

Krzysztof BORYCZKO, Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK

Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków
Politechnika Rzeszowska

RYZIKO AWARII W PODSYSTEMIE DYSTRYBUCJI WODY MIASTA RZESZOWA

FAILURE RISK IN WATER DISTRIBUTION SUBSYSTEM OF RZESZOW

Paper presents analysis of failure of water distribution subsystem of Rzeszow. For Rzeszow water distribution subsystem maps of risk of interruptions in water supply to consumers have been developed. Results demonstrate the validity of the new tank for reliability of water supply. The aim of paper is to propose a method to analyze risk of interruptions in water supply to consumers.

1. Wprowadzenie

Podsystem dystrybucji wody (PsDyW) należy do kluczowych podsystemów systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę do spożycia (SZZW), którego celem jest dostarczenie wody odbiorcom o odpowiedniej jakości (zgodnie z obowiązującymi przepisami), w odpowiedniej ilości i pod wymaganym ciśnieniem, a także o akceptowalnej cenie [14, 24].

Z funkcjonowaniem PsDyW bezpośrednio wiąże się ryzyko niedostarczenia odbiorcom wody lub dostarczenia jej w jakości niezgodnej z obowiązującymi przepisami [1].

Najczęstszą przyczyną przerw dostawy wody są awarie sieci wodociągowej [3, 8] lub wtórne zanieczyszczenie wody [30]. W przypadku awarii podłączenia domowego liczba zagrożonych przerwą dostawy wody do spożycia jest niewielka. Podczas awarii przewodu dystrybucyjnego liczba ta rośnie do kilkuset osób. Awaria przewodu magistralnego może swoim zasięgiem objąć duży obszar i spowodować ograniczenie dostaw wody dla całych dzielnic, zmuszając mieszkańców do korzystania alternatywnych źródeł wody [20].

Kompleksowe zarządzanie PsDyW wymaga zbierania informacji dotyczących działania poszczególnych jego elementów (rurociągów, armatury, pompowni i hydroformi sieciowych), przekazywania ich w czasie rzeczywistym do operatora systemu, archiwizowania tych danych oraz alarmowania odpowiednich służb o nieprawidłowościach w jego pracy. Nieodzownym elementem zarządzania siecią wodociągową jest system kompleksowego monitoringu zarówno jakościowego jak i ilościowego. Operator PsDyW powinien w trybie online otrzymywać dane o awariach na sieci wodociągowej, przez co czas reakcji służb przedsiębiorstwa wodociągowego na uszkodzenie zostaje zminimalizowany [6, 7, 9, 10, 20-23, 26].

Zarządzanie bezpieczeństwem PsDyW przeprowadza się poprzez analizę ryzyka, a w szczególności poprzez identyfikacje ryzyka, a w tym identyfikacja zagrożeń i skutków dla możliwych reprezentatywnych scenariuszy awaryjnych, ocenę (szacowanie ryzyka), zasady postępowania z ryzykiem [2, 4, 5, 12, 13, 27].

Model hydrauliczny systemu zaopatrzenia w wodę jest jednym z podstawowych narzędzi badawczych, wykorzystywanych do analizy właściwości i działania systemu wodociągowego miasta [9].

W pracy przedstawiono analizę awaryjność PsDyW miasta Rzeszowa, ze szczególnym uwzględnieniem awarii mających wpływ na komfort, zdrowie i życie mieszkańców miasta. Do analizy skutków awarii wykorzystano model hydrauliczny PsDyW miasta Rzeszowa, dzięki któremu możliwe było zasymulowanie awarii rurociągów przy równoczesnej obserwacji bezpośrednich skutków związanych z tymi awariami, tj. lokalnych spadków ciśnienia w sieci wodociągowej, prowadzących w konsekwencji do niedostarczenia wody do spożycia odbiorcom. Praca zawiera również opis pracy systemu monitoringu PsDyW miasta Rzeszowa, który realizowany m.in. za pomocą siatki węzłów pomiarowych, zawierających rejestratory ciśnienia i przepływu.

Celem pracy jest przedstawienie propozycji metodyki analizy ryzyka awarii w PsDyW, związanej z obniżeniem ciśnienia w sieci wodociągowej spowodowanej awarią przewodów magistralnych. W pracy przedstawiono przykład aplikacyjny dla PsDyW miasta Rzeszowa z wykorzystaniem map ryzyka, które pozwalają na kompleksową ocenę dowolnego systemu wodociągowego.

2. System zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta Rzeszowa

2.1. Charakterystyka elementów SZZW Rzeszowa

Miasto Rzeszów zaopatrywane jest w wodę z rzeki Wisłok za pomocą brzegowokomorowego ujęcia o wydajności 84 tys. m³/d. Woda uzdatniana jest w zmodernizowanym Zakładzie Uzdatniania Wody (ZUW) Zwiężczyca I i Zwiężczyca II i spełnia wymagania jakościowe stawiane wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Z SZZW korzysta obecnie około 190 tys. mieszkańców miasta i pobliskich miejscowości. Średniodobowa produkcja wody uzdatnionej wynosi około 34,6 tys. m³/d i w pełni pokrywa zapotrzebowanie odbiorców na wodę. Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie (MPWiK Rzeszów) eksploatuje ponadto [31]:

- awaryjne ujęcie wody podziemnej przy ul. Mazowieckiej w Rzeszowie, o wydajności 240 m³/d,
- lokalne ujęcie wody: Osiedle Słocina w Rzeszowie, o wydajności 465 m³/d,
- 32 przepompownie wody (hydroformie),
- 8 zbiorników wyrównawczych wody czystej o łącznej pojemności 33,94 tys. m³,
- 187 studni publicznych.

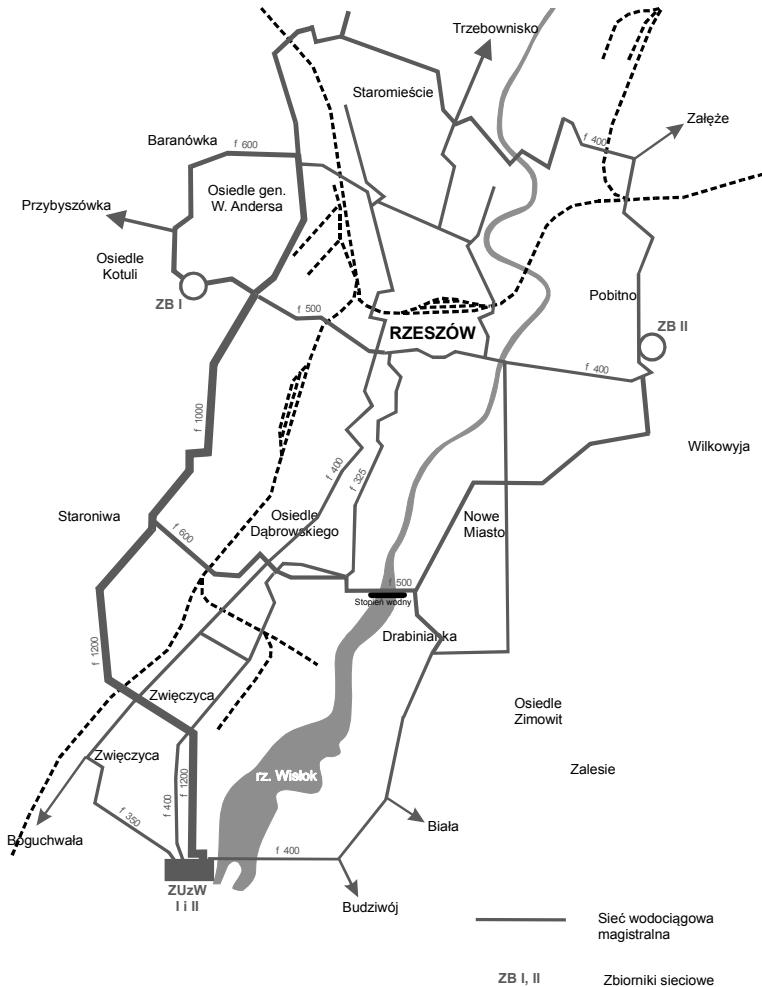
Podsystem dystrybucji wody tworzy sieć wodociągowa o łącznej długości około 840 km stanowią (stan na 2009 r.):

- sieć magistralna – 49,8 km,
- sieć rozdzielcza – 504,1 km,
- podłączenia domowe – 324,4 km.

Sieć magistralna jest wykonana z przewodów żeliwnych i stalowych. Sieć rozdzielczą zbudowano z przewodów żeliwnych, stalowych oraz z PE i PVC. Podłączenia domowe wykonane są głównie ze stali ocynkowanej, żeliwa, PE i PVC.

Szkielet sieci wodociągowej miasta Rzeszów stanowią cztery główne magistrale transportujące wodę uzdatnioną z pompowni II stopnia (rys. 1):

- magistrala 0 (ϕ 1200, ϕ 1000, ϕ 800 mm) transportuje wodę z ZUW i zaopatruje północnozachodnią część miasta, zbiornik wody czystej Baranówka oraz odbiorców w miejscowości Przybyszówka i Miłocin.



