

Dr inż. Katarzyna Pietrucha-Urbanik

Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

AUTOREFERAT

dotyczący osiągnięć w pracy naukowo-badawczej

SPIS TREŚCI

1. DANE PERSONALNE	3
2. POSIADANE TYTUŁY I STOPNIE NAUKOWE	3
3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	3
4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.)	4
4.1. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
4.2. ZESTAWIENIE JEDNOTEMATYCZNYCH PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
4.3. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO, ZASTOSOWANEJ METODYKI BADAŃ ORAZ OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW I SPOSOBÓW ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA	7
4.3.1. CEL BADAŃ	7
4.3.2. UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ	8
4.3.3. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW	10
4.3.4. OSIĄGNIĘCIA, JAKIE WYNIKAJĄ Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ	30
5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH	32
5.1. PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA	32
5.2. PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA	35
LITERATURA	39
6. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO	41

1. DANE PERSONALNE

Imię i nazwisko: **Katarzyna Pietrucha-Urbanik**

2. POSIADANE TYTUŁY I STOPNIE NAUKOWE

VII. 2007 r. Tytuł zawodowy: magister inżynier
Dyscyplina: inżynieria środowiska
Kierunek dyplomowania: Zaopatrzenie w Wodę i Odprowadzanie Ścieków
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Temat pracy dyplomowej magisterskiej: *Analiza oddziaływania systemów kanalizacyjnych na jakość wód odbiornika*
Promotor: **Prof. dr hab. inż. Józef Dziopak,**
Recenzent: **Prof. dr hab. inż. Janusz Rak.**

IV. 2014 r. Stopień naukowy: dr inż. nauk technicznych
Dyscyplina naukowa: inżynieria środowiska
Politechnika Białostocka
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Temat rozprawy doktorskiej: *Metodyka określania gwarancji w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę*
rozprawa obroniona z wyróżnieniem nadanym przez Radę Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej
Promotor: **Prof. dr hab. inż. Janusz Rak,**
Recenzenci: **Dr hab. inż. Dariusz Kowalski prof. Politechniki Lubelskiej,**
Prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski.

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

2007-2014 Asystent w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

od 2014 Adiunkt w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.)

4.1. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Osiągnięciem naukowym, określonym zgodnie z obowiązującą „Ustawą o stopniach naukowych ... art. 16, ust. 2” jest jednotematyczny cykl publikacji pod tytułem:

ANALIZA I OCENA RYZYKA AWARII SIECI WODOCIĄGOWEJ

4.2. ZESTAWIENIE JEDNOTEMATYCZNYCH PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Lp.	Tytuł publikacji
1 Lista A	Pietrucha-Urbanik K., Studziński A. Case study of failure simulation of pipelines conducted in chosen water supply system, 2017, EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOSC-MAINTENANCE AND RELIABILITY, t.19, z.3, s.317-323 ISBN/ISSN: 1507-2711 Liczba punktów w roku opublikowania: 25 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 15 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 1,383 (IF), 1,296 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopus: 1,363
2 Lista A	Pietrucha-Urbanik K., Studziński A. Wybrane aspekty kosztów oraz awaryjności przewodów przykładowego systemu wodociągowego, 2016, ROCZNIK OCHRONA ŚRODOWISKA, t.18, s.616-627 ISBN/ISSN: 1506-218X Liczba punktów w roku opublikowania: 15 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 9 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0,705 (IF), 0,545 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopus: 0
3 Lista A	Pietrucha-Urbanik K., Żelazko A. Approaches to Assess Water Distribution Failure. 2017, PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING, t.61, z.3, s.632-639 ISBN/ISSN: 0553-6626 Liczba punktów w roku opublikowania: 15 pkt.

Lp.	Tytuł publikacji
	Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 12 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0,636 (IF), 0640 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopusa: 0,669
4 Indeksowanie w WoS Scopus	Pietrucha-Urbanik K. Assessing the costs of losses incurred as a result of failure [w:] Dependability Engineering and Complex Systems - Proceedings of the Eleventh International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX. June 27-July 1, 2016, Brunów, Poland, (pod red.) Zamojski W., Mazurkiewicz J., Sugier J., Walkowiak T., Kacprzyk J., 2016, Londyn: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING SWITZERLAND, t.470, s.355-362 ISBN/ISSN: 978-3-319-39638-5 Liczba punktów w roku opublikowania: 15 pkt. Procent udziału w publikacji: 100% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 15 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0 (IF), 0 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopusa: 0,338
5 Indeksowanie w WoS Scopus	Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B. Failure risk assessment in water network in terms of planning renewals - a case study of the exemplary water supply system, 2017, WATER PRACTICE AND TECHNOLOGY, t.12, z.2, s.274-286 ISBN/ISSN: 1751-231X Liczba punktów w roku opublikowania: 15 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 9 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0 (IF), 0 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopusa: 0,278
6 Lista A	Pietrucha-Urbanik K. Failure analysis and assessment on the exemplary water supply network 2015, ENGINEERING FAILURE ANALYSIS, t.57, s.137-142 ISBN/ISSN: 1350-6307 Liczba punktów w roku opublikowania: 30 pkt. Procent udziału w publikacji: 100% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 30 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 1,358 (IF), 1,289 (IF_{5letni})

Lp.	Tytuł publikacji
	SNIP ₂₀₁₇ wg Scopus: 1,363
7 Lista A	Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B. Approaches to Failure Risk Analysis of the Water Distribution Network with regard to the Safety of Consumers, 2018, WATER, z. 10(11), 1679 ISBN/ISSN: 2073-4441 Liczba punktów w roku opublikowania: 30 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 18 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 2,069 (IF), 2,25 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopus: 1,007
8 Lista A	Pietrucha-Urbanik K., Studziński A. Qualitative analysis of the failure risk of water pipes in terms of water supply safety, 2019, ENGINEERING FAILURE ANALYSIS, t.95, s.371-378 ISBN/ISSN: 1350-6307 Liczba punktów w roku opublikowania: 35 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 21 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 2,157 (IF), 2,148 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopus: 1,363
9 Lista A	Studziński A., Pietrucha-Urbanik K. Simulation model of contamination threat assessment in water network using the Epanet software, 2016, ECOLOGICAL CHEMISTRY AND ENGINEERING S-CHEMIA I INŻYNIERIA EKOLOGICZNA S, t.23, z.3, s.425-433 ISBN/ISSN: 1898-6196 Liczba punktów w roku opublikowania: 15 pkt. Procent udziału w publikacji: 40% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 6 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0,7 (IF), 0,815 (IF_{5letni}) SNIP₂₀₁₇ wg Scopus: 0,535
10 Lista B	Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B., Mohamed E. Cascading Failure Analysis in Order to Assess the Resilience of a Water Supply System, 2018, JOURNAL OF POLISH SAFETY AND RELIABILITY ASSOCIATION, SUMMER SAFETY AND RELIABILITY SEMINARS, t. 7, z.1-2, s. 149-156

Lp.	Tytuł publikacji				
	ISBN/ISSN: 2084-5316 Liczba punktów w roku opublikowania: 9 pkt. Procent udziału w publikacji: 60% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 5,4 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0 (IF), 0 (IF _{5letni}) SNIP ₂₀₁₇ wg Scopus: 0				
11 Lista B	Rak J., Pietrucha-Urbanik K. Implementacja metody Bow - Tie do analizy bezpieczeństwa systemów wodociągowych, 2017, GAZ, WODA I TECHNIKA SANITARNA, z.11/2017, s.453-457 ISBN/ISSN: 0016-5352 Liczba punktów w roku opublikowania: 11 pkt. Procent udziału w publikacji: 50% Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki: 5,5 pkt. Impact factor w roku opublikowania: 0 (IF), 0 (IF _{5letni}) SNIP ₂₀₁₇ wg Scopus: 0				
Suma	Liczba punktów w roku opublikowania	Liczba punktów po uwzględnieniu udziału habilitantki	Impact factor w roku opublikowania		SNIP ₂₀₁₇ wg Scopus
			IF	IF _{5letni}	
	215	142,9	9,008	8,983	6,916

Udział merytoryczny w publikacjach współautorskich polegał przede wszystkim na definiowaniu zagadnienia, ustalaniu założeń i metodologii prowadzenia badań oraz formułowaniu wniosków.

Zakres charakteryzujący udział współautorów został dołączony do wniosku jako Załącznik 8.

4.3. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO, ZASTOSOWANEJ METODYKI BADAŃ ORAZ OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW I SPOSOBÓW ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA

4.3.1. CEL BADAŃ

Celem naukowym zaprezentowanego jednotematycznego cyklu 11 publikacji, pt. Analiza i ocena ryzyka awarii sieci wodociągowej jest:

- analiza i ocena awaryjności oraz kosztów związanych z usuwaniem awarii przewodów wodociągowych - [publikacje 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7],

- określenie prawidłowego funkcjonowania sieci wodociągowej oraz skutków awarii poszczególnych odcinków poprzez analizę ryzyka awarii przewodów wodociągowych - [publikacje 1, 8, 9],
- propozycja wskaźników ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej w aspekcie przynależności do infrastruktury krytycznej - [publikacje 9, 10],
- ocena bezpieczeństwa systemów wodociągowych w oparciu o zidentyfikowane zagrożenia i ich możliwe skutki - [publikacja 11].

Opracowane rozwiązania oraz wyniki mają charakter badań podstawowych, poznawczych oraz aplikacyjnych. Badania te stanowią autorski wkład w rozwój dyscypliny inżynierii środowiska, polegający na opracowaniu nowatorskiej metodologii analiz i oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej. Uzyskane wyniki dotyczące analiz i ocen awaryjności oraz kosztów związanych z usuwaniem awarii przewodów wodociągowych pozwoliły na wykonanie wielowymiarowych analiz porównawczych z uwzględnieniem analiz zależności pomiędzy otrzymanymi skupieniami, co pozwala na zaplanowanie kosztów eksploatacji sieci wodociągowych. Wprowadzono pojęcie awarii kaskadowych w systemach wodociągowych, które dotyczą sekwencji niezależnych zdarzeń niepożądanych, w celu oceny odporności systemu wodociągowego oraz podejmowaniu decyzji dotyczących zarządzania ryzykiem, np. w czasie sytuacji kryzysowych. Zaproponowano autorską metodę wielokryterialnego modelu decyzyjnego z implementacją hierarchicznej analizy procesu w celu umożliwienia przeprowadzenia oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej. Opracowana metoda może stanowić również element procesu decyzyjnego odnośnie planów modernizacyjnych. W metodyce oceny zagrożeń uwzględniono implementację podejścia oceny zagrożeń poprzez metodę Bow-Tie z wykorzystaniem matrycy ryzyka oraz metody LOPA (ang. Layer of Protection Analysis), która do tej pory nie była stosowana w podsystemach dystrybucji wody.

Celem przeprowadzonych badań jest propozycja uniwersalnej metodyki oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej.

4.3.2. UZASADNIENIE PODJĘCIA BADAŃ

Podjęty problem badawczy wychodzi naprzeciw światowym trendom odnośnie utrzymania niezawodności funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody. Sieci wodociągowe stanowią nawet do 90% majątku przedsiębiorstw wodociągowych¹, dlatego też istotne jest zastosowanie analiz ryzyka awarii sieci wodociągowych w procesie podejmowania decyzji dotyczących ich eksploatacji oraz prac remontowych czy modernizacji. Analiza ryzyka sieci wodociągowych ma bezpośrednio znaczący wpływ na poziom niezawodności dostaw wody.

¹ Kwietniewski M., Rak J.: *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Studia z zakresu inżynierii nr 67, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2010.

Zgodnie z ustawą o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i odprowadzaniu ścieków² przedsiębiorstwa wodociągowe mają obowiązek zapewnić ciągłą i niezawodną dostawę wody do odbiorców (Art. 5.1.). Rozporządzenie⁵ wprowadza definicję „oceny ryzyka” jako „proces polegający na identyfikacji zagrożeń i analizie ryzyka przeprowadzony na podstawie obowiązującej w czasie dokonywania tej oceny normy PN-EN 15975-2 „Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia - Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka - Część 2: Zarządzanie ryzykiem”; przy opracowaniu oceny ryzyka uwzględnia się czynniki określone dla obszaru zaopatrzenia w wodę, o których mowa w §11 pkt 1, 2 i 4-9”. Z kolei Dyrektywa 98/83/EC z dnia 3 listopada 1998 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi³ oraz Ramowa Dyrektywa Wodna zobowiązała kraje członkowskie UE do podejmowania wszelkich środków niezbędnych do zapewnienia regularnego monitorowania jakości i ilości wody w celu sprawdzenia, czy dostawy wody do konsumentów spełniają wymagania aktualnych międzynarodowych unormowań prawnych. Rozwiązania naukowe mające za zadanie zapewnienie wymaganego poziomu niezawodności oraz bezpieczeństwa konsumentów są realizowane zgodnie z założeniami Planów Bezpieczeństwa Wody (ang. WSP - Water Safety Plans)⁴, które powinny być oparte na analizach i ocenach ryzyka. Plany te rekomendowane są przez Światową Organizację Zdrowia (WHO), IWA (International Water Association) oraz Komisję Europejską. Regulacje prawne dotyczące bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody obejmują wytyczne WHO oraz tzw. Ramowa Dyrektywa Wodna oraz przepisy krajowe jak Ustawa Prawo Wodne⁵, Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i odprowadzaniu ścieków⁶ oraz Rozporządzenie Ministra Zdrowia dotyczące jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi⁷. Podsystem dystrybucji wody zgodnie z ustawą o zarządzaniu kryzysowym⁸ należy do infrastruktury krytycznej kluczowej dla funkcjonowania społeczeństwa i Państwa. W związku z tym ustawa o zarządzaniu kryzysowym reguluje zasady opracowywania planów zarządzania kryzysowego, których celem jest zapobieganie sytuacjom kryzysowym, reagowanie w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych oraz usuwanie ich skutków. Niewłaściwe funkcjonowanie infrastruktury krytycznej może stanowić zagrożenie dla zdrowia lub życia ludzi, dlatego też musi charakteryzować się wysokim poziomem niezawodności i bezpieczeństwa.

² Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2001 r. Nr 72, poz. 747 z późniejszymi zmianami).

³ Dyrektywa Rady 98/83/WE z dnia 3 listopada 1998 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. L 330 z 5.12.1998 r.).

⁴ World Health Organization, 2004, *Guidelines for Drinking-water Quality*, World Health Organization, Geneva. Fourth Edition, nr 1.

⁵ Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. - *Prawo wodne*.

⁶ Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2001 r. Nr 72, poz. 747 z późniejszymi zmianami).

⁷ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. z 2017 r., poz. 2294).

⁸ Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. z 2007 r. Nr 89, poz. 590 z późniejszymi zmianami).

Bezpieczeństwo i niezawodność funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody rozpatrywane jest przede wszystkim z punktu widzenia konsumentów wody przeznaczonej do spożycia. W tym zakresie rozpatruje się zagrożenia związane z możliwością spożycia wody o nieodpowiedniej jakości oraz brakiem dostawy wody w wyniku awarii systemu. Przyjmuje się, że podstawową miarą utraty bezpieczeństwa w podsystemach dystrybucji wody jest ryzyko definiowane jako iloraz prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego oraz ich konsekwencji^{9,10,11}.

