

Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK

Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA RYZYKA AWARII SIECI WODOCIĄGOWEJ Z WYKORZYSTANIEM MODELOWANIA NEURONOWO – ROZMYTEGO

RISK ANALYSIS OF WATER SUPPLY NETWORK FAILURE
USING NEURO - FUZZY MODELING

Fuzzy systems are used primarily in the models where there is imprecise (uncertain) information database, while neural networks are capable of learning and making the new rules of inference on the basis of the gained knowledge. neuro-fuzzy models (NR) combine characteristics of both fuzzy modelling and neural systems. The aim of the work is to present a proposition to apply NR (such as ANFIS) in the risk analysis of water supply network failure. The paper presents the principles of fuzzy and neuro-fuzzy risk analysis. The model of risk analysis for water supply system failure using Sugeno fuzzy model adopted as the neural network model, has been proposed. The application example is presented using Matlab software (Fuzzy toolbox).

1. Wprowadzenie

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) składa się z powiązanych ze sobą funkcjonalnie podsystemów, stanowiących integralną całość, co umożliwia dostarczenie dla konsumentów wody zdatnej do spożycia, w sposób niezawodny oraz bezpieczny. Jednym z podstawowych elementów SZZW jest sieć wodociągowa, której niezawodne funkcjonowanie ma bardzo istotny wpływ na funkcjonowanie całego SZZW. Niezawodność dostawy wody polega na zapewnieniu stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania na wodę zgodnie z obowiązującymi przepisami, natomiast bezpieczeństwo SZZW to zdolność systemu do unikania zagrożeń [11,13,15,16,18].

W 1981 roku S. Kaplan i B.J. Garrick [5] po raz pierwszy zdefiniowali ryzyko uznając je za miarę bezpieczeństwa systemów. Ryzyko zdefiniowali jako trójelementowy zbiór prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych, konsekwencji tych zdarzeń oraz scenariusza zajścia zdarzeń niepożądanych.

Obecnie stosowana jest rozbudowana definicja ryzyka, w której wprowadza się dodatkowo tzw. parametr ochrony (O) jako odwrotnie proporcjonalny do wielkości ryzyka [13], lub zamiennie parametr podatności na zagrożenie (V) [3,4, 5,13,16].

Podatność na zagrożenie związana jest z [13]:

- niezawodnością działania poszczególnych obiektów,
- efektywnością usuwania awarii,
- strukturą połączeń poszczególnych elementów sieci wodociągowej i urządzeń oraz metody rezerwowania,
- mobilnością technologii uzdatniania wody, a nawet okresowego wprowadzania alternatywnych jej wariantów,
- liczbą źródeł dostawy wody (np.: ujęcia wód powierzchniowych i podziemnych).

Ochrona związana jest [13]:

- monitoringiem jakości wody i sposobami reagowania na złą jej jakość, np.: wczesne ostrzeżenie – stacje osłonowe ujęć wody),
- strefami ochrony ujęć wody,
- monitorowanie i zarządzanie parametrami hydraulicznymi pracy sieci wodociągowych,
- dysponowaniem objętością asekuracyjną w sieciowych zbiornikach wody czystej,
- alternatywnymi sposobami zaopatrzenia w wodę do spożycia w sytuacjach kryzysowych,
- profesjonalnym zarządzaniem ryzykiem.

Nowym nurtem pojawiającym się w literaturze światowej jest analiza ryzyka w warunkach niepewności. Daje się zauważyć dwa podejścia do tego zagadnienia. Pierwsze zakłada, że samo ryzyko jest swego rodzaju niepewnością, a uwzględnienie w jego analizie tzw. niepewności danych można wykonać za pomocą teorii subiektywnego prawdopodobieństwa oraz teorii bayesowskich. Drugi nurt badań nad ryzykiem w warunkach niepewności rozwija podejście oparte na sieciach bayesowskich, logice rozmytej, sieciach neuronowo rozmytych oraz algorytmach genetycznych [1,2,6,7,11,14,17,18].

Celem niniejsze pracy jest przedstawienie propozycji zastosowania sieci neuronowo rozmytych (typu ANFIS) w analizach ryzyka awarii sieci wodociągowej.