Rys. 1. Schemat sieci wodociągowej magistralnej dla miasta Rzeszowa

Fig. 1. A diagram of the water supply system of Rzeszow

- magistrala 1 (ϕ 400 mm) transportuje wodę z ZUZW Zwiężczyca I do centrum oraz północnej części miasta i posiada dwa odgałęzienia, z których jedno (ϕ 200 mm) zaopatruje miejscowości Zwiężczyca, Raclawówka i Niechobrz, natomiast drugie dostarcza wodę do miejscowości Boguchwał i Mogielnica,
- magistrala 2 (ϕ 400 mm) transportuje wodę z ZUZW Zwiężczyca I do południowej i centralnej części miasta,
- magistrala 3 (ϕ 400 mm) transportuje wodę z ZUZW Zwiężczyca I i II do wschodniej i północno-wschodniej części miasta, zasila zbiorniki Pobitno. Posiada dwa odgałęzienia (ϕ 150 mm i ϕ 100 mm), które zaopatrują w wodę miejscowości Budziwój i Biała.

Sieć w 80% pracuje w układzie zamkniętym. Z siecią przewodów wodociągowych współpracują dwa zespoły zbiorników wodociągowych usytuowane we wschodniej i zachodniej części miasta (w tym nowy zbiornik labiryntowy).

2.2. Opis systemu monitoringu sieci wodociągowej miasta Rzeszowa

Monitorowanie sieci wodociągowej jest niezbędne do zarządzania jej eksploatacją. Konieczność monitorowania sieci wynika również z wielu innych oczywistych przesłanek. Przede wszystkim zaś z wymagań przepisów prawnych. System monitoringu w rzeszowskiej sieci wodociągowej obsługuje pakiet ProconWin. Transmisja danych działa w oparciu o sieć GSM. Oprogramowanie zainstalowane jest w Dziale Obsługi Komputerowej, w Pracowni Mapy Numerycznej MPWiK w Rzeszowie. W skład systemu monitoringu wchodzi 8 węzłów pomiarowych zlokalizowanych na osiedlu Ziemiów, a także 9 innych punktów [31]:

- 2 na zbiornikach sieciowych,
- 2 na pompowni II stopnia,
- 4 w hydroforniach lokalnych,
- 1 w budynku administracyjnym MPWiK w Rzeszowie.

W węzłach pomiarowych zainstalowane są sterowniki, których zadaniem jest odczyt wartości chwilowych oraz ich rejestracja, a następnie transmisja do punktu nadzoru. Informacje gromadzone w sterowniku są nadawane do systemu wizualizacji okresowo lub zdarzeniowo. Po odebraniu przez operatora sieci GSM i potwierdzeniu przyjęcia wiadomości SMS program przechodzi do przygotowania kolejnego pakietu danych. W celu odfiltrowania ewentualnych chwilowych zakłóceń, które mogłyby niekorzystnie wpływać na obraz rejestrowanego pomiaru – wartość chwilowa użyta jest do wyznaczenia wartości ekstremalnych. Funkcję tę sterownik wykonuje automatycznie.

Rejestrowanymi wartościami są:

- ciśnienie,
- przepływ.

W skład szafek pomiarowych wchodzi urządzenia podtrzymujące zasilanie w przypadku braku zasilania z sieci energetycznej, sterowniki i radiomodemy, instalacje i systemu alarmowe oraz urządzenia klimatyzacyjne czuwające nad odpowiednią temperaturą powietrza i urządzeń elektronicznych w szafkach. System wizualizacji ProconWin pozwala na szczegółową obserwację i analizę poszczególnych parametrów hydraulicznych sieci. Informacja o obiekcie podzielona jest na kilka poziomów, w zależności

od stopnia szczegółowości wyświetlanych danych, dzięki temu operator może wybrać interesującą go informację. Dzięki temu wzrasta czytelność i komfort pracy. Wśród poziomów szczegółowości w systemie wizualizacji można wyróżnić:

- schemat główny,
- bloki technologiczne obiektu,
- schemat wybrane części obiektu (informacje o: stanie urządzeń – praca/postój; awariach; typie sterowania),
- schemat sterowania urządzenia (prezentuje możliwe rodzaje sterowań),
- parametry urządzeń.

Każdy węzeł pomiarowy ma indywidualny schemat, zawierający wykresy rejestrowanych pomiarów. System wizualizuje krzywe minimalnych i maksymalnych przepływów oraz ciśnień. Są one w czytelny sposób opisane odpowiednimi kolorami i legendą. Operator ma możliwość wyboru interesujących do krzywych, dla dowolnie wybranego okresu czasowego. Program ProconWin współpracuje z graficznym systemem informacyjnym Geomedia, który wyświetla zapisane przez ProconWin wartości w oknie mapy w miejscach pomiarów. Eksploatacja systemu monitoringu generuje miesięczny koszt jego utrzymania na poziomie około 300 zł. W przeciągu 5 lat eksploatacji systemu monitoringu nie wystąpiły poważne usterki, a przesył danych działał bez zarzutu. Dane pomiarowe z monitoringu są zapisywane i przechowywane na dysku twardym w Dziale Obsługi Komputerowej, a także okresowo kopiowana na nośniki cyfrowe (płyty CD-ROM) [31].

2.3. Alternatywne zaopatrzenie w wodę Rzeszowa

Wyróżnia się następujące rodzaje zapotrzebowania na wodę w sytuacjach kryzysowych [28]:

- optymalne – $0,030 \text{ m}^3/\text{mieszkaniec} \times \text{dobę}$,
- niezbędna ilość wody – $0,015 \text{ m}^3/\text{mieszkaniec} \times \text{dobę}$,
- minimalne – $0,0075 \text{ m}^3/\text{mieszkaniec} \times \text{dobę}$.

W sytuacji wyłączenia z eksploatacji wodociągów Rzeszowa, do awaryjnego zaopatrzenia w wodę do spożycia bierze się pod uwagę 170000 mieszkańców, co daje:

- $5100 \text{ m}^3/\text{d}$ zakładając optymalną ilość wody,
- $2550 \text{ m}^3/\text{d}$ zakładając niezbędną ilość wody,
- $1275 \text{ m}^3/\text{d}$ zakładając minimalną ilość wody,

Wodę do spożycia w sytuacjach kryzysowych planuję się uzyskać z następujących źródeł [17]:

- studnia publiczna przy ul. Saperów 9 ($Q=11,2 \text{ m}^3/\text{d}$),
- ok. 1050 studni prywatnych,
- studnia głębinowa Szpitala Wojewódzkiego nr 2 ($Q=1330 \text{ m}^3/\text{d}$),
- studnia głębinowa przy ul. Morgowej ($Q=432 \text{ m}^3/\text{d}$),
- studnie głębinowe Zelmer S.A. ($Q=672 \text{ m}^3/\text{d}$),
- zbiorniki przy ulicy Krakowskiej ($V=27100 \text{ m}^3$),
- zbiorniki na osiedlu Pobitno ($V=6000 \text{ m}^3$),
- zbiorniki w ZUW Zwiężczyca ($V=8000 \text{ m}^3$).

Wyżej wymienione zbiorniki są technicznie przygotowane do pobory wody przez beczkowszy. Dodatkowo istnieją techniczne możliwości wykorzystania jako źródło awaryjnego zaopatrzenia miasta Rzeszowa w wodę do spożycia SZZW gminy:

- Świlcza – czas wykonania niezbędnych połączeń około 10h,
- Boguchwała – czas wykonania niezbędnych połączeń około 2h.

W/w SZZW ze względu na małą wydajność są w stanie zaopatrzyć w wodę do spożycia ul. Krakowską, ul. Matuszczaka i okolice.

Studnie awaryjne są źródłem zaopatrzenia w wodę w przypadku niemożliwości dostarczenia wody z wodociągu [31].

Każdy zbiornik wodociągowy powinien mieć możliwość odcięcia dopływu i odpływu wody oraz powinien być wyposażony w urządzenie sygnalizujące osiągnięcie dopuszczalnego poziomu wody zapewniającego nie mniej niż jednodniowy minimalny zapas wody. Zbiornik powinien mieć możliwość czerpania z niego wody przez cysterny, beczkowszy, itp.

Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie dysponuje jedną cysterną o pojemności 4 m³. Istnieje Możliwość wypożyczenia cystern do przewozu wody do spożycia z :

- 21 Brygady Strzelców Podhalańskich ul. Lwowska – 3 przyczepy o pojemności 1,5 m³ każda,
- Oddziału prewencji Komendy Wojewódzkiej Policji Zaczernie – 2 przyczepy o pojemności 3 m³ każda,
- Chmar S. C. – 4 beczki o pojemności 2 m³ każda.

