

Barbara Tchórzewska-Cieślak

Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociągowej

Ryzyko jest nieodłącznym elementem eksploatacji sieci wodociągowej. Związane jest ono z możliwością wystąpienia zakłóceń w dostawie wody w sensie ilościowym (przerwy w dostawie, obniżenie ciśnienia) lub jakościowym (wtórne zanieczyszczenie wody) [5]. Ryzyko odnosi się do producenta wody i wtedy związane jest z kosztami finansowymi, jakie przedsiębiorstwo poniesie w przypadku wystąpienia zdarzeń awaryjnych oraz do konsumentów wody i wtedy związane jest bezpośrednio z utratą przez nich bezpieczeństwa (możliwość utraty zdrowia lub życia w wyniku spożycia wody o nieodpowiedniej jakości lub uciążliwości związane z przerwami w dostawie wody) [1, 2].

W procesie zarządzania ryzykiem przez przedsiębiorstwo wodociągowe niezbędne jest utworzenie i ciągłe uaktualnianie listy potencjalnych zagrożeń oraz ich możliwych skutków. W związku z tym identyfikacja, analiza i ocena ryzyka powinny być procesem ciągłym w kompleksowym programie zarządzania ryzykiem awarii sieci wodociągowej. Każde z potencjalnych zagrożeń powinno zostać poddane ocenie ze względu na prawdopodobieństwo jego wystąpienia oraz skutki, jakie może wywołać [1–3]. Pojęcie ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę zapoczątkował prof. E.S. Kempa [4], a kontynuacją w tym zakresie były liczne prace, m.in. [3, 5, 6]. Podstawowa definicja ryzyka wprowadzona w 1981 r. przez S. Kaplana i B.J. Garricka [7] zakłada, że ryzyko jest opisane przez trójelementowy zbiór:

$$r = \{S_i, P_i, C_i\} \quad (1)$$

w którym:

S_i – reprezentatywny scenariusz i-tego zdarzenia awaryjnego
 P_i – prawdopodobieństwo zajścia i-tego zdarzenia awaryjnego
 C_i – parametr związany z możliwymi skutkami i-tego zdarzenia awaryjnego

Podejście to z biegiem czasu poszerzyło się o czwarty parametr, zwany podatnością na zagrożenia (V_i – vulnerability) lub ekspozycją (E_i – exhibition) [6]. W analizach ryzyka awarii sieci wodociągowej dominujące stały się wieloparametryczne matryce ryzyka omówione m.in. w pracach [3, 5, 8, 9]. Nowym podejściem w analizie ryzyka jest uwzględnienie tzw. niepewności, która często utożsamiana jest z samym ryzykiem lub stanowi jego element. Takie podejście rozwinął w swoich pracach T. Aven [10], który ryzyko zdefiniował jako kombinację parametrów charakteryzujących zdarzenia awaryjne i ich

potencjalne skutki, wraz z podatnością systemu na ich zajście oraz parametru charakteryzującego niepewność, czy dane zdarzenie zajdzie czy nie. Niepewność w analizie ryzyka wynika przede wszystkim z analizy danych eksploatacyjnych systemu (niepewność co do uzyskanych informacji od ekspertów czy danych statystycznych potrzebnych w analizie ryzyka). Jedną z metod, jaką można wykorzystać w takim przypadku jest tzw. rozmyta analiza ryzyka (fuzzy risk analysis – FRA), która opiera się na teorii zbiorów rozmytych [11–14].

Celem pracy było zaprezentowanie nowego podejścia w analizie i ocenie ryzyka awarii sieci wodociągowej, opartego na teorii zbiorów rozmytych.

Analiza i ocena ryzyka awarii sieci wodociągowej

Analizę ryzyka awarii sieci wodociągowej można przedstawić w następujących etapach [5, 15, 16]:

- identyfikacja możliwych zdarzeń awaryjnych,
- wyznaczenie zakresu częstości lub prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń awaryjnych na podstawie analizy statystycznej lub opinii ekspertów,
- oszacowanie możliwych skutków zdarzeń z uwzględnieniem podatności/ekspozycji na zdarzenie awaryjne,
- wyznaczenie wartości ryzyka oraz porównanie z przyjętymi wartościami kryterialnymi,
- opracowanie wytycznych dotyczących zmniejszenia i dalszego monitorowania ryzyka.

