

**Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK<sup>1</sup>**  
**Krzysztof BORYCZKO<sup>2</sup>**  
**Izabela PIEGDOŃ<sup>3</sup>**

## **NIEKONWENCJONALNE METODY ANALIZY RYZYKA AWARII W SYSTEMACH ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA W WODĘ**

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) jest jednym z priorytetowych systemów technicznych wchodzących w skład podziemnych infrastruktur miejskich. Podstawową kategorią związaną z możliwością utraty bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW jest ryzyko. Według jednej z podstawowych definicji ryzyko jest kombinacją prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i negatywnych skutków, które może wywołać. Proces analizy ryzyka na potrzeby analizy bezpieczeństwa konsumentów wody obejmuje najczęściej: określenie liczby mieszkańców korzystających z wodociągu, wyznaczenie reprezentatywnych zdarzeń awaryjnych i określenie dla nich scenariuszy rozwoju w celu oszacowania strat, określenie prawdopodobieństwa (częstotliwości) występowania zdarzeń awaryjnych. Problem w analizach ryzyka pojawia się w przypadku bardzo złożonych systemów, gdy baza danych jest niepewna, a także w tzw. małych wodociągach, gdzie brak jest bazy danych lub jest ona niepełna. W takich sytuacjach uzupełnieniem bazy danych jest wiedza i doświadczenia ekspertów, a także nowoczesne modele oraz metody pozwalające na analizę i symulację ryzyka. Przykładem są metody oparte na tzw. modelach miękkich, w tym sieci bayesowskie, modelowanie rozmyte. Innym aspektem jest wykorzystanie nowoczesnych narzędzi informatycznych typu GIS. Badania tego typu wymagają nie tylko odpowiedniej metodologii, ale również szczególnej i uporządkowanej bazy danych eksploatacyjnych. Warunkuje to prawidłową analizę statystyczną danych oraz zastosowanie odpowiedniego modelu przyczynowo-skutkowego. W pracy przedstawiono niekonwencjonalne metody analizy ryzyka awarii w SZZW, uwzględniające metody symulacyjne, bazy danych, aplikacje GIS, teorię zbiorów rozmytych, modelowanie neuronowo-rozmyte oraz rozmyte drzewa niezdatności.

**Słowa kluczowe:** zaopatrzenie w wodę, ryzyko, GIS, zbiory rozmyte

---

<sup>1</sup> Barbara Tchórzewska-Cieślak, Politechnika Rzeszowska

<sup>2</sup> Krzysztof Boryczko, Politechnika Rzeszowska

<sup>3</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Izabela Piegdoń, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651427, piegi@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) jako złożony system techniczny składa się z powiązanych ze sobą funkcjonalnie obiektów oraz podsystemów stanowiących integralną całość, których zadaniem jest dostarczenie wody zdatnej do spożycia dla mieszkańców poszczególnych osiedli miast i wsi. Jest to jeden z priorytetowych systemów technicznych wchodzących w skład podstawowej infrastruktury aglomeracji miejskich. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) coraz częściej alarmuje o tzw. światowym kryzysie wodnym związanym nie tylko ze zmieniającym się klimatem, ale również z zanieczyszczeniem środowiska wodnego, zwiększającą się liczbą ludności (szczególnie w regionach biednych), występowaniem w różnych rejonach świata konfliktów zbrojnych. Kwestia zaopatrzenia w wodę niejednokrotnie jest wykorzystywana przez strony konfliktów, czego przykładem może być walka z o tamę w Mosulu na Bliskim Wschodzie czy brak wody w rejonach Donbasu.

Woda transportowana siecią wodociągową powinna być bezpieczna dla zdrowia, a także dostarczana w wymaganej ilości i pod wymaganym ciśnieniem. Jako paradygmat przyjmuje się, że miarą utraty bezpieczeństwa SZZW jest ryzyko związane z zawodnością poszczególnych elementów oraz całych jego podsystemów. W zakresie zarządzania ryzykiem w systemach wodociągowych obowiązuje europejska norma EN 15975-1-2011: Security of drinking water supply – Guidelines for risk and crisis management – Part 1: Crisis management. W Polsce są to odpowiednio normy PN-EN 15 975-2:2013-12 E oraz PN-EN 15975-1-2011.

W pracy przyjęto, że ryzyko awarii jest funkcją prawdopodobieństwa zajścia awarii, jej skutków oraz stopnia podatności na zagrożenie. Badania prowadzone w tym zakresie [2, 9, 14, 15, 17, 18, 23, 27, 28, 33, 39] obejmują szeroki zakres analiz przyczynowo-skutkowych zdarzeń awaryjnych związanych z funkcjonowaniem i eksploatacją systemu. Badania tego typu wymagają odpowiedniej metodologii, ale również szczegółowej i uporządkowanej bazy danych eksploatacyjnych. Warunkuje to prawidłową analizę statystyczną danych oraz zastosowanie odpowiedniego modelu przyczynowo-skutkowego, np. drzewa zdarzeń czy błędów w aspekcie analizy różnych scenariuszy awaryjnych, które mogą być przyczyną utraty bezpieczeństwa konsumentów wody.