Łącznie daje to możliwość przewiezienia 22,5 m³, a zakładając że każda z cystern wykona 8 kursów w ciągu doby, co zabezpiecza 180 m³/d wody do spożycia. W przypadku konieczności awaryjnego zaopatrzenia w wodę i dostarczenia:

- niezbędnej ilości wody w ilości 2550 m³/d beczkowszy są w stanie pokryć 180 m³/d (deficyt 2370 m³/d),
- minimalnej ilości wody w ilości 1275 m³/d beczkowszy nie są w stanie pokryć tego zapotrzebowania (deficyt 1095 m³/d).

Informacje o niebezpieczeństwie mającym swoje źródło w SZZW powinny być przekazywane społeczeństwu w skuteczny i bezpośredni sposób, np. poprzez wykorzystanie:

- telewizji,
- radia,
- sieci GSM,
- megafonów,
- syren,
- internetu.

Instytucje oświatowe, ośrodki zdrowia, administracja publiczna, służby mundurowe potwierdzoną informację o niebezpieczeństwie powinny otrzymać w trybie natychmiastowym.

Kluczowym elementem w informowaniu społeczeństwa jest posiadanie rzetelnych i potwierdzonych informacji o niebezpieczeństwach zagrażającym życiu i zdrowiu konsumentów wody. Ma to na celu zapobiec wybuchowi paniki. W 2003 roku w Tarnobrzegu miało miejsce 17-dobowe zanieczyszczenie wody wodociągowej. W wodociągu wykryto bakterie coli. Brak skoordynowanych działań informacyjnych spowodował panikę, podczas której ludzie masowo wykupywali wodę butelkowaną. Firmy usługowe i produkcyjne o zanieczyszczeniu dowiedziały się tzw. „pocztą pantoflową”. W okresie zagrożenia szpital odnotował 100 przypadków różnego rodzaju dolegliwości u osób korzystających z wody wodociągowej (zatrucia, biegunki, itp.) [16].

Informacja przekazywana społeczeństwu powinna zawierać:

- charakterystykę zagrożenia,
- sposoby ewentualnego przygotowania wody do spożycia (np. każdorazowe kilkuminutowe gotowanie wody przez spożyciem, itp.),
- lokalizacje i czas dostarczenia wody do spożycia poprzez beczkowsy,
- lokalizację najbliższych źródeł awaryjnego zaopatrzenia w wodę (studnie awaryjne),
- przewidywalny termin zakończenia zagrożenia,
- sposób dalszego informowania społeczeństwa o zagrożeniu lub jego zaniku.

Miasto Rzeszów informuje mieszkańców o zagrożeniu za pomocą następujących środków [29]:

- instrukcje postępowania w razie zaistnienia zagrożenia (w formie ulotki, plakatu, instrukcji, poradnika lub komunikatu elektronicznego),
- komunikaty informacyjne o zagrożeniach, sposobach zapobiegania i postępowania w razie ich wystąpienia, podawane w środkach masowego przekazu
- dźwiękowe sygnały alarmowe (system alarmowy Miasta Rzeszowa obejmuje 39 syreny (sterowane radiem), które pokrywają swym zasięgiem prawie cały obszar Miasta Rzeszowa. System ten funkcjonuje poprawnie i jest w pełni gotowy do natychmiastowego użycia),
- komunikaty ostrzegawcze i alarmowe nadawane za pośrednictwem lokalnych środków masowego przekazu, ze szczególnym uwzględnieniem rozgłośni radiowych i telewizji oraz portali internetowych,
- komunikaty przekazywane za pośrednictwem stałych urzędów nagłaśniających, zwłaszcza w zakładach pracy oraz obiektach użyteczności publicznej,
- komunikaty przekazywane za pośrednictwem ruchomych urzędów nagłaśniających, ze szczególnym uwzględnieniem pojazdów służbowych inspekcji i straży,
- komunikaty przekazywane z wykorzystaniem nowoczesnych systemów teleinformatycznych (radiofonii RDS, telegazety, telefonii cyfrowej).

2.4. Awaryjność sieci wodociągowej miasta Rzeszowa

Analizę awaryjności przewodów sieci wodociągowej przeprowadzono, opierając się na danych eksploatacyjnych uzyskanych od MPWiK w Rzeszowie w latach 2002÷2009 (osiem lat eksploatacji sieci) [31].

Wartości wskaźników intensywności uszkodzeń λ_i dla sieci wodociągowej magistralnej λ_M , rozdzielczej λ_R i połączeń domowych λ_{Pd} wyznaczono według wzoru:

$$\lambda_i = \frac{k_i}{L_i \cdot \Delta t}, \text{ uszk./km} \cdot \text{rok} \quad (1)$$

gdzie:

L_i – długość i-tego odcinka sieci wodociągowej,

k_i – liczba awarii na i-tym odcinku sieci,

W badanym okresie średnia częstotliwość awarii, zanotowanych w dziennikach awarii przez brygady remontowe dla przewodów sieci wodociągowej wynosiła ogółem 278 awarii w roku, a odpowiednia średnia intensywność uszkodzeń była równa 0,38 awarii/km×a (liczona dla średniej długości sieci wodociągowej ogółem 732 km obliczonej dla lat 2002÷2009).

Analiza wymagała uporządkowania oraz weryfikacji danych eksploatacyjnych. Weryfikacja dotyczyła przede wszystkim klasyfikacji danych na temat awaryjności sieci magistralnej i rozdzielczej oraz zmian wynikających z przeprowadzonych remontów i modernizacji [25].

W analizie awaryjności badanej sieci wodociągowej wzięto pod uwagę tylko te zdarzenia, które wymagały wyłączenia z eksploatacji danego rurociągu lub naprawa trwała dłużej niż 2 h. Wyniki analizy po weryfikacji danych przedstawiono w tabelach 1, 2, 3.

Następnie przeanalizowano awaryjność sieci ze względu na rodzaj (przyczynę) uszkodzenia. W tabeli 1 przedstawiono średnie wartości intensywności uszkodzeń dla trzech głównych przyczyn uszkodzeń, takich jak: korozja, rozszczelnienia na połączeniach oraz uszkodzenia mechaniczne.

Tab. 1. Wartości intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej dla ośmiu lat eksploatacji sieci (2002÷2009)

Tab. 1. Failure rate index of water pipelines (eight years of operation 2002÷2009)

Rok	Rodzaj sieci wodociągowej								
	magistralna			rozdzielcza			podłączenia domowe		
	liczba awarii	L	λ_M $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot \text{a}}$	liczba awarii	L	λ_R $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot \text{a}}$	liczba awarii	L	λ_{Pd} $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot \text{a}}$
2002	18	49,5	0,36	198	320	0,62	87	274,0	0,32
2003	14	49,5	0,28	188	345,4	0,54	130	281,5	0,46
2004	13	49,5	0,26	173	348,6	0,50	122	282,7	0,43
2005	14	49,5	0,28	178	350,5	0,51	123	283,8	0,43
2006	11	49,5	0,22	138	384,4	0,36	101	287,7	0,35
2007	10	49,5	0,20	129	433,5	0,30	87	305,8	0,28
2008	14	49,5	0,28	136	447,7	0,30	110	322,8	0,34
2009	11	49,5	0,22	112	460	0,24	113	330,0	0,34
Średnia	13,1	49,5	0,26	156,5	386,3	0,41	109	296,0	0,37

Tab. 2. Podstawowe charakterystyki statystyczne wartości intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej dla ośmiu lat eksploatacji sieci (2002+2009)

Tab. 2. Basic statistical characteristics of failure rate index of water pipelines (eight years of operation 2002+2009)

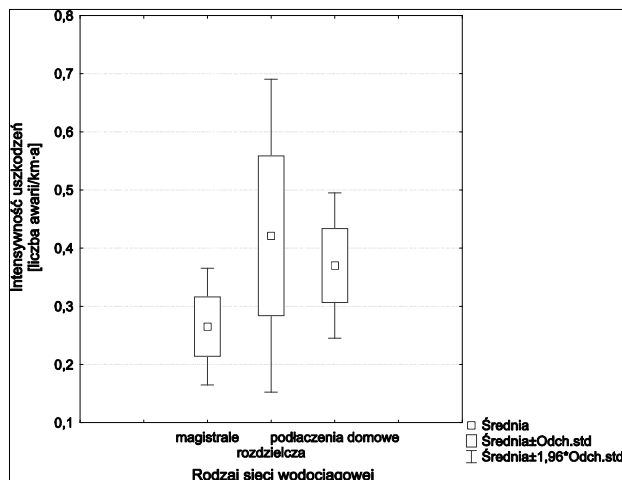
Rodzaj sieci wodociągowej	Średnia długość sieci L	Średnia częstotliwość awarii $\frac{\text{liczba awarii}}{a}$	λ $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot a}$			Mediana	Odchylenie standardowe	Kwartył	
			λ_{\min}	λ_{sr}	λ_{\max}			dolny (25%)	górnny (75%)
Magistralna	49,5	13,1	0,2	0,26	0,36	0,27	0,05	0,22	0,28
Rozdzielcza	386,3	156,5	0,24	0,41	0,62	0,43	0,14	0,30	0,53
Podłączenia domowe	296,0	109	0,28	0,37	0,46	0,35	0,06	0,33	0,43
Sieć ogółem	732	278	0,2	0,38	0,62	0,34	0,11	0,28	0,43

Tab. 3. Średnia intensywność uszkodzeń sieci wodociągowej w zależności od rodzaju awarii

Tab. 3. Average failure rate index depending on type of failure

Rodzaj awarii	λ_{Msr} $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot a}$	λ_{Rsr} $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot a}$	λ_{Psr} $\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot a}$
Korozja	0,20	0,17	0,32
Rozszczelnienia	0,04	0,23	0,03
Uszkodzenie mechaniczne	0,02	0,01	0,02
λ_{sr}	0,26	0,41	0,37

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla sieci magistralnej oraz połączeń wodociagowych główną przyczyną awaryjności są procesy korozyjne, a dla sieci rozdzielczej rozszczelnienia na połączeniach.



