stopni przynależności $\mu_{A_i}(x_1^*)$, $\mu_{B_j}(x_2^*)$ wartości ostrych x_1^* , x_2^* do poszczególnych zbiorów rozmytych A_1 , A_2 , B_1 , B_2 .

Wnioskowanie (inferencja) odbywa się na podstawie bazy reguł, założonego mechanizmu wnioskowania oraz funkcji przynależności zmiennej wyjściowej do zdefiniowanych zbiorów rozmytych opisujących uniwersum zmiennej i jego podział. Baza reguł składa się z relacji logicznych opisujących zależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi i wyjściem.

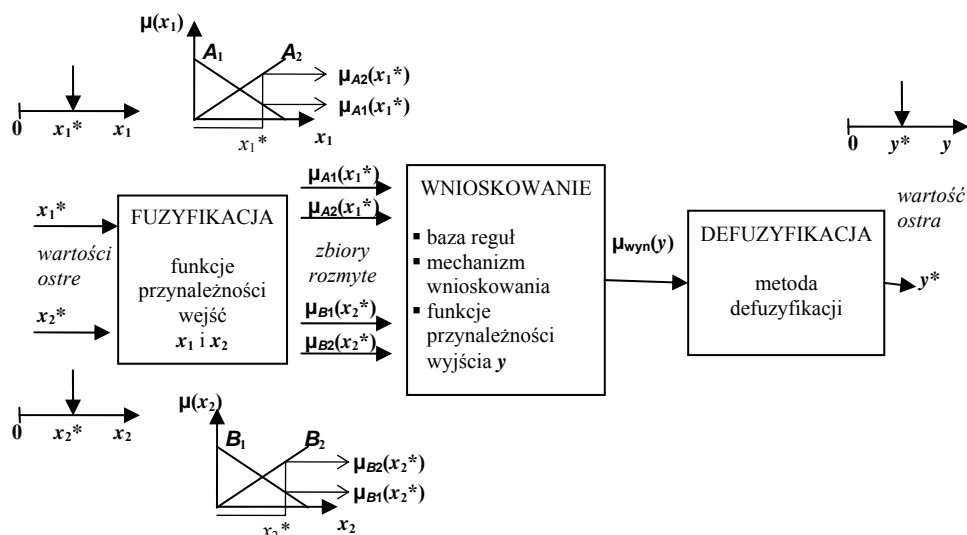
Relacje te zaprezentowano w postaci relacji logicznych zbiorów rozmytych przedstawiających możliwe zależności pomiędzy zdefiniowanymi lingwistycznymi wartościami wejść i wyjść, np.: dla przyjętych dwóch zmiennych wejściowych (x_1 i x_2) zdefiniowanych przez dwie wartości lingwistyczne (odpowiednio, A_1 i A_2 oraz B_1 i B_2) oraz zmiennej wyjściowej (y) zdefiniowanej poprzez trzy wartości lingwistyczne (odpowiednio, C_1 , C_2 i C_3), baza reguł może mieć postać

R_1 : jeżeli ($x_1=A_1$) oraz ($x_2=B_1$) to ($y=C_1$)

R_2 : jeżeli ($x_1=A_1$) oraz ($x_2=B_2$) to ($y=C_2$)

R_3 : jeżeli ($x_1=A_2$) oraz ($x_2=B_1$) to ($y=C_2$)

R_4 : jeżeli ($x_1=A_2$) oraz ($x_2=B_2$) to ($y=C_3$)



Ryc. 1. Schemat modelu rozmytego [7]

Fig. 1. The scheme of a fuzzy model [7]

Wnioskowanie składa się z trzech podstawowych etapów:

- 1) obliczenia stopnia spełnienia przesłanek poszczególnych reguł (w tym agregacja przesłanek złożonych, np. koniunkcja przesłanek prostych dotyczących poszczególnych wejść),
- 2) obliczenia stopnia aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł,
- 3) obliczenia końcowej wartości wyjścia na podstawie wszystkich reguł (akumulacja wyników z poszczególnych reguł).

Matematyczny zapis poszczególnych etapów dla przyjętego schematu modelu:

1. Obliczenie stopnia spełnienia przesłanek – stopnia spełnienia koniunkcji przesłanek prostych dotyczących x_1 i x_2

$$\mu_{A_i \cap B_j}(x_1^*, x_2^*) = T(\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*)) \quad (1)$$

gdzie:

$\mu_{A_i}(x_1^*)$ – stopień przynależności wartości x_1^* do zbioru rozmytego A_i ,

T – operator t -normy (najczęściej stosowane: MIN i PROD).

$$\text{MIN: } \mu_{A_i \cap B_j}(x_1^*, x_2^*) = \min(\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*)) \quad (2)$$

$$\text{PROD: } \mu_{A_i \cap B_j}(x_1^*, x_2^*) = \mu_{A_i}(x_1^*) \cdot \mu_{B_j}(x_2^*) \quad (3)$$

Ocena 4 przesłanek bazy reguł dla przyjętej struktury modelu

$$R_1: (x_1=A_1) \text{ oraz } (x_2=B_1) \Rightarrow \mu_{A_1 \cap B_1}(x_1^*, x_2^*) = \min(\mu_{A_1}(x_1^*), \mu_{B_1}(x_2^*))$$

$$R_2: (x_1=A_1) \text{ oraz } (x_2=B_2) \Rightarrow \mu_{A_1 \cap B_2}(x_1^*, x_2^*) = \min(\mu_{A_1}(x_1^*), \mu_{B_2}(x_2^*))$$

$$R_3: (x_1=A_2) \text{ oraz } (x_2=B_1) \Rightarrow \mu_{A_2 \cap B_1}(x_1^*, x_2^*) = \min(\mu_{A_2}(x_1^*), \mu_{B_1}(x_2^*))$$

$$R_4: (x_1=A_2) \text{ oraz } (x_2=B_2) \Rightarrow \mu_{A_2 \cap B_2}(x_1^*, x_2^*) = \min(\mu_{A_2}(x_1^*), \mu_{B_2}(x_2^*))$$

2. Obliczenie stopnia aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł (R_k) jest równoznaczne z określeniem stopnia przynależności $\mu_{R_k}(x_1^*, x_2^*, y)$ relacji będących wynikiem operacji złożenia zbioru rozmytego (wyniku przesłanki) i relacji rozmytej (reguły). Stosując implikację Mamdaniego (MIN), wynik można obliczyć jako

$$\mu_{R_k}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_i \cap B_j}(x_1^*, x_2^*), \mu_{R_k}(x_1, x_2, y)) \quad (4)$$

$$\mu_{R_k}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*), \mu_{C_{akt}(R_k)}(y)) \quad (5)$$

gdzie $C_{akt}(R_k)$ to aktywowany zbiór rozmyty w k -tej regule – obecny w konkluzji k -tej reguły.

Ocena stopnia spełnienia konkluzji bazy reguł dla przyjętej struktury modelu

$$R_1: \text{ jeżeli } (x_1=A_1) \text{ oraz } (x_2=B_1) \text{ to } (y=C_1) \\ \Rightarrow \mu_{R_1}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_1}(x_1^*), \mu_{B_1}(x_2^*), \mu_{C_1}(y))$$

$$R_2: \text{ jeżeli } (x_1=A_1) \text{ oraz } (x_2=B_2) \text{ to } (y=C_2) \\ \Rightarrow \mu_{R_2}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_1}(x_1^*), \mu_{B_2}(x_2^*), \mu_{C_2}(y))$$

$$R_3: \text{ jeżeli } (x_1=A_2) \text{ oraz } (x_2=B_1) \text{ to } (y=C_2) \\ \Rightarrow \mu_{R_3}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_2}(x_1^*), \mu_{B_1}(x_2^*), \mu_{C_2}(y))$$

$$R_4: \text{ jeżeli } (x_1=A_2) \text{ oraz } (x_2=B_2) \text{ to } (y=C_3) \\ \Rightarrow \mu_{R_4}(x_1^*, x_2^*, y) = \min(\mu_{A_2}(x_1^*), \mu_{B_2}(x_2^*), \mu_{C_3}(y))$$

3. Obliczenia końcowej wartości wyjścia na podstawie wszystkich reguł – tzw. akumulacja, przeprowadzona może być operatorem MAX (lub innym operatorem typu s -normy).

$$\mu_{C^*}(y) = \max_k (\min(\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*), \mu_{C_{akt}(R_k)}(y))) \quad (6)$$

Ostatecznie w wyniku wnioskowania otrzymujemy zbiór rozmyty C^* o wartościach przynależności $\mu_{c^*}(y)$. Na podstawie C^* i $\mu_{c^*}(y)$ wyliczana jest następnie wartość ostra zmiennej wyjściowej y^* – jest to tzw. proces defuzyfikacji (wyostrzania). Często stosowaną metodą jest metoda środka ciężkości

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_{c^*}(y) dy}{\int \mu_{c^*}(y) dy} \quad (7)$$

3. Modelowanie zmienności współczynników wodochłonności z zastosowaniem rozmytych modeli Mamdaniego

Na zapotrzebowanie na wodę gospodarki narodowej mają wpływ dwa podstawowe czynniki: wielkość/poziom produkcji oraz jej wodochłonność. Jedną z metod umożliwiających modelowanie poziomu wykorzystania wody przez gospodarke (jako czynnika produkcji) jest modelowanie oparte na rozszerzonym modelu *input-output*, np. modelu Leontiewa ([1, 2, 8, 9] i in.). Prognozowanie poborów wody w takim podejściu wymaga wyznaczenia prognoz współczynników zużycia wody (współczynników wodochłonności) dla poszczególnych sektorów gospodarki.