W procesie analizy i oceny ryzyka związanego z zagrożeniami istnieje wiele metod. W normie ISO/IEC 31010:2009¹² opisano ich 28. Charakteryzują się one różnym podejściem do ryzyka poczynając od metod eksperckich po metody oparte na scenariuszach zdarzeń niepożądanych. Od wprowadzenia elementów zarządzania ryzykiem w 2009 roku obserwuje się zdecydowany trend jego wzrostu. Polityka wykorzystywania norm z zakresu ryzyka pokazuje, że są one praktycznym źródłem wiedzy. Dostarczają one sprawdzone narzędzia wspomagające zarządzaniem ryzykiem w warunkach niepewności. Najbardziej znanym systemem certyfikowania na świecie jest system zarządzania jakością według normy ISO 9001¹³, na drugim miejscu znajduje się system zarządzania środowiskowego według standardu ISO 14001¹⁴. Kolejnym jest system zarządzania bezpieczeństwem informacji według normy ISO 27001¹⁵. Koncepcja analizy i oceny ryzyka przynależy do obszaru standardu ISO 31010. Według tego standardu ryzyko to kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego oraz skutków z tym związanych, jak również wpływ niepewności na cele organizacji. Definicja zarządzania ryzykiem obejmuje podejście prewencyjne i reakcyjne na ten proces. Formalizacja procesu zarządzania ryzykiem to zorganizowane opracowanie i stosowanie procedur, praktyk, analiz, ocen, kontroli i reagowania na ryzyko.

4.3.3. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW

Analiza i ocena awaryjności oraz kosztów związanych z usuwaniem awarii przewodów wodociągowych - [publikacje 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

⁹ Rak J.: *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.

¹⁰ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.

¹¹ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

¹² IEC/ISO 31010:2010. *Risk management – Risk assessment techniques*, International Electrotechnical Commission, Geneva.

¹³ ISO 9001:2008. *Quality management systems – Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva.

¹⁴ ISO 14001:2004. *Environmental management systems – Requirements with guidance for use*.

¹⁵ ISO/IEC 27001:2005. *Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva.

Wodociągi należą do systemów technicznych, od których wymaga się szczególnej niezawodności działania. W głównej mierze ciągłość dostawy wody do odbiorców jest wynikiem bezawaryjnej pracy sieci wodociągowej, stąd w przedsiębiorstwach wodociągowych kładzie się szczególny nacisk na sprawne usuwanie powstałych awarii¹⁶. Wymaga to utrzymywania ekip remontowych oraz stanów magazynowych części niezbędnych do przeprowadzenia napraw. Wiąże się to również z zapewnieniem środków finansowych, które przeznaczone zostaną na pokrycie kosztów napraw¹⁷. Zapewnienie ciągłości dostawy wody wodociągowej jest jednym z priorytetów działania przedsiębiorstw wodociągowych, co zostało usankcjonowane w przepisach krajowych¹⁸. Rozpatrując ilościowy aspekt zagadnienia w odniesieniu do sieci wodociągowych, kluczowe znaczenie dla ciągłości dostawy wody ma awaryjność przewodów wodociągowych. Badania awaryjności przewodów były przedmiotem licznych publikacji, z których wyniki zestawiono między innymi w^{16,19,20,21}. Mimo szerokiego zakresu badań istnieje konieczność dalszego ich prowadzenia, co wynika głównie z ciągłych zmian wieku i struktury sieci wodociągowych, ponieważ dane te stanowią jeden z głównych wskaźników dla polityki eksploatacyjnej sieci wodociągowych. Kryteria stanowiące podstawę wyznaczania niezawodności dostawy wody do odbiorców zostały przedstawione w opracowaniach^{20,22,23,24}.

Analiza ryzyka awarii sieci wodociągowej powinna być przeprowadzona w następujących etapach:

- określenie typu systemu zaopatrzenia w wodę,
- określenie krytycznej wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej,
- określenie barier redukujących przyczyny oraz skutki zdarzeń niepożądanych,
- określenie kryterialnych wartości ryzyka awarii sieci wodociągowej.

¹⁶ Kwietniewski M., Rak J.: *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Studia z zakresu inżynierii nr 67, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2010.

¹⁷ Rak J.: *Bezpieczna woda wodociągowa. Zarządzanie ryzykiem w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.

¹⁸ Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2001 r. Nr 72, poz. 747 z późniejszymi zmianami).

¹⁹ Hotłoś H.: *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.

²⁰ Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H.: *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Wydawn. Arkady, Warszawa 1993.

²¹ Zimoch I.: *Reliability analysis of water-pipe networks in Cracow, Poland*. Environmental Engineering III, Eds.: Pawłowski L., Dudzińska M.R., Pawłowski A., 3rd Congress of Environmental Engineering, Lublin, 13-16.09.2009 r., s. 561-565.

²² Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H.: *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Wydawn. ARKADY, Warszawa 1993.

²³ Roman M.: *Problemy kryteriów niezawodności komunalnych systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Mat. konf. „Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, Wydawn. PZITS O/Kraków, 1986, s.13-26.

²⁴ Wiczysty A.: *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*, t. I i II. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.

W pracach [publikacje 1, 2, 3, 5, 6] dokonano analizy danych dotyczących uszkodzalności sieci wodociągowej zaopatrującej od 20 tys. do 180 tys. mieszkańców. Przedstawiono dane dotyczące awarii w rozbiciu na rodzaj przewodów, średnicę i materiał. Pokazano również zmienność awaryjności sieci wodociągowej w czasie w celu oceny cyklu wahań sezonowych na występowanie awarii sieci wodociągowej [publikacje 3, 5, 6, 7].

W opracowaniach oparto się na wartościach następujących wskaźników awaryjności stosowanych w analizie funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę²⁵:

- intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ [l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹], wyznaczony jako liczba awarii w czasie Δt przez długość badanych przewodów w przedziale czasu Δt ,
 - średniego czasu naprawy - Mean Time To Repair - $MTTR$ [h] opisującego średni czas od momentu wystąpienia awarii, aż do ponownego włączenia przepływu wody w uszkodzonym odcinku sieci wodociągowej,
 - intensywność naprawy $\mu(t)$ [l. napraw·rok(h)⁻¹] określa liczbę awarii w jednostce czasu, można ją określić jako odwrotność średniego czasu naprawy.
- oraz wskaźniki do określenia wahań sezonowych i przypadkowych:
- wskaźnik sezonowości awarii oparty na średnich okresach jednoimiennych,
 - absolutny poziom wahań sezonowych,
 - wskaźnik trendu szeregu czasowego, wyznaczony poprzez średnie ruchome scentrowane dla kwartałów,
 - addytywny i multiplikatywny wahań sezonowych dla cyklu wahań dla jednoimiennych podokresów,
 - indywidualne jednopodstawowe indeksy łańcuchowe.

Ryzyko (r) rozpatrywane w kontekście bezpieczeństwa w obliczu pojawienia się zagrożenia może być wyrażone również jako funkcja wskaźnika dostępności ($r = R(t)$), gdzie wskaźnik dostępności wyraża prawdopodobieństwo, z którym system będzie miał zdolność operacyjną w czasie t i jest określany jako zależność średniego czasu pracy między awariami, Mean Time Between Failures $MTBF$, przez sumę $MTBF$ i średniego czasu naprawy $MTTR$ ^{26,27,28}.

Przedstawione wskaźniki mogą być pomocne w opisie prawidłowego funkcjonowania podsystemu dystrybucji wody, zarówno dla operatora tego systemu oraz odbiorcy wody pod względem niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania.

Średnie wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń dla analizowanych sieci wodociągowych wynoszą [publikacje 2, 3, 4, 7, 8, 11]:

²⁵ Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H.: *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Wydawn. ARKADY, Warszawa 1993.

²⁶ Kołowrocki K., Soszyńska-Budny J. *Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling – Identification – Prediction – Optimization*. Springer 2011.

²⁷ IEC 61508-4 *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 4: Definitions and abbreviations*.

²⁸ IEC 191-12-07 *Dependability and quality of service/Reliability performance measures*.

- dla sieci magistralnej $\lambda_{Msr} = 0,54$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda_{Mmed} = 0,48$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹,
- dla sieci rozdzielczej $\lambda_{Rsr} = 0,27$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda_{Rmed} = 0,26$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹,
- dla przyłączy wodociągowych $\lambda_{Psr} = 0,52$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda_{Pmed} = 0,38$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹.

Analizując awaryjność można stwierdzić, iż liczba awarii a tym samym intensywność uszkodzeń systematycznie maleje w rozpatrywanych podsystemach dystrybucji wody, co z kolei może być spowodowane pracami renowacyjnymi przewodów wodociągowych sieci w ostatnich latach i wykonaniem nowych przewodów z trwalszych materiałów, które są mniej podatne na awarie. Można zauważyć, iż największą uszkodzalnością charakteryzują się przewody magistralne, jest to spowodowane najczęściej wiekiem tych przewodów oraz tym, że są to przewody wykonane z żeliwa szarego oraz stali, które uszkodzeniom podlegają częściej niż np. przewody wykonane z PE, na które w większości zamieniane są stare przewody. Według pracy²⁹ wskaźnik intensywności uszkodzeń dla magistral nie powinien przekraczać 0,3 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, dlatego można stwierdzić, że magistrale są przewodami wymagającymi renowacji bądź wymiany. Przewody rozdzielcze i przyłącza wodociągowe spełniają wartości graniczne dla tego wskaźnika, odpowiednio 0,5 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ oraz 1,0 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹. Biorąc pod uwagę także strukturę materiałową rozpatrywanych sieci wodociągowych, największą intensywnością charakteryzują się przewody wodociągowe wykonane z żeliwa szarego ($\lambda_{\text{żeliwo szare}} = 0,779$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹) oraz stali ocynkowanej ($\lambda_{\text{stal oc}} = 0,802$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹), a więc dla najstarszych przewodów wodociągowych wykonywanych z tego materiału. Obecnie stosowane materiały do budowy sieci wodociągowych z tworzyw sztucznych jak PVC oraz PE wykazują małe wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń, odpowiednio $\lambda_{PVC} = 0,100$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ oraz $\lambda_{PE} = 0,112$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹. Zwiększona intensywność określonych materiałów określa przyczynę powstawania awarii, dlatego też największe wskaźniki odnotowano dla uszkodzeń spowodowanych korozją oraz pęknięciami, mediana wymienionych przyczyn wynosiła odpowiednio $\lambda_{\text{korozja}} = 0,36$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ oraz $\lambda_{\text{pęknięcia}} = 0,26$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹. Zauważono dziesięciokrotny wzrost intensywności uszkodzeń wraz ze wzrostem wieku przewodu w zakresie 10-50 lat, od $\lambda_{<10;20} = 0,092$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ do $\lambda_{<40;50} = 0,94$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, najmłodsze przewody wykazują intensywność uszkodzeń $\lambda_{10 \text{ lat}} = 0,24$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ związaną z wadami materiałowymi i błędami wykonawstwa, natomiast przewody najstarsze cechują się intensywnością $\lambda_{\geq 50 \text{ lat}} = 0,31$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹ i można to tłumaczyć wysoką jakością wykonania oraz użytego materiału.

Na podstawie danych literaturowych oraz analiz awarii sieci wodociągowej przeprowadzonych w różnych podsystemach dystrybucji wody zaproponowano następujące kryteria akceptowalności w ocenie ryzyka awarii sieci wodociągowych w odniesieniu do

²⁹ Rak J.: *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*. Wydawnictwo PAN - Komitet Inżynierii Środowiska t.28, Rzeszów 2005.

wybranych priorytetowych wskaźników, które powinny determinować ocenę poziomu niezawodności:

- dla systemów wodociągowych zaopatrujących mniej niż 2000 odbiorców:
 - intensywność uszkodzeń: $\lambda(t)_{tolerowana} \leq 0,9$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{kontrolowana}$ od 0,9 do 2,0 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{nieakceptowana} \geq 2,0$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹,
 - średni czas naprawy: $MTTR_{tolerowany} \leq 3$ h, $MTTR_{kontrolowany}$ od 3 do 24 h, $MTTR_{nieakceptowany} \geq 24$ h,
- dla systemów wodociągowych zaopatrujących więcej niż 2000 i mniej niż 200 000 odbiorców:
 - intensywność uszkodzeń: $\lambda(t)_{tolerowana} \leq 0,5$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{kontrolowana}$ od 0,5 do 1,5 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{nieakceptowana} \geq 1,5$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹,
 - średni czas naprawy: $MTTR_{tolerowany} \leq 2$ h, $MTTR_{kontrolowany}$ od 2 do 18 h, $MTTR_{nieakceptowany} \geq 18$ h,
- dla systemów wodociągowych zaopatrujących więcej niż 200 000 odbiorców:
 - intensywność uszkodzeń: $\lambda(t)_{tolerowana} \leq 0,5$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{kontrolowana}$ od 0,5 do 1,0 l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹, $\lambda(t)_{nieakceptowana} \geq 1,0$ l. awarii·rok⁻¹·km⁻¹,
 - średni czas naprawy: $MTTR_{tolerowany} \leq 2$ h, $MTTR_{kontrolowany}$ od 2 do 12 h, $MTTR_{nieakceptowany} \geq 12$ h.

Problematyka awaryjności stanowi szczególnie istotne zagadnienie w ocenie funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody, gdzie możliwe konsekwencje zdarzeń niepożądanych mogą dotyczyć zdrowia i życia odbiorców wody. Szczególnie ważny dla konsumentów wody jest aspekt jakości i ciągłości dostaw wody. Poważne konsekwencje pociągają za sobą długotrwałe przerwy w dostawie wody, przykładowo uniemożliwiając gaszenie pożarów, dlatego koniecznym jest prowadzenie okresowych analiz związanych z awaryjnością sieci wodociągowej.

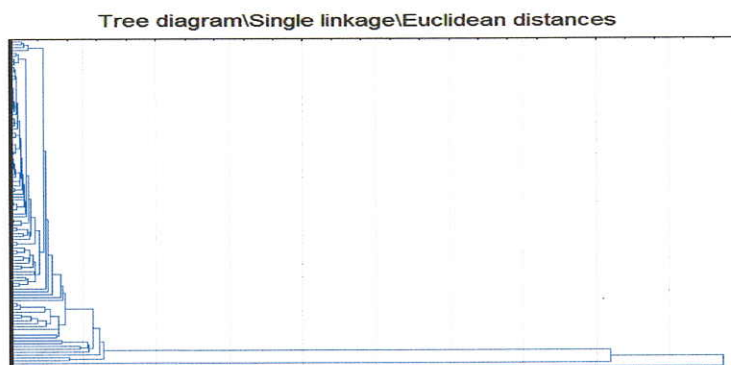
W pracach [publikacje 2, 4] dokonano analizy danych eksploatacyjnych kosztów robocizny związanych z naprawą przewodów wodociągowych w podziale na materiał i średnicę przewodów dla średnic nominalnych. Badania prowadzono w podsystemach dystrybucji wody średniej wielkości miast zlokalizowanych w południowej Polsce. Badania przeprowadzono na podstawie opracowanych kart awarii wypełnianych przez pracowników przedsiębiorstwa wodociągowego. Zakres zgromadzonych informacji zawierał: lokalizację, średnicę, materiał i wiek przewodu, prawdopodobną przyczynę uszkodzenia oraz wykorzystany sprzęt, materiały i czas pracy, a także liczebność brygady remontowej. Określono również skutki awarii: liczbę odbiorców oraz liczbę mieszkańców pozbawionych wody, czas przerwy w dostawie wody oraz jednostkowe zużycie wody w tym czasie. Istotnym składnikiem kosztów usuwania awarii przewodów jest koszt robocizny, będący iloczynem czasu pracy i ceny jednostkowej roboczogodziny. Pod pojęciem czasu naprawy należy rozumieć liczbę roboczogodzin, czyli iloczyn czasu naprawy i liczby pracowników dokonujących czynności naprawczych. Przedstawiona analiza wykazała, że koszty robocizny związane z naprawą przewodów wodociągowych wykazują znaczne zróżnicowanie. Zauważono,

że są w największym stopniu uzależnione od średnicy naprawianego przewodu. Jednak nawet w obrębie poszczególnych średnic wykazują dużą rozbieżność. Koszty te nie są wynikiem funkcji przewodów, jednak z uwagi na powiązanie średnic z funkcją przewodu można stwierdzić, że najniższe koszty jednostkowe dotyczą przyłączy wodociągowych, następnie przewodów rozdzielczych i największe magistral. Średni koszt awarii wyniósł 730 zł (poziom cen 2015 r.). Wykazano również zróżnicowanie kosztów dla poszczególnych materiałów, w przypadku stali koszt średni naprawy przewyższał koszty w przypadku żeliwa szarego oraz PE. Zauważono również wyższy koszt robocizny w przypadku awarii występującej w jezdni lub chodniku.