Problem w analizach pojawia się wtedy, gdy systemy są bardzo złożone, baza danych jest niepewna, a także w tzw. małych wodociągach, gdzie brak jest bazy danych lub jest ona niepełna. W takich sytuacjach uzupełnieniem bazy danych jest wiedza i doświadczenia ekspertów, a także nowoczesne modele oraz metody pozwalające na analizę oraz symulację ryzyka. Przykładem są metody oparte na tzw. modelach miękkich, w tym sieci baysowskie, oraz modelowanie rozmyte [34, 35]. Innym aspektem jest wykorzystanie nowoczesnych narzędzi informatycznych, takich jak bazy typu *Geographic Information Systems* (GIS), systemy *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) czy różnorodne

oprogramowanie typu MATLAB, EPANET. Głównym celem pracy jest przedstawienie niekonwencjonalnych metod analizy ryzyka awarii w SZZW.

## 2. Metody analizy ryzyka

Podział metod analizy ryzyka przedstawiono na rys. 1. Najogólniej metody analizy ryzyka dzieli się na:

- ilościowe metody analizy ryzyka (ang. *Quantitative Methods for Risk Analysis*, QRA) – są to metody, które przetwarzają dane ilościowe (mierzalne) i wyznaczają konkretną wartość ryzyka; do metod tych zalicza się metody oparte na statystyce matematycznej oraz rachunku prawdopodobieństwa [24],
- jakościowe metody oceny (szacowania) ryzyka (ang. *Qualitative Methods of Risk Analysis – QLRA*) – w odróżnieniu od ilościowych nie uwzględniają liczbowego wyznaczania ryzyka z wykorzystaniem metod probabilistycznych (np. rozkładów gęstości) [24],
- metody ilościowo-jakościowe analizy ryzyka (ang. *Quantitative-Qualitative Methods for Risk Analysis*) – zalicza się do nich m.in. metody matrycowe, metody drzewa niezdatności (ang. *Fault Tree Analysis*, FTA) [25] i drzewa zdarzeń (ang. *Event Tree Analysis*), sieci bayesowskie, logikę rozmytą oraz sieci neuronowe,
- metody symulacyjne z wykorzystaniem komputerowych modeli hydraulicznych oraz systemów sterowania, przetwarzania i rejestracji danych (na typu SCADA), komputerowych baz danych, np. typu GIS (ang. *geograficzny system informacji*), a także symulację metodą Monte Carlo, które stanowią narzędzie wspomagające proces analizy ryzyka.



Rys. 1. Podział metod analizy ryzyka w SZZW

Fig. 1. The division of methods of risk analysis in SZZW

Metody jakościowe szacowania ryzyka w odróżnieniu od ilościowych nie uwzględniają liczbowego wyznaczania ryzyka z wykorzystaniem metod probabilistycznych (np. rozkładów gęstości) [7]. Obecnie istotnym elementem w ana-

lizach i ocenach ryzyka jest możliwość zastosowania różnego rodzaju oprogramowania, które istotnie wpływa na stopień szczegółowości przeprowadzanych obliczeń. Oprogramowanie komputerowe możliwe do zastosowania w analizach i ocenach ryzyka w SZZW można podzielić na podstawowe grupy:

- programy do symulacji komputerowych (np. oparte na modelach hydraulicznych sieci wodociągowej, jak EPANET, ISYDYW),
- programy umożliwiające analizę różnych scenariuszy awaryjnych, np. oparte na analizach drzew zdarzeń, niezdatności, związkach przyczynowo-skutkowych powstawania zagrożeń oraz na zarządzaniu i raportowaniu danych (XFMEA 4, BlockSim 7, RCM++4),
- programy umożliwiające analizę rozkładów prawdopodobieństwa zdarzeń awaryjnych (np. Weibull++, STATISTICA),
- programy do statystycznej analizy danych (np. STATISTICA),
- programy umożliwiające prognozowanie zdarzeń niepożądanych oraz ryzyka (np. MATLAB, RENO),
- programy umożliwiające wizualizację opracowanych modeli zdarzeń awaryjnych (np. SCADA).

Oddzielną grupę stanowią aplikacje GIS służące m.in. do wizualizacji, aktualizacji oraz przetwarzania danych przestrzennych (np. ArcInfo, Quantum GIS, G-Technology). Na rynku dostępna jest różnorodna gama programów, co umożliwia wybór takiego, który jest dostosowany do specyfiki SZZW oraz do celów analizy i oceny ryzyka.

### 3. Konwencjonalne metody analizy ryzyka

#### 3.1. Metody ilościowo-jakościowe

W SZZW (podobnie jak w większości zastosowań inżynierskich) obowiązuje podstawowa definicja ryzyka, która definiuje ryzyko jako iloczyn prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niepożądanych i strat powstałych w wyniku ich zajścia. Proces analizy ryzyka na potrzeby analizy bezpieczeństwa konsumentów wody obejmuje najczęściej [26]:

- określenie liczby mieszkańców korzystających z wodociągu,
- wyznaczenie reprezentatywnych zdarzeń awaryjnych i określenie dla nich scenariuszy rozwoju w celu oszacowania strat,
- określenie prawdopodobieństwa (częstotliwości) występowania zdarzeń awaryjnych.