Współczynnik zużycia wód (współczynnik wodochłonności) wyraża zużycie wód w przeliczeniu na jednostkę pieniężną produkcji

$$b_j = \frac{Z_j}{x_j} \quad (8)$$

gdzie:

- Z_j – zużycie wody w j -tym sektorze gospodarki,
- x_j – produkcja globalna j -tego sektora gospodarki.

Ze względu na fakt, że większość danych statystycznych dotyczących zmiennych (nakłady inwestycyjne, prognoza rozwoju sektorów gospodarki) jest dostępnych na poziomie głównych sektorów gospodarki, przyjęto podział gospodarki na następujące sektory (działy wg Polskiej Klasyfikacji Działalności PKD):

- 1) Rolnictwo (A),
- 2) Rybactwo (B),
- 3) Górnictwo (C),
- 4) Przetwórstwo przemysłowe (D),
- 5) Energetyka (E-en.),
- 6) Pobór wód (E-pob.),
- 7) Pozostałe sektory (F-O).

Na podstawie analizy danych historycznych przyjęto, że do modeli dynamiki wodochłonności (osobno wód podziemnych i powierzchniowych) poszczególnych sektorów gospodarki będą używane dwie zmienne – dynamika produkcji globalnej oraz dynamika nakładów inwestycyjnych w tych sektorach. Wyznaczono i zestawiono w tabl. 1 histo-

ryczne wartości dynamiki (względnej zmiany w stosunku do roku poprzedniego) produkcji globalnej (P), nakładów inwestycyjnych (N), zużycia wód powierzchniowych (W_{pw}) i podziemnych (W_{pd}).

Tablica 1

Zmienność (w stosunku do roku poprzedniego) produkcji globalnej P , nakładów inwestycyjnych N i wodochłonności wód powierzchniowych W_{pw} oraz podziemnych W_{pd} w poszczególnych sektorach gospodarki w latach 1993–2004

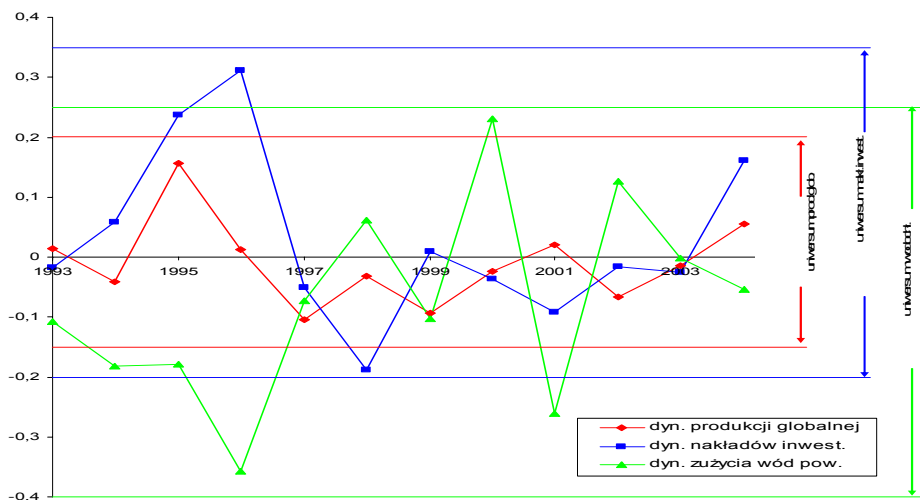
Sektor	Zmien- -na	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	P	0,015	-0,041	0,157	0,012	-0,105	-0,032	-0,093	-0,023	0,021	-0,066	-0,014	0,056
A	N	-0,017	0,058	0,237	0,311	-0,051	-0,188	0,009	-0,037	-0,092	-0,016	-0,025	0,161
	W_{pw}	-0,108	-0,181	-0,178	-0,357	-0,072	0,062	-0,102	0,231	-0,261	0,126	-0,001	-0,054
	P	-0,297	-0,014	-0,171	0,041	0,011	-0,104	0,047	-0,176	-0,253	-0,344	0,283	-0,203
B	N	0,802	-0,544	-0,688	1,632	-0,218	0,242	0,305	-0,087	-0,280	-0,233	-0,042	0,562
	W_{pw}	0,460	-0,050	0,147	-0,087	0,040	0,017	0,027	0,210	0,339	0,451	-0,120	0,331
	P	0,037	0,143	-0,029	-0,019	0,042	-0,150	-0,043	-0,006	-0,041	-0,014	-0,018	0,183
C	N	-0,062	0,121	-0,053	-0,060	-0,017	0,022	-0,004	-0,215	0,183	-0,046	-0,014	0,059
	W_{pw}	-0,053	-0,123	0,066	-0,130	-0,127	-0,489	-0,032	-0,031	-0,152	-0,132	0,094	-0,420
	W_{pd}	-0,306	-0,129	0,228	0,031	-0,171	-0,347	0,053	-0,009	-0,049	0,388	-0,387	-0,254
	P	0,031	0,105	0,055	0,049	0,093	0,025	0,011	0,063	-0,034	-0,005	0,104	0,152
D	N	-0,125	0,355	0,142	0,254	0,179	0,152	-0,077	-0,113	-0,134	-0,015	0,117	0,134
	W_{pw}	-0,137	-0,118	-0,050	-0,104	-0,129	-0,112	-0,142	-0,056	-0,152	0,002	-0,416	0,412
	W_{pd}	-0,110	-0,136	-0,119	-0,070	-0,079	-0,154	-0,126	-0,171	-0,092	-0,039	-0,112	-0,138
	P	-0,111	0,007	0,000	-0,012	0,023	-0,007	0,115	0,045	0,182	0,054	0,044	-0,025
E-en.	N	0,141	0,097	0,223	0,135	-0,001	-0,039	-0,009	-0,203	0,149	-0,005	-0,127	-0,061
	W_{pw}	0,116	-0,004	0,047	0,046	-0,032	-0,003	-0,128	-0,066	-0,159	-0,026	-0,015	0,029
	W_{pd}	0,065	-0,084	-0,021	-0,071	0,013	-0,054	0,046	-0,016	-0,193	-0,090	0,006	0,038
	P	0,144	0,046	-0,189	0,028	0,068	0,037	0,105	0,222	0,041	0,136	0,012	-0,035
E-pob.	N	0,170	0,083	-0,066	0,026	0,027	-0,145	-0,077	-0,081	-0,051	-0,126	-0,024	0,220
	W_{pw}	-0,161	-0,128	0,111	-0,077	-0,108	-0,094	-0,127	-0,222	-0,120	-0,178	-0,021	-0,019
	W_{pd}	-0,149	-0,060	0,213	-0,003	-0,123	-0,069	0,078	-0,178	-0,078	-0,117	0,005	0,006
	P	0,025	0,009	0,127	0,122	0,121	0,111	0,090	0,096	0,032	0,023	0,011	0,025
F-O	N	0,004	0,012	0,148	0,189	0,309	0,197	0,125	0,076	-0,116	-0,137	-0,026	0,043
	W_{pw}	0,853	0,356	1,731	-0,443	-0,340	-0,513	0,422	0,001	-0,145	0,043	0,054	-0,010
	W_{pd}	-0,035	0,007	-0,150	-0,184	-0,094	-0,175	-0,073	-0,202	-0,123	-0,111	0,012	0,001

Do modelowania zmienności współczynników zużycia wód wybrano modele stosujące wnioskowanie rozmyte w architekturze Mamdaniego. Każdą ze zmiennych opisano przez 5 wartości lingwistycznych, którym przypisano odpowiednie zbiory rozmyte o funkcjach przynależności typu gaussowskiego. Zastosowano mechanizm inferencji MAX-MIN i metodę defuzyfikacji – metodę środka ciężkości.