Przyjęto definicję ryzyka awarii sieci wodociągowej w postaci:

$$r = P(i)P(C_i/V_i) \quad (2)$$

w której:

$P(i)$ – prawdopodobieństwo zajścia i-tego zdarzenia awaryjnego lub przyjęta na jego podstawie wartość punktowa (P_i)
 $P(C_i/V_i)$ – prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia strat (C), z uwzględnieniem podatności (V) na zagrożenie w wyniku zajścia i-tego zdarzenia awaryjnego
 i – zdarzenie awaryjne ($i=1, 2, \dots, n$)
 n – liczba zidentyfikowanych możliwych zdarzeń awaryjnych na sieci wodociągowej

W przypadku zastosowania metod matrycowych, wartościom prawdopodobieństw i skutków awarii przypisuje się wagi punktowe. Wówczas wzór (2) przyjmuje postać:

$$r = P_{ji}C_{ji}(V_i) \quad (3)$$

w której:

P_{ji} – waga punktowa prawdopodobieństwa wystąpienia i-tego zdarzenia awaryjnego

Dr inż. B. Tchórzewska-Cieślak: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, al. Powstańców Warszawy 6, 35–950 Rzeszów
 cbarbara@prz.rzeszow.pl

$C_{ji}(V_i)$ – waga punktowa strat pod warunkiem zajścia i-tego zdarzenia awaryjnego z uwzględnieniem podatności na zagrożenie (V)

j – numer przyjętej skali ($j=1, 2, 3, \dots, m$)

m – przyjęty stopień skali

W tabeli 1 przedstawiono macierz ryzyka w skali trójstopniowej, uwzględniającą parametry ryzyka.

Tabela 1. Macierz ryzyka wg wzoru (3)
Table 1. Risk matrix according to equation (3)

P_{ji}	$C_{ji}(V_i)$		
	1	2	3
	r		
1	1	2	3
2	2	4	6
3	3	6	9

Według macierzy ryzyka, przedstawionej w tabeli 1, przyjęto następującą trójstopniową skalę ryzyka:

- ryzyko tolerowane: $r_T=[1\div 2]$,
- ryzyko kontrolowane: $r_K=(2\div 4]$,
- ryzyko nieakceptowane: $r_N=(4\div 9]$.

Kryteria przyjęcia wag punktowych poszczególnych parametrów oceny ryzyka były następujące:

- parametr prawdopodobieństwa (P_{ji}):
 - ♦ zdarzenie prawdopodobne: waga 3,
 - ♦ zdarzenie średnio prawdopodobne: waga 2,
 - ♦ zdarzenie mało prawdopodobne: waga 1,
- parametr strat ($C_{ji}(V_i)$):

♦ małe straty (awaria sieci, niewielki wyciek wody, krótkotrwałe zakłócenia w pracy sieci, spadek dobowej produkcji wody do 70% dobowej wartości nominalnej lub przerwy w dostawie wody do 2h, dostrzegalne zmiany organoleptyczne wody (minimalne zagrożenie znacznego pogorszenia jakości wody lub pojedyncze skargi konsumentów wody), sieć w układzie pierścieniowym z ciągłym monitoringiem ilościowym; jest profesjonalny system wczesnego ostrzegania oraz reagowania w sytuacjach kryzysowych, pełna dostępność do alternatywnych źródeł wody do spożycia): waga 1,

♦ średnie straty (awaria magistrali wodociągowej lub/i lokalne pogorszenie jakości wody, spadek dobowej produkcji wody do 30÷70% lub przerwy w dostawie wody od 2h do 24h, spadek ciśnienia wody w sieci wodociągowej poniżej wymaganego w niektórych dzielnicach miasta, występują straty finansowe oraz możliwość spożycia wody o gorszej jakości (odór, zmienione barwa i mętność), niedyspozycje zdrowotne konsumentów, liczne skargi, komunikaty w regionalnych mediach publicznych, są przesłanki do eskalacji zdarzenia (powstania tzw. efektu domina), monitoring ilościowy sieci; jest profesjonalny system wczesnego ostrzegania oraz reagowania w sytuacjach kryzysowych, pełna dostępność do alternatywnych źródeł wody do spożycia): waga 2,