W pracy [publikacja 4] przedstawiono analizę kosztów awarii sieci wodociągowej uwzględniającej koszty materiałów, robocizny oraz sprzętu poniesionych na usuwanie awarii z zastosowaniem wielowymiarowej analizy porównawczej.

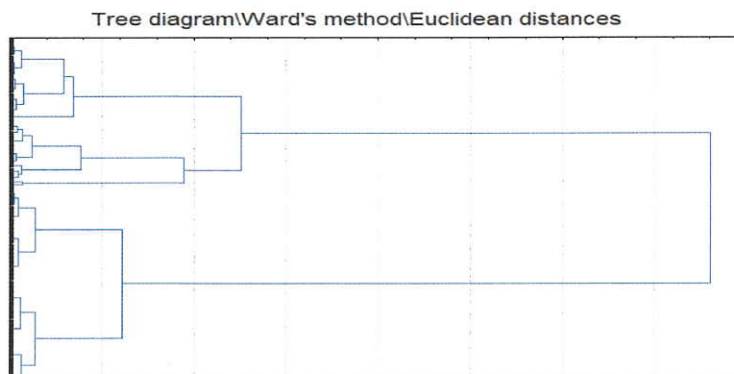
W celu porównania kosztów przeznaczonych do usunięcia awarii na różnych przewodach wodociągowych zastosowano wielowymiarową analizę porównawczą. Podejście to umożliwiło analizę kosztów awarii sieci wodociągowej uwzględniającej koszty materiałów, robocizny oraz sprzętu poniesionych na usuwanie awarii. W celu oszacowania odległości między skupieniami zaproponowano zastosowanie metody pojedynczego wiązania (ang. single linkage method), metody pełnego wiązania (ang. complete linkage method), metody średnich połączeń ważonych (ang. weighted pair-group method using arithmetic averages - WPGMA) oraz metody Warda³⁰ (Rys. 1). Do dalszej analizy wzięto pod uwagę metodę Warda, dzięki której udało się utworzyć jednorodne skupienia. W celu przedstawienia charakterystyki analizowanych awarii i związanych z tym kosztów, średnią każdego skupienia określono metodą *k*-średnich (ang. *k*-means method). Metoda ta gwarantuje otrzymanie skupień, które maksymalnie różnią się od siebie, co po grupowaniu dużej liczby elementów, znacznie zwiększa przejrzystość uzyskanych wyników.

a)



³⁰ Abonyi, J., Feil B.: *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification*, Birkhauser Verlag AG, Germany 2007.

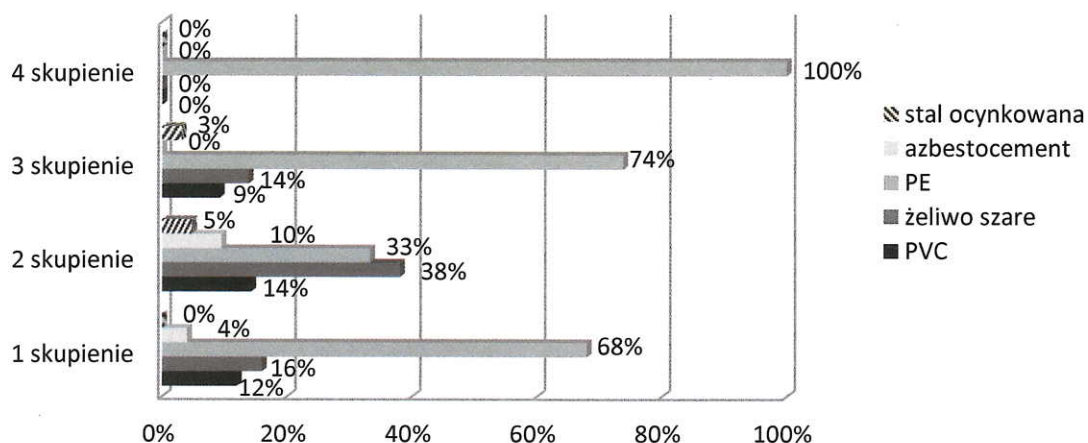
b)



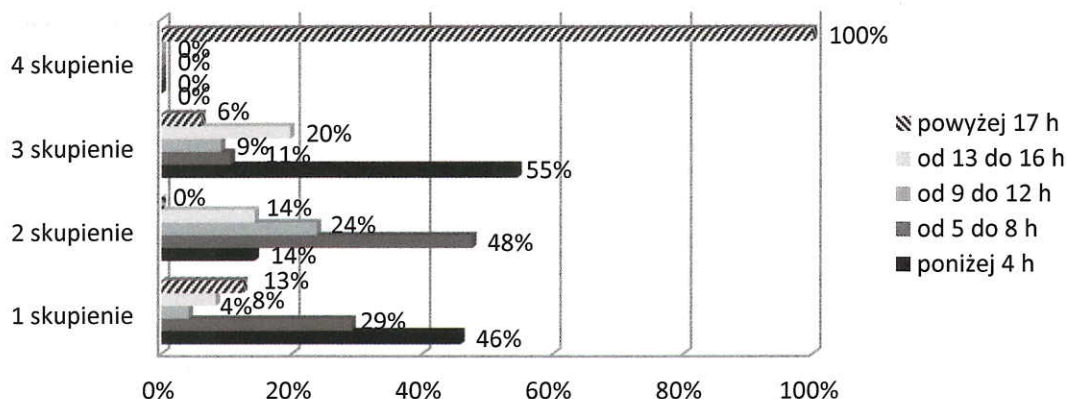
Rysunek 1. Dendrogram zróżnicowania poszczególnych awarii z przykładowymi metodami obliczania odległości między skupieniami: a) metoda pojedynczego wiązania, b) metoda Warda.

Zagregowane koszty każdego ze skupień można scharakteryzować w następujący sposób: 1 skupienie obejmujące 22,61% spośród wszystkich awarii - wysokie koszty materiału ($\bar{x} = 59,83$ zł) i średnie koszty pracy oraz sprzętu do usuwania awarii ($\bar{x} = 317,80$ zł), 2 skupienie obejmujące 18,26% spośród wszystkich awarii - wysokie koszty materiału ($\bar{x} = 59,68$ zł) i wysokie koszty pracy oraz sprzętu do usuwania awarii ($\bar{x} = 554,01$ zł), 3 skupienie obejmujące 1,74% spośród wszystkich awarii - bardzo wysokie koszty materiałów ($\bar{x} = 82,97$ zł) i bardzo wysokie koszty pracy oraz sprzętu do usuwania awarii ($\bar{x} = 1456,28$ zł) oraz 4 skupiające 57,39% spośród wszystkich awarii bardzo niskie koszty materiału ($\bar{x} = 10,07$ zł) i niskie koszty pracy oraz sprzętu do usuwania awarii ($\bar{x} = 112,16$ zł). W celu oceny wpływu poszczególnych czynników na zgrupowanie poszczególnych skupień dokonano charakterystyki przedstawionej na rysunku 2.

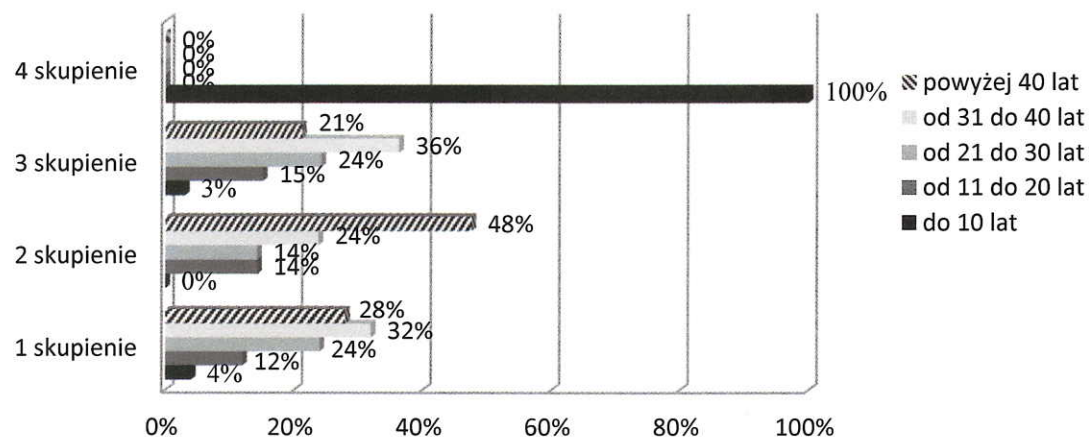
a)



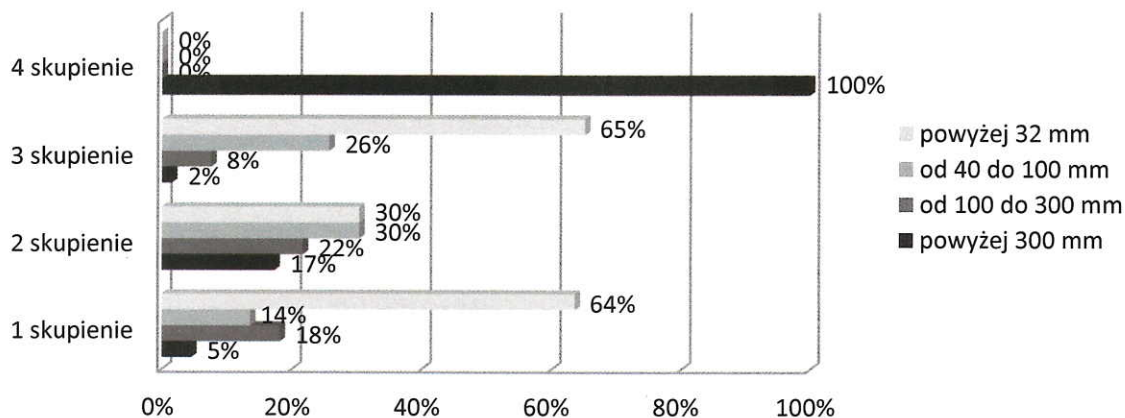
b)



c)



d)



Rysunek 2. Charakterystyka poszczególnych skupień metodą k-średnich, ze względu na: a) materiał, b) czas usunięcia awarii, c) wiek przewodu, d) średnicę przewodu wodociągowego.

Przedstawiona metodyka z zastosowaniem wielowymiarowej analizy porównawczej oraz zebrane dane mogą stanowić składową ryzyka eksploatatora podsystemu dystrybucji wody. Analiza uwzględniająca koszty materiałów i sprzętu znajduje zastosowanie w planowaniu kosztów eksploatacji sieci wodociągowych.

Określenie prawidłowego funkcjonowania sieci wodociągowej oraz skutków awarii poszczególnych odcinków poprzez analizę ryzyka awarii przewodów wodociągowych - [publikacje 1, 8, 9]

Obecnie wymagania związane z dostawą wody wzrastają, dlatego też dostawcy wody powinni ograniczyć ryzyko związane z awariami przewodów wodociągowych, a w związku z tym z brakiem dostawy wody, bądź jej dostawę o złej jakości. W celu zapobiegania pojawiania się takich problemów należy prowadzić analizę ryzyka poprzez symulacje przewodów wodociągowych.

W pracach [publikacje 1, 8] dokonano analizy skutków stanów awaryjnych przewodów wodociągowych. Wyniki przeprowadzonej analizy pozwoliły na wyodrębnienie odcinków, których awaria w różnym stopniu wpływa na prawidłową pracę układu. Przeprowadzenie analizy wybranych odcinków pozwoliło na wyodrębnienie tych, dla których awarie mają duże znaczenie. Model opierał się na bieżącym zapotrzebowaniu na wodę wraz z jego aktualnym rozkładem. Podjęty w pracy termin ryzyka związany jest z ryzykiem wystąpienia awarii na poszczególnych przewodach sieci wodociągowej. Ryzyko definiowane jest najczęściej jako wartość oczekiwana strat, co można przedstawić za pomocą zależności^{31,32}:

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

gdzie:

P - prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego,

C - konsekwencje (straty, skutki) wystąpienia zdarzenia niepożądanego.

Występujące awarie na przewodach odcinają od dostaw wody zasilanych mieszkańców. W celu analizy konsekwencji związanych z wystąpieniem awarii na przewodzie, a więc zasięgu oraz czasu trwania czy wielkości ograniczenia zaopatrzenia w wodę opracowano uaktualniony model hydrauliczny w programie Epanet 2 odwzorowujący pracę sieci. Model ten przedstawia aktualny stan zapotrzebowania na wodę, wraz z aktualnym rozkładem zapotrzebowania na wodę w rozpatrywanym systemie wodociagowym zaopatrującym około 200 tys. mieszkańców. W przedstawionym modelu uwzględniono również współpracę pompowni II stopnia ze zbiornikami wyrównawczymi. Analiza odnosiła się do porównania pracy sieci w warunkach bezawaryjnych w ciągu 24 godzin z pracą sieci podczas wystąpienia awarii. Analiza przeprowadzona na modelu pozwoliła określić poprawną pracę sieci wodociągowej. Zakres pracy obejmował skompletowanie informacji dotyczących systemu zaopatrzenia w wodę i wykonanie modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, przeprowadzenie symulacji hydraulicznej awarii przewodów sieci, przedstawienie i podsumowanie wyników symulacji. Wartości graniczne ryzyka zostały przyjęte na podstawie analizy danych eksploatacyjnych funkcjonowania badanego

³¹ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.

³² Rak J.: *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.

systemu wodociągowego. Wartość graniczną ryzyka tolerowanego wyznaczono jako iloczyn prawdopodobieństwa awarii przypadające na jeden odcinek przewodów rozdzielczych oraz liczby mieszkańców odciętych od dostawy wody przypadających na jeden odcinek rozpatrywanego przewodu, wynoszącą $r = 0,085$. Wartość graniczna dla ryzyka kontrolowanego została przyjęta dla sieci magistralnej i wyniosła $r = 0,62$. Dla 23% badanych przewodów wartość ryzyka przekracza wartość ryzyka tolerowanego. Ryzyko badanej sieci wodociągowej przybiera małe wartości ma wpływ fakt, iż podczas awarii poszczególnych przewodów wodociągowych, wody pozbawieni są tylko odbiorcy pobierający z nich wodę, jednakże są to dość duże wartości sięgające w skrajnych przypadkach kilka tysięcy mieszkańców pozbawionych dostaw wody. Po szczegółowej analizie modelu hydraulicznego wnioskowano, iż ciśnienie w okolicy nie spada na tyle, aby występowały problemy z dostawą wody. Duży wpływ na taką sytuację ma także budowa pierścieniowa ujęta w modelu oraz przewymiarowanie sieci wodociągowej. Przeprowadzona analiza może stanowić ważne narzędzie do wskazania, które odcinki przewodów wodociągowych powinny zostać zmodernizowane w pierwszej kolejności ze względu na ich duże znaczenie dla odbiorców. Stąd potrzeba skupienia szczególnej uwagi na ich sprawności, w tym na kwalifikowaniu do rekonstrukcji lub renowacji. Przedstawiona metoda nie wyczerpuje wszystkich czynników wpływających na procesy decyzyjne w działaniach eksploatacyjnych przewodów wodociągowych, znakomitym przykładem jest wcześniejsza rekonstrukcja przewodów, mimo zadowalającego stanu technicznego w przypadku przebudowy dróg. Metoda wskazuje kierunki działania eksploatatora systemu wodociągowego mające na celu osiągnięcie najlepszego efektu technicznego w założonych warunkach eksploatacji systemu.

Natomiast w celu oceny ryzyka propagacji zanieczyszczeń w sieci wodociągowej zastosowano klasyczną definicję ryzyka rozumianego jako wartość oczekiwaną strat przyjęto względny ładunek zanieczyszczenia pobrany do organizmu człowieka z wody wodociągowej [publikacja 9]. Zaproponowano metodę estymacji ryzyka w oparciu o analizę propagacji zanieczyszczeń w sieci wodociągowej w przypadku skażenia wody w zbiorniku wody uzdatnionej. Analizowany rzeczywisty wodociąg jest wodociągiem grupowym, zaopatrującym w wodę około 14 tys. mieszkańców. Analiza hydrauliczna wykonana została z wykorzystaniem programu Epanet na podstawie zweryfikowanego modelu hydraulicznego sieci wodociągowej. Określono rozkład stężeń zanieczyszczenia w sieci wodociągowej w czasie i na jego podstawie wyliczono masę zanieczyszczenia pobraną do organizmu przez statystycznego konsumenta wody wodociągowej. Podstawowe znaczenie dla ryzyka zdrowotnego konsumenta ma rodzaj i toksyczność zanieczyszczenia oraz jego stężenie początkowe, ale jak wykazała przedstawiona analiza istotne parametry to również konfiguracja przestrzenna sieci wodociągowej i wielkość rozbioru. Podczas symulacji 24 godzinnej symulacji rozprzestrzeniania zanieczyszczenia w sieci wodociągowej woda skażona dotarła do 86,7% konsumentów wody, a ponad 30% mieszkańców mogło spożyć wodę skażoną już po trzech godzinach od momentu wystąpienia skażenia. Przeprowadzona symulacja pokazuje, jak wrażliwymi na zanieczyszczenia mogą być współczesne systemy

zaopatrzenia w wodę w przypadku jej incydentalnych skażeń. Szczególnie istotny jest czas propagacji zanieczyszczenia. Wynika on głównie z układu przestrzennego sieci wodociągowej oraz wielkości zapotrzebowania wody.

Wskaźniki ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej - [publikacje 9, 10]

Wśród bardzo wielu wielkości używanych do opisu strat C przeważają wskaźniki o charakterze opisowym. Wielkość zarówno prawdopodobieństwa awarii, jak również wynikających z nich strat przedstawiano w postaci wag uzyskując matryce ryzyka^{33,34,35}. Metody te ewoluowały poprzez wprowadzanie większej liczby czynników wpływających na wielkość strat³⁶, przykładowo ekspozycję na zagrożenie, liczbę mieszkańców potencjalnie objętych skutkami awarii, wpływ barier ochronnych przeciwdziałających powstawaniu skutkom zagrożeń³⁷ i inne^{38,39}.

Do oceny strat powstałych w wyniku awarii przewodów wodociągowych zastosowano wskaźnik wartości oczekiwanej niedoboru wody R_t . Wskaźnik ten wiąże prawdopodobieństwo wystąpienia kombinacji uszkodzeń i wynikającego z nich niedoboru wody⁴⁰. Łączną objętość wody potrzebna w przyjętym okresie bilansowania przyjęto jako nominalne zapotrzebowanie dobowe Q_n . Wielkością, którą można określić jako miarę ryzyka jest czas, w którym dostawa wody nie spełnia wymagań konsumenta. Wielkość ta wyraża czas, w którym konsument narażony jest na dostawę wody poniżej obowiązujących standardów w tym zakresie, zarówno ilościowych jak i jakościowych. Wartość wskaźnika wyraża się w czasie (wyrażonym w godzinach) narażenia statystycznego konsumenta wody w ciągu roku SSH - Substandard Supply Hours. Wskazuje się również na możliwość opisu ryzyka za pomocą wskaźników stosowanych w innych branżach, np. energetyce, np.: Average Short Interruption Frequency Index, Average Long Interruption Frequency Index, Average Water Volume Not Supplied. W przypadku przewodów wodociągowych zakres skutków awarii rozpatrywano jako wartość oczekiwaną liczby odbiorców pozbawionych wody na skutek awarii przewodu. Wskaźnikiem ryzyka w tym przypadku jest wartość oczekiwana liczby mieszkańców dotkniętych deficytem wody $E(INH)$. Wskaźnik ten ma jednak pewne

³³ Rak J.: *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.

³⁴ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.

³⁵ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

³⁶ Pietrucha-Urbanik K., Studziński A.: *Qualitative analysis of the failure risk of water pipes in terms of water supply safety*, 2019, Engineering Failure Analysis, t. 95, s. 371-378, ISBN/ISSN: 1350-6307.

³⁷ Rak J.: *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*. Wydawnictwo PAN - Komitet Inżynierii Środowiska t.28, Rzeszów 2005.

³⁸ Kwietniewski M, Roman M, Kloss-Trębaczkiwicz H. *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Warszawa: Arkady, 1993.

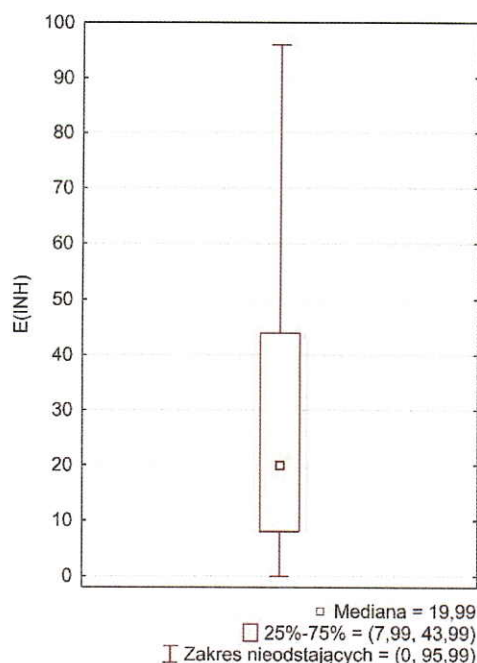
³⁹ Wieczysty A. *Niezawodność miejskich systemów zaopatrzenia w wodę*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1993.

⁴⁰ Wieczysty A., Iwanek R.: *Wyznaczanie wymaganego poziomu niezawodności obiektów systemu zaopatrzenia w wodę*, 1996, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2, s. 54-58.

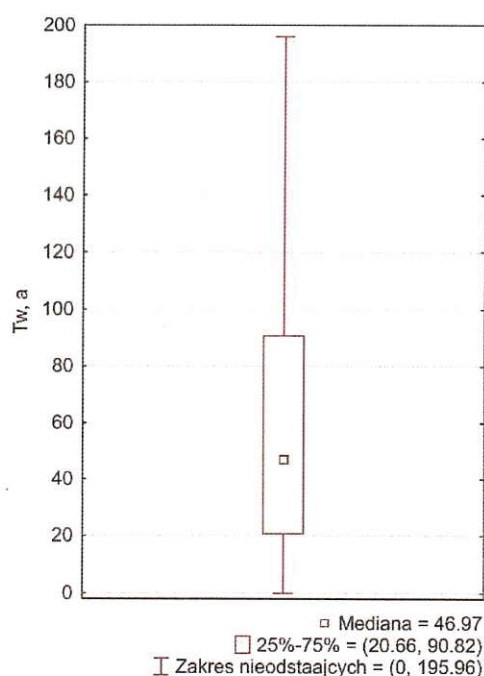
ograniczenia wynikające z nieuwzględnienia pozostałych grup konsumentów wody - głównie przemysłu i usług. Niedogodność ta może być wyeliminowana poprzez wyrażenie strat jako wartości oczekiwanej liczby przyłączy wodociągowych pozbawionych dostawy wody. Wielkość ta nie uwzględnia wartości poboru wody przez poszczególnych odbiorców, przez co uzyskane wyniki mogą nie być rzetelne. Dlatego jako negatywny skutek awarii wprowadza się wielkość uniwersalną równą zapotrzebowaniu na wodę dla wszystkich grup odbiorców łącznie w przeliczeniu na statystycznego mieszkańca, zwaną dalej mieszkańcem równoważnym. Wskaźnik ten pozwala różnicować odbiorców wody zarówno dla samego mieszkalnictwa, jak również pozostałych grup odbiorców instytucjonalnych. Jakkolwiek nie precyzuje zagadnienia z finansowego punktu widzenia to jednak w sposób czytelny wartościuje skutki awarii przewodów zachowując jednocześnie prostotę estymacji, co pozwala na jego upowszechnienie w zarządzaniu ryzykiem.

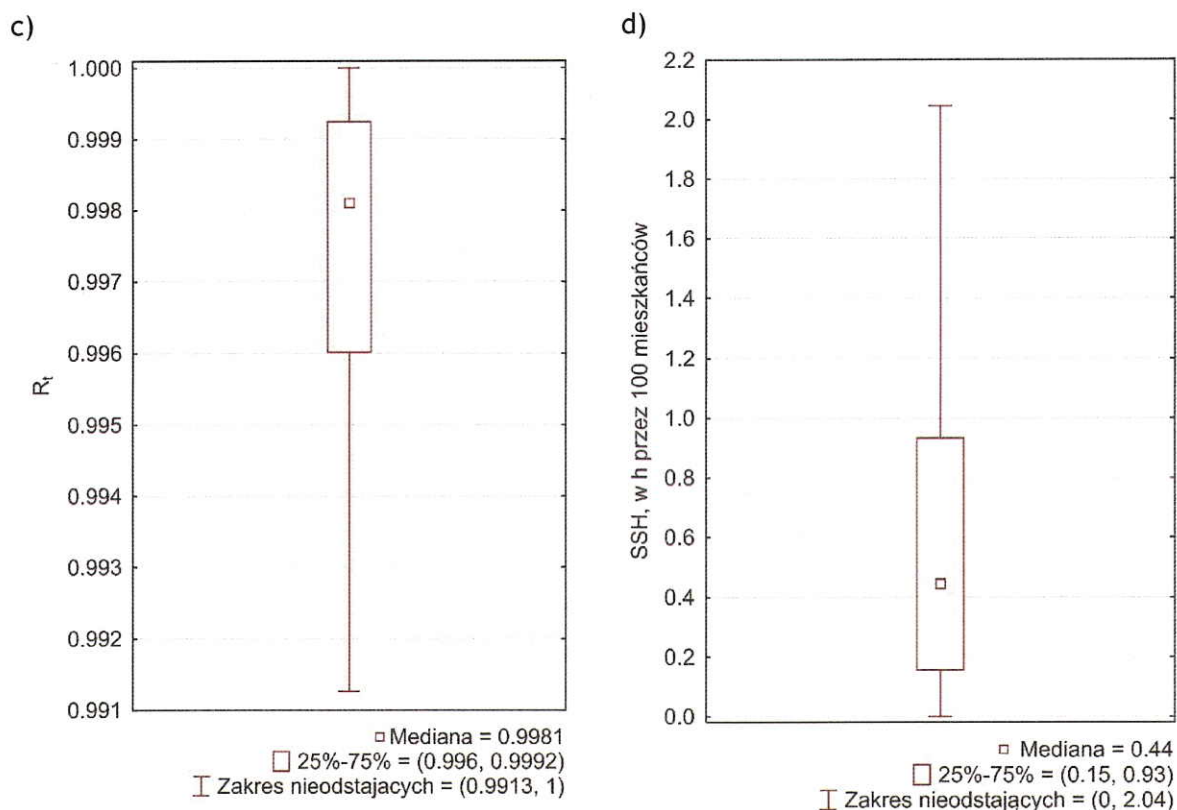
Estymację ryzyka przewodów wodociągowych przeprowadzono dla jednego z miast południowo-wschodniej Polski [publikacja 9]. W oparciu o zweryfikowany model hydrauliczny sieci wodociągowej przeprowadzono symulacje wyłączenia poszczególnych przewodów z eksploatacji, przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że w przypadku przewodów rozdzielczych skutki awarii dotyczą wyłącznie odbiorców podłączonych bezpośrednio do tych odcinków. Wyniki przedstawiono na Rysunku 4.

a)



b)





Rysunek 3. Zestawienie wskaźników ryzyka awarii sieci wodociągowej: a) oczekiwana liczba osób pozbawionych dostaw wody - $E(INH)$, b) średni czas pracy - T_w , c) wskaźnik ryzyka - R_t , d) narażenie statystycznego konsumenta wody - SSH, h .

Zaproponowano wyrażenie strat wynikających z awarii przewodów jako wartości oczekiwanej liczby mieszkańców równoważnych pozbawionych wody umożliwiając liczbowe oszacowanie strat, a zwłaszcza porównywanie skutków zdarzeń niepożądanych, co może ułatwiać procesy decyzyjne w przedsiębiorstwie wodociągowym. Przedstawiona metodyka jest zarazem stosunkowo prosta, a zakres danych niezbędnych dla oszacowania ryzyka najczęściej pokrywa się z wielkościami obecnie używanymi w praktyce eksploatacyjnej.

Efektywny proces zarządzania ryzykiem powinien umożliwić wykonanie wyczerpującego przeglądu i analizy wszystkich prawdopodobnych zdarzeń lub sekwencji zdarzeń, które mogą zagrozić ciągłości dostaw zaopatrzenia w wodę. Proces ten obejmuje identyfikację zagrożeń, analizę danych dotyczących awarii, opracowanie modelu i analizę konsekwencji, co prowadzi do kwantyfikacji ryzyka za pomocą modeli dynamicznych w celu opisanie podatności na zdarzenia niepożądane oraz pozostałych procesów, np. starzenia się materiałów przewodów wodociągowych. Zarządzanie ryzykiem z wykorzystaniem dynamicznego modelowania sekwencji niezależnych zdarzeń w celu oceny odporności systemu wodociągowego przedstawiono w opracowaniu [publikacja 10], w którym wprowadzono pojęcie awarii kaskadowych w systemach wodociągowych. Sekwencja zdarzeń niepożądanych powstała na skutek pojedynczego zdarzenia awaryjnego spowodowanego korozją przewodu wodociągowego - E_1 , po którym pojawiają się

kolejne zdarzenia (pęknięcie przewodu wodociągowego - E_2 , brak lokalizacji uszkodzonego przewodu - E_3 , brak naprawy/wymiany przewodu oraz przywrócenie dostaw wody - E_4) została opisana przez stochastyczne procesy Poissona.

Prawdopodobieństwo wystąpienia sekwencji zdarzeń niepożądanych $P_{n+1}(t)$ opisano jako:

$$\Delta P_{n+1}(t) = P_n(t) \cdot e^{-\lambda_{n+1}t} \cdot \lambda_{n+1} \Delta t, \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta P_{n+1}(t)$ - infinitezymalne prawdopodobieństwo n -tego zdarzenia w infinitezymalnym przedziale czasu Δt w sąsiedztwie t ,

$P_n(t)$ - prawdopodobieństwo wystąpienia n -pierwszego zdarzenia w przedziale czasu t ,

$e^{-\lambda_{n+1}t}$ - prawdopodobieństwo nie wystąpienia $(n + 1)$ -tego zdarzenia w przedziale czasu t ,

$\lambda_{n+1} \Delta t$ - infinitezymalne prawdopodobieństwo $(n + 1)$ -tego zdarzenia w infinitezymalnym przedziale czasu Δt w sąsiedztwie t .

Prawdopodobieństwo wystąpienia $P_4(T)$, w przedziale sekwencji T , przedstawiono jako:

$$P_4(T) = \int_0^T e^{-\lambda_1 \xi_1} \lambda_1 d\xi_1 \int_{\xi_1}^T e^{-\lambda_2 \xi_2} \lambda_2 d\xi_2 \dots \int_{\xi_3}^T e^{-\lambda_4 \xi_4} \lambda_4 d\xi_4, \quad (3)$$

Stopniową utratę odporności Δ_{res} określono jako:

$$\Delta_{res} = [P_n^*(\Delta T) - P_n(\Delta T)] \cdot \Delta T, \quad (4)$$

gdzie $P_n^*(\Delta T)$ oraz $P_n(\Delta T)$ są to prawdopodobieństwa sekwencji zdarzeń niepożądanych, odpowiednio podczas normalnych warunków eksploatacji (unstressed) oraz w czasie występowania dodatkowego zagrożenia (stressed).

Stopień przywrócenia dostaw wody $\lambda^*(t)$ w danym przedziale czasu odpowiadający sekwencji zdarzeń niepożądanych opisano jako funkcję gęstości prawdopodobieństwa.

Wyznaczone prawdopodobieństwa poszczególnych zdarzeń oraz podatności przedstawiono w Tabelach 1-3 oraz na Rysunku 3.

Tabela 1. Wskaźniki występowania poszczególnych zdarzeń oraz podatności zdarzeń niepożądanych.

Lista sekwencyjnych zdarzeń	Normalne warunki eksploatacji (ang. Unstressed Rate) (/h)	Wsp. podatności	Stressed Rate (/h)
E_1	5,00E – 5	0,0	5,00E – 5
E_2	4,00E – 4	2,0	1,20E – 3
E_3	4,17E – 2	– 0,8	8,34E – 3
E_4	4,17E – 2	– 0,9	4,17E – 3

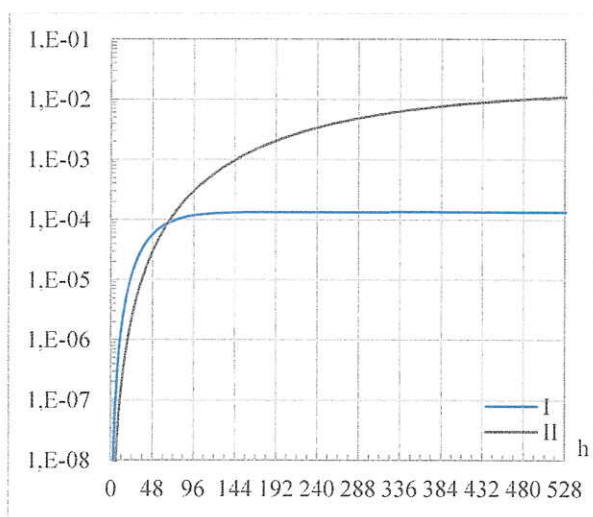
Tabela 2. Przyrost utraty odporności (ang. resilience) w systemie wodociągowym.

Lp.	$T_1 - T_2$	$P_n(\Delta T)$	$P_n^*(\Delta T)$	ΔT (h)	$P_n^*(\Delta T) - P_n(\Delta T)$	Δ_{res}	$P_n^*(T_2) - P_n^*(T_1)$
1	0 – 24 h	1,22E – 5	2,28E – 6	24	~ – 1,0E – 5	– 2,4E – 5	2,2E – 6
2	24 – 72 h	9,66E – 5	1,17E – 4	48	~ – 2,0E – 5	6,9E – 4	1,1E – 4
3	3 – 7 d	1,34E – 4	1,48E – 3	96	1,35E – 3	1,5E – 1	1,3E – 3
4	1 – 3 tyg.	1,35E – 4	1,05E – 2	336	1,04E – 2	3,4	9,5E – 3
5	3 – 53 tyg.	1,35E – 4	1,56E – 2	8400	1,55E – 2	130	4,9E – 3

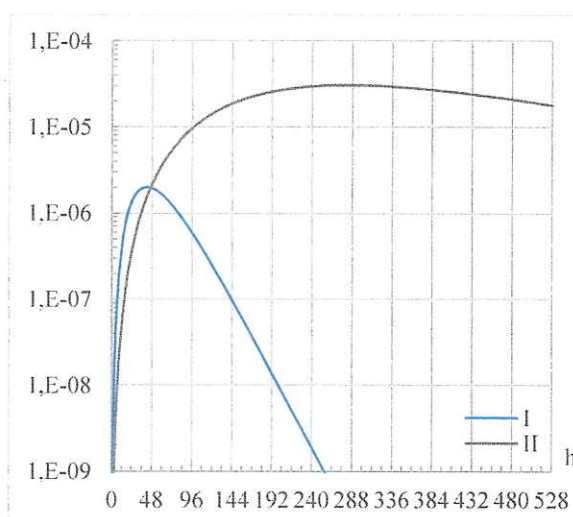
Tabela 3. Prawdopodobieństwo przywrócenia dostaw wody w funkcji odcinków-czasu.

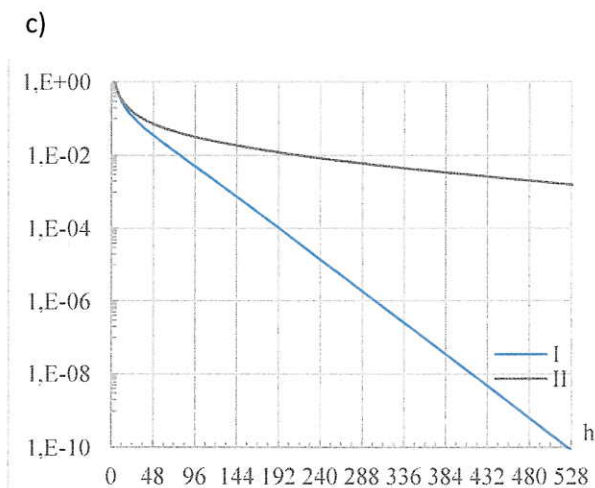
Lp.	$\lambda^*(t)$	Opis	Normalne warunki eksploatacji (ang. unstressed conditions)	Występowanie dodatkowych zagrożeń (ang. stressed conditions)	Przywrócenie dostaw wody podczas sytuacji, w której występują dodatkowe zagrożenia (ang. stressed conditions)
1	$> 10^{-1}$	Bardzo możliwe	< 30 h	< 30 h	jest prawie podobna do funkcjonowania w normalnych warunkach eksploatacji
2	$> 10^{-2}$	Prawdopodobne	30 – 84 h	30 – 192 h	trwa dłuższy czas z podobnym prawdopodobieństwem
3	$> 10^{-4}$	Mało prawdopodobne	30 – 192 h	192 – 1100 h	dłuższy czas z podobnym prawdopodobieństwem dużo później w czasie
4	$> 10^{-6}$	Bardzo nieprawdopodobne	192 – 290 h	1100 – 2000 h	skala czasowa jest nieistotna dla zarządzania kryzysowego
5	$> 10^{-6}$	Niemożliwe	> 290 h	> 2000 h	skala czasowa jest nieistotna dla zarządzania kryzysowego

a)



b)





Rysunek 4. Prawdopodobieństwo przywrócenia dostaw wody w przedziale czasu (a), funkcja gęstości prawdopodobieństwa przywrócenia dostaw wody w przedziale czasu (b), wskaźnik przywrócenia dostaw wody w przedziale czasu (c), gdzie: I - normalne warunki eksploatacji (ang. unstressed conditions), II - przywrócenie dostaw wody podczas sytuacji, w której występują dodatkowe zagrożenia (ang. stressed conditions).

Zaproponowana koncepcja szacowania odporności systemu wodociągowego oraz sekwencji kaskadowych zdarzeń niepożądanych może pomóc w podejmowaniu decyzji dotyczących zarządzania kryzysowego.

Propozycja zmodyfikowanego wielokryterialnego modelu decyzyjnego w ocenie ryzyka awarii przewodów wodociągowych - [publikacja 7]

Metoda zmodyfikowanego wielokryterialnego modelu decyzyjnego (mMCDA) polega na wyborze kryteriów wpływających na ryzyko awarii przewodów wodociągowych. Zaproponowana metoda jest konstruowana na podstawie grupowania kryteriów ryzyka awarii sieci wodociągowej i za ich pomocą dokonania oceny poprzez wyznaczone wartości punktowych zgodnie z metodą hierarchicznej analizy procesu^{41,42}. Założono, że ryzyko to miara oceny zagrożenia wynikająca z prawdopodobnych zdarzeń pozostających poza kontrolą, albo z możliwych konsekwencji decyzji, stanowiące wartość oczekiwaną strat, wyznaczone zgodnie z równaniem 5.

$$r(A) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot F_j(A), \quad (5)$$

gdzie:

$r(A)$ - addytywna wartość ryzyka,

w_j - waga punktowa dla każdego z kryteriów podkategorii j obejmującej projektowanie, wykonawstwo, eksploatację, kategorie społeczne, finansowe, środowisko oraz otoczenie, dla $j = \{1, 2, \dots, m\}$,

F_j - kategoria preferencji alternatyw.

⁴¹ Saaty, L.T. A scaling method for priorities in hierarchical structures. J. Math. Psychol. 1977, 15, 234–281.

⁴² Saaty, L.T. The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.

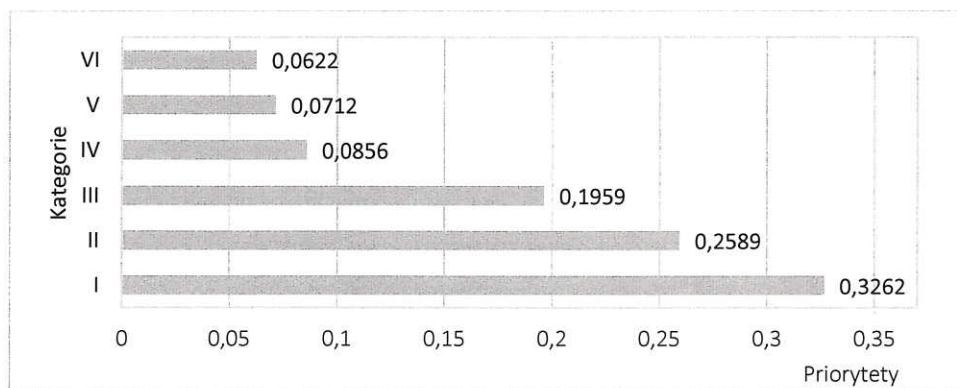
Część kryteriów wziętych do oceny ryzyka awarii przewodów wodociągowych zaprezentowano w tabeli 4⁴³.

Tabela 4. Wagi oceny kryteriów - wycinek kryteriów.

Lp.		Kategorie oraz podkategorie kryteriów			Wagi punktowe podkategorii
1	2	3	4		5
I	...	Projektowanie	...	...	...
II	...	Wykonawstwo	...	...	...
III	IIIa)	Eksploatacja	rodzaj sieci wodociągowej według wyższego priorytetu naprawy	przyłącz wodociagowy,	1
	IIIb)			przewód rozdzielczy,	2
	IIIc)			magistrala,	3
	IIId)		intensywność uszkodzeń, λ	do $0,5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$,	1
	IIIe)			od $0,5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ do $1,0 \text{ km}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$,	2
	III f)			$>1,0 \text{ km}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$,	3
	IIIg)		obciążenia dynamiczne, w tym uciążliwość wykonywania napraw w miejscu ułożenia sieci	przewód w terenie niezurbanizowanym,	1
	IIIh)			przewód w pasie ruchu pieszego,	2
	IIIi)			przewód w jezdni,	3
	IIIj)				
	IIIk)		wiek sieci	do 20 lat,	1
	IIIl)			od 20 do 50 lat,	2
	IIIm)			powyżej 50 lat,	3
	III n)		materiał sieci	tworzywa,	1
	III o)			stal,	2
	III p)			żeliwo szare,	3
IV	IVa)	Społeczne	uciążliwość wynikająca z zajęcia pasa drogowego, bądź terenów zielonych	przewód w terenie niezurbanizowanym,	1
	IVb)			przewód w pasie ruchu pieszego,	2
	IVc)			przewód w jezdni,	3
V		Finansowe	...	...	...
VI	VIa)	Środowisko oraz otoczenie	warunki hydrogeologiczne	dobrze,	1
	VIb)			średnie,	2
	VIc)			złe,	3
	VI d)		gęstość uzbrojenia podziemnego w miejscu ułożenia sieci	małe,	1
	VI e)			średnie,	2
	VI f)			duże.	3

⁴³ Pietrucha-Urbanik K., Tchorzewska-Cieślak B. *Approaches to Failure Risk Analysis of the Water Distribution Network with regard to the Safety of Consumers*, 2018, Water, z. 10(11), 1679. ISBN/ISSN: 2073-4441

Dla rozpatrywanej sytuacji przedstawionej w pracy [publikacja 7], otrzymano następujące oceny ważności parametrów (Rys. 5), nie naruszające zasad stałości preferencji dla następujących parametrów: maksymalna wartość własnej macierzy $\lambda_{max} = 6,3071$, wskaźnik konsekwencji (Consistency Index) $CI = 0,0614$, indeks losowy (Random Index) $RI = 1,25$ oraz współczynnik konsekwencji (Consistency Ratio) $CR = 0,0491$.



Rysunek 5. Ocena priorytetów poszczególnych kryteriów.

W rozpatrywanej metodzie przyjęto trzystopniową skalę poszczególnych kategorii ryzyka, która umożliwia ocenę ryzyka w oparciu o następujące wyznaczone przedziały ryzyka: ryzyko tolerowane $[2,567 \div 3,06)$, kontrolowane $[3,06 \div 6,02)$ oraz nieakceptowane $[6,02 \div 7,44]$. Proponowana skala została oparta na opiniach ekspertów, przeprowadzonych analiz oraz danych literaturowych związanych z oceną ryzyka. Ocena otrzymanych wartości ryzyka pomaga podjąć decyzję związaną z eksploatacją lub modernizacją systemu. W przypadku osiągnięcia akceptowalnego ryzyka nie są wymagane żadne dodatkowe działania, a system działa w sposób prawidłowy i niezawodny, jak również nie są potrzebne żadne działania zapobiegawcze w systemie. Kontrolowane ryzyko oznacza, że system może funkcjonować, ale pod warunkiem, że rozpocznie się modernizacja lub renowacja. Natomiast w przypadku otrzymania poziomu nieakceptowalnego, należy podjąć natychmiastowe działania w celu obniżenia wartości otrzymanego ryzyka. Należy zauważyć, że konsekwencje awarii podsystemu dystrybucji wody powodują okresowe przerwy w dostawie wody o odpowiedniej jakości i ilości. Analiza ryzyka awarii może przyczynić się do ograniczenia awarii oraz ich konsekwencji.

Ocena bezpieczeństwa podsystemów dystrybucji wody w oparciu o zidentyfikowane zagrożenia i ich możliwe skutki - [publikacja 11]

W pracy [publikacja 11] zaproponowano zastosowanie metody Bow-Tie do oceny i analizy bezpieczeństwa podsystemów dystrybucji wody. W Polsce metoda ta nie miała jeszcze praktycznych zastosowań w zakresie zaopatrzenia w wodę. Przedstawiono założenia nowej metodologii analizy bezpieczeństwa dla zidentyfikowanych zagrożeń i ich możliwych skutków, która uwzględnia różne scenariusze sytuacji awaryjnych związanych z funkcjonowaniem

podsystemów dystrybucji wody. Metodę Bow-Tie można stosować zarówno w ujęciu jakościowym, jak i ilościowym. Z teoretycznego punktu widzenia metoda Bow-Tie stanowi połączenie drzewa niezdatności - FTA (ang. Fault Tree Analysis) oraz zdarzeń - ETA (ang. Event Tree Analysis) z uwzględnieniem elementów modelu środków kontroli ryzyka^{44,45,46}. W uporządkowany sposób przedstawiono informacje o zagrożeniach i środkach kontroli oraz ilościowe (liczbowe) oszacowanie skutków zdarzeń niepożądanych. Podstawą wyznaczania kryteriów ryzyka było przyjęcie akceptowalnych kryteriów ryzyka.

W krajach Unii Europejskiej występuje różne podejścia do przyjęcia akceptowalnych kryteriów ryzyka, przykładowo:

- Francja, implementacja akceptowalnych kryteriów dla grupowego ryzyka, które zostały przedstawione w formie matrycy w zależności od liczby narażonych osób, np. katastrofalne konsekwencje powyżej 1000 narażonych osób, przy niskim prawdopodobieństwie występowania 10^{-5} ,⁴⁷
- Wielka Brytania, w odniesieniu do ryzyka indywidualnego dolna granica to 10^{-6} , natomiast $0,3 \cdot 10^{-6}$ dla osób szczególnie narażonych (np. starszych, osób podatnych na narażenie, szkoły), górna granica dla biernego ryzyka np. dla zatrudnionych w okolicznych obiektach 10^{-5} zgodnie z zaleceniami Głównego Inspektoratu Zdrowia i Bezpieczeństwa Pracy - HSE^{48,49}. Zasady ramowe dopuszczalności ryzyka opracowane przez HSE zostały przyjęte przez inne kraje europejskie, min. Holandię,
- Niemcy, wytyczne podano w opracowaniu⁵⁰ oraz uwzględniono Dyrektywę Seveso II, wyznaczenie konsekwencji w oparciu o szczegółowe założenia, bądź wytyczne dla danej działalności (np. wartość progowa promieniowania cieplnego $1,6 \text{ kW/m}^2$).

Analizę konsekwencji towarzyszących pojawieniu się zdarzenia niepożądanemu z wykorzystaniem metody Bow-Tie przeprowadzono poprzez zastosowanie matrycy ryzyka oraz

⁴⁴ Reason, J. *Human error: models and management*. British Medical Journal. 320 (7237), 2000, pp. 768–770.

⁴⁵ Kacprzak, P., Kosmowski, K.T. 2009. *Human factors in the layer of protection analysis with emphasis on alarm system management*. Mat. konf. ESREL, Prague 2009, Reliability, Risk and Safety - Theory and Applications (ed. By Radim Bris, Carlos Guides' Soares, Sebastián Martorell), CRC Press.

⁴⁶ IEC 61508:1998. *Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety-Related Systems*. Parts 1-7. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

⁴⁷ European Commission. *Le plan de prevention des risques technologiques (PPRT)*, Guide méthodologique, Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Overview of roadmaps in selected member states, 2007.

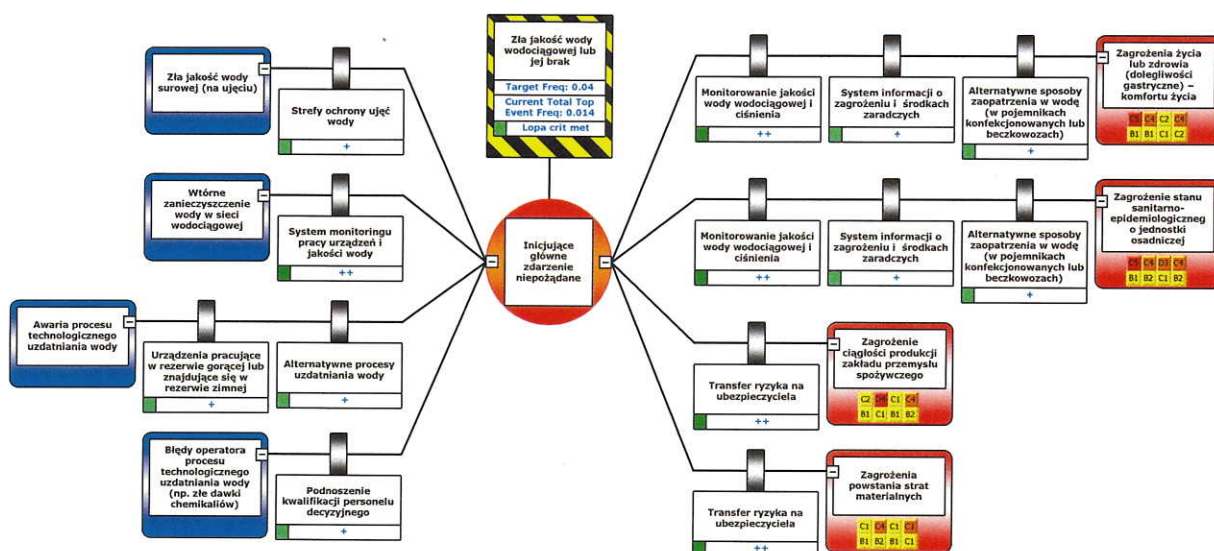
⁴⁸ UK Health and Safety Executive. *Proposals for revised policies to address societal risk around onshore non-nuclear major hazard installations*, Consultative Document CD112, 2007.

⁴⁹ UK Health and Safety Executive, *Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards*, 1989.

⁵⁰ UK SFK/TAA-GS-1: *Störfall-Kommission technischer Ausschuss für Anlagensicherheit, Leitfaden*. Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung - Umsetzung § 50 BImSchG.

metody LOPA. Pierwszym etapem analizy bezpieczeństwa było zidentyfikowanie zagrożeń oraz ich możliwych skutków, następnie określenie barier zapobiegających powstawaniu zagrożeń, wraz z określeniem stopnia ich efektywności. W rozwoju sekwencji zdarzeń uwzględniono wpływ barier bezpieczeństwa, których celem jest zapobieganie lub ograniczanie skutków zdarzenia inicjującego.

Na rysunku 6 przedstawiono przykład ustrukturyzowanej reprezentacji pojawienia się zdarzenia niepożądanego związanego ze złą jakością wody wodociągowej lub jej brakiem w podsystemie dystrybucji wody. Skale częstości oraz uciążliwości skutków zdarzeń niepożądanych jako pięciostopniowe przedstawiono w tabeli 5.



Rysunek 6. Zastosowanie metody Bow-Tie dla zdarzenia niepożądanego w podsystemie dystrybucji wody związanego z pojawieniem się złej jakości wody wodociągowej, bądź jej brakiem.

Tabela 5. Matryca ryzyka.

Wyszczególnienie						Prawdopodobieństwo				
						Bardzo nieprawdopodobne	Nieprawdopodobne	Dość prawdopodobne	Prawdopodobne	Bardzo prawdopodobne
Konsekwencje	1. Straty ludzkie	2. Aktywa przedsiębiorstwa	3. Środowisko	4. Reputacja	Oznac.	A	B	C	D	E
	Brak	Bez wpływu	Bez wpływu	Bez wpływu	1	A1	B1	C1	D1	E1
	Dolegliwości gastryczne	Do 2% odsetku dochodów przedsiębiorstwa	Niewielki wpływ, Czas restytucji poniżej 1 roku, Koszt restytucji poniżej 10 tys. zł	Znikome Odziaływanie lokalne	2	A2	B2	C2	D2	E2
	Wymagane udzielenie pomocy lekarskiej	Do 5% odsetku dochodów przedsiębiorstwa	Lokalne, Czas restytucji powyżej 1 roku, Koszt restytucji powyżej 10 tys. zł	Znaczny, ale ograniczony efekt Odziaływanie krajowe	3	A3	B3	C3	D3	E3

Wymagana hospitalizacja	Do 20% odsetku dochodów przedsiębiorstwa	Duży, Czas restytucji powyżej 10 lat, Koszt restytucji powyżej 100 tys. zł	Kluczowe Odziaływanie krajowe	4	A4	B4	C4	D4	E4
Zejście śmiertelne	Powyżej 20% odsetku dochodów przedsiębiorstwa	Bardzo duży, Skutki na poziomie globalnym, bądź krajowym Czas restytucji powyżej 10 lat	Krytyczne Odziaływanie międzynarodowe	5	A5	B5	C5	D5	E5

Objaśnienia: - ryzyko tolerowane, - ryzyko kontrolowane, - ryzyko nieakceptowalne

W celu oceny skuteczności istniejących zabezpieczeń w aspekcie ilościowym w połączeniu z metodą Bow-Tie zastosowano metodę LOPA (ang. Layer of Protection Analysis).

Przeprowadzono następujące etapy analizy warstw zabezpieczeń:

- ustalenie oraz analizę zagrożeń,
- identyfikację inicjującego zdarzenia oraz częstości pojawiania się,
- identyfikację prawdopodobieństwa uszkodzenia poprzez prawdopodobieństwo, że system bezpieczeństwa technicznego nie zrealizuje swojej funkcji w razie potrzeby PFD (ang. Probability of Failure on Demand),
- oszacowanie i ocena wyznaczonych częstości pojawiania się zdarzeń niepożądanych w aspekcie akceptowalności, z zależności:

$$f_i^p = f_i^k \times \prod_{j=1}^l PFD_{il}, \quad (6)$$

gdzie f_i^p jest to częstość wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego oraz f_i^k to częstość wystąpienia k -tego inicjującego zdarzenia niepożądanego oraz PFD_{il} jest to prawdopodobieństwo nie wykonania funkcji przez l -tą barierę.

Ryzyko dla przykładowej sytuacji awaryjnej pojawiającej się w podsystemie dystrybucji wody spowodowanej wtórnym zanieczyszczeniem wody w sieci wodociągowej, określono na podstawie dokonania analizy danych, w wyniku czego otrzymano częstość pojawiania się zdarzenia niepożądanego równą 0,005 oraz częstość konsekwencji dla danego zdarzenia niepożądanego $2E-08$, co nie przekracza przyjętego akceptowalnego częstości konsekwencji poziomu LOPA (przyjętego na podstawie brytyjskich wytycznych Heath and Safety Executive (HSE), w krajach wysokorozwiniętych dobrowolne narażenie się na ryzyko utraty zdrowia 10^{-5}), co potwierdza iż założone bariery zapewniają skuteczność funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę w aspekcie pojawienia się zdarzenia niepożądanego w tym systemie.

Opracowana metoda analizy i oceny relacji między pojawiającymi się zagrożeniami oraz stosowanymi barierami zabezpieczeń, umożliwia gradację stopnia uciążliwości w formie klasyfikacji skutków oraz może być wykorzystana do określenia ewentualnych, bądź dodatkowych barier zabezpieczających, co pozwala na zapewnienie ciągłości dostaw wody poprzez podsystem dystrybucji wody.

4.3.4. OSIĄGNIĘCIA, JAKIE WYNIKAJĄ Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie uniwersalnej metodyki analizy i oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej. Podsystem dystrybucji wody jest jednym z podstawowych podsystemów technicznych należących do infrastruktury podziemnej, który ma priorytetowe znaczenie dla życia ludności, szczególnie w aglomeracjach miejskich. Należąc do infrastruktury krytycznej podlega specjalnej ochronie zarówno pod kątem zapewnienia bezpieczeństwa, jak i niezawodności funkcjonowania dostaw wody do odbiorców.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych, jakie wynikają z przeprowadzonych badań z zakresu analizy i oceny ryzyka sieci wodociągowej należą:

- propozycja zastosowania wielowymiarowych analiz porównawczych do analizy i oceny awaryjności oraz kosztów związanych z usuwaniem awarii przewodów wodociągowych, co może stanowić składową ryzyka eksploatatora podsystemów dystrybucji wody, jak również może być zastosowana w planowaniu kosztów eksploatacji sieci wodociągowych, a także pozwolić na wspomaganie decyzji w zakresie oceny efektywności ekonomicznej ich funkcjonowania,
- opracowanie metody wielokryterialnego modelu decyzyjnego z implementacją hierarchicznej analizy procesu w celu umożliwienia przeprowadzenia oceny ryzyka awarii dla sieci wodociągowej,
- opracowanie metodyki analiz i oceny ryzyka sieci wodociągowej z zastosowaniem wskaźników ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej, co pozwoli na rzetelną ocenę funkcjonowania oraz może być podstawą szeregu działań z zakresu polityki eksploatacyjnej systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę,
- wprowadzenie pojęcia awarii kaskadowych w systemach wodociągowych, które dotyczą sekwencji niezależnych zdarzeń niepożądanych, w celu podejmowaniu decyzji dotyczących zarządzania ryzykiem,
- implementacja podejścia oceny zagrożeń poprzez metodę Bow-Tie z wykorzystaniem macierzy ryzyka oraz metody LOPA, co może stanowić narzędzie wspomagające dla operatorów w zakresie zwiększenia poziomu niezawodności oraz może zostać wykorzystana do eliminacji słabych punktów systemu i ograniczenia prawdopodobieństwa występowania zdarzeń niepożądanych,
- zaproponowana metodyka analizy i oceny ryzyka, wykonana na podstawie danych eksploatacyjnych i wiedzy eksperckiej może stanowić podstawę kompleksowego programu zarządzania ryzykiem, która stanowi część planów bezpieczeństwa wody zalecanych przez WHO, biorąc pod uwagę potrzebę nowoczesnych standardów dotyczących bezpieczeństwa i niezawodności dostaw wody do spożycia,
- opracowane metody, jak również wyniki przeprowadzonych analizy będą mogły być wykorzystane w dalszych badaniach funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody pod

kątem ich niezawodności i bezpieczeństwa, w celu ochrony konsumentów wody oraz zrównoważonego zarządzania systemami wodociągowymi.

Możliwość wykorzystania wyników

Zastosowanie w analizie i ocenie ryzyka sieci wodociągowych.

Kierunki dalszych badań

Dalsze badania powinny dotyczyć wprowadzenie kompleksowej metodyki analizy i oceny ryzyka awarii sieci wodociągowych dla małych, średnich i dużych wodociągów, z uwzględnieniem nowoczesnych technik informatycznych oraz oprogramowania opartego na wielokryterialnym wspomaganie decyzji, w celu podejmowania decyzji odnośnie priorytetyzacji odnowy przewodów wodociągowych.

Konieczne wydaje się również wskazanie do dyskusji wartości kryterialnych z zakresu efektywności funkcjonowania podsystemu dystrybucji wody. Przyjęcie takich wartości jest zadaniem trudnym i powinno opierać się na wieloletnich badaniach oraz doświadczeniu ekspertów z zakresu niezawodności funkcjonowania podsystemów dystrybucji wody.

Opracowanie standardów w zakresie efektywnej eksploatacji oraz dotychczasowe rozważania stanowią podstawę do zastosowania uzyskanych rozwiązań w praktyce wodociągowej i będą podstawą w zarządzaniu odnową sieci wodociągowej.

Przedstawione propozycje zmierzają do aplikacji pilotażowego programu dla wybranych wodociągów, celem potwierdzenia wniosków wynikających z pracy, co pozwoli na prawidłowe zarządzanie podsystemem dystrybucji wody.

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

5.1. PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

W dniu 21 marca 2011 r. otworzyłam przewód doktorski na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej. Na Promotora został powołany prof. dr hab. inż. Janusz Rak. Temat mojej rozprawy doktorskiej był następujący: *Metodyka określania gwarancji w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę*.

Moje badania naukowe w tym okresie skupiały się przede wszystkim na opracowaniu metodologii mogącej posłużyć do opisywania funkcjonowania systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) z wykorzystaniem gwarancji. Głównym celem badań było opracowanie projektu modelowej gwarancji obejmującej warunki dostawy wody i wytycznych jej zawierania. W pracy przeprowadziłam badania opinii konsumentów na temat oczekiwań związanych z gwarancją dostawy wody do spożycia. Do oceny zróżnicowania poziomu świadczonych usług w SZZW zastosowałam metody wielowymiarowej analizy porównawczej (WAP) oraz zaimplementowałam konsumenckie wskaźniki wyznaczające standardy dostawy wody. Określiłam standardy jakości poziomu usług wodociągowych. Zastosowałam teorię zbiorów rozmytych (TZR) do oceny ryzyka związanego z niedotrzymaniem warunków gwarancji. Opracowałam metody określania

gwarantowanego stopnia dostępności usług wodociągowych. Materiał uzyskany z badań eksploatacyjnych prowadzonych na terenie przedsiębiorstwa wodociągowego w Rzeszowie pozwolił na wyznaczenie gwarancji na przykładzie systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Rzeszowa, oraz zaproponowanie metodologii zawierania umowy gwarancyjnej.

Rozprawę doktorską⁵¹ obroniłam 16 marca 2014 r. na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej i uzyskałam stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, Rada Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej, rozprawa obroniona z wyróżnieniem (recenzenci: Dr hab. inż. Dariusz Kowalski prof. Politechniki Lubelskiej oraz Prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski - Politechnika Białostocka).

Balneologia i balneotechnika

Moje zainteresowania naukowe poszerzyły się również o zagadnienia związane z balneologią i balneotechniką (inżynierią uzdrowiskową) oraz analizą i wykorzystaniem wód mineralnych. Efektem badań w tym zakresie były publikacje nt. zagadnień związanych z balneotechniką, balneoterapią, inżynierią uzdrowiskową i z walorami środowiskowymi⁵². W publikacji pt. *Approach to Analyse the State of Health Resorts Base in Podkarpackie Province*⁵³ na podstawie zebranego materiału oraz danych eksploatacyjnych dotyczących funkcjonowania uzdrowisk Podkarpacia, dokonano charakterystyki uzdrowisk pod kątem walorów krajobrazowych, stref ochrony uzdrowiskowej, oferty zabiegów leczniczych, zaplecza noclegowo-usługowego oraz przeanalizowano skład chemiczny wód mineralnych i leczniczych występujących w wymienionych uzdrowiskach.

W opracowaniu pt. *Nowe-stare możliwości uzdrowiskowe województwa Podkarpackiego*⁵⁴ przedstawiono ocenę potencjalnych miejscowości Podkarpacia pod kątem możliwości wykorzystania uzdrowiskowego oraz dokonano jakościowej analizy wód w aspekcie możliwości odnowy działalności uzdrowiskowej w tych miejscowościach. Kontynuacją tej tematyki jest publikacja *Wpływ gospodarki wodno-ściekowej na ocenę atrakcyjności turystycznej gminy*⁵⁵

⁵¹ Pietrucha-Urbanik K.: *Metodyka określania gwarancji w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę*. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, 2014.

⁵² Pietrucha-Urbanik K.: *Analiza wielowymiarowa zróżnicowania wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na europejskim rynku. 2012, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, t. 4, z. 59, s. 83-91, ISBN/ISSN: 0209-2646.*

⁵³ Pietrucha-Urbanik K., Skowrońska D.: *Approach to Analyse the State of Health Resorts Base in Podkarpackie Province*, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA*, t. XXXIV, z. 64 (4/I/17), październik-grudzień 2017, s. 425-434, DOI:10.7862/rb.2017.224

⁵⁴ Rak J., Pietrucha-Urbanik K.: *Nowe-stare możliwości uzdrowiskowe województwa Podkarpackiego [w:] Walory ekologiczne i turystyczne północnej części Euroregionu Karpackiego (pod red. prof. J. Raka), 2010, Brzozów: Muzeum Regionalne im. Adama Fastnachta W Brzozowie, s.293-301, ISBN/ISSN: 978-83-86801-49-7.*

⁵⁵ Rak J., Pietrucha-Urbanik K.: *Wpływ gospodarki wodno-ściekowej na ocenę atrakcyjności turystycznej gminy. [w:] Gospodarka wodno-ściekowa w Karpatach i na Pogórzu Karpackim oraz jej wpływ na podniesienie atrakcyjności*

opublikowana w monografii *Gospodarka wodno-ściekowa w Karpatach i na Pogórzu Karpackim oraz jej wpływ na podniesienie atrakcyjności turystycznej regionu*, będąca efektem wystąpienia na IX Międzynarodowej Konferencji Ekologicznej w Brzozowie. Do oszacowania atrakcyjności turystycznej w aspekcie gospodarki wodno-ściekowej zaproponowano zastosowanie matrycy trójparametrycznej z uwzględnieniem kategorii procentowego udziału oczyszczonych ścieków, procentu zwodociągowania gospodarstw oraz klasę wyposażenia sanitarnego.

Odniesiono się również do balneologii na zachodniej Ukrainie, dokonując charakterystyki wybranych uzdrowisk zachodniej Ukrainy, jak również przedstawiono analizę składu fizykochemicznego wód mineralnych rozpatrywanych uzdrowisk Zachodniej Ukrainy. Z kolei w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska opublikowano publikację pt. *Analiza składu wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na europejskim rynku*⁵⁶, w której dokonano charakterystyki składu fizykochemicznego wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na rynku europejskim oraz przedstawiono hierarchizację porządkowania liniowego, według składników wód mineralnych, analizą objęto 1030 wód mineralnych. Z kolei w pracy *Balneotechnika. Walory uzdrowiskowe*⁵⁷ dokonano analizy koncepcji rozwiązań oddziałów zabiegowych oraz technicznych instalacji balneotechnicznych, w tym instalacji wód mineralnych oraz borowinowych. Przedstawiono analizę awarii źródeł oraz instalacji wód mineralnych oraz przykładową analizę niezawodności instalacji balneotechnicznych metodą drzewa niezdatności oraz metodą drzewa zdarzeń. Przenalizowano zagadnienia związane z kontrolą jakości naturalnych wód mineralnych w aspekcie bezpieczeństwa zdrowotnego według metodologii systemu analizy zagrożeń w krytycznych punktach kontroli - HACCP (ang. Hazard Analysis Critical Control Points), mającego na celu zapewnienie bezpieczeństwa wodom mineralnym poprzez identyfikację i oszacowanie zagrożeń z punktu widzenia jakości zdrowotnej oraz ryzyka wystąpienia zagrożeń podczas przebiegu wszystkich etapów produkcji i obrotu handlowego wodami mineralnymi.

5.2. PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych zostałam zatrudniona na stanowisku adiunkta i od 2014 r. pracuję na tym stanowisku w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej oraz podjęłam badania naukowe związane z bezpieczeństwem i niezawodnością podsystemów dystrybucji wody.

turystycznej regionu (pod red. prof. J. Raka), Muzeum Regionalne im. Adama Fastnachta w Brzozowie t.3, s.177-185, 2009, ISBN/ISSN: 978-83-86801-42-8.

⁵⁶ Pietrucha-Urbanik K.: *Analiza składu wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na europejskim rynku*. 2012, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, t.4, z.59, s.71-82, ISBN/ISSN: 0209-2646.

⁵⁷ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K. *Balneotechnika. Walory uzdrowiskowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010, s. 1-212, ISBN/ISSN: 978-83-7199-618-4.

Zagadnienia podejmowane w pracy naukowo-badawczej dotyczą również analizy i oceny bezpieczeństwa jakości wody wodociągowej pod kątem analizy ryzyka utraty stabilności biologicznej i chemicznej wody. Głównym osiągnięciem moich prac w tym zakresie jest opublikowanie w 2017 r. we współautorstwie z dr. hab. inż. Barbarą Tchórzewską-Cieślak, prof. PRz oraz dr. hab. inż. Doroty Papciak, prof. PRz monografii nt. *Szacowanie ryzyka zmian jakości wody w sieciach wodociągowych*⁵⁸. Woda dostarczana odbiorcom musi charakteryzować się odpowiednią jakością nie tylko w momencie wprowadzenia do sieci wodociągowej ale również w punkcie odbioru przez konsumentów⁵⁹. W czasie transportu wody do odbiorcy często następuje pogorszenie jej jakości powodowane przez uwalnianie materiału, z którego wykonana jest sieć, tworzenie i odrywanie biofilmu, gromadzenie i uwalnianie zdeponowanych osadów. Nieregularne zmiany jakości dostarczanej wody mogą powodować fizykochemiczną i mikrobiologiczną destabilizację materiału rurociągu i powstałych w nim obrostów. Bezpieczeństwo SZZW to zdolność systemu do realizowania swoich funkcji pomimo występowania różnego rodzaju zdarzeń niepożądanych^{60,61,62,63,64}. W pracach pt. *Analysis of chemical stability of tap water in terms of required level of technological safety* oraz *Analysis of the biological stability of tap water on the basis of risk analysis and parameters limiting the secondary growth of microorganisms in water distribution systems*^{65,66} dokonano analizy i oceny ryzyka utraty stabilności chemicznej oraz biologicznej wody. Skutkami utraty stabilności jest zwiększona podatność na korozję oraz wtórne pogorszenie parametrów organoleptycznych poprzez wtórne zanieczyszczenie wody w sieci, a więc zagrożenie zdrowia konsumentów. Analiza została wykonana na podstawie uzyskanych danych eksploatacyjnych ze stacji uzdatniania wody. Przyjęto, że ryzyko związane z niedotrzymaniem określonych (wymaganych) parametrów jakości wody w sieci wodociągowej,

⁵⁸ Tchórzewska-Cieślak B., Papciak D., Pietrucha-Urbanik K.: *Szacowanie ryzyka zmian jakości wody w sieciach wodociągowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2017, s. 1-114. ISBN/ISSN: 978-83-7934-207-5.

⁵⁹ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. z 2017 r., poz. 2294).

⁶⁰ Rak J.: *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.

⁶¹ Rak J.: *Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 111, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1993.

⁶² Rak J.: *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*. Wydawnictwo PAN - Komitet Inżynierii Środowiska t.28, Rzeszów 2005.

⁶³ Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2005.

⁶⁴ Zimoch I.: *Operational Safety of the Water Supply System Under Conditions of Water Quality Variations in the Water-pipe Network*, 2009, *Ochrona Środowiska*, 31 (3), s. 51-55.

⁶⁵ Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B., Papciak D., Skrzypczak I.: *Analysis of chemical stability of tap water in terms of required level of technological safety*, 2017, *Archives of Environmental Protection*, 43 (4), s. 3-12, ISBN/ISSN: 2083-4772

⁶⁶ Papciak D., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Pietrzyk A.: *Analysis of the biological stability of tap water on the basis of risk analysis and parameters limiting the secondary growth of microorganisms in water distribution systems*, 2018, *Desalination and Water Treatment*, s.1-9, ISBN/ISSN: 1944-3994

które mogą mieć negatywny wpływ na parametry fizykochemiczne i jakość bakteriologiczną wody docierającej do konsumenta jest miarą braku biostabilności. Ryzyko w takim aspekcie może być definiowane jako wartość oczekiwana strat (skutków) jakie mogą zaistnieć w wyniku przekroczenia określonych parametrów jakości wody wodociągowej. Wychodząc z definicji wartości oczekiwanej, tak zdefiniowane ryzyko określamy jako prawdopodobieństwo przekroczenia założonych parametrów jakości wody^{15,16,17,18,67, 68}. Do przeprowadzenia analizy i oceny ryzyka przyjęto następujące wartości progowe parametrów warunkujących stabilność biologiczną wody⁶⁹: BRWO = 0,25 gC/m³, $\Sigma N_{\text{nieorganiczny}} = 0,2 \text{ gN/m}^3$ oraz $\text{PO}_4^{3-} = 0,03 \text{ gPO}_4^{3-}/\text{m}^3$.

Przyjęto następujące poziomy bezpieczeństwa: akceptowalny poziom bezpieczeństwa - PB_T. Odpowiada parametrom wyznaczającym obszar ryzyka tolerowanego (r_T), parametry wody wodociągowej zapewniają wymaganą stabilność biologiczną w sieci wodociągowej. Poziom bezpieczeństwa, który wymaga kontroli oraz redukcji - PB_K, odpowiada poziomowi ryzyka kontrolowanego (r_K) oraz oznacza, iż parametry jakości wody wskazują na możliwość wystąpienia zmian stabilności chemicznej wody w sieci wodociągowej. Nieakceptowalny poziom bezpieczeństwa - PB_{NA}, wyznaczony poprzez nieakceptowalne ryzyko (r_{NA}) oznacza wystąpienie takich parametrów jakości wody, które powodują brak stabilności biologicznej wody w sieci wodociągowej, co w konsekwencji może być przyczyną jej wtórnego zanieczyszczenia.

Analizę i ocenę ryzyka utraty stabilności chemicznej wody przeprowadzono w oparciu o założenie, że wtórne zanieczyszczenie wody wodociągowej w systemie dystrybucji związane jest głównie z tymi właściwościami wody, które decydują o wytrącaniu i rozpuszczaniu nagromadzonych osadów i bezpośrednio wpływają na walory organoleptyczne wody. Przyjęto, że miarą ryzyka utraty stabilności wody wodociągowej jest wartość oczekiwana, związana z przekroczeniem indeksów korozyjności wody uwzględniających tendencję do tworzenia warstw ochronnych oraz wytrącania i rozpuszczania osadów. W tym celu do analizy wybrano indeksy nasycenia Langeliera I_L , Indeks Ryznara I_R oraz Indeks Stroheckera I_{st} . Operatorzy powinni uczestniczyć w procesie projektowania systemu dystrybucji wody, używając odpowiednich materiałów, aby zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa od źródła wody do odbiorców. Należy zauważyć, że konieczne jest dostosowanie materiału wewnętrznej instalacji sieci wodociągowej do parametrów wody. Obecnie nie ma korelacji między etapem projektowania a parametrami wody. Stwierdzono, że aby chronić infrastrukturę wodociagową, która należy do infrastruktury krytycznej, przedsiębiorstwo wodociagowe powinno położyć większy nacisk na dystrybucję stabilnej wody, która nie ma potencjalnie korozyjnych właściwości. Podjęto pewne

⁶⁷ Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.

⁶⁸ Tchórzewska-Cieślak B.: *Water supply system reliability management*. Environmental Protection Engineering. 35, 2009, s. 29-35.

⁶⁹ Wolska M. *Usuwanie substancji biogenych w technologii oczyszczania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015.

sugestie dotyczące ochrony systemu dystrybucji wody i zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania systemu oraz długotrwałej trwałości przewodów wodociągowych.

Kolejny obszar badań dotyczył badania niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemów dystrybucji gazu ziemnego. W pracy pt. *Analysis of the gas network failure and failure prediction using the Monte Carlo simulation method*⁷⁰ dokonano analizy awaryjności sieci gazowych oraz prognozowania awarii z zastosowaniem symulacyjnych metod, co pozwoli na prawidłową klasyfikację elementów podsystemu do modernizacji lub generalnych remontów. Z kolei w pracach pt. *Approaches for Safety Analysis of Gas-Pipeline Functionality in Terms of Failure Occurrence: a Case Study*⁷¹ oraz pt. *Approaches to Methods of Risk Analysis and Assessment Regarding the Gas Supply to a City*⁷² przedstawiono metodę prognozowania akceptowalnych skutków awarii z wykorzystaniem jednorodnego łańcucha Markowa oraz wyznaczono strumień uszkodzeń dla dystrybucyjnych sieci gazowych za pomocą rozkładu Poissona.

Kolejnym nurtem badań była analiza zagadnienia zagrożeń związanych z funkcjonowaniem małych systemów zaopatrzenia w wodę na tle oceny bezpieczeństwa konsumentów wody wykonanej na podstawie analizy ryzyka przedstawiona w pracach pt. *Safety problems of small water supply systems*⁷³ oraz pt. *Analiza bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę na obszarach wiejskich*⁷⁴. Zaproponowano definicję miary utraty bezpieczeństwa konsumentów wody do spożycia jako ryzyko związane z możliwością spożycia wody złej jakości lub jej brakiem. W tym celu zaimplementowano matrycę trójparametryczną z parametrami prawdopodobieństwa wystąpienia reprezentatywnego scenariusza awaryjnego, skutkami dla konsumentów wody oraz z ich ochroną. Zarządzanie ryzykiem, wraz z implementacją barier ochronnych małych systemów wodociągowych przed zagrożeniami jest podstawowym warunkiem ciągłości funkcjonowania systemu.

Z kolei w opracowaniach pt. *Review of methods for identifying threats including the critical infrastructure systems within the Baltic Sea*⁷⁵, *Development of cause-effect dependence*

⁷⁰ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Urbanik M.: *Analysis of the gas network failure and failure prediction using the Monte Carlo simulation method*, 2016, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, t.18, z.2, s.254-259, ISBN/ISSN: 1507-2711.

⁷¹ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Urbanik M., Rak J.R.: *Approaches for Safety Analysis of Gas-Pipeline Functionality in Terms of Failure Occurrence: A Case Study*, Energies 2018, z. 11, nr 1589, ISSN 1996-1073.

⁷² Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K.: *Approaches to Methods of Risk Analysis and Assessment Regarding the Gas Supply to a City*, Energies 2018, z. 11(12), nr 3304, ISSN 1996-1073.

⁷³ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Safety problems of small water supply systems*, 2016, Journal of Konbin, t. 37, z. 1, s. 51-61, ISBN/ISSN: 1895-8281.

⁷⁴ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Analiza bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę na obszarach wiejskich*, 2016, Inżynieria Ekologiczna, t.48, s.208-213, ISBN/ISSN: 2081-139X.

⁷⁵ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Review of methods for identifying threats including the critical infrastructure systems within the Baltic Sea*, 2017, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.8, z.1, s.139-148, ISBN/ISSN: 2084-5316.

*model of undesirable events using Bayes network*⁷⁶ oraz *Developing procedures for hazard identification*⁷⁷ skupiono się na analizie funkcjonowania infrastruktury krytycznej w obrębie portu Morza Bałtyckiego. Zaproponowano metodę analizy ryzyka z wykorzystaniem sieci Bayesa, która ma zastosowanie w procesach decyzyjnych. Opracowano metodę analizy przyczynowo-skutkowej zdarzeń niepożądanych z wykorzystaniem sieci Bayesa z wykorzystaniem programu Java Bayes. Wykorzystanie sieci Bayesa umożliwia wyznaczenie prawdopodobieństwa zdarzenia szczytowego oraz zdarzeń cząstkowych wchodzących w skład sieci, co stanowi podstawową informację dla oceny bezpieczeństwa systemu. Na podstawie zaproponowanej metody uzyskano informacje, jaki poziom ryzyka (w przyjętej pięciostopniowej skali) wystąpi z określonym prawdopodobieństwem. Na podstawie wykonanej analizy zaproponowano działania zapobiegająco-ograniczające pojawienia się zagrożeń oraz ograniczenie skutków zdarzeń niepożądanych. Zaproponowano procedurę identyfikacji słabych punktów systemu, stanowiących największe zagrożenie dla bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej.

Literatura

1. Abonyi, J., Feil B.: *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification*, Birkhauser Verlag AG, Germany 2007.
2. Dyrektywa Rady 98/83/WE z dnia 3 listopada 1998 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. L 330 z 5.12.1998 r.).
3. European Commission. *Le plan de prevention des risques technologiques (PPRT)*, Guide méthodologique, Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Overview of roadmaps in selected member states, 2007.
4. Hotłós H.: *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
5. IEC 61508:1998. *Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety-Related Systems*. Parts 1-7. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
6. IEC 61508-4 *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 4: Definitions and abbreviations*.
7. IEC/ISO 31010:2010. *Risk management - Risk assessment techniques*, International Electrotechnical Commission, Geneva.
8. IEV 191-12-07. *Dependability and quality of service/Reliability performance measures*.
9. ISO 14001:2004. *Environmental management systems - Requirements with guidance for use*.
10. ISO 9001:2008. *Quality management systems - Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva.
11. ISO/IEC 27001:2005. *Information technology - Security techniques - Information security management systems - Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva.
12. Kacprzak, P., Kosmowski, K.T. 2009. *Human factors in the layer of protection analysis with emphasis on alarm system management*. Mat. konf. ESREL, Prague 2009, Reliability, Risk and Safety - Theory and Applications (ed. By Radim Bris, Carlos Guides' Soares, Sebastián Martorell), CRC Press.

⁷⁶ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Development of cause-effect dependence model of undesirable events using Bayes network*, 2017, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.8, z.1, s.149-156, ISBN/ISSN: 2084-5316.

⁷⁷ Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Developing procedures for hazard identification*, 2016, Journal Of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.7, z.1, s.209-215, ISBN/ISSN: 2084-5316.

13. Kołowrocki K., Soszyńska-Budny J. *Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling - Identification - Prediction - Optimization*. Springer 2011.
14. Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H. *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. Warszawa: Arkady, 1993.
15. Kwietniewski M., Rak J.: *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Studia z zakresu inżynierii nr 67, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2010.
16. Papciak D., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Pietrzyk A. *Analysis of the biological stability of tap water on the basis of risk analysis and parameters limiting the secondary growth of microorganisms in water distribution systems*, 2018, Desalination and Water Treatment, s.1-9, ISBN/ISSN: 1944-3994.
17. Pietrucha-Urbanik K., Skowrońska D.: *Approach to Analyse the State of Health Resorts Base in Podkarpackie Province*, Czasopismo Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA, t. XXXIV, z. 64 (4/I/17), październik-grudzień 2017, s. 425-434, DOI:10.7862/rb.2017.224
18. Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B., Papciak D., Skrzypczak I. *Analysis of chemical stability of tap water in terms of required level of technological safety*, 2017, Archives Of Environmental Protection, t.43, z.4, s. 3-12, ISBN/ISSN: 2083-4772
19. Pietrucha-Urbanik K., Tchórzewska-Cieślak B.: *Failure risk assessment in water network in terms of planning renewals - a case study of the exemplary water supply system*, 2017, Water Practice and Technology, t.12, z.2, s.274-286, ISBN/ISSN: 1751-231X.
20. Pietrucha-Urbanik K., Żelazko A.: *Approaches to Assess Water Distribution Failure*, 2017, Periodica Polytechnica-Civil Engineering, t.61, z.3, s.632-639, ISBN/ISSN: 0553-6626.
21. Pietrucha-Urbanik K.: *Analiza składu wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na europejskim rynku*. 2012, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, t.4, z.59, s.71-82, ISBN/ISSN: 0209-2646.
22. Pietrucha-Urbanik K.: *Analiza wielowymiarowa zróżnicowania wybranych butelkowanych wód mineralnych występujących na europejskim rynku*. 2012, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, t. 4, z. 59, s. 83-91, ISBN/ISSN: 0209-2646.
23. Pietrucha-Urbanik K.: *Metodyka określania gwarancji w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę*. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, 2014.
24. Rak J., Pietrucha-Urbanik K. *Implementacja metody Bow-Tie do analizy bezpieczeństwa systemów wodociągowych*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, z.11/2017, s.453-457. ISBN/ISSN: 0016-5352.
25. Rak J., Pietrucha-Urbanik K. *Nowe-stare możliwości uzdrowiskowe województwa Podkarpackiego* [w:] Walory ekologiczne i turystyczne północnej części Euroregionu Karpackiego (pod red. prof. J. Raka), 2010, Brzozów: Muzeum Regionalne Im. Adama Fastnachta w Brzozowie, s.293-301, ISBN/ISSN: 978-83-86801-49-7.
26. Rak J., Pietrucha-Urbanik K. *Wpływ gospodarki wodno-ściekowej na ocenę atrakcyjności turystycznej gminy*. [w:] Gospodarka wodno-ściekowa w Karpatach i na Pogórzu Karpackim oraz jej wpływ na podniesienie atrakcyjności turystycznej regionu (pod red. prof. J. Raka), Muzeum Regionalne im. Adama Fastnachta w Brzozowie t.3, s.177-185, 2009, ISBN/ISSN: 978-83-86801-42-8.
27. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K. *Balneotechnika. Walory uzdrowiskowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010, s. 1-212, ISBN/ISSN: 978-83-7199-618-4.
28. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
29. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
30. Rak J.: *Bezpieczna woda wodociągowa. Zarządzanie ryzykiem w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
31. Rak J.: *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
32. Rak J.: *Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 111, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1993.
33. Rak J.: *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*. Wydawnictwo PAN - Komitet Inżynierii Środowiska t.28, Rzeszów 2005.

34. Reason, J. *Human error: models and management*. British Medical Journal. 320 (7237), 2000, pp. 768-770.
35. Roman M.: *Problemy kryteriów niezawodności komunalnych systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Mat. konf. „Nieawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, Wydawn. PZITS O/Kraków, 1986, s.13-26.
36. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. z 2017 r., poz. 2294).
37. Studziński A., Pietrucha-Urbanik K. *Simulation model of contamination threat assessment in water network using the Epanet software*, 2016, Ecological Chemistry And Engineering S-Chemia i Inżynieria Ekologiczna S, t.23, z.3, s.425-433, ISBN/ISSN: 1898-6196.
38. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K.: *Approaches to Methods of Risk Analysis and Assessment Regarding the Gas Supply to a City*, Energies 2018, z. 11(12), nr 3304, ISSN 1996-1073.
39. Tchorzewska-Cieślak B., Papciak D., Pietrucha-Urbanik K.: *Szacowanie ryzyka zmian jakości wody w sieciach wodociągowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2017, s. 1-114. ISBN/ISSN: 978-83-7934-207-5
40. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Analiza bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę na obszarach wiejskich*, 2016, Inżynieria Ekologiczna, t.48, s.208-213, ISBN/ISSN: 2081-139X.
41. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Development of cause-effect dependence model of undesirable events using Bayes network*, 2017, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.8, z.1, s.149-156, ISBN/ISSN: 2084-5316.
42. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Developing procedures for hazard identification*, 2016, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.7, z.1, s.209-215, ISBN/ISSN: 2084-5316.
43. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Review of methods for identifying threats including the critical infrastructure systems within the Baltic Sea*, 2017, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars, t.8, z.1, s.139-148, ISBN/ISSN: 2084-5316.
44. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Szpak D.: *Safety problems of small water supply systems*, 2016, Journal of Konbin, t. 37, z. 1, s. 51-61, ISBN/ISSN: 1895-8281.
45. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Urbanik M., Rak J.R.: *Approaches for Safety Analysis of Gas-Pipeline Functionality in Terms of Failure Occurrence: A case Study*, Energies 2018, 11, 1589.
46. Tchorzewska-Cieślak B., Pietrucha-Urbanik K., Urbanik M.: *Analysis of the gas network failure and failure prediction using the Monte Carlo simulation method*, 2016, Eksploatacja i Nieawodność - Maintenance and Reliability, t.18, z.2, s.254-259, ISBN/ISSN: 1507-2711.
47. Tchorzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
48. Tchorzewska-Cieślak B.: *Water supply system reliability management*. Environmental Protection Engineering. 35, 2009, s. 29-35.
49. UK Health and Safety Executive, *Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards*, 1989.
50. UK Health and Safety Executive. *Proposals for revised policies to address societal risk around onshore non-nuclear major hazard installations*, Consultative Document CD112, 2007.
51. UK SFK/TAA-GS-1: *Störfall-Kommission technischer Ausschuss für Anlagensicherheit, Leitfaden. Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung - Umsetzung § 50 BImSchG*.
52. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. z 2007 r. Nr 89, poz. 590 z późniejszymi zmianami).
53. Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2001 r. Nr 72, poz. 747 z późniejszymi zmianami).
54. Wiczysty A. *Niezawodność miejskich systemów zaopatrzenia w wodę*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1993.
55. Wiczysty A., Iwanek R.: *Wyznaczanie wymaganego poziomu niezawodności obiektów systemu zaopatrzenia w wodę*, 1996, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2, s. 54-58.

56. Wieczysty A.: *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*, t. I i II. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
57. Wolska M. *Usuwanie substancji biogenych w technologii oczyszczania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015.
58. Zimoch I.: *Operational Safety of the Water Supply System Under Conditions of Water Quality Variations in the Water-pipe Network*, 2009, *Ochrona Środowiska*, 31 (3), s. 51-55.
59. Zimoch I.: *Reliability analysis of water-pipe networks in Cracow, Poland*. *Environmental Engineering III*, Eds.: Pawłowski L., Dudzińska M.R., Pawłowski A., 3rd Congress of Environmental Engineering, Lublin, 13-16.09.2009 r., s. 561-565.

6. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora byłam współautorem 2 artykułów opublikowanych w czasopismach wyróżnionych w bazie JCR, 35 publikacji opublikowanych w czasopismach punktowanych przez MNiSW, 1 niepunktowanej publikacji, 7 rozdziałów w monografiach oraz 4 publikacji zamieszczonych w materiałach konferencyjnych. Liczba punktów MNiSW wg punktacji zgodnie z rokiem opublikowania przed uzyskaniem stopnia doktora wyniosła 253,57 pkt.

Na mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia naukowego doktora składa się 62 publikacji, w tym 16 artykułów opublikowanych w czasopismach wyróżnionych w bazie JCR, 38 publikacji zamieszczonych w czasopismach nie wyróżnionych w bazie JCR, ale znajdujących się na liście MNiSW, 2 rozdziały w monografiach, 5 publikacji zamieszczonych w materiałach konferencyjnych. Wyniki prac były prezentowane na 7 międzynarodowych i 8 krajowych konferencjach naukowych. Sumaryczny Impact Factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania po uzyskaniu stopnia doktora: 22,713 (IF_{5letni} 23,216). Indeks Hirscha według bazy Web of Science wynosi 11 (Załącznik 7. Analiza cytowań).

Liczba punktów MNiSW wg punktacji zgodnie z rokiem opublikowania po uzyskaniu stopnia doktora wyniosła 482,78 pkt.

Zestawienie dorobku naukowego oraz informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki przedstawiono w Załączniku 3. (Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki) oraz Załączniku 6. Analiza dorobku naukowego.