2. Modelowanie neuronowo rozmyte typu Takagi –Sugeno-Kanga

2.1. Rozmyte modele decyzyjne

Pojęcie zbiorów rozmytych (ang. *fuzzy sets*) zostało wprowadzone w 1965 r. przez L.A. Zadeha z Uniwersytetu w Berkeley (California). Logikę rozmytą należy traktować jako logikę wielowartościową. W odróżnieniu od granicy zbioru klasycznego, granica zbioru rozmytego nie jest określona precyzyjnie, natomiast istnieje płynne przejście od całkowitej nieprzynależności elementu do zbioru, poprzez jego częściową przynależność, aż do całkowitej przynależności, które jest określone jest za pomocą tzw. funkcji przynależności μ_A , gdzie A oznacza zbiór liczb rozmytych. Zbiory rozmyte mogą służyć do opisu różnych pojęć lingwistycznych związanych z analizą ryzyka (małe, średnie,

duże, bardzo duże) [7,16,17]. Wartościami funkcji przynależności μ_A są liczby rzeczywiste z przedziału [0, 1], przy czym [7,8,10,11] :

- jeżeli $\mu_A = 0$, oznacza to brak przynależności zmiennej x do zbioru A ,
- jeżeli $\mu_A = 1$, oznacza to pełną przynależność zmiennej x do zbioru A ,
- jeżeli $0 < \mu_A < 1$, oznacza to przynależność częściową zmiennej x do zbioru A ,

Funkcja przynależności może mieć różne kształty, najczęściej są wykorzystywane funkcje typu gaussowskiego, trójkątnego lub trapezoidalnego,

Systemy wnioskowania rozmytego opierają się na bazie reguł typu: jeżeli (przesłanka)..., to... (konkluzja).

Zmienne występujące w regułach są zmiennymi lingwistycznymi. Typowy rozmyty model decyzyjny przeprowadza się w czterech podstawowych krokach [1,7]:

- rozmywanie danych (ang. *fuzzification*), czyli przekształcanie zmiennych wejściowych do modelu w postać rozmytą za pomocą założonych funkcji przynależności i ich parametrów,
- utworzenie bazy reguł oraz założenie modelu wnioskowania rozmytego,
- agregacja reguł (grupowanie) oraz wnioskowanie (inferencja) na podstawie reguły globalnej,
- wyostrzanie (ang. *defuzzification*) otrzymanego wyniku, jeśli wyjściem z modelu jest wartość rozmyta.

2.2 Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociągowej typu Takagi Sugeno -Kanga

Do opracowania rozmytego modelu analizy ryzyka przyjęto następującą formułę ryzyka [16,17]:

$$r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_i \cdot C(V)_j \quad (1)$$

gdzie:

P_i – waga punktowa dla parametru prawdopodobieństwa,

$C(V)_j$ – waga punktowa dla parametru strat C z uwzględnieniem podatności na zagrożenie V , $C(V)_j$ przyjęto jako $=C_j$

i, j – numer przyjętej skali dla parametrów P i C , $i, j = 1, \dots, N$; $N = 3$.

W tabeli 1 i 2 przedstawiono parametry funkcji przynależności zaproponowane dla parametrów P i C [16,17] wg ogólnego równania funkcji postaci:

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{dla } b < x \leq c \\ 0 & \text{dla } x > c \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

x – zmienna,

μ_A – funkcja przynależności zmiennej x do zbioru rozmytego A ,

a, b, c – parametry funkcji przynależności.

Tab. 1 Rozmyta charakterystyka parametru prawdopodobieństwa P

Zbiór rozmyty P_i	Opis lingwistyczny parametru P	Typ funkcji przynależności	Parametry funkcji przynależności		
			a	b	c
P_1	mało prawdopodobne, raz na 5 lat i rzadziej	typ L	-	0,3	0,45
P_2	średnio prawdopodobne, raz na 2 lata	trójkątna	0,3	0,45	0,75
P_3	Prawdopodobne raz na 0,5 roku i częściej	typ γ	0,45	0,75	-

Tab. 2. Rozmyta charakterystyka parametru strat C

Zbiór rozmyty C_j	Opis lingwistyczny parametru C	Typ funkcji przynależności	Parametry funkcji przynależności		
			a	b	c
C_1	małe	typ L	-	0,5	1,5
C_2	średnie	trójkątna	0,5	1,5	2,5
C_3	duże	typ γ	1,5	2,5	-

Parametrami wejściowymi do opracowanego modelu, zdefiniowanymi w postaci zbiorów rozmytych (określonych według danych z tab. 1 i 2) są:

- x_1 – zmienna charakteryzująca prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia awaryjnego,
- x_2 – zmienna charakteryzująca straty poniesione w wyniku zajścia zdarzenia awaryjnego, z uwzględnieniem podatności na zagrożenie.