Obecnie obowiązuje rozbudowana definicja ryzyka, gdzie parametrami są prawdopodobieństwo awarii (P), skutki awarii (C) i podatność na zagrożenie (V), którą można wyrazić liczbą mieszkańców objętych zasięgiem SZZW (N). Tak przyjętą definicję ryzyka można przedstawić za pomocą równania [10]:

$$r = P \cdot C \cdot N \quad (1)$$

W ilościowych metodach matrycowych dla wszystkich parametrów ryzyka przypisuje się odpowiednie wagi punktowe (w przyjętej skali). Poszczególne parametry oznaczają:

- P – waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia danego reprezentatywnego zdarzenia niepożądanego,
- C – waga punktowa związana z wielkością strat,
- N – waga punktowa związana z zagrożoną liczbą mieszkańców.

Kategoryzacja poszczególnych parametrów przedstawia się następująco [26]:

- kategoria liczby mieszkańców zagrożonych N
  - niska – zagrożonych do 5 000 mieszkańców, N = 1,
  - średnia – zagrożonych od 5 001 do 50 000 mieszkańców, N = 2,
  - wysoka – zagrożonych powyżej 50 000 mieszkańców, N = 3,
- kategoria prawdopodobieństwa (częstotliwości) wystąpienia zdarzenia awaryjnego P
  - niska – mało prawdopodobne – raz na 10÷50 lat, P = 1,
  - średnia – dość prawdopodobne – raz na 1÷10 lat, P = 2,
  - wysoka – prawdopodobne – 1÷10 razy w roku bądź częściej, P = 3,
- kategoria skutków C
  - mała – dostrzegalne zmiany organoleptyczne wody, pojedyncze skargi konsumentów, straty finansowe do  $5 \cdot 10^3$  EUR, C = 1,
  - średnia – znaczna uciążliwość organoleptyczna (odór, zmiana barwy i mętności), niedyspozycje zdrowotne konsumentów, liczne skargi, komunikaty w regionalnych mediach publicznych, straty finansowe do  $10^5$  EUR, C = 2,
  - wysoka – wymagane leczenie szpitalne osób, zaangażowanie profesjonalnych służb ratowniczych, wyniki badań organizmów wskaźnikowych ujawniające wysoki poziom substancji toksycznych, informacje w mediach ogólnokrajowych, strata finansowa powyżej  $10^5$  EUR, C = 3.

Parametry ryzyka przyjmują zatem wartości: P = {1,2,3}, C = {1,2,3} N = {1,2,3}. Macierz ryzyka ma postać:

$$R_{PCN} = \begin{vmatrix} 111 & 121 & 131 & 112 & 122 & 132 & 113 & 123 & 133 \\ 211 & 221 & 231 & 212 & 222 & 232 & 213 & 223 & 233 \\ 311 & 321 & 331 & 312 & 322 & 332 & 313 & 323 & 333 \end{vmatrix} \quad (2)$$

Zbiór możliwych wartości ryzyka: R = {1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 18, 27}.

Ocena ryzyka to porównanie wyznaczonej wartości ryzyka z wartościami kryterialnymi:

- ryzyko tolerowane  $RT - (1 \div 6 >$ ,
- ryzyko kontrolowane  $RK - (6 \div 8 >$ ,
- ryzyko nieakceptowane  $RN - (8 \div 27 >$ .

Należy zwrócić uwagę na fakt, że tak przeprowadzona ocena nie uwzględnia wag poszczególnych parametrów, tzn. każdy parametr P, C, N ma równoważne znaczenie w ocenie ryzyka, ponieważ ocenie podlega tylko końcowa jego wartość. Przykładowo, ryzyko równe 4 może być wynikiem iloczynów  $P = 2, C = 2, N = 1$  lub  $P = 2, C = 1, N = 2$  lub  $P = 1, C = 2, N = 2$ . W związku z tym taka analiza może być obciążona pewnego rodzaju niepewnością co do prawidłowej oceny ryzyka. Uwzględnienie ewentualnych wag dla poszczególnych parametrów ryzyka wymaga pogłębionych analiz oraz wiedzy ekspertów.

### 3.2. Metody symulacyjne

W analizach ryzyka metody symulacyjne odgrywają znaczącą rolę. Przedsiębiorstwa wodociągowe coraz chętniej korzystają z tych rozwiązań, ponieważ narzędzia do symulacji umożliwiają wykonywanie analiz ryzyka pracy SZZW. Metody symulacyjne polegają na przeprowadzeniu badań, w których system rzeczywisty jest opisywany za pomocą modeli matematycznych zaimplementowanych na komputerze. Wynik modelowania symulacyjnego zależy od wiarygodnego i zweryfikowanego modelu matematycznego (w przypadku sieci wodociągowej modelu hydraulicznego) badanego systemu. Na przestrzeni ostatnich lat niezwykle popularnym sposobem tworzenia modeli sieci wodociągowych stało się oprogramowanie EPANET, który jest tworem United States Environmental Protection Agency [30]. EPANET umożliwia wykonywanie symulacji przepływu wody w każdym z przewodów i ciśnienia w węzłach, sprawdzenie wysokości wody w zbiornikach wodociągowych czy czasu rozprzestrzeniania się substancji niebezpiecznych [38]. W oknie użytkownika możliwa jest wizualizacja sieci, dzięki której proces budowania modeli, a następnie jego edycja staje się łatwiejsza. Narzędzie, jakim jest EPANET, wspomaga proces utrzymania stałych parametrów pracy na sieci wodociągowej. Program EPANET umożliwia pełną wizualizację ryzyka braku dostawy wody do odbiorców, np. na skutek spadku ciśnienia wody w sieci czy awarii przewodu wodociągowego. Oprogramowanie EPANET umożliwia utworzenie map oraz modeli ryzyka związanych z brakiem dostawy wody do odbiorców oraz zasymulować różnorodne scenariusze zdarzeń. Tworzenie map ryzyka w wyniku awarii przewodów wodociągowych pozwala na identyfikowanie stref zagrożonych oraz podejmowanie decyzji dotyczących modernizacji oraz planów remontowych. Dzięki wizualizacji stref zagrożonych brakiem dostawy wody możliwe jest również określenie poziomu ryzyka braku dostawy wody [3].