Rys. 2. Wykres intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej dla lat 2002+2009

Fig. 2. Failure rate index chart of water pipes for 2002+2009

Następnie przeprowadzono analizę awaryjności przewodów sieci wodociągowej w kolejnych miesiącach roku. W tabeli 4 oraz na rys. 3 przedstawiono podstawowe charakterystyki statystyczne dla miesięcznych wartości intensywności uszkodzeń.

Tab. 4. Podstawowe charakterystyki wartości miesięcznych intensywności uszkodzeń dla sieci magistralnej, rozdzielczej oraz podłączeń domowych

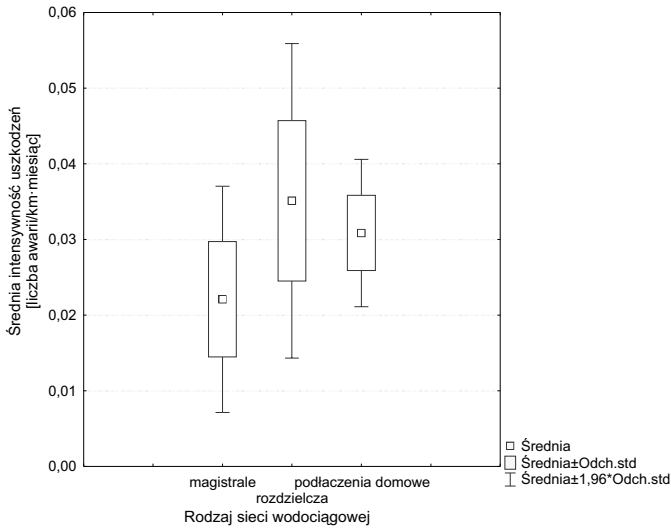
Tab. 4. Basic statistical characteristics of monthly failure rate index of water main, distribution, household connections

Rodzaj sieci wodociągowej	λ			Mediana	Odchylenie standardowe	Kwartyl	
	liczba awarii km · miesiąc					dolny (25%)	górnny (75%)
	λ_{\min}	λ_{sr}	λ_{\max}				
Magistralna	0,005	0,022	0,033	0,023	0,007	0,020	0,025
Rozdzielcza	0,018	0,035	0,048	0,036	0,01	0,028	0,044
Podłączenia domowe	0,022	0,031	0,041	0,05	0,005	0,027	0,034

Na rys.4 przedstawiono średnie wartości intensywności w kolejnych miesiącach roku.

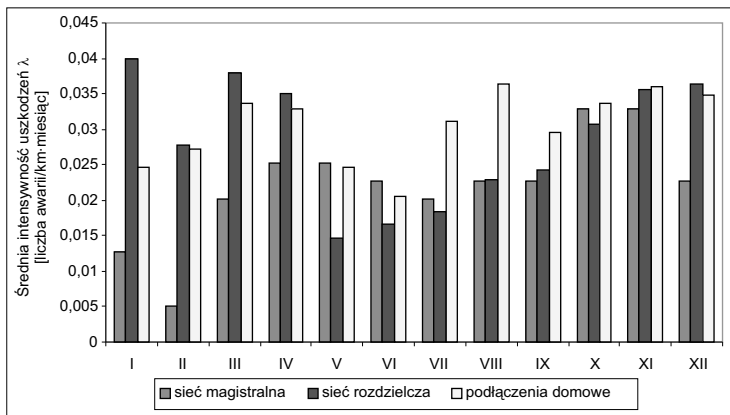
Z przeprowadzonej analizy wynika, że najmniejszą sezonową zmianą intensywności uszkodzeń charakteryzują się podłączenia domowe, natomiast w przypadku sieci magistralnej i rozdzielczej obserwuje się zależność intensywności uszkodzeń od pory roku, co wynika

przede wszystkim ze zmian temperatury gruntu w okresach zimowo-wiosennych. W trakcie analizy awaryjności przewodów sieci wodociągowej pojawił się problem klasyfikacji danych, szczególnie w odniesieniu do sieci magistralnych i rozdzielczych.



Rys. 3. Wykres miesięcznych intensywności uszkodzeń przewodów sieci wodociągowej dla lat 2002+2009

Fig. 3. Monthly failure rate index chart of water pipes for 2002+2009



Rys. 4. Średnie wartości intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej w kolejnych miesiącach roku (czas eksploatacji: lata 2002+2009)

Fig. 4. Average failure rate index of water pipes in consecutive months (operation 2002+2009)

Przedstawiona analiza stanowi punkt wyjścia dla analizy ryzyka awarii przewodów wodociągowych. W tym celu w pierwszej kolejności zastosowano metodę matrycową.

3. Wstępna analiza ryzyka awarii sieci wodociągowej miasta Rzeszowa metodą matrycową

Analizę i ocenę ryzyka awarii przewodów sieci wodociągowej w Rzeszowie wykonano dla trzech podstawowych rodzajów sieci – magistralnej, rozdzielczej i podłączeń wodociągowych. Zastosowano w tym celu trójparametryczną matrycę ryzyka.

Analizę ryzyka awarii sieci wodociągowej przeprowadzono w następujących etapach:

- określenie rodzaju sieci wodociągowej,
- wyznaczenie granicznej intensywności uszkodzeń sieci wodociągowych,
- określenie rodzajów zabezpieczeń związanych z funkcjonowaniem sieci wodociągowej,
- wyznaczenie wartości kryterialnych odpowiednich poziomów ryzyka.

Zaproponowano trójparametryczną matrycę szacowania ryzyka dla przewodów sieci wodociągowej [16, 19]:

$$r = \frac{S \cdot \lambda_s}{O_s} \quad (2)$$

gdzie:

λ_s – waga punktowa związana z intensywnością uszkodzeń λ ,

S – waga punktowa związana z rodzajem sieci wodociągowej (tj. magistralna, rozdzielcza i podłączenia domowe), odpowiadająca parametrom strat (założono, że straty w wyniku awarii są największe w przypadku awarii przewodu magistralnego, średnie, gdy dotyczą sieci rozdzielczej i najmniejsze dla podłączeń domowych),

O_s – waga punktowa związana z zabezpieczeniem (ochroną) sieci wodociągowej.

Każdorazowo parametrom λ_s , S i O_s przypisywano wielkość za pomocą następującej skali punktowej:

- niska – $L = 1$,
- średnia – $M = 2$,
- wysoka – $H = 3$.

Otrzymano w ten sposób punktową skalę miar ryzyka w postaci liczbowej, w przedziale od 0,33 do 9. Matrycę ryzyka przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Trójparametryczna maczyca ryzyka awarii sieci wodociągowej

Tab. 5. Three parametric matrix of risk of water pipe network

λ_s	S		
	1	2	3
	$O_s = 1$		
1	1	2	3
2	2	4	6
3	3	6	9
	$O_s = 2$		
1	0,5	1	1,5
2	1	2	3
3	1,5	3	4,5
	$O_s = 3$		
1	0,33	0,66	1
2	0,66	1,33	2
3	1	2	3

Kryteria wartościowania poszczególnych wag punktowych przedstawiają się następująco:

- dla rodzaju sieci wodociągowej – S; wagi punktowe wyznaczone zostały według kryterium ważności sieci określonego z uwzględnieniem takich danych, jak: potencjalna liczba zagrożonych konsumentów, uciążliwości związane z naprawą itp.:
 - podłączenia domowe – S = L = 1,
 - sieci rozdzielcze – S = M = 2,
 - sieci magistralne – S = H = 3,
- dla intensywności uszkodzeń – λ_s ; wagi punktowe zaproponowane zostały z wykorzystaniem krajowego badania awaryjności sieci [11] i przedstawione w tabeli 6 .

Tab. 6. Kryteria dla intensywności uszkodzeń

Tab. 6. Criteria for failure rate index

λ_s	$\lambda_j \left[\frac{\text{liczba awarii}}{\text{km} \cdot \text{a}} \right]$		
	sieć magistralna	sieć rozdzielcza	podłączenia wodociągowe
L (1)	$\leq 0,3$	$\leq 0,7$	$\leq 1,0$
M (2)	$0,3 \div 0,7$	$0,7 \div 1,0$	$1,0 \div 2,0$
H (3)	$> 0,7$	$> 1,0$	$> 2,0$

- dla zabezpieczeń (ochrony sieci wodociągowej) – O_S ; wagi punktowe założono na podstawie ogólnych kryteriów [14]:
 - specjalne – $H = 3$,
 - standardowe – $M = 2$,
 - niskie $L = 1$.