Wyjściem z modelu jest charakterystyka ryzyka: $y = r$. Zbiór możliwych wartości ryzyka przedstawia się następująco:

$$R = \{r_{ij}\} = \{r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}\}.$$

Kolejnym etapem jest opracowanie bazy reguł, która będzie stanowić podstawę wnioskowania.

Ogólna postać reguł przedstawia się następująco:

$$\text{Jeśli } x_1 \text{ jest } P_i \text{ i } x_2 \text{ jest } C_j, \text{ to } y = r_{ij}.$$

Następnym etapem rozmytej analizy ryzyka jest wykonanie działań implikacji przesłanek dla poszczególnych reguł. W tym celu wykorzystano operator T-normy w postaci iloczynu algebraicznego). Przykładowo, dla reguły pierwszej działanie to ma postać:

- przesłanka reguły to:

$$\text{Jeśli } x_1 \text{ jest } P_1 \text{ i } x_2 \text{ jest } C_1 \Rightarrow \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2).$$

Bazę reguł można przedstawić w postaci tzw. rozmytej pamięci asocjacyjnej (FAM- ang. fuzzy associative memories (wprowadzonej w 1992 [9]). Zakładając trójstopniową skalę ryzyka dla oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej tj. ryzyko tolerowane RT, ryzyko kontrolowane RK, ryzyko nieakceptowane NK, bazę reguł w postaci tablicy FAM przedstawia tabela 3.

Tab. 3. Tablice FAM dla rozmytego modelu analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej.

i/j	P1	P2	P3
C1	RT	RT	RK
C2	RT	RK	RN
C3	RK	RN	RN

Proces agregacji reguł polega na łączeniu reguł o takiej samej konkluzji za pomocą spójnika lub. W ten sposób można wyróżnić trzy grup reguł postaci:

- Reg₁: Jeśli x_1 jest P₁ i x_2 jest C₁ lub x_1 jest P₁ i x_2 jest C₂ lub x_1 jest P₂ i x_2 jest C₁, to ryzyko jest tolerowane,
- Reg₂: Jeśli x_1 jest P₁ i x_2 jest C₃ lub x_1 jest P₂ i x_2 jest C₂ lub x_1 jest P₃ i x_2 jest C₁ to ryzyko jest kontrolowane, Reg₃:
- Reg₃: Jeśli x_1 jest P₂ i x_2 jest C₃ lub x_1 jest P₃ i x_2 jest C₂ lub x_1 jest P₃ i x_2 jest C₃ to ryzyko jest nieakceptowane.

W celu wykonania działania dla każdej grupy reguł, spójnik „lub” zastąpiono operatorem S-normy typu max postaci:

- Reg₁: $\max \{ \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2), \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2) \}$,
- Reg₂: $\max \{ \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2), \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2) \}$,
- Reg₃: $\max \{ \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2), \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2) \}$,

Wyjściem z modelu ($y = r$) jest funkcja w postaci wielomianu:

$$y = p_0 + \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i \quad (3)$$

gdzie: p_0, p_1, \dots, p_N – wagi liczbowe ($p_i = 0$ dla $i > 0$).

Przy wielu (M) regułach wnioskowania wyjście z modelu jest określone jako średnia ważona poszczególnych reguł w postaci [16,17]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 w_{ij} \cdot r_{ij}}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 w_{ij}} \quad (4)$$

gdzie: w_{ij} – waga przypisana każdej regule wnioskującej;

$$W_{ij} = \mu_{P_i}(x_1) T \mu_{C_j}(x_2) \quad (5)$$

T – operator T-normy.

3. Model neuronowo rozmyty awarii sieci wodociągowej

Sztuczne sieci neuronowe (ang. artificial neural networks) definiowane są jako typ układów uczących, a ich działanie opiera się na zasadach działania biologicznych neuronów. Sieć neuronowa to układ obliczeniowy złożony elementów działających w trybie

równoległym, mającym zdolność uczenia się na podstawie przykładów i stosowania tak pozyskiwanej wiedzy do przyszłych nieznanymi sytuacji. Wiedza zapamiętywana jest w wartościach wag połączeń synaptycznych [9,12]. Obecnie różne typy sieci neuronowych mają bardzo szerokie zastosowanie między innymi w diagnostyce, procesach prognozowania czy optymalizacji różnych zjawisk [7,12,10].

Systemy rozmyte mają zastosowanie przede wszystkim w modelach, gdzie występuje nieprecyzyjna (niepewna) baza informacji, natomiast sieci neuronowe mają zdolność uczenia się i tworzenia nowych reguł wnioskowania na podstawie zdobytej wiedzy.

Model neuronowo – rozmyte (NR) łączy cechy zarówno modelowania rozmytego oraz systemów neuronowych. Systemy NR składa się z tych samych bloków wnioskowania co system rozmyty, z tym że na każdym etapie obliczenia wykonywane są przez uczące się sieci neuronowe. W bloku rozmywania każdy neuron reprezentuje funkcję przynależności poprzedzającą go reguły rozmytej [2,9,10,12]. Istnieje szereg modeli NR, które różnią się od siebie przede wszystkim sposobem pozyskiwania reguł. Jednym z pierwszych modeli jest system wnioskowania rozmytego oparty na sieci adaptacyjnej (ang. Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System - ANFIS). System ANFIS oparty jest na modelu rozmytym Takagi – Sugeno (TSK), w którym uczenie przebiega przy zastosowaniu metody wstecznej propagacji błędów [2,7,10]. System ten został zaproponowany przez J.S.R. Janga, który wykazał, że system TSK jest równoważny sieci neuronowej o czterech warstwach ukrytych [2,12,10]. Każda warstwa sieci ANFIS składa się z identycznych neuronów realizujących następujące obliczenia [10]:

- L0 – (warstwa wejściowa – enter Layer – L0), w której realizowane jest rozprzewadzenie sygnałów wejściowych do pierwszej warstwy ukrytej.
- L1 – (pierwsza warstwa ukryta – Layer 1), w której następuje wyznaczenie stopnia kompatybilności wartości wejściowych z wartościami lingwistycznymi zawartymi w przesłankach reguł warunkowych. Proces ten realizowany jest poprzez fuzyfikację każdej zmiennej, określając dla każdej reguły wnioskowania wartość współczynnika przynależności $\mu(x)$ zgodnie z przyjętą funkcją przynależności.
- L2 – (druga warstwa ukryta – Layer 2), w której wyznaczany jest stopień aktywacji dla każdej reguły warunkowej. Każdy neuron tej warstwy realizuje t-normę [7,8] w postaci iloczynu, a sygnałami wejściowymi są stopnie kompatybilności pochodzące z pierwszej warstwy. W ten sposób otrzymujemy wypadkową wartość współczynnika przynależności.
- L3 – (trzecia warstwa ukryta – Layer 3), jest generatorem funkcji TSK określającej

$$\text{wartość wyjściową } y = p_0 + \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i$$

W warstwie tej następuje również mnożenie sygnałów, „y” przez wartość wynikową otrzymaną z poprzedniej warstwy

- L4 – (czwarta warstwa ukryta – Layer 4), w której są wyznaczane konkluzje na podstawie każdej reguły pomnożone przez znormalizowany stopień aktywacji tej reguły.
- L5 – (piąta warstwa ukryta – Layer 5) składa się jednego neuronu wyznaczającego wartość wyjściową sieci ANFIS.

W sieci ANFIS jedynie pierwsza i trzecia warstwa ukryta są warstwami parametrycznymi czyli podlegają adaptacji w procesie uczenia. Przy założeniu N zmiennych wejściowych każda reguła wprowadza N+1 zmiennych zależności liniowych TSK. Przy M regułach wnioskowania mamy więc M(N+1) parametrów liniowych sieci [10]. Każda

funkcja przynależności odpowiada trzem parametrom podlegającym adaptacji. Przy założeniu, że każda zmienna x jest scharakteryzowana przez własną funkcję przynależności, to przy M regułach wnioskowania otrzymujemy $3MN$ parametrów nieliniowych, co w sumie daje $M(4N+1)$ parametrów liniowych i nieliniowych [10].

Dla opracowanego modelu ryzyka awarii sieci wodociągowej typu TSK zaproponowano model ANFIS. W poszczególnych warstwach realizowane są następujące procesy analizy ryzyka:

- L0 – dwa parametry wejściowe:

x_1 – zmienna charakteryzująca prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia awaryjnego P ,

x_2 – zmienna charakteryzująca straty poniesione w wyniku zajścia zdarzenia awaryjnego C .

Zgodnie z zaproponowanym przez Janga [2,7,9,10] zasadami sieci ANFIS dla dzie-
więciu reguł warunkowych zaproponowano podział przestrzeni wejściowej metodą
równego podziału siatkowego

- L1 Każda zmienna opisana jest własną funkcją przynależności za pomocą trzech wartości lingwistycznych
-dla poszczególnych zmiennych zbiory rozmyte postaci $P=\{P_1, P_2, P_3\}$, $C=\{C_1, C_2, C_3\}$ scharakteryzowane są za pomocą funkcji przynależności (zgodnie z tabl i tab. 2)
- L2 – w warstwie tej wyznaczany jest tzw. poziom zapłonu (waga w_i) poszczególnych reguł z wykorzystaniem operatorów T-normy (zastosowano operator w postaci iloczynu algebraicznego). Poszczególne wagi wyznaczane są wg ogólnej zależności:

$$w_j = \mu_{P_i}(x_1) \cdot \mu_{C_i}(x_2), \quad (6)$$

$$i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$$

Poszczególne wagi wynoszą:

$$w_1 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2), \quad (7)$$

$$w_2 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \quad (8)$$

$$w_3 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2), \quad (9)$$

$$w_4 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2), \quad (10)$$

$$w_5 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \quad (11)$$

$$w_6 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2), \quad (12)$$

$$w_7 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2), \quad (13)$$

$$w_8 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2), \quad (14)$$

$$w_9 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2), \quad (15)$$

- L3 – warstwą ta nie ma parametrów, a jej wyjście odpowiada unormowanemu poziomowi zapłonu poszczególnych reguł wg zależności:

$$\overline{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^9 w_j} \quad (16)$$

- L4- wyjściem są konkluzje wyznaczone wg zależności:

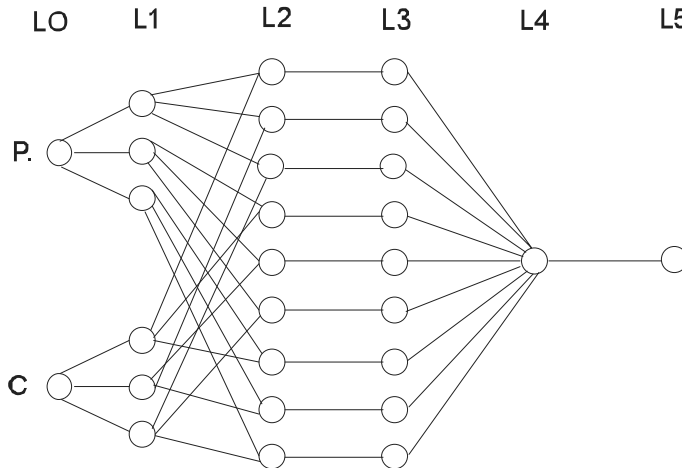
$$y_j = \overline{w}_j \cdot r_j \quad (17)$$

gdzie zgodnie z założeniem modelu TSK $r_j = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9\}$,

- L5 jest wyjściem z modelu i jest wyostrzoną wartością ryzyka wyliczona wg zależności:

$$y = r = \sum_{j=1}^9 \overline{w}_j y_j \quad (18)$$

Zaproponowany model zaadoptowano do programu Matlab Fuzzy toolbox. Sieć poddano procesowi uczenia wprowadzając dane testowe i treningowe uzyskane z procesu eksploatacji sieci wodociągowej miasta Rzeszowa. Sieć została zaadoptowana w drugim kroku uczenia z błędem równym 0.0564866. Na rysunku 1 przedstawiono schemat sieci ANFIS dla opracowanego modelu analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej.



Rys. 1. Schemat sieci ANFIS dla modelu analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej

W tabeli 4 przedstawiono wprowadzone do programu zakres danych eksploatacyjnych stanowiących dane testowe w procesie uczenia sieci ANFIS. Dane zostały podzielone losowo na dane testowe i treningowe.

Tab. 4. Dane testowe dla sieci ANFIS analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej

P	C	r
0,01	2	0,02
0,2	1	0,2
0,3	2	0,6
0,05	3	0,15
0,1	1	0,1
0,5	1	0,5
0,7	2	1,4
0,1	3	0,3
0,33	1	0,33
0,2	2	0,6
0,3	3	1,2
0,48	3	2,4
0,72	1	0,72
0,2	1	0,2
0,3	3	1,5
0,7	3	2,8

4. Podsumowanie

- Prawidłowa ocena funkcjonowania sieci wodociągowej, która jest podstawowym elementem podsystemu dystrybucji wody powinna opierać się na analizie i ocenie ryzyka, co jest gwarantem podejmowania właściwych decyzji dotyczących wyboru najlepszych rozwiązań pod względem technicznym, ekonomicznym oraz eksploatacyjnym.
- Stosowane metody analizy i oceny ryzyka w większości opierają się na danych eksploatacyjnych. Problem pojawia się wtedy, gdy danych brakuje, są niekompletne lub niepewne.
- Jeżeli nie jest możliwe uzyskanie dokładnych i kompletnych danych statystycznych, potrzebne informacje można otrzymać od ekspertów, którzy na podstawie swojej wiedzy, doświadczenia i danych literaturowych oceniają poszczególne parametry ryzyka. Otrzymane w ten sposób dane stanowią bazę ocen subiektywnych, które są podstawą do rozmytego modelowania ryzyka. Teoria zbiorów rozmytych umożliwia przeprowadzenie analizy ryzyka w języku naturalnym (np. małe straty, ryzyko tolerowane) na podstawie doświadczenia ekspertów.
- Wykorzystanie adaptacyjnego, neuronowo rozmytego modelu ANFIS w analizie ryzyka sieci wodociągowej uwzględnia wiedzę i doświadczenie ekspertów z zakresu eksploatacji systemów wodociągowych oraz analizy i oceny bezpieczeństwa. Model umożliwia wykorzystanie wcześniej zgromadzonych informacji w procesie uczenia sieci.

- Opracowany w pracy model może być wykorzystany w procesie decyzyjnym związanym z eksploatacją sieci wodociągowych i stanowi alternatywę dla powszechnie stosowanych tradycyjnych metod analizy i oceny ryzyka.
- W oparciu zbudowany model możliwe jest podejmowanie odpowiednich decyzji dotyczących modernizacji sieci wodociągowej na podstawie parametrów ryzyka.
- Przedstawiony model ANFIS analizy ryzyka sieci wodociągowej z wykorzystaniem oprogramowania Matlab stanowi wstępny zakres badań autorki w tym zakresie.

Bibliografia

- [1] Braglia M., Frosolini M., Montanari R.: Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20(4), 2003, s. 503-524.
- [2] Christodoulous S., Deligianni A.: A Neurofuzzy Decision Framework for the Management of Water Distribution Networks. *Water Resource Management*, 24, 2010, s. 1573-1650.
- [3] Ezell B., Farr J., Wiese I.: Infrastructure risk analysis of municipal water distribution system. *Journal of Infrastructure Systems, ASCE*, 6(3), 2000, s. 118-122.
- [4] Haimes Y.Y.: On the complex definition of risk: a systems-based approach. *Risk Analysis*, 29(12), 2009, s. 1647-1654
- [5] Kaplan S.: The words of risk analysis. *Risk Analysis*, 7(4), 1997, s. 407-417.
- [6] Kleiner Y., Rajani B.B., Sadiq R.: Failure risk management of buried infrastructure using fuzzy-based techniques. *Journal of Water Supply Research and Technology, Aqua*, 55(2), 2006, s. 81-94.
- [7] Klir G.J., Folger T.: *Fuzzy sets, uncertainty, and information*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New York 1988.
- [8] Kluska J.: *Analytical Methods in Fuzzy Modelling and Control*. Springer-Verlag, Berlin 2009.
- [9] Kosko B.: *Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York 1992
- [10] Łęski J.: *Systemy neuronowe-rozmyte*. Wydawnictwo Nukowo-Techniczne. Warszawa 2008.
- [11] Markowski A., Mannan S.: Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials*, 59(1), 2008, s. 152-156.
- [12] Osowski S.: *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000.
- [13] Rak J.: Selected problems of water supply safety. *Environmental Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej*, 35, 2009, s. 29-35.

- [14] Sadiq R., Kleiner Y., Rajani B.: Water quality failures in distribution networks – risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. *Risk Analysis*, 27(5), 2007, s. 1381-1394.
- [15] Tanyimboh T.T., Burd R., Burrows R., Tabesh M.: Modelling and reliability analysis of water distribution systems. *Water Science Technology*, 39(4), 1999, 249-255.
- [16] Tchórzewska-Cieślak B.: *Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociągowej*. Ochrona Środowiska, Wydawn. PZiTS O/Dolnośląski, 1(33), 2011, s.35-41.
- [17] Tchórzewska-Cieślak B.: *Matrix method for estimating the risk of failure in the collective water supply system using fuzzy logic*. Environmental Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, 3 (37), s. 111-118, 2011.
- [18] Zimoch I. Bezpieczeństwo działania system zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska*. 3,2009,s.51-57