Na rynku jest również dostępne nieco inne oprogramowanie oparte na modelowaniu stosowanym głównie w dziedzinie analiz ryzyka. Jednym z takich

programów jest RENO firmy ReliaSoft© [29]. RENO jest narzędziem umożliwiającym budowanie oraz uruchamianie złożonych analiz według probabilistycznych, jak i deterministycznych scenariuszy. Możliwe jest to za pomocą schematu blokowego oraz intuicyjnego podejścia podczas modelowania i symulacji. Możliwe jest tworzenie modeli blokowych stosowanych w kompleksowych analizach niezawodności, ryzyka, bezpieczeństwa, a także w podejmowaniu decyzji niezbędnych podczas planowania konserwacji [4].

## **4. Niekonwencjonalne metody analizy ryzyka**

### **4.1. Zastosowanie aplikacji GIS oraz baz danych w analizach ryzyka**

Wykorzystanie systemów informacji geograficznej w procesie analizy ryzyka SZZW stanowi istotny element zarządzania niezawodnością oraz bezpieczeństwem dostawy wody do odbiorców. Aplikacje GIS mogą stanowić istotny element wspomaganie procesu decyzyjnego w przedsiębiorstwach wodociągowych. System zawiera funkcje pozyskiwania oraz przetwarzania danych o awaryjności i pozwala na ich wizualizację przestrzenną. W literaturze [16, 19] omówiono funkcje, możliwości oraz zasady wdrażania aplikacji GIS w celu polepszenia działań związanych z zarządzaniem i eksploatacją sieci wodociągowej. Programy GIS umożliwiają pełną wizualizację komponentów wchodzących w skład infrastruktury krytycznej oraz śledzenie czynników mających wpływ na wzrost ryzyka.

Najprostszą formą analiz wykonywanych za pomocą narzędzi GIS jest prezentacja rozmieszczenia obiektów geograficznych poprzez wizualizację pewnych zjawisk oraz nieprawidłowości charakteryzujących sieci wodociągowe. Innym typem analiz możliwych do wykonania są operacje wyszukiwania obiektów spełniających dane kryteria stawiane w tzw. zapytaniach, a także selekcja obiektów z bazy danych. Zapytania umożliwiają identyfikację i analizę określonych zestawów obiektów. Zapytania oparte na atrybutach wyszukują obiekty według ich cech opisowych. Przykładem tego może być wyszukiwanie przez przedsiębiorstwo wodociągowe przewodów charakteryzujących się np. największą intensywnością uszkodzeń. Kolejnym typem analiz przestrzennych możliwych do wykonania jest wyszukiwanie elementów znajdujących się w pobliżu określonego obiektu geograficznego. Aby tego dokonać, możliwe jest utworzenie wokół niego bufora. Utworzony bufor można nałożyć na inne warstwy bazy danych w celu zidentyfikowania obszarów znajdujących się w pobliżu analizowanego obiektu.

Istotną cechą wykonywanych analiz jest możliwość wykorzystywania wyniku jednej procedury analitycznej w innej analizie. Wymienione czynności umożliwiają stworzenie w narzędziu GIS mapy ryzyka z pełną wizualizacją komponentów wchodzących w skład analizy. Mapy ryzyka można stworzyć na podstawie awaryjności sieci wodociągowej, wieku przewodów oraz ich aktual-

nego stanu technicznego. Współczesne systemy geoinformacyjne stanowią często rozbudowane, zintegrowane systemy z narzędziami informatycznymi, jakimi są monitoring sieci wodociągowej czy modele matematyczne [14, 39]. Aplikacje GIS można integrować z [8]:

- systemami obsługi dokumentacji archiwalnej (ang. *Electronic Document Management Systems*, EDMS) – w połączeniu z GIS pozwalają na proste i szybkie przeglądanie dokumentów przechowywanych w bazie, dotyczy to szczególnie dokumentacji obiektów przestrzennych,
- systemem zarządzania pracami (ang. *Work Management Systems*, WMS) – system WMS, opierając się na danych przestrzennych, ewidencyjnych, pozwala na planowanie prac związanych z eksploatacją, modernizacją, rozbudową sieci wodociągowej; do głównych zadań WMS należą m.in. rejestracja zgłoszeń o stanach awaryjnych, wspomaganie decyzyjne w procesie usuwania awarii oraz ich ewidencja, tworzenie harmonogramów prac remontowych,
- systemem realizacji produkcji (ang. *Manufacturing Execution System*, MES) – system pozwala na automatyczne zarządzanie produkcją, w szczególności chodzi o planowanie, nadzorowanie i optymalizację procesów technologicznych pod kątem np. jakości wody dostarczanej odbiorcom na skutek procesu produkcyjnego,
- systemem zarządzania relacjami z klientem (ang. *Customer Relationship Management*, CRM) – integracja ta pozwala na zarządzanie interakcją z klientami przedsiębiorstwa; zastosowanie systemów CRM wraz z aplikacjami GIS umożliwia zbieranie informacji o klientach korzystających i niekorzystających z usług przedsiębiorstwa,
- systemem planowania zasobów przedsiębiorstwa (ang. *Enterprise Resource Planning*, ERP) – dzięki informacjom aplikacji GIS dotyczących awarii na sieci wodociągowej oraz jej stanu system ERP ułatwia planowanie i nadzór nad realizacją działań związanych z inwestycjami i remontami.

Współpracujące ze sobą systemy GIS i systemy monitoringu (np. SCADA) mogą być podstawą do stworzenia zintegrowanego systemu informatycznego. Integracja ta usprawnia prace związane z procesem inwestycyjnym, projektowania, sterowania operacyjnego siecią, wizualizacją obiektów, prezentacją wyników czy sygnalizacją o stanach awaryjnych.

#### 4.2. Posybilistyczna analiza ryzyka

Tradycyjnie do modelowania ryzyka awarii jest stosowany rachunek prawdopodobieństwa, w którym niezbędny jest statystycznie reprezentatywny zbiór danych o awariach. Niejednokrotnie w praktyce warunek ten nie może być spełniony. W takim przypadku stosowanie arbitralnie rachunku prawdopodobieństwa i jego rozkładów prowadzi do niewiarygodnych wyników. Systemy rozmyte mają zastosowanie przede wszystkim w modelach, gdzie występują dane nie-

precyzyjne (np. około liczby 1) bądź niepewne lub mają charakter lingwistyczny (prawdopodobieństwo małe). Oprogramowanie MATLAB (Fuzzy Toolbox) umożliwia analizę rozmytego modelu ryzyka FRA (ang. *Fuzzy Risk Analysis*) na podstawie założonej bazy reguł. Rozmyta analiza ryzyka jest metodą opartą na logice rozmytej [12]. 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. To płynne przejście jest określone za pomocą tzw. funkcji przynależności  $\mu_A$ , gdzie  $A$  oznacza zbiór liczb rozmytych. Poszczególne parametry, np. charakteryzujące wartość ryzyka, opisuje się za pomocą zmiennych lingwistycznych, które następnie zamienia się na postać rozmytą [6, 21]. Zbiór rozmyty  $A$  jest określony jako:  $A = \{\mu_A(x), x\}$ . 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) [12].

Zmienne występujące w regułach są zmiennymi lingwistycznymi. Typowy rozmyty model decyzyjny przeprowadza się w czterech podstawowych krokach [6]:

- 1) rozmywanie danych (ang. *fuzzification*), czyli przekształcanie zmiennych wejściowych do modelu w postać rozmytą za pomocą założonych funkcji przynależności i ich parametrów,
- 2) utworzenie bazy reguł oraz założenie modelu wnioskowania rozmytego (np. model Mamdaniego [21], Takagi-Sugeno [31]),
- 3) agregacja reguł (grupowanie) oraz wnioskowanie (inferencja) na podstawie reguły globalnej,
- 4) wyostrzanie (ang. *defuzzification*) otrzymanego wyniku, jeśli wyjściem z modelu jest wartość rozmyta.

Ogólna postać tzw. bazy reguł przedstawia się następująco: jeśli  $x_1$  jest  $P_i$  i  $x_2$  jest  $C_j$ , to  $y = r_{ij}$ .

Bazę reguł można przedstawić w postaci tzw. rozmytej pamięci asocjacyjnej FAM (ang. *Fuzzy Associative Memories*), wprowadzonej w 1992 r. [13]. Zakładając trójstopniową skalę ryzyka, tj. ryzyko tolerowane RT, ryzyko kontrolowane RK, ryzyko nieakceptowane NK, bazę reguł w postaci tablicy FAM przedstawia tab. 1.

Tabela 1. Tablice FAM dla rozmytego modelu analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej

Table 1. FAM matrix of fuzzy model for the risk analysis of water supply network

$C_i/P_j$	P1	P2	P3
C1	RT	RT	RK
C2	RT	RK	RN
C3	RK	RN	RN

Podjęcie posybilistyczne oparte na teorii zbiorów rozmytych można znaleźć w tzw. teorii możliwości (ang. *theory of possibility*). Fundamentem teorii możliwości jest tzw. rozkład możliwości, za pomocą którego można opisać przynależność danych do określonego zbioru rozmytego. Funkcja rozkładu możliwości jest równa funkcji przynależności do zdefiniowanego zbioru rozmytego [12]. Szczególnym przypadkiem teorii możliwości jest tzw. teoria Dempstera-Shafera (DST), zwana matematyczną teorią ewidencji [37]. Teoria ta umożliwia łączenie różnych hipotez (podawanych przez ekspertów) w celu określenia wyjściowej wartości prawdopodobieństwa. Różnym hipotezom przypisuje się wartości prawdopodobieństwa za pomocą tzw. *Basic Probability Assignment* (BPA) oraz *Mass Function* (the mass  $m(X)$  of  $X$ ) funkcji przekonania  $m$  (ang. *Basic Probability Assignment*).