Przyjęto następujące kryteria dla poszczególnych poziomów ryzyka według ogólnych zasad podanych w pracach [18]:

- ryzyko zaniedbywane $\langle 0,33 \div 0,5 \rangle$,
- ryzyko tolerowane $\langle 0,5 \div 1,5 \rangle$,
- ryzyko kontrolowane $\langle 1,5 \div 4 \rangle$,
- ryzyko nietolerowane $\langle 4 \div 6 \rangle$,
- ryzyko nieakceptowane $\langle 6 \div 9 \rangle$.

Na podstawie danych uzyskanych od MPWiK w Rzeszowie oszacowano wartości intensywności uszkodzeń dla przewodów sieci wodociągowej, wartości parametru S przyjęto według rodzaju sieci wodociągowej, a parametru O_S na podstawie informacji uzyskanych od MPWiK:

- dla sieci magistralnej $\lambda_{Msr} = 0,26$, parametr $\lambda_S = 1$, $O_S=3$, $S=3$
- dla sieci rozdzielczej $\lambda_{Rsr} = 0,41$, parametr $\lambda_S = 1$, $O_S=2$, $S=2$
- dla połączeń wodociągowych $\lambda_{Pdsr} = 0,37$, parametr $\lambda_S = 1$, $O_S=1$, $S=1$

Wykonano analizę i ocenę ryzyka awarii sieci wodociągowej, a jej wyniki zostały przedstawione w tabeli 7.

Tab. 7. Wyniki oceny ryzyka awarii sieci wodociągowej dla podsystemu dystrybucji wody miasta Rzeszowa

Tab. 7. Results of water pipe network risk of failure estimation for water distribution subsystem of Rzeszow

Rodzaj sieci	Analiza ryzyka				Ocena ryzyka
	S	λ_S	O_S	r	Ryzyko
Magistralna	3	1	3	1	tolerowane
Rozdzielcza	2	1	2	1	tolerowane
Podłączenia	1	1	1	1	tolerowane

Z przeprowadzonej analizy wynika, że ryzyko awarii na wszystkich rodzajach sieci wodociągowej miasta Rzeszowa jest na poziomie tolerowanym.

4. Analiza awarii przerw w dostawie wody

4.1. Założenia do analizy

Model hydrauliczny sieci wodociągowej służy do obliczania przepływów i ciśnień we wszystkich przewodach i węzłach sieci wodociągowej.

W badaniach wykorzystano model hydrauliczny sieci wodociągowej Rzeszowa wykonany w programie EPANET 2.0. Został on opracowany na podstawie modelu ISYDYW rzeszowskiej sieci autorstwa prof. Krzysztofa Knapika. Z tego opracowania, na potrzeby modelu w programie EPANET 2.0 zaczerpnięto układ, długości, średnice, chropowatości przewodów, rzędne wodociągu.

Dla przygotowanego modelu hydraulicznego symulowano 12-stogodzinne awarie przewodów magistralnych z zamknięciem rurociągu w newralgicznych punktach sieci:

- za pompownią 2° w pobliżu ZUW Zwięczyca na przewodzie magistralnym „0”,
- za pompownią 2° w pobliżu ZUW Zwięczyca na przewodzie magistralnym „1”,
- za pompownią 2° w pobliżu ZUW Zwięczyca na przewodzie magistralnym „2”,
- za pompownią 2° w pobliżu ZUW Zwięczyca na przewodzie magistralnym „3”,
- na rurociągu przed zbiornikiem Pobitno,
- na rurociągu przed zbiornikiem Baranówka.

Spośród w/w zasymulowanych awarii wybrano dwie, które wpływają na obniżenie ciśnienia w sieci w największym stopniu tj.:

- awaria z zamknięciem magistrali „0” w pobliżu ZUW Zwięczyca,
- awaria z zamknięciem magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno.

Pozostałe symulacje nie spowodowały spadku ciśnienia poniżej poziomu wymaganego.

W badaniach przyjęto następujące założenia:

- czas trwania awarii (wyłączenia) równy 12 h,
- wyłączenie o godzinie 6, włączenie o godzinie 18,
- nie jest zapewniona odpowiednia alternatywna dystrybucja wody, np. poprzez beczkowozy,
- w przypadku przerw w dostawie wody mieszkańcy czerpią wodę z awaryjnych studni w obrębie strefy, które zamieszkują,
- symulacji dokonano przy rozbiórce średnim dobowym.

Do wyznaczenia mapy ryzyka przerw dostawy wody miasta Rzeszowa zaproponowano następującą miarę ryzyka (zmodyfikowana formuła (2)):

$$r = \frac{P \cdot N}{O} \quad (3)$$

gdzie:

- P – waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii danego przewodu magistralnego,
- N – waga punktowa związana z procentem mieszkańców danej strefy pozbawionych dostawy wody,
- O – waga punktowa związana z możliwością korzystania z awaryjnych źródeł zasilania przez mieszkańców danej strefy.

W celu określenia wagi związanej z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii przeanalizowano wskaźnik intensywności uszkodzeń przewodów magistralnych Rzeszowa.

Estymator wskaźnika intensywności uszkodzeń wyliczono ze wzoru (1).

Na podstawie badań prowadzonych w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków Politechniki Rzeszowskiej w latach 2000÷2008 średnia wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń przewodów magistralnych w badanym okresie wyniosła 0,26 awarii/km×rok. Wartość ta jest mniejsza od zalecanego standardu dla sieci magistralnych $\lambda \leq 0,3$ uszk./km×rok. W wyborze skali kierowano się wielkością zalecaną maksymalnej wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń. Przyjęto następującą pięciostopniową skalę [14]:

- $\lambda \leq 0,1$ – waga 1,
- $0,1 < \lambda \leq 0,2$ – waga 2,
- $0,2 < \lambda \leq 0,3$ – waga 3,
- $0,3 < \lambda \leq 0,4$ – waga 4,
- $0,4 < \lambda$ – waga 5.

W celu określenia wagi związanej z procentem mieszkańców danej strefy pozbawionych dostawy wody, wykonano symulację pracy PsDyW w programie Epanet 2.0. Wedle wcześniej podjętych założeń zasymulowano 12 godzinną awarię, od godziny 6 do 18 podczas doby z rozbiorem średnim. W modelu symulowało awarię przewodu skutkującą zamknięciem danego rurociągu. Dla pracującej sieci podczas awarii przewodu magistralnego, sporządzono warstwicowe wykresy wysokości ciśnienia dla ostatniej godziny awarii, tj. 17-18.

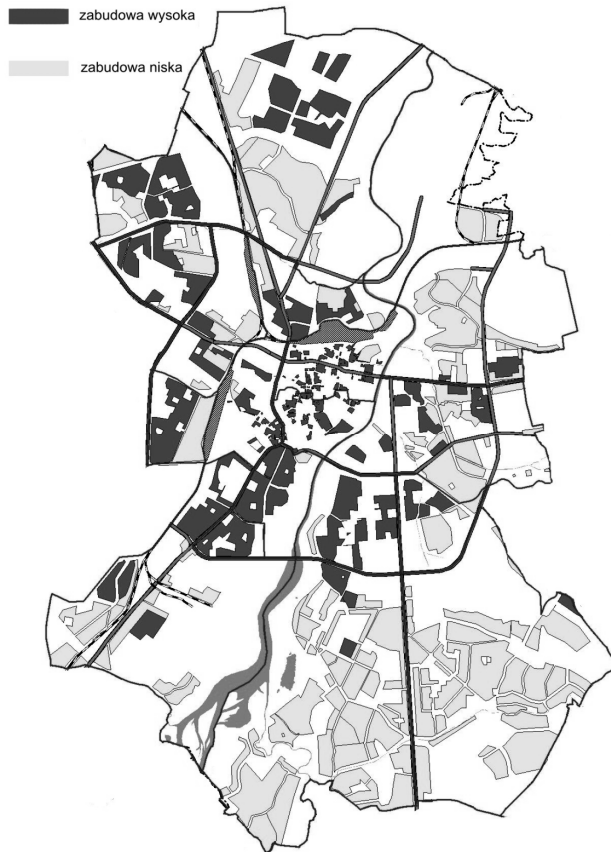
W celu określenia liczby mieszkańców pozbawionych dostawy wody przyjęto następujące założenia:

- sieć wodociągowa powinna zapewnić ciśnienie pozwalające czerpać wodę na poziomie do czwartego piętra łącznie (nazwane w obliczeniach piętrem ostatnim),
- ostatnie piętro zamieszkuje 15% ogólnej liczby mieszkańców z zabudowy wysokiej,
- na dwóch ostatnich piętrach mieszka łącznie 40% ogólnej liczby mieszkańców z zabudowy wysokiej,
- na trzech ostatnich piętrach mieszka łącznie 60% ogólnej liczby mieszkańców z zabudowy wysokiej.