♦ duże straty (awaria głównej magistrali wodociągowej lub/i wtórne zanieczyszczenie całej sieci wodociągowej, spadek dobowej produkcji wody do poniżej 30%, przerwy w dostawie wody powyżej 24h, spadek ciśnienia w sieci wodociągowej poniżej wymaganego, występują znaczące straty zarówno finansowe, jak i społeczne, liczna grupa konsumentów jest narażona na spożycie wody o gorszej jakości, wymagane leczenie szpitalne narażonych osób, zaangażowanie profesjonalnych służb ratowniczych, poważne skutki toksyczne wśród organizmów wskaźnikowych,

informacje w mediach ogólnokrajowych; jest niekompletny system wczesnego ostrzegania oraz reagowania w sytuacjach kryzysowych, ograniczona dostępność do alternatywnych źródeł wody do spożycia): waga 3.

Założenia modelowania rozmytego

Pojęcie teorii zbiorów rozmytych wprowadził w 1965 r. L.A. Zadeh [14], co umożliwiło matematyczny opis wielkości, które mają charakter wieloznaczny i nieprecyzyjny. W przypadku, gdy dane dotyczące eksploatacji sieci wodociągowej otrzymywane są na podstawie informacji ekspertów (eksploatatorów, inżynierów praktyków lub naukowców) w analizach i ocenach ryzyka napotyka się problem z ich precyzyznością, często mają charakter ocen subiektywnych (straty małe, prawdopodobieństwo średnie), a w wielu przypadkach ich analiza statystyczna jest niemożliwa lub bardzo trudna. Jest wiele metod, które można zastosować w takich sytuacjach, takie jak teoria subiektywnego prawdopodobieństwa, sieci bayesowskie czy tzw. analizy rozmyte [17–21].

Zbiory rozmyte służą do analizy tzw. pojęć lingwistycznych, tj. opisanych za pomocą słów. W odróżnieniu od zbioru klasycznego, granica zbioru rozmytego nie jest określona precyzyjnie, a do jego opisu służy tzw. funkcja przynależności (μ_A), w której A jest przestrzenią rozważań. Wartościami funkcji przynależności są liczby rzeczywiste z przedziału $[0, 1]$. Funkcja ta każdemu elementowi „x” przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego A, przy czym można wyróżnić trzy przypadki:

- $\mu_A(x)=1$ oznacza pełną przynależność do zbioru rozmytego A,
- $\mu_A(x)=0$ oznacza brak przynależności elementu „x” do zbioru rozmytego A,
- $0 < \mu_A(x) < 1$ oznacza częściową przynależność elementu „x” do zbioru rozmytego A.

Konkretna wartość funkcji przynależności nosi nazwę stopnia przynależności, który może być określony za pomocą zależności funkcyjnej lub w sposób dyskretny. Postać funkcji przynależności dobierana jest na podstawie wiedzy ekspertów, z uwzględnieniem wiedzy dotyczącej badanego zjawiska pod kątem opisu matematycznego, statystycznego oraz probabilistycznego. W praktyce najczęściej stosowane są funkcje typu gaussowskiego, trójkątnego lub trapezoidalnego. Gdy zgromadzona wiedza jest niewielka, wówczas zaleca się przyjmowanie trójkątnej funkcji przynależności [13]. Podstawowymi operacjami na zbiorach rozmytych są suma (OR) i iloczyn (AND) [12]. Operacje te wykonywane są za pomocą odpowiednich wzorów matematycznych. W przypadku sumy logicznej zbiorów rozmytych są to tzw. operatory S-normy, a iloczynu logicznego zbiorów rozmytych – operatory T-normy. Znane są różne formuły na wyznaczenie operatorów rozmytych, przy czym do podstawowych należą operatory S-normy:

- suma algebraiczna,
- operator „max”:

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4)$$

oraz operatory T-normy:

- iloczyn algebraiczny,
- operator „min”:

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (5)$$

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

Zmienne występujące w tych regułach są zmiennymi lingwistycznymi. Typowy rozmyty model decyzyjny przeprowadza się w czterech podstawowych krokach postępowania [22]:

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

Rozmyty model oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej

Ryzyko oraz jego parametry bardzo często przedstawiane są za pomocą zmiennych typu lingwistycznego, np. ryzyko tolerowane, kontrolowane i nieakceptowane. W wielu przypadkach wartości kryterialne przyjęcia poszczególnych wartości skali (parametrów ryzyka czy samego ryzyka) są różnie przyjmowane i interpretowane przez ekspertów. Mając szeroką, ale jednocześnie subiektywną, ekspercką wiedzę dotyczącą eksploatacji systemu można zbudować rozmyty model analizy ryzyka (FRA), który pozwoli na wykorzystanie w całości wszystkich informacji (pochodzących od różnych ekspertów) i na tej podstawie podjęcie odpowiednich decyzji w procesie zarządzania ryzykiem.

W przyjętym modelu wartościami wejściowymi były parametry ryzyka, tj. prawdopodobieństwo zajścia zdarzeń

awaryjnych (P) oraz wielkość strat w wyniku zajścia tych zdarzeń (C), natomiast wyjściem z modelu była wartość ryzyka. Do analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej zaproponowano następujące typy funkcji przynależności, opierając się na doświadczeniach związanych z analizą niezawodności oraz ryzyka awarii sieci wodociągowej [2, 4–7, 15, 17, 19, 23, 24]:

– funkcje typu trapezowego:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{jeżeli } a < x \leq b \\ 1 & \text{jeżeli } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{jeżeli } c < x < d \\ 0 & \text{jeżeli } x > d \end{cases} \quad (6)$$

– funkcje typu γ :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{jeżeli } a < x \leq b \\ 1 & \text{jeżeli } b < x \leq c \end{cases} \quad (7)$$

– funkcje typu L:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{jeżeli } c < x < d \\ 0 & \text{jeżeli } x > d \end{cases} \quad (8)$$

w których:

x – zmienna (liczba rozmyta)

a, b, c, d – parametry funkcji przynależności

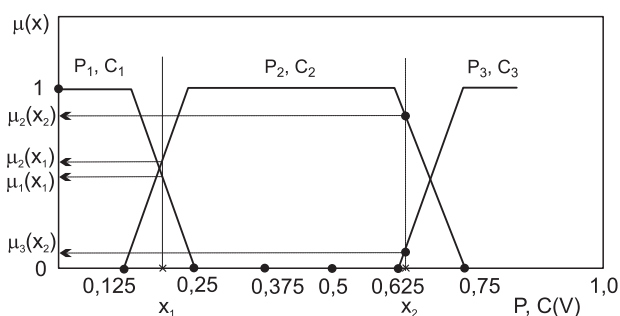
Tabela 2. Rozmyta charakterystyka parametrów $P=\{P_1, P_2, P_3\}$, $C(V_i)=\{C_1, C_2, C_3\}$
Table 2. Fuzzy characteristics for parameters $P=\{P_1, P_2, P_3\}$, $C(V_i)=\{C_1, C_2, C_3\}$

Zbiór rozmyty	Opis lingwistyczny	Typ funkcji przynależności	Parametr funkcji przynależności			
			a	b	c	d
P ₁	zdarzenie nieprawdopodobne	L wzór (8)	–	–	0,125	0,25
C ₁	straty małe					
P ₂	zdarzenie prawdopodobne	trapezowa wzór (6)	0,125	0,25	0,625	0,75
C ₂	straty średnie					
P ₃	zdarzenie bardzo prawdopodobne	γ wzór (7)	0,625	0,75	–	–
C ₃	straty duże					

Tabela 3. Rozmyta charakterystyka parametru ryzyka: $r=\{r_T, r_K, r_N\}$
Table 3. Fuzzy characteristics for risk parameter: $r=\{r_T, r_K, r_N\}$

Zbiór rozmyty	Opis lingwistyczny	Typ funkcji przynależności	Parametr funkcji przynależności			
			a	b	c	d
r _T	ryzyko tolerowane	L wzór (8)	–	–	2,0	4,0
r _K	ryzyko kontrolowane	trapezowa wzór (6)	3,0	4,0	6,0	7,0
r _N	ryzyko nieakceptowane	γ wzór (7)	6,0	8,0	–	–