Rozmyta analiza ryzyka FRA (ang. *Fuzzy Risk Analysis*) może być zastosowana w połączeniu z sieciami neuronowymi (ang. *Neuro-Fuzzy Risk Analysis*) lub algorytmami genetycznymi (ang. *Genetic Algorithm Risk Analysis*), stanowiąc bazę dla inteligentnych systemów zarządzania ryzykiem.

#### 4.3. Modelowanie neuronowo-rozmyte

Sztuczne sieci neuronowe (ang. *Artificial Neural Networks*) są definiowane jako typ układów uczących, a ich działanie opiera się na zasadach działania biologicznych neuronów. Wiedza zapamiętywana jest w wartościach wag połączeń synaptycznych. Obecnie różne typy sieci neuronowych mają różne zastosowania, m.in. w diagnostyce, procesach prognozowania czy optymalizacji różnych zjawisk [1].

Modele neuronowo-rozmyte (NR) łączą cechy modelowania rozmytego oraz systemów neuronowych. System NR składa się z tych samych bloków wnioskowania, co system rozmyty, z tym że na każdym etapie obliczenia są wykonywane przez uczące się sieci neuronowe. W bloku rozmywania każdy neuron reprezentuje funkcję przynależności poprzedzającej go reguły rozmytej [5, 13, 20, 22]. Istnieje wiele 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 jest oparty na modelu rozmytym Takagi-Sugeno-Kanga (TSK) [31], w którym uczenie przebiega z zastosowaniem metody wstecznej propagacji błędów [11]. System ten został zaproponowany przez J.S.R. Janga, który wykazał, że system TSK jest równoważny sieci neuronowej o czterech warstwach ukrytych [20, 22].

Model ANFIS można zaadaptować na potrzeby analizy ryzyka awarii w systemach wodociągowych. Ogólna postać modelu przedstawia się następująco [32]:

- parametry wejściowe do modelu
  - $x_1$  – zmienna charakteryzująca prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia awaryjnego P,

- $x_2$  – zmienna charakteryzująca straty poniesione w wyniku zajścia zdarzenia awaryjnego C,
- L1 – każda zmienna jest opisana własną funkcją przynależności za pomocą trzech wartości lingwistycznych; dla poszczególnych zmiennych zbiory rozmyte postaci  $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ ,  $C = \{C_1, C_2, C_3\}$  są scharakteryzowane za pomocą funkcji przynależności,
- L2 – w warstwie tej jest wyznaczany tzw. poziom zapłonu (waga  $w_i$ ) poszczególnych reguł z wykorzystaniem operatorów T-normy (zastosowano operator w postaci iloczynu algebraicznego); poszczególne wagi są wyznaczane według ogólnej zależności

$$w_j = \mu_{P_i}(x_1) \cdot \mu_{C_i}(x_2) \quad (3)$$

gdzie:  $i = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ .

Poszczególne wagi wynoszą:

$$w_1 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2) \quad (4)$$

$$w_2 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2) \quad (5)$$

$$w_3 = \mu_{P_1}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2) \quad (6)$$

$$w_4 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2) \quad (7)$$

$$w_5 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2) \quad (8)$$

$$w_6 = \mu_{P_2}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2) \quad (9)$$

$$w_7 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_1}(x_2) \quad (10)$$

$$w_8 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_2}(x_2) \quad (11)$$

$$w_9 = \mu_{P_3}(x_1) \cdot \mu_{C_3}(x_2) \quad (12)$$

- L3 – warstwa ta nie ma parametrów, a jej wyjście odpowiada unormowanemu poziomowi zapłonu poszczególnych reguł według zależności

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^9 w_j} \quad (13)$$

- L4 – wyjściem są konkluzje wyznaczone według zależności

$$y_j = \overline{w_j} \cdot r_j \quad (14)$$

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 – wyjściem z modelu jest wyostrzona wartość ryzyka wyliczona według zależności

$$y = r = \sum_{j=1}^9 \overline{w_j} y_j \quad (15)$$

#### 4.4. Rozmyte drzewa niezdatności

Metoda drzew niezdatności służąca do analizy przyczyn wystąpienia danego zdarzenia szczytowego wykorzystuje w swojej konstrukcji dwie podstawowe bramki logiczne: AND i OR. W przypadku niepewnych informacji o prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzeń elementarnych zaproponowano zastosowanie teorii zbiorów rozmytych.

Dla bramki rozmytej FAND jest spełniona zależność [25]:

$$\text{FAND}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \prod_{i=1}^n p_i \quad (16)$$

gdzie  $p_1 \div p_n$  – prawdopodobieństwo wejścia do bramki.

Dla trójkątnych funkcji przynależności charakterystyka zbioru jest opisana za pomocą funkcji przynależności (a, b, c). Dla tej funkcji [36]:

$$\text{FAND}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \prod_{i=1}^n (a, b, c) = \left( \prod_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n b_i, \prod_{i=1}^n c_i \right) \quad (17)$$

Dla bramki rozmytej FOR jest spełniona zależność:

$$\text{FOR}(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (18)$$

Dla trójkątnych funkcji przynależności charakterystyka zbioru jest opisana za pomocą funkcji przynależności (a, b, c). Dla tej funkcji [36]:

$$\text{FOR}(p_1, p_2, \dots, p_n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (a, b, c)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - a, 1 - b, 1 - c) =$$

$$\begin{aligned} &= 1 - \left( \prod_{i=1}^n (1 - a_i), \prod_{i=1}^n (1 - b_i), \prod_{i=1}^n (1 - c_i) \right) \\ &= (1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - c_i)) \end{aligned} \quad (19)$$

## 5. Podsumowanie

Rzetelne oraz kompletne bazy danych o systemach stanowią podstawę do wykonywania mniej lub bardziej skomplikowanych analiz ryzyka pod względem braku dostawy wody do odbiorców. Stale uaktualniane dane służą jako fundament w aplikacjach GIS. Programy GIS umożliwiają tworzenie map ryzyka na skutek zajścia zdarzeń niepożądanych.

Różnorodność stosowania programów symulacyjnych umożliwiła wizualizację analizy ryzyka za pomocą modeli i schematów. Służą one jako narzędzie w podejmowaniu decyzji związanych z tworzeniem planów remontowych na sieci. Przedstawione przykłady zastosowania programu EPANET oraz RENO można zaadaptować dla każdego podsystemu dystrybucji wody, jego poszczególnych części lub elementów.

Ograniczeniem stosowania wszelkiego rodzaju programów do symulacji jest konieczność posiadania dokładnych danych o analizowanym systemie. Jeżeli nie ma możliwości uzyskania kompletnych danych eksploatacyjnych, w analizie ryzyka należy posłużyć się wiedzą ekspercką. Tak stworzoną bazę danych można uznać za podstawę do modelowania ryzyka metodami zbiorów rozmytych. Jeżeli nie jest możliwe uzyskanie dokładnych i kompletnych danych statystycznych, które są wymagane w analizie i ocenie ryzyka awarii sieci wodociągowej, potrzebne informacje można otrzymać od ekspertów. Na podstawie swojej wiedzy, doświadczenia i danych literaturowych oceniają oni 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. Jej zastosowanie pozwala na modelowanie zależności nieliniowych, gdzie opis analityczny, statystyczny lub probabilistyczny jest trudny lub niemożliwy.

Modelowanie posybilistyczne analizy i oceny ryzyka awarii w SZZW jest alternatywą dla klasycznych metod i modeli, i powinien być stosowany w przypadku posiadania niepewnej lub niepełnej wiedzy na temat czynników ryzyka. Rozmyta analiza ryzyka wymaga wiedzy z zakresu analizy ryzyka oraz teorii zbiorów rozmytych.

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.

## Literatura

- [1] Abraham A.: Adaptation of fuzzy inference system using neural learning, [in:] *Fuzzy Systems Engineering*, Macedo Mourelle L., Nedjah N. (eds.). Springer, New York, pp. 53-83.
- [2] Bajer J., Iwanejko R.: Eksploatacyjne badania niezawodności podstawowych elementów uzbrojenia pompowni wodociągowych. *INSTAL*, „Technika instalacyjna w budownictwie”, nr 10(288), 2008, s. 81-84.
- [3] Boryczko K., Tchórzewska-Cieślak B.: Analysis and assessment of the risk of lack of water supply using the EPANET program, [in:] *Environmental Engineering IV*, Dudzińska M.R., Pawłowski L., Pawłowski A. (eds.). Taylor & Francis Group, London 2013, pp. 63-68.
- [4] Boryczko K., Piegoń I., Eid M.: Collective water supply systems risk analysis model by means of RENO software, [in:] *Safety, reliability and risk analysis: Beyond the horizon*, Van Gelder P.H.A.J.M., Steenbergen R.D.J.M., Miraglia S., Vrouwenvelder A.C.W.M. (eds.). Taylor & Francis Group, London 2014, pp. 1987-1992.
- [5] Christodoulous S., Deligianni A.: A neurofuzzy decision framework for the management of water distribution networks. *Water Resource Management*, no. 24/2010, s. 1573-1650.
- [6] Dubois D., Prade H.: *Fuzzy sets and systems: Theory and application*. Academic Press, Nowy Jork 1980.
- [7] Dzienis L.: *Niezawodność wiejskich systemów zaopatrzenia w wodę*. Rozprawy Naukowe nr 4. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.
- [8] Góra W.: Zastosowanie GIS w systemach wodociągowych i kanalizacyjnych. *Rynek Instalacyjny*, Grupa Medium, nr 5/2008, s. 43-48.
- [9] Iwanejko R., Rybicki S.M.: Badania i ocena poziomu niezawodności sieci wodociągowych w wybranych miastach Polski. XX Jubileuszowa Krajowa Konferencja, VIII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”. PZITS O/Wielkopolski, Poznań-Gniezno 2008, s. 481-492.
- [10] Kaplan S., Garrick B.J.: On the quantitative definition of risk analysis, no. 1(1)/1981, pp. 11-27.
- [11] Klir G.J., Folger T.: *Fuzzy sets, uncertainty, and information*. Prentice-Hall, New York 1988.
- [12] Kluska J.: *Analytical methods in fuzzy modelling and control*. Springer-Verlag GmbH, Berlin 2009.
- [13] Kosko B.: *Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence*. Prentice Hall, New York 1992.
- [14] Kowalski D.: *Nowe metody opisu struktur sieci wodociągowych do rozwiązywania problemów ich projektowania i eksploatacji*. Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2011.
- [15] Królikowska J.: *Niezawodność funkcjonowania i bezpieczeństwa sieci kanalizacyjnej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.