Przerwa dostawy następuje:

- dla ostatniego piętra, jeśli ciśnienie w sieci spadnie poniżej 25 mH₂O,
- dla przedostatniego piętra, jeśli ciśnienie w sieci spadnie poniżej 20 mH₂O,
- dla trzeciego piętra od góry, jeśli ciśnienie w sieci spadnie poniżej 15 mH₂O.

Na rys. 5 przedstawiono mapę Rzeszowa z zaznaczoną wysokością zabudowy. Na podstawie tej mapy, warstwicowych wykresów wysokości ciśnienia oraz wysokości ciśnienia wymaganego, określono procent mieszkańców danej strefy pozbawionych dostawy wody.



Rys. 5. Mapa Rzeszowa z podziałem na wysokość zabudowy

Fig. 5. Map of Rzeszow with buildings height

Zaproponowano pięciopunktową skalę związaną z procentem zagrożonych mieszkańców. Dla procentu zagrożonych mieszkańców przyjęto następujące wagi [16]:

- $<0\% \div 10\%>$ – wagę 1,
- $(10\% \div 20\%>$ – wagę 2,
- $(20\% \div 30\%>$ – wagę 3,
- $(30\% \div 40\%>$ – wagę 4,
- powyżej 50% – wagę 5.

Na terenie Rzeszowa utworzony został system awaryjnego zaopatrzenia ludności miasta w wodę. Jego celem jest umożliwienie mieszkańcom korzystania z wody w przypadku awarii zasilania, kataklizmów i innych zdarzeń mogących spowodować przerwę w działaniu wodociągów komunalnych.

W skład systemu awaryjnego zaopatrzenia Rzeszowa w wodę wchodzi studnie, które czerpią wodę z czwartorzędowego poziomu wodonośnego. Głębokość większości studni wierconych wynosi od kilku do kilkunastu metrów.

Wydział Zarządzania Kryzysowego i Ochrony Ludności Miasta Rzeszowa posiada opracowany „Plan reagowania kryzysowego Miasta Rzeszowa” oraz „Plan awaryjnego zaopatrzenia w wodę ludności Miasta Rzeszowa”, który zakłada dostawę wody z alternatywnych źródeł (system studzien).

Dla warunków specjalnych wyróżnia się następujące zapotrzebowanie [28]:

- fizjologiczne $0,0025 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$
- minimalne (konieczne) $0,0075 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$,
- niezbędne $0,015 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$,
- optymalne $0,030 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$,
- ponadoptymalne $>0,030 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$.

Wydatność studzien prywatnych przyjęto $5,0 \text{ m}^3/\text{d}$, studni wierconych $15,0 \text{ m}^3/\text{d}$ [15].

Głównymi wskaźnikami stanowiącymi o zanieczyszczeniu i decydującymi o jakości wód podziemnych na terenie aglomeracji Rzeszowa są żelazo - Fe_{og} i mangan - Mn. Zanieczyszczenie wód podziemnych tymi jonami wynika z naturalnego występowania wymienionych pierwiastków w wodach czwartorzędowego poziomu wodonośnego. Zgodnie z klasyfikacją jakości wód podziemnych, na obszarze aglomeracji występują wody podziemne o średniej (II - wymagające uzdatniania) i lokalnie niskiej (III - nie spełniające kryteriów dla wód przeznaczonych do spożycia) jakości.

Na podstawie wydajności studni awaryjnych przypadającej na jednego mieszkańca danej strefy zaproponowana pięciostopniową skalę punktową:

- $Q \leq 0,0025 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$; z wagą 1,
- $0,0025 < Q \leq 0,0075 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$; z wagą 2,
- $0,0075 < Q \leq 0,015 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$; z wagą 3,
- $0,015 < Q \leq 0,030 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$; z wagą 4,
- $Q > 0,030 \text{ m}^3/\text{M}\times\text{d}$; z wagą 5.

W tabeli 8 przedstawiono dla poszczególnych stref: liczbę mieszkańców, liczbę studni kopanych i wierconych, ich sumaryczną wydajność na jednego mieszkańca oraz punktową wagę stopnia ochrony strefy.

Tab. 8. Liczba mieszkańców, liczba i wydajność studni kopanych i wierconych dla poszczególnych stref

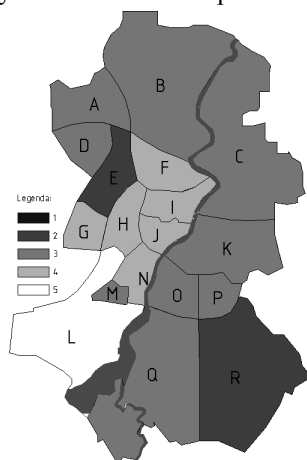
Tab. 8. Number of residents, number and efficiency of wells for every zone

Strefa	Liczba mieszkańców	Liczba studni wierconych	Liczba studni kopanych	wydajność studni wierconych	wydajność studni kopanych	wydajność sumaryczna studni	wydajność sumaryczna studni na jednego mieszkańca	stopień ochrony strefy
A	10875	8	0	120	0	120	0,011	3
B	2903	0	6	0	30	30	0,010	3
C	4033	1	6	15	30	45	0,011	3
D	11882	5	1	75	5	80	0,007	2
E	5597	4	4	60	20	80	0,014	3
F	9131	10	4	150	20	170	0,019	4
G	7559	7	2	105	10	115	0,015	4
H	5215	8	1	120	5	125	0,024	4
I	4787	6	10	90	50	140	0,029	4
J	3554	5	2	75	10	85	0,024	4
K	9626	7	2	105	10	115	0,012	3
L	5017	8	8	120	40	160	0,032	5
M	4996	4	2	60	10	70	0,014	3
N	8254	9	6	135	30	165	0,020	4
O	15522	8	1	120	5	125	0,008	3
P	4373	3	2	45	10	55	0,013	3
Q	7595	4	2	60	10	70	0,009	3
R	6030	3	0	45	0	45	0,007	2

Przejęto następujące kategorie ryzyka:

- zaniedbywalne dla $0,2 < r \leq 1,6$;
- tolerowane dla $1,6 < r \leq 3,2$;
- kontrolowane dla $3,2 < r \leq 5,0$;
- nieakceptowane dla $5,0 < r \leq 10,0$;
- niedopuszczalne dla $10,0 < r \leq 25,0$.

Na rys. 6 zaprezentowano mapę ochrony z wagami punktowymi związanymi z możliwością korzystania z awaryjnych źródeł zasilania przez mieszkańców danej strefy.



Rys. 6. Wagi parametru O (ochrona) dla poszczególnych stref

Fig. 6. Parameter O (protection) for every zone

4.2. Awaria magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno

Na rys. 7 przedstawiono rozkład ciśnienia w PsDyW uzyskany w wyniku symulacji awarii magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno przeprowadzonej w programie EPANET 2.0.



Rys. 7. Rozkład wysokości ciśnienia w PsDyW Rzeszowa podczas awarii magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno

Fig. 7. Pressure height in water distribution subsystem of Rzeszów during failure of main pipeline „3” before Pobitno tank

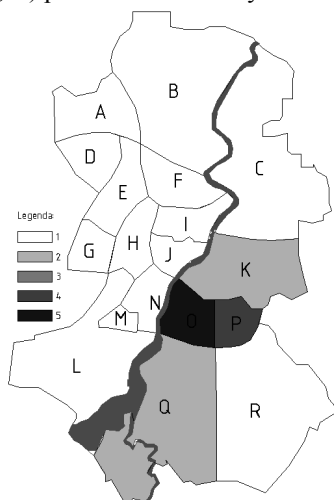
Na podstawie wysokości ciśnienia w sieci i wysokości zabudowy określono liczbę mieszkańców pozbawionych dostawy wody. Dane przedstawiono w tabeli. 9.

Tab. 9. Liczba mieszkańców pozbawionych dostawy wody (awaria magistrali „3”), parametrów P, N, O oraz wartości ryzyka r dla poszczególnych stref

Tab. 9. Number of people deprived of water supply ,parameters P, N, O and risk values r for the individual zone

Strefa	Procent mieszkańców strefy pozbawionych dostawy wody	waga punktowa związana z możliwością korzystania z awaryjnych źródeł zasilania	waga punktowa związana z procentem mieszkańców danej strefy pozbawionych dostawy wody	waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii danego przewodu	Wartość ryzyka przerwy dostawy wody	Ryzyko przerwy dostawy wody
A	0	3	1	3	1,00	zaniedbywalne
B	0	3	1	3	1,00	zaniedbywalne
C	0	3	1	3	1,00	zaniedbywalne
D	0	2	1	3	1,50	zaniedbywalne
E	0	3	1	3	1,00	zaniedbywalne
F	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
G	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
H	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
I	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
J	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
K	14	3	2	3	2,00	tolerowane
L	0	5	1	3	0,60	zaniedbywalne
M	0	3	1	3	1,00	zaniedbywalne
N	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
O	40	3	5	3	5,00	kontrolowane
P	36	3	4	3	4,00	kontrolowane
Q	12	3	2	3	2,00	tolerowane
R	0	2	1	3	1,50	zaniedbywalne

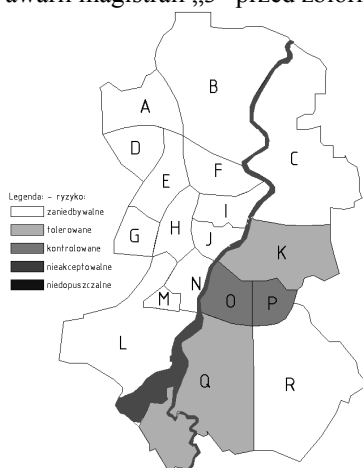
Wagi parametru N (procentu zagrożonych mieszkańców) dla poszczególnych stref Rzeszowa (awaria magistrali „3”) przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Waga parametru N (procentu zagrożonych mieszkańców) dla poszczególnych stref

Fig. 8. Parameter N (percent of people deprived of water supply) for every zone

Na podstawie danych z tabeli 9 sporządzono mapę ryzyka (rys. 9) dla rzeszowskiej sieci wodociągowej podczas awarii magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno.