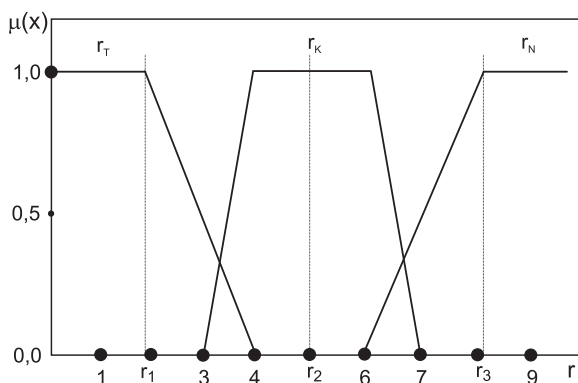
Wartości prawdopodobieństwa (P) wystąpienia awarii sieci wodociągowej przedstawiono jako trójelementowy zbiór, którego elementami były podzbiory rozmyte opisane za pomocą zmiennych lingwistycznych ($P_{ji} = \{\text{zdarzenie nieprawdopodobne, zdarzenie prawdopodobne, zdarzenie bardzo prawdopodobne}\} = \{P_1, P_2, P_3\}$). Zmienne te opisano za pomocą przyjętych funkcji przynależności, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 1. Wartości strat ($C(V_i)$) przedstawiono również jako trójelementowy zbiór, którego elementami były podzbiory rozmyte opisane za pomocą zmiennych lingwistycznych ($C_{ji}(V) = \{\text{małe, średnie, duże}\} = \{C_1, C_2, C_3\}$). Zmienne te opisano za pomocą przyjętych funkcji przynależności, których charakterystykę również przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 1.



Rys. 1. Funkcja przynależności parametrów prawdopodobieństwa i strat

Fig. 1. Membership function for probability and loss parameters

Wartości ryzyka zajścia awarii na sieci wodociągowej przedstawiono jako trójelementowy zbiór, którego elementami były podzbiory rozmyte opisane za pomocą zmiennych lingwistycznych ($r = \{\text{tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane}\} = \{r_T, r_K, r_N\}$). Zmienne te opisano za pomocą przyjętych funkcji przynależności, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja przynależności parametru ryzyka

Fig. 2. Membership function for the risk parameter

Przykład

W założonym modelu wartościami wejściowymi (x_1, x_2) były poszczególne wartości parametrów ryzyka, które zdefiniowano w postaci zbiorów rozmytych (tab. 2, rys. 1), zaś wyjściem modelu była charakterystyka ryzyka ($y=r$):

x_1 – zmienna charakteryzująca prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia awaryjnego,

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

Wartości zmiennych wejściowych, oszacowane przez eksperta, wynosiły odpowiednio: zdarzenie mało prawdopodobne – $x_1=0,19$, straty średnie – $x_2=0,63$. Poszczególnym wartościom parametrów przypisano odpowiednie wartości funkcji przynależności obliczone wg wzorów (6), (7) i (8) (rys. 1), co stanowiło proces rozmywania danych wejściowych. Odpowiednie wartości funkcji przynależności zmiennej $x_1=0,19$ wyniosły:

- funkcja przynależności zmiennej x_1 do zbioru rozmytego P_1 – wzór (8): $\mu_{P_1}(x_1)=0,48$,
- funkcja przynależności zmiennej x_1 do zbioru rozmytego P_2 – wzór (6): $\mu_{P_2}(x_1)=0,52$,
- funkcja przynależności zmiennej x_1 do zbioru rozmytego P_3 – wzór (7): $\mu_{P_3}(x_1)=0$.

Odpowiednie wartości funkcji przynależności zmiennej $x_2=0,63$ wyniosły:

- funkcja przynależności zmiennej x_2 do zbioru rozmytego C_1 – wzór (8): $\mu_{C_1}(x_2)=0$,
- funkcja przynależności zmiennej x_2 do zbioru rozmytego C_2 – wzór (6): $\mu_{C_2}(x_2)=0,96$,
- funkcja przynależności zmiennej x_2 do zbioru rozmytego C_3 – wzór (7): $\mu_{C_3}(x_2)=0,04$.

W ten sposób otrzymano macierz danych w postaci rozmytej:

$$W = \begin{vmatrix} \mu_{P_1}(x_1) & \mu_{P_2}(x_1) & \mu_{P_3}(x_1) \\ \mu_{C_1}(x_2) & \mu_{C_2}(x_2) & \mu_{C_3}(x_2) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,48 & 0,52 & 0,0 \\ 0,0 & 0,96 & 0,04 \end{vmatrix} \quad (9)$$

Aby przeprowadzić proces wnioskowania należy zdefiniować bazę reguł. Proces ten przeprowadza się w oparciu o wiedzę ekspertów. Do przedstawionego przykładu bazę reguł opracowano na podstawie danych z analiz ryzyka zawartych m.in. w pracach [3, 5–7], którą przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Baza reguł do analizy ryzyka
Table 4. Base of rules for risk analysis

Nr reguły	Opis
1	jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_1 , to ryzyko jest tolerowane
2	jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_2 , to ryzyko jest tolerowane
3	jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_3 , to ryzyko jest kontrolowane
4	jeśli x_1 jest P_2 i x_2 jest C_1 , to ryzyko jest tolerowane
5	jeśli x_1 jest P_2 i x_2 jest C_2 , to ryzyko jest kontrolowane
6	jeśli x_1 jest P_2 i x_2 jest C_3 , to ryzyko jest nieakceptowane
7	jeśli x_1 jest P_3 i x_2 jest C_1 , to ryzyko jest kontrolowane
8	jeśli x_1 jest P_3 i x_2 jest C_2 , to ryzyko jest nieakceptowane
9	jeśli x_1 jest P_3 i x_2 jest C_3 , to ryzyko jest nieakceptowane

W następnym etapie wykonano działania implikacji przesłanek poszczególnych reguł. W tym celu wykorzystano operator T-normy w postaci iloczynu algebraicznego. W przypadku reguły nr 1 działanie to miało postać:

- przesłanka reguły: jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_1 , wówczas $\mu_{P_1}(x_1)\mu_{C_1}(x_2)$.

Proces agregacji reguł polega na połączeniu reguł o tej samej konkluzji, tj. w analizowanym przypadku odpowiedni poziom ryzyka (tolerowane, kontrolowane, nieakceptowane). Reguły łączone są za pomocą spójnika „lub”. W ten sposób otrzymano trzy grupy reguł w postaci:

- R_T : jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_1 lub x_1 jest P_1 i x_2 jest C_2 lub x_1 jest P_2 i x_2 jest C_1 , to ryzyko jest tolerowane,

- R_K : jeśli x_1 jest P_1 i x_2 jest C_3 lub x_1 jest P_2 i x_2 jest C_2 lub x_1 jest P_3 i x_2 jest C_1 , to ryzyko jest kontrolowane,
- R_N : jeśli x_1 jest P_2 i x_2 jest C_3 lub x_1 jest P_3 i x_2 jest C_2 lub x_1 jest P_3 i x_2 jest C_3 , to ryzyko jest nieakceptowane.

Wnioskowanie rozmyte wymaga oceny stopnia przynależności poszczególnych przesłanek – im wyższy stopień spełnienia przesłanki (wyższy stopień przynależności), tym wyższy jest udział danej reguły w wyznaczeniu końcowego wniosku na podstawie bazy reguł. W celu wykonania działania w każdej grupie reguł spójnik „lub” zastąpiono operatorem S-normy typu „max” (4). W analizowanym przykładzie wartości funkcji przynależności poszczególnych reguł wynosiły:

– $\mu(R_T)$:

$$\max\{\mu_{P_1}(x_1)\mu_{C_1}(x_2), \mu_{P_1}(x_1)\mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_2}(x_1)\mu_{C_1}(x_2)\} = \{0,48 \cdot 0,0, 0,48 \cdot 0,96, 0,52 \cdot 0,0\} = 0,46$$

– $\mu(R_K)$:

$$\max\{\mu_{P_1}(x_1)\mu_{C_3}(x_2), \mu_{P_2}(x_1)\mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_3}(x_1)\mu_{C_1}(x_2)\} = \{0,48 \cdot 0,04, 0,52 \cdot 0,96, 0,0 \cdot 0,0\} = 0,50$$

– $\mu(R_N)$:

$$\max\{\mu_{P_2}(x_1)\mu_{C_3}(x_2), \mu_{P_3}(x_1)\mu_{C_2}(x_2), \mu_{P_3}(x_1)\mu_{C_3}(x_2)\} = \{0,52 \cdot 0,04, 0,0 \cdot 0,96, 0,0 \cdot 0,04\} = 0,02$$

Wynikowe funkcje przynależności charakteryzują stopień przynależności do poszczególnych poziomów ryzyka:

- ryzyko tolerowane: $\mu(R_T) = 0,46$,
- ryzyko kontrolowane: $\mu(R_K) = 0,50$,
- ryzyko nieakceptowane: $\mu(R_N) = 0,02$.

Przedstawione wartości na tym etapie charakteryzują ryzyko awarii sieci wodociągowej w sposób rozmyty. Aby otrzymać konkretną wartość ryzyka należy przeprowadzić proces wyostrzenia (zamiana wartości rozmytych w wartość zdeterminowaną). Transformację zbioru rozmytego w wartość nierozmytą można wykonać różnymi metodami [12, 18, 22]. W przypadku proponowanego modelu wykorzystano metodę singletonów wg równania (10):

$$r = \frac{\sum_1^3 r_{sr} \mu(R)}{\sum_1^3 \mu(R)} \quad (10)$$

w którym:

r_{sr} – wartość ryzyka (każdego poziomu), przyjęta jako wartość środkowa z przedziału wg rysunku 2

$\mu(R)$ – wartość funkcji przynależności poszczególnych reguł

Wartość wyjściowa $y=r$ modelu, będąca oceną ryzyka awarii sieci wodociągowej, wynosiła 3,7.

Podsumowanie

Do kompletnej analizy i oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej wymagana jest obszerna baza różnorodnych danych eksploatacyjnych. 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 wartości poszczególnych parametrów ryzyka. Otrzymane w ten sposób dane stanowią bazę ocen subiektywnych, które są podstawą do rozmytego modelowania ryzyka. Teoria zbiorów rozmytych umożliwia analizę ryzyka awarii sieci wodociągowej w języku naturalnym (np. małe straty, ryzyko tolerowane) na podstawie doświadczenia ekspertów. Pozwala także na modelowanie zależności nieliniowych, gdzie opis analityczny, statystyczny lub probabilistyczny jest trudny lub niemożliwy. Rozmyte modelowanie ryzyka umożliwia zastosowanie adaptacyjnej

techniki doboru parametrów na podstawie danych uczących (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) i może być łączone z konwencjonalnymi metodami analizy ryzyka.

Zaprezentowana metodologia pozwala na opracowanie rozmytego modelu ryzyka awarii sieci wodociągowej w konkretnym systemie dystrybucji wody. Proces wyostrzenia jest końcowym etapem modelu i podaje wartość ryzyka, która wymaga interpretacji przez operatora systemu lub może stanowić bazę komputerowego modelu ekspertowego w zintegrowanym systemie sterowania całym systemem dystrybucji wody. W przypadku posiadania kompletnych i pewnych danych dotyczących parametrów ryzyka zalecane jest stosowanie klasycznych metod analizy ryzyka (np. metod matrycowych). Stosowanie zaprezentowanej metody rozmytej analizy ryzyka uzasadnione jest w przypadku, gdy posiadana wiedza jest nieprecyzyjna lub niepewna i stanowi alternatywę dla konwencjonalnych metod analizy i oceny ryzyka. Rozmyta analiza ryzyka wymaga wiedzy z zakresu analizy ryzyka oraz teorii zbiorów rozmytych, a opracowany model może być wykorzystany z powodzeniem przez operatorów systemu dystrybucji wody.

LITERATURA

1. A.L. KOWAL: Przyczyny i zapobieganie zmianom jakości wody w systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 4, ss. 3–6.
2. H. HOTŁOŚ: Analiza strat wody w systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 1, ss. 17–24.
3. J. RAK: Selected problems of water supply safety. *Environment Protection Engineering* 2009, Vol. 35, No. 2, pp. 23–28.
4. E.S. KEMPA: Ryzyko w procesach i obiektach inżynierii sanitarnej. *Ochrona Środowiska* 1995, vol. 17, nr 2, ss. 43–48.
5. J. RAK: Metoda szacowania ryzyka zagrożenia systemu zaopatrzenia w wodę. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 2, ss. 33–36.
6. J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Uwarunkowania podejmowania ryzyka na przykładzie systemu zaopatrzenia w wodę. *Ochrona Środowiska* 2006, vol. 28, nr 2, ss. 57–60.
7. S. KAPLAN, B.J. GARRICK: On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis* 1981, Vol. 1, No. 1, pp. 11–27.
8. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Szacowanie akceptacji ponoszenia kosztów ryzyka związanego z funkcjonowaniem systemu zaopatrzenia w wodę. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 3, ss. 69–72.
9. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Water supply system reliability management. *Environment Protection Engineering* 2009, Vol.35, No. 2, pp. 29–35.
10. T. AVEN: A conceptual framework for risk assessment and risk management. *Journal of Polish Safety and Reliability Association* 2010, Vol. 1, pp. 15–27.
11. M. BRAGLIA, M. FROSOLINI, R. MONTANAR: Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management* 2003, Vol. 20, No. 4, pp. 503–524.
12. D. DUBOIS, H. PRADE: Fuzzy Sets and Systems: Theory and Application. Academic Press, New York 1980.
13. J. KLUSKA: Analytical Methods in Fuzzy Modelling and Control. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2009.
14. L.A. ZADEH: Fuzzy sets. *Information and Control* 1965, Vol. 8, pp. 338–353.
15. Y.Y. HAİMES: Risk Modeling, Assessment and Management. Wiley, New York 1998.
16. D.W. HUBBARD: The Failure of Risk Management. Wiley, New York 2009.

17. Y. KLEINER, B. RAJANI, R. SADIQ: Failure risk management of buried infrastructure using fuzzy-based techniques. *Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua* 2006, Vol. 55, No. 2, pp. 81–94.
18. H.-M. LEE: Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development. *Fuzzy Sets and Systems* 1996, Vol. 79, No. 3, pp. 323–336.
19. A. MARKOWSKI, S. MANNAN: Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials* 2008, Vol. 59, No. 1, pp. 152–156.
20. R. SADIQ, Y. KLEINER B. RAJANI: Water quality failures in distribution networks – risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. *Risk Analysis* 2007, Vol. 27, No 5, pp. 1381–1394.
21. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Model of risk of water mains failure using fuzzy logic. *Journal of Polish Safety and Reliability Association* 2010, Vol. 1. pp. 255–265.
22. E.H. MAMDANI: Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. *Fuzzy Sets and Systems* 1977, Vol. 26, pp. 1182–1191.
23. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Zarządzanie ryzykiem w ramach planów bezpieczeństwa wody. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 4, ss. 57–60.
24. I. ZIMOCH: Bezpieczeństwo działania systemu zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 51–55.

Tchórzewska-Cieślak, B. A Fuzzy Model for Failure Risk in Water-pipe Networks Analysis. *Ochrona Środowiska* 2011, Vol. 33, No. 1, pp. 35–40.

Abstract: To perform reliable risk analyses and assessments regarding failure modes and effects in water-pipe networks, it is necessary to have access to a comprehensive database. A major problem in failure risk analysis is the uncertainty of the operating data required both for statistical analysis and cause-and-effect assessment. This paper presents a model for the analysis of failure risk in a water-pipe network (according to the definition including the

probability of failure occurrence and consequences). The data uncertainty problem was considered using the theory of fuzzy sets. Fuzzy modeling of risk enables the application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and can be combined with conventional methods of risk analysis. Risk analysis using fuzzy logic is not a standard solution. The model proposed in this paper may constitute a part of a complex model for failure risk management of a water-pipe network, and may be of practical use to the operator of a water distribution system.

Keywords: Water-pipe network, risk, failure, fuzzy logic.