- [16] Kwietniewski M.: GIS w wodociągach i kanalizacji. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [17] Kwietniewski M.: Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [18] Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Studia z zakresu inżynierii, nr 67. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2010.
- [19] Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Wróbel K.: Możliwości zastosowania GIS w wodociągach na przykładzie wybranego systemu dystrybucji wody. Ochrona Środowiska, nr 29(3), 2008, s. 73-76.
- [20] Łęski J.: Systemy neuronowe-rozmyte. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [21] Mamdani E.H.: Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. Fuzzy Sets and Systems, no. 26(12), 1977, pp. 1182-1191.
- [22] Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [23] Pawełek J., Wojdyna M.: Analiza uszkodzeń przewodów rozdzielczych w dużym systemie wodociągowym. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 2/2001, s. 49-54.
- [24] PN-EN-1050:1999: Zasady oceny ryzyka.
- [25] PN-EN 61025: Analiza drzewa niezdatności (FTA).
- [26] Rak J.: Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę. Badania systemowe. Inżynieria środowiska. Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2009.
- [27] Rak J.: Wybrane elementy zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie wodociągowym. Ochrona Środowiska, nr 4/2007, s. 61-64.
- [28] Rak J., Kucharski B.: Metoda analizy przyczyn i skutków szacowania ryzyka. XIX Krajowa Konferencja, VII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS O/Wielkopolski, Poznań-Zakopane 2006, s. 585-593.
- [29] Reliasoft Corporation. Reno Software Training Guide. ReliaSoft Corporation, Tuscon 2005.
- [30] Rossman L.A.: Epanet 2. Users manual. National Risk Management Research Laboratory. Office Of Research And Development, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio 2000.
- [31] Song H., Zhang H.Y., Chan C.W.: Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system. Soft Computing, no. 13(1), 2009, pp. 31-40.
- [32] Tchórzewska Cieślak B.: Analiza ryzyka awarii sieci wodociągowej z wykorzystaniem modelowania neuronowo-rozmytego, [w:] Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, Jeż-Walkowiak J., Dymaczewski Z., Nowak M. (red.). PZITS O/Wielkopolski, Poznań 2014, s. 179-189.
- [33] Tchórzewska-Cieślak B.: Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.

- [34] Tchórzewska-Cieślak B.: Model of risk of water mains failure using fuzzy logic, Journal of Polish Safety and Reliability Association. Polish Safety and Reliability Association, no. 1/2010, pp. 255-264.
- [35] Tchórzewska-Cieślak B.: Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociągowej. Ochrona Środowiska, nr 33(1), 2011, s. 35-40.
- [36] Tyagi S., Pandey D., Tyagi R.: Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis. International Journal of Engineering. Science and Technology, MultiCraft Ltd., no. 2(5), 2010, pp. 276-283.
- [37] Yager R.R.: On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. Information Sciences, no. 41(2), 1987, pp. 93-137.
- [38] Zimoch I.: Bezpieczeństwo działania systemów zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej. Ochrona Środowiska, nr 31(3), 2009, s. 51-55.
- [39] Zimoch I.: Zintegrowana metoda analizy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.

## UNCONVENTIONAL METHODS OF FAILURE RISK ANALYSIS IN COLLECTIVE WATER SUPPLY SYSTEMS

### Summary

The collective water supply system (CWSS) is one of the priority technical system which is included in the underground urban infrastructures. Basic category associated with the possibility of losing the safety of functioning the CWSS is risk. The basic definition of risk means that the risk is a combination of the probability of undesirable events and their the negative. The process of risk analysis for consumer safety analysis includes points: determination of the number of inhabitants using water from water network, the designation of the representative undesirable events, determine scenarios for them to estimate losses, determine the probability (frequency) of occurrence of the adverse event. The problem in risk analysis occurs when systems are very complex, the database is uncertain, as well as in the so-called. small water supply systems where there is no database or it is incomplete. In such situations, the complementary of database often is knowledge and experience of experts as well as modern models and methods for risk analysis and simulations. Examples are based on soft models such as Bayesian networks and fuzzy modelling. Another aspect is the use of GIS tools. Such studies require appropriate methodology but also a detailed and structured database about water networks. It determines the correct analysis of the data and the appropriate model causality. The paper presents an unconventional method of analysis of the risk of failure in CWSS, taking into account the method of simulation, databases, GIS applications, theory of fuzzy sets, neuro-fuzzy modelling and fuzzy fault tree.

**Keywords:** water supply, risk, GIS, fuzzy sets

*Przesłano do redakcji: 19.01.2015 r.*

*Przyjęto do druku: 28.03.2015 r.*

DOI: 10.7862/rb.2015.28