Rys. 9. Mapa ryzyka przerwy dostawy wody podczas awarii magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno

Fig. 9. The map of risk of interruption in water supply during the failure in the main pipeline „3” before Pobitno tank

4.3. Awaria magistrali „0” w pobliżu ZUW

Na rys. 10 przedstawiono rozkład ciśnienia w PsDyW uzyskany w wyniku symulacji awarii magistrali „0” w pobliżu ZUW Zwiężczyca przeprowadzonej w programie EPANET 2.0.



Rys. 10. Rozkład wysokości ciśnienia w PsDyW Rzeszowa (awaria magistrali „0”)

Fig. 10. Pressure height in water distribution subsystem of Rzeszow during failure of main pipeline “0”

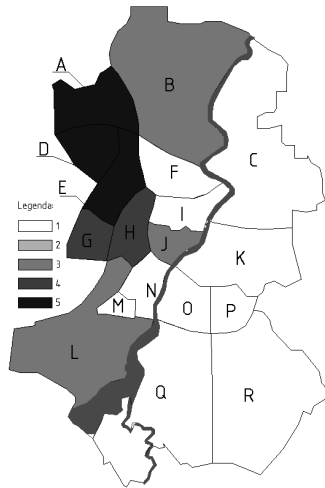
Na podstawie wysokości ciśnienia w sieci i wysokości zabudowy określono liczbę mieszkańców pozbawionych dostawy wody. Dane dla Awaria magistrali „0” w pobliżu ZUW przedstawiono w tabeli 10.

Tab. 10. Liczba mieszkańców pozbawionych dostawy wody, parametrów P, N, O oraz wartości ryzyka r dla poszczególnych stref

Tab. 10. Number of people deprived of water supply ,parameters P, N, O and risk values r for the individual zone

Strefa	Sumaryczna liczba mieszkańców pozbawionych dostawy wody	Procent mieszkańców strefy pozbawionych dostawy wody	Waga punktowa związana z procentem mieszkańców pozbawionych dostawy wody	waga punktowa związana z możliwością korzystania z awaryjnych źródeł zasilania	waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii danego przewodu	Wartość ryzyka przerwy dostawy wody	Ryzyko przerwy dostawy wody
A	4300	40	3	3	3	3	tolerowane
B	600	21	2	3	3	2	tolerowane
C	0	0	1	3	3	1	zaniedbywalne
D	5300	45	3	2	3	4,5	kontrolowane
E	2400	43	3	3	3	3	tolerowane
F	1000	11	2	4	3	1,5	zaniedbywalne
G	2650	35	3	4	3	2,25	tolerowane
H	1550	30	2	4	3	1,5	zaniedbywalne
I	450	9	1	4	3	0,75	zaniedbywalne
J	700	20	2	4	3	1,5	zaniedbywalne
K	0	0	1	3	3	1	zaniedbywalne
L	1300	26	2	5	3	1,2	zaniedbywalne
M	900	18	2	3	3	2	tolerowane
N	0	0	1	4	3	0,75	zaniedbywalne
O	0	0	1	3	3	1	zaniedbywalne
P	0	0	1	3	3	1	zaniedbywalne
Q	0	0	1	3	3	1	zaniedbywalne
R	0	0	1	2	3	1,5	zaniedbywalne

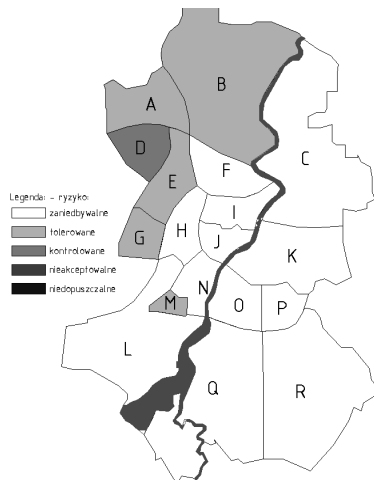
Wagi parametru N (procentu zagrożonych mieszkańców) dla poszczególnych stref (awaria magistrali „0”) przedstawiono na rys.11.



Rys. 11. Waga parametru N (procentu zagrożonych mieszkańców) dla poszczególnych stref

Fig. 11. Parameter N (percent of people deprived of water supply) for every zone

Na podstawie danych z tabeli 10 sporządzono mapę ryzyka (rys. 12) dla rzeszowskiej sieci wodociągowej podczas awarii magistrali „0” w pobliżu ZUW Zwięczyca.



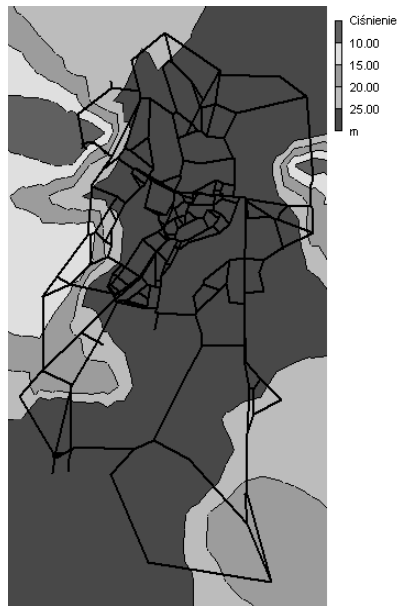
Rys. 12. Mapa ryzyka przerwy dostawy wody podczas awarii magistrali "0" w pobliżu ZUW Zwięczyca

Fig. 12. The map of risk of interruption in water supply during the failure in the main pipeline "0", near WTP in Zwięczyca

4.4. Awaria magistrali „0” w pobliżu ZUW po oddaniu do użytku nowego labiryntowego zbiornika w kompleksie zbiorników Baranówka

Podczas przeprowadzania analiz ryzyka w kompleksie zbiorników Baranówka oddano do użytku nowy labiryntowy zbiornik o pojemności 17500 m³. Zbiornik dodano do modelu hydraulicznego i ponownie przeprowadzono analizę ryzyka przerw dostawy wody dla mieszkańców Rzeszowa.

Na rys. 13 przedstawiono rozkład ciśnienia w PsDyW uzyskany w wyniku symulacji awarii magistrali „0” w pobliżu ZUW Zwięczyca przeprowadzonej w programie EPANET 2.0.



Rys. 13. Rozkład ciśnienia podczas awarii magistrali "0" po uruchomieniu nowego zbiornika labiryntowego

Fig. 13. Pressure height in water distribution subsystem of Rzeszow during failure of main pipeline "0" (after starting a new labyrinth tank)

Na podstawie wysokości ciśnienia w sieci i wysokości zabudowy określono liczbę mieszkańców pozbawionych dostawy wody. Zestawienie wag punktowych P, N, O dla poszczególnych stref oraz poziomu ryzyka przedstawiono w tabeli 11.