Prace obejmowały budowę modeli wodochłonności wód powierzchniowych oraz wód podziemnych dla poszczególnych sektorów – odpowiednio, 7 i 5 modeli. Zakres prac nad każdym z 12 modeli obejmował: przygotowanie zmiennych, budowę wstępnej struktury modelu oraz strojenie modelu.

Pierwsze zadanie, obejmujące przygotowanie zmiennych, zostało wykonane na podstawie analizy wartości historycznych (przedstawionych w tabl. 1). Dla każdej ze zmiennych (dynamika produkcji, nakładów i wodochłonności) wyznaczono uniwersum zmiennej. Uniwersum zmiennej x jest wyznaczane na podstawie przedziału zmienności obserwowanej.

nego w danych historycznych – jako $\langle \min(x), \max(x) \rangle$. Poniżej zostanie przedstawiony przebieg prac nad tworzeniem modelu zmienności wodochłonności sektora (A) rolnictwo.



Ryc. 2. Dane historyczne – dynamika produkcji globalnej, nakładów inwestycyjnych i wodochłonności wód powierzchniowych w sektorze (A) rolnictwo w latach 1993–2004. Definiowanie uniwersów zmiennych na podstawie przedziału zmienności historycznej

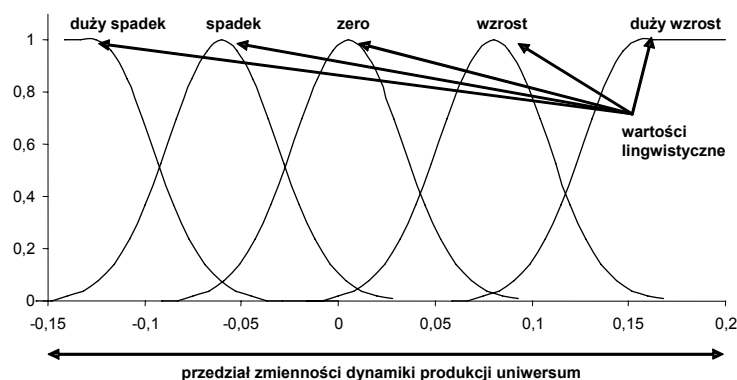
Fig. 2. Observed data – dynamics of gross output, investment expenditures and surface water use in Agriculture sector in 1993–2004. The definition of variables universes on the basis of a range of observed variation

Uniwersa dzielono na 5 zbiorów rozmytych i przypisywano im odpowiednie wartości lingwistyczne. Zmienne zwykle miały wartości od ok. $-0,5$ do ok. $0,5$ i przyjmowano następujący zmienne lingwistyczne – „duży spadek”, „spadek”, „zero”, „wzrost”, „duży wzrost”. Uniwersum było dzielone równomiernie, ale utrzymywano układ zmiennych, który zapewniał, że zmienne „duży spadek” i „spadek” miały ujemne jądra i w większości ujemne nośniki, zmienna „zero” miała jądro w zerze, a zmienne „wzrost” i „duży wzrost” – dodatnie jądra i znaczne części nośników. Na rycinach 3–5 przedstawiono przygotowane w ten sposób zmienne dla sektora (A) rolnictwo. Zastosowano funkcje przynależności typu gaussowskiego, testowane były również funkcje trójkątne, jednak lepsze dopasowanie modeli (w dalszym opisanym procesie strojenia modeli) osiągnięto dla funkcji gaussowskich – i z tego powodu ostatecznie wybrano tego typu funkcje do modelowania. W programie MATLAB funkcje przynależności typu gaussowskiego są definiowane jako

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

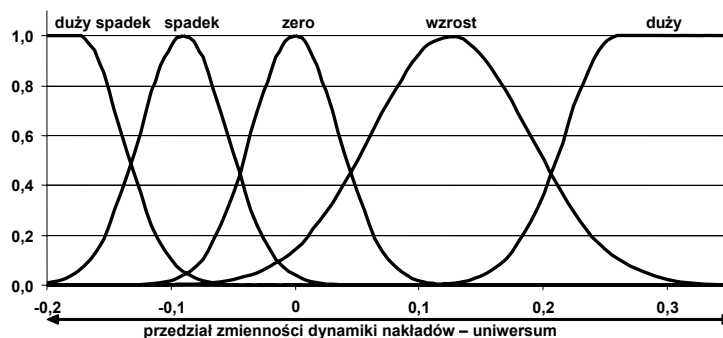
gdzie: σ i c to parametry funkcji.

Stosowano dwa rodzaje funkcji przynależności – funkcje symetryczne o dwóch parametrach dla wartości lingwistycznych „środkowych”, takich jak „spadek”, „zero”, „wzrost” oraz funkcje niesymetryczne o czterech parametrach – o różnych parametrach σ , c dla prawego i lewego ramienia funkcji dla opisanie wartości skrajnych – „duży spadek” i „duży wzrost”.



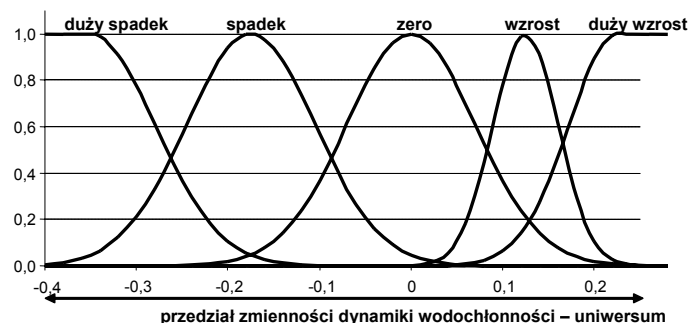
Ryc. 3. Zdefiniowanie zmiennej „dynamika produkcji globalnej” (uniwersum, wartości lingwistyczne, funkcje przynależności) dla potrzeb modelu rozmytego, sektor (A) rolnictwo

Fig. 3. The definition of the variable – gross output dynamics (an universe, linguistic values, membership functions) for purposes of a fuzzy model, Agriculture sector



Ryc. 4. Zdefiniowanie zmiennej „dynamika nakładów inwestycyjnych”, sektor (A) rolnictwo

Fig. 4. The definition of dynamics of investment expenditures variable in Agriculture sector