Tab. 11 Zestawienie parametrów P, N, O oraz wartości ryzyka r dla poszczególnych stref

Tab. 11. Number of people deprived of water supply ,parameters P, N, O and risk values r for the individual zone

Strefa	Sumaryczna liczba mieszkańców pozbawionych dostawy wody	Procent mieszkańców strefy pozbawionych dostawy wody	waga punktowa związana z możliwością korzystania z awaryjnych źródeł zasilania	waga punktowa związana z procentem mieszkańców danej strefy pozbawionych dostawy wody	waga punktowa związana z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii danego przewodu	Wartość ryzyka przerwy dostawy wody	Ryzyko przerwy dostawy wody
A	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
B	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
C	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
D	0	0	2	1	3	1,5	zaniedbywalne
E	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
F	0	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
G	1315	17	4	2	3	1,5	zaniedbywalne
H	0	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
I	0	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
J	0	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
K	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
L	725	14	5	2	3	1,2	zaniedbywalne
M	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
N	0	0	4	1	3	0,75	zaniedbywalne
O	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
P	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
Q	0	0	3	1	3	1	zaniedbywalne
R	0	0	2	1	3	1,5	zaniedbywalne

5. Podsumowanie

- Analiza awaryjności sieci wodociągowej Rzeszowa pozwoliła na określenie wag związanych z prawdopodobieństwem wystąpienia awarii przewodów magistralnych.
- Na podstawie sporządzonej mapy ryzyka podczas awarii magistrali „3” przed zbiornikiem Pobitno, stwierdzono że:
 - najbardziej zagrożone są dzielnice O i P (ryzyko kontrolowane), K i Q (ryzyko tolerowane),
 - dla w/w stref wartość parametru N jest najwyższa (4÷5),
 - w pozostałych strefach występuje ryzyko na poziomie zanedbywalnym.
- Na podstawie sporządzonej mapy ryzyka podczas awarii magistrali „0” w pobliżu ZUW (przed uruchomieniem nowego zbiornika labiryntowego w kompleksie zbiorników Baranówka), stwierdzono że:
 - najbardziej zagrożone są dzielnice w północno-zachodniej części miasta,
 - ryzyko na poziomie kontrolowanym w strefie O, na poziomie tolerowanym w strefach A, B, E, G, M,
 - dla stref A, D, E wartość parametru N jest najwyższa (5),
- Na podstawie sporządzonej mapy ryzyka podczas awarii magistrali „0” w pobliżu ZUW (przed uruchomieniem nowego zbiornika labiryntowego w kompleksie zbiorników Baranówka), stwierdzono że:
 - najbardziej zagrożone są dzielnice w północno-zachodniej części miasta,
 - ryzyko na poziomie kontrolowanym w strefie O, na poziomie tolerowanym w strefach A, B, E, G, M,
 - dla stref A, D, E wartość parametru N jest najwyższa (5),
 - w pozostałych strefach występuje ryzyko na poziomie zanedbywalnym.
- Po uruchomieniu nowego zbiornika labiryntowego w kompleksie zbiorników Baranówka zmienił się procent mieszkańców zagrożonych przerwą w dostawie wody. W porównaniu ze stanem przed uruchomieniem zbiornika poziom ryzyka obniżył się we wszystkich badanych strefach do poziomu zanedbywalnego. Wynik świadczy o zasadności istnienia nowego zbiornika ze względów niezawodności dostaw wody.
- Rzeszowska infrastruktura wodociągowa spełnia większość wymagań dotyczących dostawy wody w warunkach awaryjnych.
- Problemem związanym z zaopatrzeniem w wodę ze studni awaryjnych okazać się może dostarczenie wody o dobrej jakości. W związku z tym należy przeprowadzić szczegółowe rozpoznanie hydrogeologiczne, mające na celu znalezienie obszarów występowania wód podziemnych o dobrej jakości.
- Zastosowanie nowoczesnych technik informatycznych i automatyki w zarządzaniu PsDyW w znacznym stopniu przyczyniło się do poprawy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów wodociągowych. Monitoring PsDyW w połączeniu z kompleksowym informatycznym programem zarządzania (wykorzystanie oprogramowania EPANET, SCADA (supervisory control and data acquisition, GIS (geographic information system)) powinno stanowić istotny element w analizach i ocenach ryzyka awarii w PsDyW.
- Nowoczesne techniki informatyczne w połączeniu z systemami sztucznej inteligencji (sieci neuronowe, neuronowo-rozmyte, algorytmy genetyczne) mogą stanowić podstawę dla „inteligentnego” zarządzania bezpieczeństwem SZZW.

- Zaproponowana w pracy metoda wyznaczania tzw. map ryzyka, które stanowią element kompleksowego zarządzania bezpieczeństwem dostawy wody do odbiorców. Metoda łączy w sobie zastosowanie podstawowych metod matrycowych i analizy ryzyka z systemu monitoringu sieci wodociągowej. Dla ulepszenia metody celowe byłoby wykorzystanie oprogramowania GIS oraz SCADA.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego Nr N R14 0006 10 nt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” w latach 2010-2013.

Bibliografia

- [1] Denczew S., Podwójny aspekt bezpieczeństwa w układach dystrybucji wody, Kon. „Bezpieczeństwo, niezawodność, diagnostyka urządzeń i systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych, grzewczych”, Wydawnictwo PZiTS O/Kraków, Zakopane, 2001
- [2] Haimes Y. Y., Moser D. A. and Stakhiv E.Z., Risk-Based Decisionmaking in Water Resources, *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12, 401-415
- [3] Hotłoś H., Ograniczenie ciśnienia w sieci wodociągowej jako czynnik zmniejszający uszkodzalność i koszty napraw uszkodzeń przewodów, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1999, 5, 180-184
- [4] Hubbard D. W., The failure of risk management, New York: Wiley, 2009
- [5] Iwanejko R., Lubowiecka T., Analiza ryzyka jako narzędzie planistyczno-decyzyjne w wodociągach, VI Międzynarodowa (XVIII Krajowa) Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, Poznań, 2004, 547-558
- [6] Kindler J., Symulacja komputerowa jako narzędzie oceny niezawodności zaopatrzenia w wodę w systemach wodno-gospodarczych, Kon. „Informatyka w zarządzaniu w sytuacjach kryzysowych”, Wydawn. WSTZiA, Warszawa, 2006
- [7] Knapik K., Symulacja czasowo-przestrzenna systemu dystrybucji wody, Kraków: Wydawnictwo PK, 1989
- [8] Knapik K., Płoskonka R., Wpływ rozmieszczenia zbiornikowych rezerw awaryjnych na niezawodność systemu dystrybucji wody, XVIII Krajowa, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”. PZITS, O/Wielkopolski, Poznań, 2004, II, 569-580
- [9] Kotowski A., Pawlak A., Wójtowicz P., Modelowanie miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę na przykładzie osiedla mieszkaniowego Baranówka w Rzeszowie, *Ochrona Środowiska*, 2010, 32 (2), 43-48
- [10] Kulbik M., Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych, Gdańsk: Wydawn. PG, 2004

- [11] Kwietniewski M., *Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców*, Monografia, Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1999
- [12] Mays L., *Water Supply Systems Security*, New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2004
- [13] Pollard S. J. T. Strutt J. E., Macgillivray B. H., Hamilton P. D., Hrudehy S. E., Risk analysis and management in the water utility sector, *Process Safety and Environmental Protection*, 2004, 82 (6), 453-462
- [14] Rak J., *Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę*, Badania systemowe. Inżynieria środowiska, Warszawa: Instytut Badań Systemowych PAN, 2009
- [15] Rak J., Wybrane problemy zarządzania systemem zaopatrzenia w wodę miasta Rzeszowa, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2004, 2, 53-57
- [16] Rak J., Wybrane zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa w zaopatrzeniu w wodę, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2008
- [17] Rak J., Koszelnik P., Mucha M., Wstępna ocena studni awaryjnych na terenie miasta Rzeszowa, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2011, 12, 467-470
- [18] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2007
- [19] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Five-parametric matrix to estimate the risk connected with water supply system operation, *Environment Protection Engineering*, 2006, 2, 37-46
- [20] Siwoń Z., Wybrane zagadnienia bieżącej eksploatacji miejskich sieci wodociągowych, Konferencja: Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji., Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce-Cedzyna, 2003, 11-24
- [21] Sroczan E., Urbaniak A., Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w monitorowaniu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód, XVIII Krajowa, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód". PZITS, O/Wielkopolski, Poznań, 2004, II, 695-704
- [22] Studziński J., Bogdan L., Informatyczny system wspomagania decyzji do zarządzania, sterowania operacyjnego i planowania miejskiego systemu wodno-ściekowego, *Badania Systemowe*, 2006, 49, 149-157
- [23] Studziński J., Drelichowski O., Rozwój i zastosowania metod ilościowych i technik informatycznych wspomagających procesy decyzyjne, *Badania Systemowe*, 2006, 49, 149-157
- [24] Tchórzewska-Cieślak B., Water supply system reliability management, *Environment Protection Engineering*, 2009, 35, 29-35
- [25] Tchórzewska-Cieślak B., *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2011

- [26] Tchórzewska-Cieślak, B. Boryczko K. and Eid M., *Failure scenarios in water supply system by means of fault tree analysis*, *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*, Grall A. Bérenguer Ch., Guedes Soares C., Editor. 2012, Taylor & Francis Group, London. p. 2492-2499.
- [27] Urbniak A., Monitorowanie i sterowanie procesami wodociągowymi, *Wodociągi Kanalizacja*, 2006, 7-8 (39/40), 39-39
- [28] Wieczysty A., Rak J., Zaopatrzenie w wodę do picia w sytuacjach nadzwyczajnych, *Prace naukowe GIG*, 1997, 18, 85-92
- [29] Wydział Zarządzania Kryzysowego i Ochrony Ludności Urząd Miasta Rzeszowa, Monitoring zagrożeń na terenie miasta Rzeszowa,
- [30] Zimoch I., Trybulec K., Monitoring jakości wody w podsystemie dystrybucji w aspekcie bezpieczeństwa, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2005, 11, 52-55
- [31] Dane z Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie