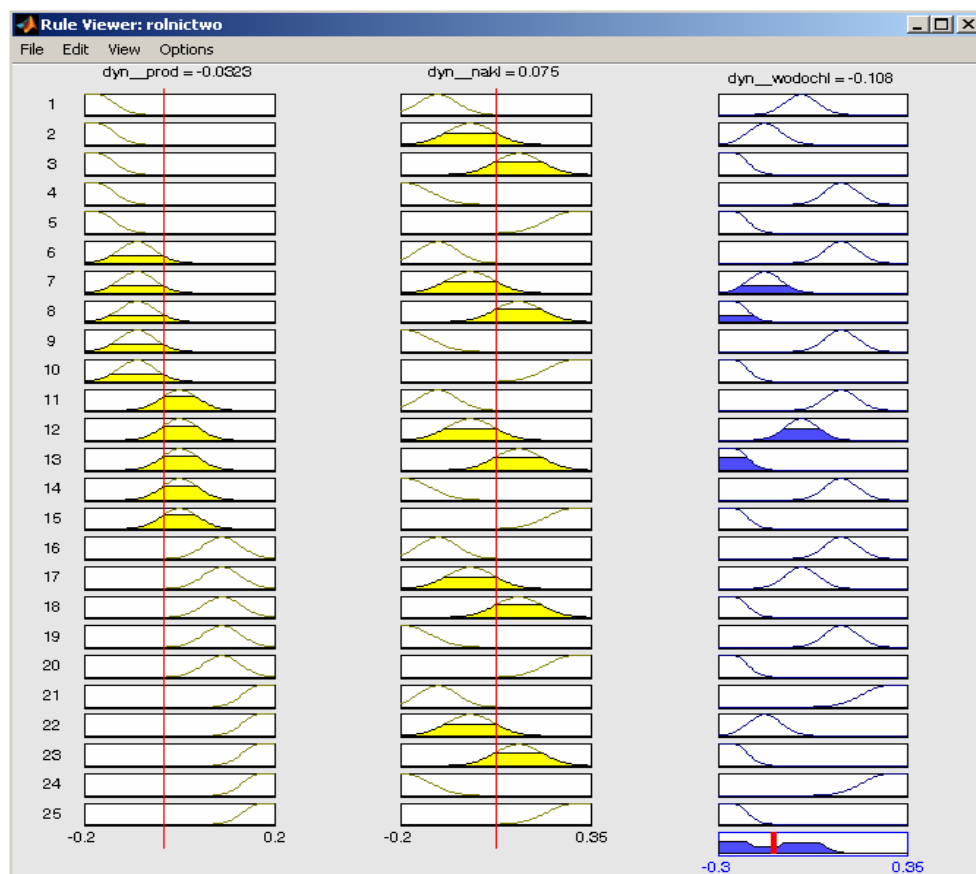


Ryc. 5. Zdefiniowanie zmiennej „dynamika wodochłonności”, sektor (A) rolnictwo

Fig. 5. The definition of dynamics of water use variable in Agriculture sector

Następnie tworzono bazę reguł opisujących relacje pomiędzy poszczególnymi wartościami zmiennych, tzn. opisujących zmienność wodochłonności w zależności od zmian w produkcji globalnej i w nakładach inwestycyjnych. Wiedzę na temat tego typu zależności czerpano z analizy danych historycznych. Schemat bazy reguł dla sektora (A) rolnictwo

- 1) JEŻELI dyn_prod=duży_spadek ORAZ dyn_nakł=duży_spadek TO dyn_wodochł=duży_spadek
- 2) JEŻELI dyn_prod=duży_spadek ORAZ dyn_nakł=spadek TO dyn_wodochł=duży_spadek
- 3) JEŻELI dyn_prod=duży_spadek ORAZ dyn_nakł=zero TO dyn_wodochł=duży_spadek
- 4) JEŻELI dyn_prod=duży_spadek ORAZ dyn_nakł=wzrost TO dyn_wodochł=spadek
- 5) JEŻELI dyn_prod=duży_spadek ORAZ dyn_nakł=duży_wzrost TO dyn_wodochł=spadek
- 6) JEŻELI dyn_prod=spadek ORAZ dyn_nakł=duży_spadek TO dyn_wodochł=duży_spadek
- 7) JEŻELI dyn_prod=spadek ORAZ dyn_nakł=spadek TO dyn_wodochł=spadek
- 8) JEŻELI dyn_prod=spadek ORAZ dyn_nakł=zero TO dyn_wodochł=spadek
- 9) JEŻELI dyn_prod=spadek ORAZ dyn_nakł=wzrost TO dyn_wodochł=spadek
- 10) JEŻELI dyn_prod=spadek ORAZ dyn_nakł=duży_wzrost TO dyn_wodochł=zero
- 11) JEŻELI dyn_prod= zero ORAZ dyn_nakł=duży_spadek TO dyn_wodochł=spadek
- 12) JEŻELI dyn_prod= zero ORAZ dyn_nakł=spadek TO dyn_wodochł=spadek
- 13) JEŻELI dyn_prod= zero ORAZ dyn_nakł=zero TO dyn_wodochł=zero
- 14) JEŻELI dyn_prod= zero ORAZ dyn_nakł=wzrost TO dyn_wodochł=zero
- 15) JEŻELI dyn_prod= zero ORAZ dyn_nakł=duży_wzrost TO dyn_wodochł=zero
- 16) JEŻELI dyn_prod=wzrost ORAZ dyn_nakł=duży_spadek TO dyn_wodochł=spadek
- 17) JEŻELI dyn_prod=wzrost ORAZ dyn_nakł=spadek TO dyn_wodochł=zero
- 18) JEŻELI dyn_prod=wzrost ORAZ dyn_nakł=zero TO dyn_wodochł=zero
- 19) JEŻELI dyn_prod=wzrost ORAZ dyn_nakł=wzrost TO dyn_wodochł=zero
- 20) JEŻELI dyn_prod=wzrost ORAZ dyn_nakł=duży_wzrost TO dyn_wodochł=wzrost
- 21) JEŻELI dyn_prod=duży_wzrost ORAZ dyn_nakł=duży_spadek TO dyn_wodochł=zero
- 22) JEŻELI dyn_prod=duży_wzrost ORAZ dyn_nakł=spadek TO dyn_wodochł=zero
- 23) JEŻELI dyn_prod=duży_wzrost ORAZ dyn_nakł=zero TO dyn_wodochł=wzrost
- 24) JEŻELI dyn_prod=duży_wzrost ORAZ dyn_nakł=wzrost TO dyn_wodochł=wzrost
- 25) JEŻELI dyn_prod=duży_wzrost ORAZ dyn_nakł=duży_wzrost TO dyn_wodochł=duży_wzrost



Ryc. 6. Przykładowe obliczenia modelu dynamiki wodochłonności w sektorze (A) rolnictwo

Fig. 6. Example calculations of the model of water use dynamics in Agriculture sector

Kolejnym etapem budowy modelu Mamdaniego było zdefiniowanie zasad wnioskowania – wytypowano operatory czytania złożonych przesłanek oraz metod agregacji i defuzyfikacji. Wybrano następujące zasady działania:

- w przesłankach reguł zawarto koniunkcję – iloczyn dwóch zbiorów rozmytych; jako operator takiego działania przyjęto MIN, czyli spełnienie całej przesłanki (przynależność do przesłanki) będzie obliczane jako minimum z przynależności do poszczególnych składowych wg wzoru (2),
- jako operator implikacji – wyznaczający przynależność do rozmytego zbioru wynikowego – wybrany został operator MIN wg wzoru (5),
- ponieważ każde uruchomienie modelu (zadanie wartości ostrych zmiennych wejściowych) może uruchomić kilka reguł i w efekcie otrzymujemy kilka wynikowych zbiorów rozmytych – zbiory te są następnie sumowane, a operatorem realizującym akumulację jest MAX wg wzoru (6),

d) w wyniku działania wnioskowania rozmytego otrzymuje się zbiór rozmyty, na podstawie którego wyliczana jest następnie wartość ostra – do wyostrania wybrano metodę CENTROID, polegającą na obliczeniu środka ciężkości zbioru wg wzoru (7).

Schemat działania tak zdefiniowanego modelu Mamdaniego zmienności wodochłonności dla sektora (A) rolnictwo dla przykładowych wartości wejść (dynamika produkcji w wysokości $-3,23\%$ i dynamika nakładów na poziomie $7,5\%$) został zaprezentowany na ryc. 6. Wartości ostre wejściowe przedstawione są w postaci pionowych linii.

Zadano następujące wartości zmiennych, dynamika produkcji globalnej $dyn_prod = -3,2\%$ oraz dynamika nakładów inwestycyjnych $dyn_nakł = 7,5\%$. Każda z tych wartości przynależy do dwóch zbiorów rozmytych – dyn_prod jest przynależna do zbioru „spadek” i „zero”, a $dyn_nakł$ do zbiorów „zero” i „wzrost” (zbiory te zaznaczone są na schemacie kolorem jasnoszarym). Tym samym w procesie fuzyfikacji przekształcono ostre wejścia na zbiory rozmyte. Każda z dwóch zmiennych wejściowych jest opisywana przez 5 wartości lingwistycznych.

Tablica 2

Zmienne, wartości lingwistyczne i parametry funkcji przynależności – sektor (A) rolnictwo

Zmienna		Wartości lingwistyczne		Parametry funkcji przynależności	
nazwa	symbol	nazwa	symbol	σ	c
Dynamika produkcji globalnej	dyn_prod	duży_spadek	PDS	0,0891	-0,2165
	P	spadek	PS	0,0247	-0,1247
		zero	PZ	0,0273	-0,0702
		wzrost	PW	0,0342	0,0019
		duży_wzrost	PDW	0,0355	0,0811
Dynamika nakładów inwestycyjnych	$dyn_nakł$	duży_spadek	NDS	0,0248	0,1525
	N	spadek	NS	0,0950	0,2519
		zero	NZ	0,0907	-0,4702
		wzrost	NW	0,0907	-0,3557
		duży_wzrost	NDW	0,0781	-0,1571
Dynamika wodochłonności	dyn_wod	duży_spadek	WDS	0,0606	0,0037
	W	spadek	WS	0,0474	0,1290
		zero	WZ	0,0423	0,2359
		wzrost	WW	0,0907	0,4040
		duży_wzrost	WDW	0,1670	-0,5100
				0,0475	-0,3070
				0,0705	-0,1670
				0,0653	-0,0019
				0,0427	0,1290
				0,0557	0,2455
				0,1710	0,5485

Zbiory rozmyte obrazujące poszczególne wartości lingwistyczne mają funkcje przynależności typu gaussowskiego, która określona jest wzorem (1), a więc rozmywanie wartości ostrych odbywa się przez obliczenie stopnia przynależności tych wartości ostrych do przyjętych wartości lingwistycznych.

$$\begin{aligned}
 P = -3,2\% \quad P = PS \quad \text{o stopniu przynależności} \\
 \mu_{PS}(-0,032) = f_{PS}(-0,032, \sigma_{PS}, c_{PS}) = f_{PS}(-0,032; 0,0273; -0,0702) = 0,38 \\
 P = -3,2\% \quad P = PZ \quad \text{o } \mu_{PZ}(-0,032) = f_{PZ}(-0,032; 0,0342; 0,0019) = 0,61 \\
 N = 7,5\% \quad N = NZ \quad \text{o } \mu_{NZ}(0,075) = f_{NZ}(0,075; 0,0606; 0,0037) = 0,50 \\
 N = 7,5\% \quad N = NW \quad \text{o } \mu_{NW}(0,075) = f_{NW}(0,075; 0,0474; 0,129) = 0,52
 \end{aligned}$$

Taki zestaw danych wejściowych uruchamia 4 reguły

- reguła 1) JEŻELI dyn_prod=„spadek” ORAZ dyn_nakł=„zero” TO dyn_wodochł=„spadek”
 reguła 2) JEŻELI dyn_prod=„spadek” ORAZ dyn_nakł=„wzrost” TO dyn_wodochł=„duży spadek”
 reguła 3) JEŻELI dyn_prod=„zero” ORAZ dyn_nakł=„zero” TO dyn_wodochł=„spadek”
 reguła 4) JEŻELI dyn_prod=„zero” ORAZ dyn_nakł=„wzrost” TO dyn_wodochł=„duży spadek”

wg skróconych nazw zmiennych

- reguła 1) JEŻELI P=PS ORAZ N=NZ TO W=WS
 reguła 2) JEŻELI P=PS ORAZ N=NW TO W=WDS
 reguła 3) JEŻELI P=PZ ORAZ N=NZ TO W=WS
 reguła 4) JEŻELI P=PZ ORAZ N=NW TO W=WDS

Zarówno przesłanki, jak i konkluzje są spełnione w pewnym stopniu, co zobrazowano na ryc. 6 przez wypełnienie kolorem tylko części zbioru rozmytego – wysokość wypełnienia to wartość stopnia przynależności. Ponieważ zastosowanym operatorem koniunkcji jest operator MIN, to stopień przynależności do zbioru wynikowego znajduje się na poziomie mniejszej z dwóch wartości przynależności do wybranych w przesłance zbioru dyn_prod i zbioru dyn_nakł. Następnie po ocenie spełnienia przesłanki uruchamiany jest mechanizm implikacji i obliczany jest wynik – stopień spełnienia konkluzji. Zbiór końcowy obrazujący zmienność wodochłonności biorący pod uwagę 4 uruchomione reguły został obliczony jako suma 4 zbiorów wynikowych – zastosowany operator MAX określa stopień przynależności do tego zbioru jako najwyższe z obliczonych stopni przynależności w wynikach dla poszczególnych reguł.

Ocena stopni spełnienia przesłanek reguł

$$\begin{aligned}
 \text{reguła 1} \quad P=PS \text{ ORAZ } N=NZ \quad h_1 = \mu_{PS \cap NZ}(-0,032; 0,075) \\
 \mu_{PS \cap NZ}(-0,032; 0,075) = \min(\mu_{PS}(-0,032), \mu_{NZ}(0,075)) = \min(0,38; 0,50) = 0,38 \\
 \text{reguła 2} \quad P=PS \text{ ORAZ } N=NW \quad h_2 = \mu_{PS \cap NW}(-0,032; 0,075) \\
 \mu_{PS \cap NW}(-0,032; 0,075) = \min(\mu_{PS}(-0,032), \mu_{NW}(0,075)) = \min(0,38; 0,52) = 0,38 \\
 \text{reguła 3} \quad P=PZ \text{ ORAZ } N=NZ \quad h_3 = \mu_{PZ \cap NZ}(-0,032; 0,075) \\
 \mu_{PZ \cap NZ}(-0,032; 0,075) = \min(\mu_{PZ}(-0,032), \mu_{NZ}(0,075)) = \min(0,61; 0,50) = 0,50 \\
 \text{reguła 4} \quad P=PZ \text{ ORAZ } N=NW \quad h_4 = \mu_{PZ \cap NW}(-0,032; 0,075) \\
 \mu_{PZ \cap NW}(-0,032; 0,075) = \min(\mu_{PZ}(-0,032), \mu_{NW}(0,075)) = \min(0,61; 0,52) = 0,52
 \end{aligned}$$

Ocena stopni spełnienia konkluzji reguł

reguła 1	JEŻELI $P=PS$ ORAZ $N=NZ$ TO $W=WS$ – stopień spełnienia konkluzji: $\mu_{PS \cap NZ \rightarrow WS}(-0,032; 0,075, WS) = \min(h_1, \mu_{WS}(W)) = 0,38$
reguła 2	JEŻELI $P=PS$ ORAZ $N=NW$ TO $W=WDS$ $\mu_{PS \cap NW \rightarrow WDS}(-0,032; 0,075, WDS) = \min(h_2, \mu_{WDS}(W)) = 0,38$
reguła 3	JEŻELI $P=PZ$ ORAZ $N=NZ$ TO $W=WS$ $\mu_{PZ \cap NZ \rightarrow WS}(-0,032; 0,075, WS) = \min(h_3, \mu_{WS}(W)) = 0,50$
reguła 4	JEŻELI $P=PZ$ ORAZ $N=NW$ TO $W=WDS$ $\mu_{PZ \cap NW \rightarrow WDS}(-0,032; 0,075, WDS) = \min(h_4, \mu_{WDS}(W)) = 0,52$

konkluzja wynikowa – uwzględniająca wyniki z wszystkich reguł jest obliczana wg wzoru (6) i stanowi sumę wyników z poszczególnych reguł

reguła 1	$W=WS^*$ o stopniu przynależności $\mu_{R_1}(W) = 0,38$
reguła 2	$W=WDS^*$ o stopniu przynależności $\mu_{R_2}(W) = 0,38$
reguła 3	$W=WS^*$ o stopniu przynależności $\mu_{R_3}(W) = 0,50$
reguła 4	$W=WDS^*$ o stopniu przynależności $\mu_{R_4}(W) = 0,52$

$$\mu_{W^*}(W) = \max_k(\mu_{W_{akt}(R_k)}(W))$$

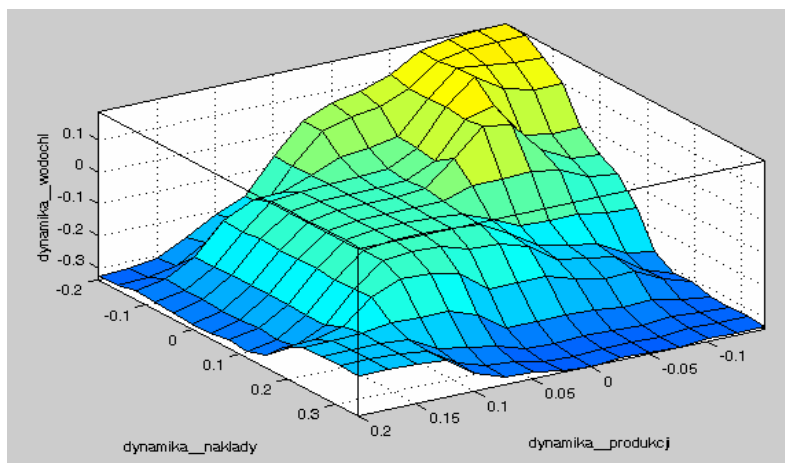
W tym przypadku będzie to zbiór rozmyty W^* będący sumą zbiorów WS^* i WDS^* (zbiory WS i WDS ograniczone stopniami przynależności, odpowiednio, 0,50 i 0,52) – zaznaczone na ryc. 6 ciemnoszarym kolorem.

Następnie za pomocą metody defuzyfikacji wyliczana jest wartość ostra. Do wyostżenia wybrano metodę środka ciężkości zbioru, która oblicza wg wzoru (7) środek ciężkości zbioru W^* i podaje odpowiadającą mu wielkość zmiennej na osi uniwersum. W odpowiedzi na ww. wartości danych wejściowych (-3,2%, 7,5%) wodochłonność spadnie o 10,8% ($\text{dyn_wodochl} = -0,108$).

Po zbudowaniu modelu, czyli po zdefiniowaniu i przygotowaniu zmiennych, zbudowaniu bazy relacji i doborze metod logicznych i matematycznych działania, model należy poddać strojeniu. Strojenie modeli prowadzone było metodą prób i błędów, z użyciem zbudowanego prostego modelu w programie Simulink obliczającego sumę kwadratów odchyłek pomiędzy wartościami historycznymi i wyznaczanymi na podstawie modelu. Strojenia modelu dokonywano, dążąc do minimalizacji ww. sumy kwadratów poprzez zmianę uniwersów, kształtu funkcji przynależności, modyfikację reguł oraz nadawanie wag poszczególnym regułom.

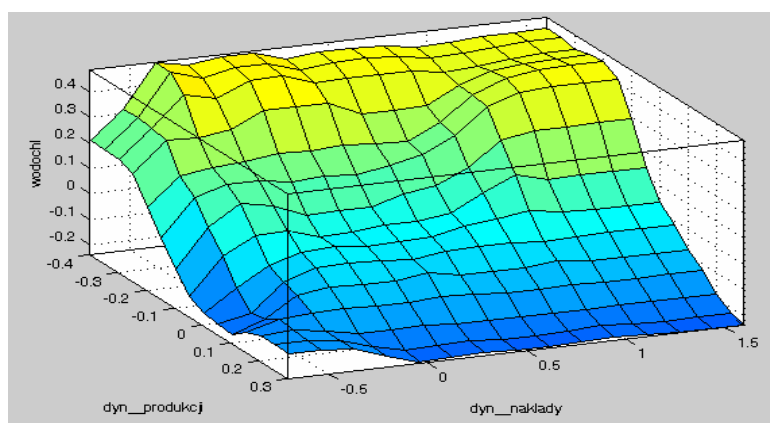
Poniżej przedstawiono oszacowane modele zmienności współczynnika wodochłonności wód powierzchniowych dla sektorów (A) rolnictwo i (B) rybactwo (przykładowe 2 z 12 estymowanych modeli).

W przypadku sektora (A) rolnictwo model opisuje zmienność wodochłonności w następujący sposób: wodochłonność spada o 25–35% przy wzroście produkcji rzędu 10–20% lub wzroście nakładów o 15–35%, oraz wodochłonność wzrasta o 10–15% przy spadku produkcji o 5–15% i jednoczesnym spadku nakładów inwestycyjnych o 5–20%.



Ryc. 7. Model dynamiki wodochłonności wód powierzchniowych w sektorze (A) rolnictwo

Fig. 7. The model of surface water use dynamics in Agriculture sector



Ryc. 8. Model dynamiki wodochłonności wód powierzchniowych w sektorze (B) rybactwo

Fig. 8. The model of surface water use dynamics in Fishing sector

W sektorze (B) rybactwo wysoki wzrost współczynnika wodochłonności powoduje głównie spadek produkcji niemal niezależnie od poziomu zmian w nakładach inwestycyjnych.

W podobny sposób można scharakteryzować zależności opisujące modele zmian współczynników wodochłonności wód powierzchniowych i podziemnych pozostałych sektorów. W modelach tych najczęściej zakładano:

- spadek wodochłonności przy wysokim wzroście dynamiki produkcji, co można interpretować jako pełniejsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych – sektor (C) (wody podziemne), sektor (D) (wody powierzchniowe i podziemne), sektor (E) energetyka (wody powierzchniowe i podziemne), sektor (E) pobór wód (wody powierzchniowe i podziemne), sektory (F-O) (wody podziemne),

- spadek wodochłonności przy wysokim wzroście nakładów, które w pewnym zakresie są także przeznaczane na racjonalizację technologii produkcji – sektor (C) (wody podziemne), sektor (D) (wody powierzchniowe i podziemne), sektor (E) energetyka (wody powierzchniowe i podziemne), sektor (E) pobór wód (wody powierzchniowe i podziemne), sektory (F-O) (wody powierzchniowe i podziemne),
- wzrost wodochłonności przy spadku dynamiki produkcji jest zauważalny we wszystkich modelach z wyjątkiem modelu współczynnika wód powierzchniowych sektora (C), który przy zdecydowanych spadkach w produkcji generuje równoczesne spadki we wodochłonności wód powierzchniowych.

4. Prognozowanie zmienności współczynników wodochłonności

Danymi wejściowymi do modeli są prognozy produkcji globalnej i dynamiki nakładów inwestycyjnych w sektorach. Dynamika produkcji globalnej została wyliczona modelem *input-output* Ghosha (model oparty na tablicach przepływów międzygałęziowych z 2000 r.) na podstawie prognozowanych wielkości wartości dodanej (zaczepniętych z sektorowych rządowych dokumentów i programów). Natomiast dynamika nakładów inwestycyjnych musi zostać zadana zewnątrz do modelu. Taka struktura modelu dotycząca danych wejściowych jest celowa, a jedna ze zmiennych jest zmienną sterującą modelowanym zjawiskiem – wodochłonnością sektorów. Taki układ pozwala na symulację strategii oddziaływania na sektory w celu wywołania pożądaných zmian wodochłonności. Wybrano zmienną w postaci nakładów inwestycyjnych, ponieważ wspieranie aktywności inwestycyjnej jest, obok opłat ekologicznych, najsilniejszym sposobem oddziaływania na poziom korzystania ze środowiska (w tym na wodochłonność).

Przeanalizowano wartości dynamiki nakładów inwestycyjnych w ostatnich latach. Wielkość ta wykazuje się dużą zmiennością i ma różne tendencje dla poszczególnych sektorów. W sektorach (A) rolnictwo i (B) rybactwo po latach niskich nakładów tendencja spadkowa się odwraca i prognozowany jest 5–6% wzrost nakładów, powodowany głównie dużymi środkami unijnymi kierowanymi do tych sektorów. W sektorze (C) górnictwo obserwuje się głównie tendencje zniżkowe w dynamice nakładów inwestycyjnych, ostatni 2004 r. przyniósł drobny wzrost, ale wynikało to głównie z dobrej koniunktury rynkowej, która niestety wygasa i przyniesie prawdopodobnie spadki w nakładach inwestycyjnych. Sektor (D) przetwórstwo przemysłowe i sektory grupy (F-O) są sektorami, które w latach 1993–2004 coraz więcej inwestowały, sektor (D) miał okres zniżkowy w latach 1999–2002, ale ostatnie lata 2003–2004 to znów dodatnia dynamika zarówno produkcji, jak i inwestycji, i tendencje te najprawdopodobniej utrzymają się w najbliższych latach. Natomiast sektory (F-O) po zniżkach w latach 2001–2003 dopiero w 2004 r. zanotowały wzrost nakładów, na razie trudno przesądzić czy będzie to trwała tendencja. Sektor energetyczny od 1997 r. inwestuje co roku coraz mniej (jedynie 2001 r. wzrost o 15% w stosunku do 2000 r.), ale biorąc pod uwagę korzystne prognozy rozwoju tego sektora, zawarte w „Polityce energetyki Polski do 2025 roku”, można założyć, że w najbliższych latach sektor będzie zwiększał wydatki na inwestycje. Sektor (E) pobór wód, podobnie jak energetyka, w ostatnich latach obniżał poziom nakładów inwestycyjnych, jednak 2004 r. przyniósł wzrost, a dodatkowo prognozowane są znaczące unijne dotacje inwestycyjne w tym sektorze, stąd można założyć, że będzie to trwała zmiana. Ostatecznie przyjęto następujące wartości dynamiki nakładów inwestycyjnych.

Tablica 3

Prognoza dynamiki produkcji globalnej i nakładów inwestycyjnych w sektorach gospodarki

Lp.	Sektor		Dynamika produkcji globalnej	Dynamika nakładów inwestycyjnych
1	Rolnictwo	(A)	3–4%	w latach 2005–2010 5% w latach 2011–2015 1,2%
2	Rybackstwo	(B)	4–5%	5%
3	Górnictwo	(C)	0–1%	0%
4	Przetw. przem.	(D)	5%	5%
5	Energetyka	(E-en.)	3%	1%
6	Pobór wód	(E-pob.)	2%	2%
7	Pozostałe	(F-O)	5%	1%

W wyniku modelowania, przy tak przyjętych wartościach dynamiki produkcji globalnej i dynamiki nakładów inwestycyjnych, otrzymano następujące prognozy współczynników wodochłonności – tabl. 4 i 5.

Tablica 4

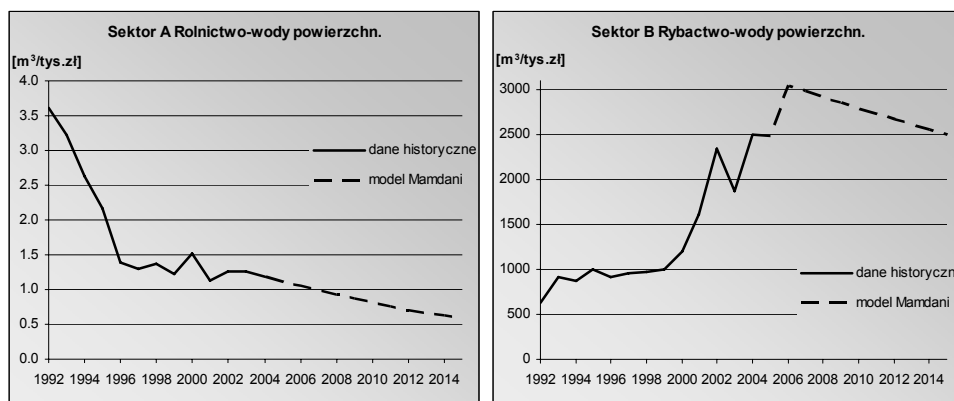
Prognozowane współczynniki wodochłonności wód powierzchniowych

Lp.	Sektor		Dane historyczne	Prognozowanie współczynników zużycia wód powierzchniowych [m ³ /tys. zł]			
				2004	2007	2010	2015
1	Rolnictwo	(A)	1,1919	0,9864	0,8113	0,5859	49%
2	Rybackstwo	(B)	2494,1772	2982,4407	2792,3537	2497,3492	100%
3	Górnictwo	(C)	0,3530	0,0906	0,0804	0,0633	18%
4	Przetw. przem.	(D)	0,8118	0,7867	0,5108	0,2483	31%
5	Energetyka	(E-en.)	110,4739	117,4366	106,5322	89,3927	81%
6	Pobór wód	(E-pob.)	100,0683	86,2777	71,0877	51,4637	51%
7	Pozostałe	(F-O)	0,0033	0,0034	0,0036	0,0039	116%

Tablica 5

Prognozowane współczynniki wodochłonności wód podziemnych

Lp.	Sektor		Dane historyczne	Prognozowanie współczynników zużycia wód powierzchniowych [m ³ /tys. zł]			
				2004	2007	2010	2015
1	Górnictwo	(A)	0,2483	0,1565	0,1447	0,1237	50%
2	Przetw. przem.	(D)	0,2438	0,1611	0,1125	0,0619	25%
3	Energetyka	(E-en.)	0,3994	0,4136	0,3597	0,2814	70%
4	Pobór wód	(E-pob.)	200,7053	193,2278	181,0069	162,2647	81%
5	Pozostałe	(F-O)	0,0385	0,0301	0,0208	0,0113	29%



Ryc. 9. Prognozy współczynników wodochłonności w sektorach (A) rolnictwo i (B) rybactwo

Fig. 9. Forecasts of water use coefficients in sectors: Agriculture and Fishing

Modele dynamiki współczynników wodochłonności prognozują na lata 2005–2015 spadki współczynników dla 10 z 12 sektorów. W poszczególnych sektorach otrzymano następujące wyniki modelowania zmienności współczynników wodochłonności wód powierzchniowych i podziemnych:

a) sektor (A) rolnictwo:

- zmiany historyczne współczynnika wodochłonności wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 spadek o 67% (w tym w latach 2000–2004 o 21%),
- model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 51%,
- wnioski: w sektorze rolnictwa w analizowanym historycznym okresie widoczne były znaczne tendencje spadkowe, wyraźne również w ostatnim 5-leciu, model wodochłonności zbudowany na podstawie tych danych prognozuje więc dalsze spadki, w najbliższych 11 latach spadki te wyniosą 51%. Model nie odzwierciedla zmian, jakie prawdopodobnie nastąpią w rolnictwie – eksperci prognozują bowiem wzrost wodochłonności, która jest bardzo niska jak na standardy europejskie;

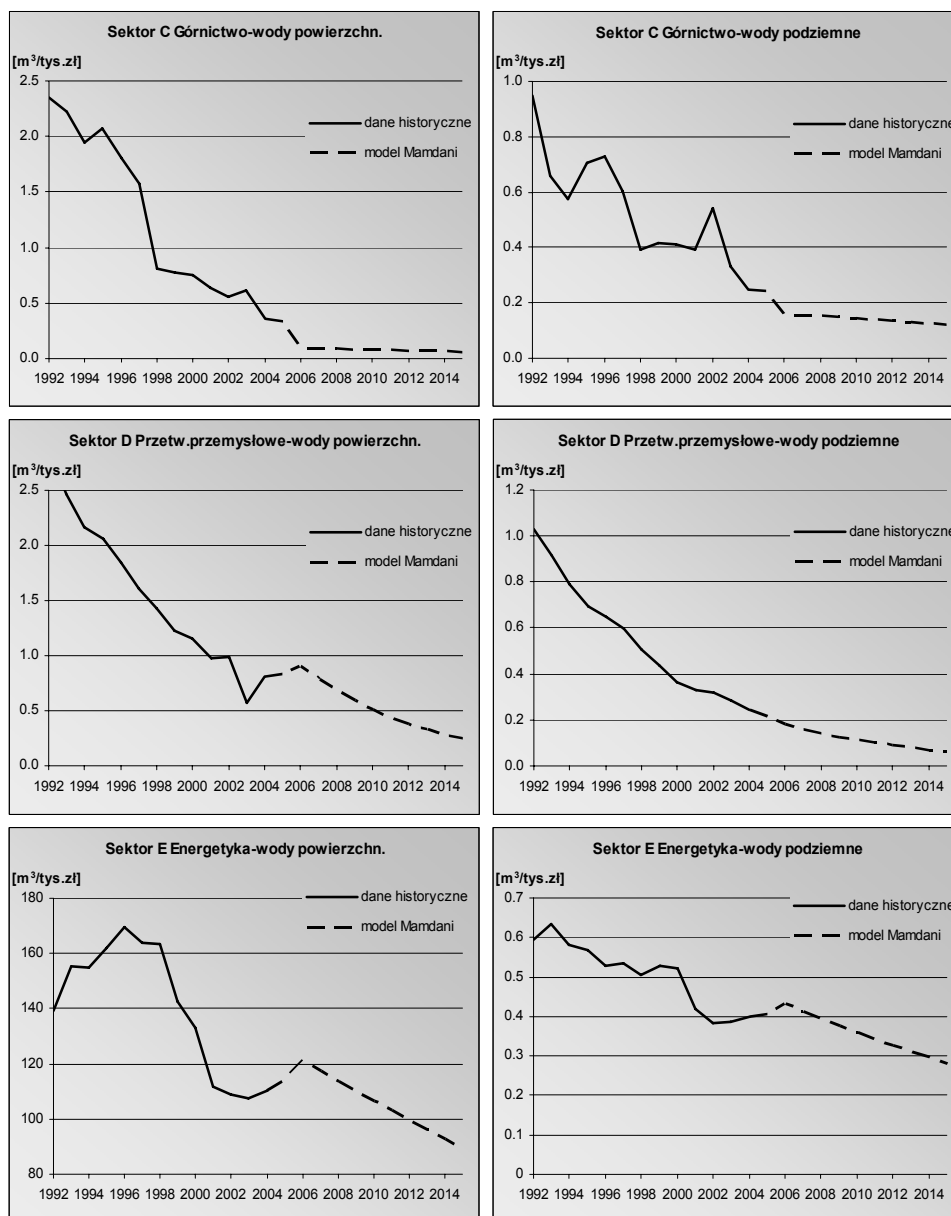
b) sektor (B) rybactwo:

- zmiany historyczne współczynnika wodochłonności wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 wzrost o 295% (w latach 2000–2004 o 107%),
- model: w 2015 r. bez zmian w stosunku do 2004 r. – 0%,
- wnioski: w tym sektorze istnieje wyraźny ciągły wzrost wodochłonności związany z jego rozwojem i zmianami w charakterze hodowli – rozwija się akwakultura pstrąga o wysokich wartościach wodochłonności, model wodochłonności zbudowany na podstawie tych danych powinien dawać prognozy dalszych wzrostów;

c) sektor (C) górnictwo:

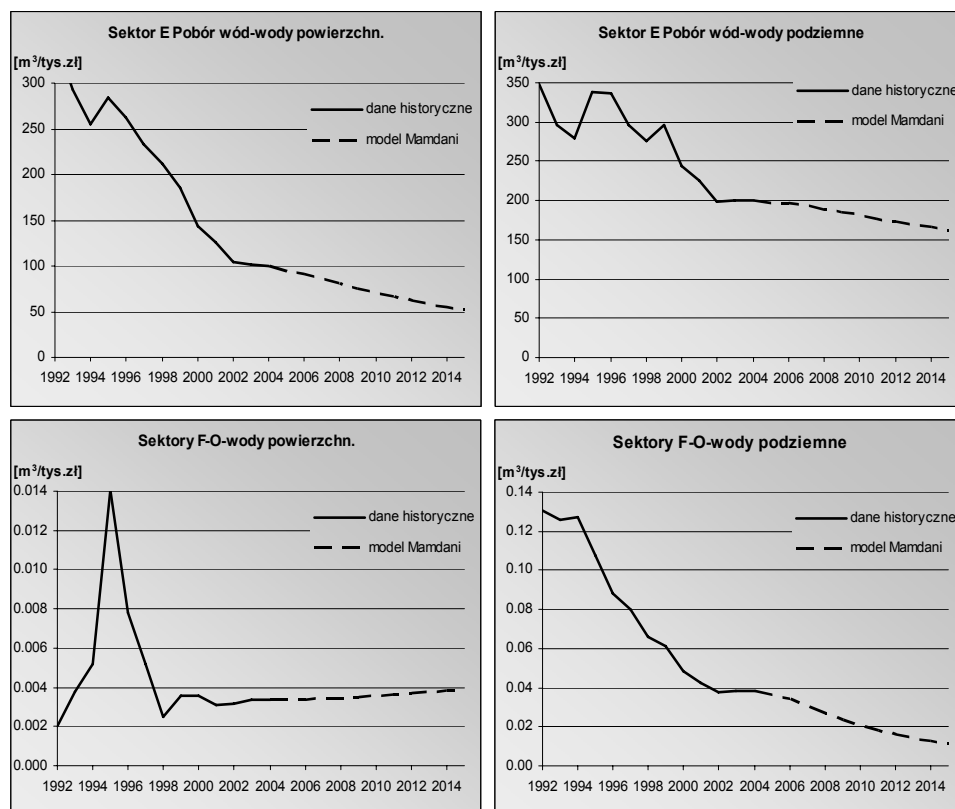
- zmiany współczynnika wodochłonności wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 spadek o 85% (w latach 2000–2004 o 53%),
- model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 82%,

- zmiany współczynnika wód podziemnych: w latach 1992–2004 spadek o 74% (w tym w latach 2000–2004 o 40%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 52%,
 - wnioski: w tym sektorze istnieje wyraźny spadek wodochłonności związany z regresją gospodarczą górnictwa, wyniki otrzymane w modelach mówiące o spadkach 80 i 50% w horyzoncie prognozy 11 lat są prawdopodobnie obciążone błędem (modele te nie są dobrze dopasowane), ale na pewno w najbliższych latach spodziewać się można dalszych spadków wodochłonności w tym sektorze;
- d) sektor (D) przetwórstwo przemysłowe:
- zmiany współczynnika wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 spadek o 72% (w latach 2000–2004 o 30%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 69%,
 - zmiany współczynnika wód podziemnych: w latach 1992–2004 spadek o 76% (w latach 2000–2004 o 33%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 75%;
- e) sektor (E) energetyka:
- zmiany współczynnika wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 spadek o 21% (w latach 2000–2004 o 17%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 19%,
 - zmiany współczynnika wód podziemnych: w latach 1992–2004 spadek o 33% (w latach 2000–2004 o 23%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 27%;
- f) sektor (E) pobór wód:
- zmiany współczynnika wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 spadek o 71% (w tym w latach 2000–2004 o 30%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 49%,
 - zmiany współczynnika wód podziemnych: w latach 1992–2004 spadek o 42% (w latach 2000–2004 o 18%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 10%,
 - otrzymano następującą wartość sumarycznego poboru (z wód powierzchniowych i podziemnych) – 1860 hm³/rok, a po przeliczeniu na 1 mieszkańca (przy prognozie ludności 37 626 tys. os.) 136 l/d. Ten sam wskaźnik obliczony dla 2004 r. wynosi 152 l/d, stąd odnosząc do tej wartości otrzymaną projekcję poboru tego sektora, wydaje się, że otrzymany wynik jest akceptowalny;
- g) sektory pozostałe (F):
- zmiany współczynnika wód powierzchniowych: w latach 1992–2004 wzrost o 63% (w latach 2000–2004 spadek o 7%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 16%,
 - zmiany współczynnika wód podziemnych: w latach 1992–2004 spadek o 71% (w latach 2000–2004 o 21%),
 - model: w 2015 r. spadek (w stosunku do 2004 r.) o 67%.



Ryc. 10. Prognozy współczynników wodochłonności w sektorach: (C) górnictwo, (D) przetwórstwo przemysłowe, (E-en.) energetyka

Fig. 10. Forecasts of water use coefficients in sectors: Mining, Manufacturing, Power industry



Ryc. 11. Prognozy współczynników wodochłonności w sektorze (E-pob.) pobór wód i w sektorach (F-O)

Fig. 11. Forecasts of water use coefficients in sectors: Water supply and group of sectors (F-O)

5. Podsumowanie i wnioski

Analiza danych historycznych dotyczących poborów wody, produkcji oraz współczynników zużycia wód dla potrzeb produkcji wykazuje dużą zmienność wodochłonności wszystkich sektorów gospodarki, której nie można pomijać przy budowie prognoz zapotrzebowania na wodę. Dane statystyczne, w tym najnowsze, pokazują, że w wielu sektorach wzrostowi produkcji towarzyszy spadek poborów wody. Podjęta próba modelowania wodochłonności poszczególnych sektorów gospodarki za pomocą technik wykorzystujących wnioskowanie rozmyte wypadła pozytywnie. Przyjęta technika wnioskowania potwierdza istnienie i daje możliwość zamodelowania zmienności współczynników wodochłonności w czasie. Zmiany wodochłonności mają dla większości sektorów gospodarki charakter spadkowy. Zastosowane techniki pozwoliły na sformułowanie modeli tych zmian oraz zbudowanie prognoz współczynników zużycia wód w poszczególnych sektorach. Prognozowane zmiany wodochłonności przedłużają istniejące dotychczas trendy spadkowe wodochłonności dla większości sektorów.

Literatura

- [1] Godyń I., *Metodyka sporządzania analiz ekonomicznych wykorzystywanych w zarządzaniu zasobami wodnymi*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [2] Godyń I., *Propozycja wykorzystania rozszerzonego modelu input-output w analizie ekonomicznej gospodarowania wodami*, Czasopismo Techniczne z. 10-Ś/2006, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006, 89-108.
- [3] Karkacier O., Goktolga Z.G., *Input-output analysis of energy use in agriculture*, Energy Conversion and Management 46 (2005), 1513-1521.
- [4] Kasprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001.
- [5] Lenzen M., Foran B., *An input-output analysis of Australian water usage*, Water Policy 3 (2001), 321-340
- [6] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów relacji i reguł*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [7] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [8] Plich A., *Budowa i zastosowanie wielosektorowych modeli ekonomiczno-ekologicznych*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2002.
- [9] Velazquez E., *An input-output model of water consumption: Analysing intersectoral water relationships in Andalusia*, Ecological Economics 56 (2006), 226-240.