

Problematyka niezawodności i bezpieczeństwa systemów wodociągowych w świetle zmian przepisów Unii Europejskiej

Reliability and safety of water supply systems in terms of changes in European Union regulations

JANUSZ RAK, BARBARA TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, IZABELA PIEGDOŃ, DAWID SZPAK, JAKUB ŻYWIEC

DOI 10.36119/15.2022.3.4

W pracy przedstawiono wskaźniki niezawodności stosowane w analizach funkcjonowania systemów wodociągowych oraz wyznaczono ryzyko braku dostawy wody do konsumentów w sytuacji kryzysowej. Prezentowane podejście jest zgodne z wymaganiami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184, wdrażającej podejście oparte na ryzyku, obejmujące cały łańcuch dostaw w obszarze zasilania, poboru, uzdatniania, magazynowania i dystrybucji wody.

Słowa kluczowe: system zaopatrzenia w wodę, zagrożenie, ryzyko

The paper presents the reliability indicators used in analyses of the functioning of water supply systems. Also the risk of lack of water supply to consumers in a crisis situation was determined. The presented approach complies with the requirements of Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020, which implements a risk-based approach covering the entire water supply system in terms of supply, draw water, treatment, storage and distribution of water.

Keywords: water supply system, hazard, risk

Wstęp

Miejskie systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) są integralną częścią zurbanizowanego życia. Poziom usług związanych z zaopatrzeniem w wodę i odprowadzaniem ścieków jest jednym z priorytetowych aspektów jakości życia mieszkańców miast i wsi. Systemy wodociągowe składają się z powiązanych ze sobą funkcjonalnie obiektów, działających w reżimie pracy ciągłej. Dodatkowo systemy te można sklasyfikować jako złożone systemy komunalnej infrastruktury krytycznej, których głównym zadaniem jest zapewnienie ciągłości dostawy wody o wymaganej jakości. Obecnie uważa się, że woda przeznaczona do spożycia przez ludzi jest zdatna do spożycia, jeżeli jest wolna od mikroorganizmów chorobotwórczych i pasożytów w liczbie stanowiącej potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego, wszelkich substancji w stężeniach

stanowiących potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego oraz nie wykazuje agresywnych właściwości korozyjnych i spełnia wymagania mikrobiologiczne oraz chemiczne określone w rozporządzeniu Ministra Zdrowia [10]. Zgodnie z zapisami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 [3] zapis ten zostanie rozszerzony m.in. o podejście do bezpieczeństwa wody oparte na ryzyku.

W trakcie eksploatacji obiektów wodociągowych istnieje możliwość pojawienia się różnego rodzaju awarii, które mogą powodować straty wody, przerwy w jej dostawie oraz mogą być przyczyną niekorzystnych zmian jej jakości. Część tych zdarzeń niesie ze sobą zagrożenie dla bezpieczeństwa konsumentów wody. Znalazło to odzwierciedlenie w zapisach Dyrektywy 2020/2184 [3], aktu prawnego mającego na celu ujednolicenie przepisów prawa krajów członkowskich. Państwa

członkowskie – w tym Polska – mają 2 lata od momentu wejścia w życie Dyrektywy, licząc od 12 stycznia 2021 r., na wdrożenie nowych przepisów. Nowa Dyrektywa UE wprowadza m.in. obowiązek prowadzenia oceny ryzyka dostaw wody w całym ich łańcuchu oraz informowania konsumentów o jakości wody, wdraża zmiany w zakresie ograniczania strat wody (poprzez wymóg redukcji wycieków) oraz ustanawia zharmonizowane minimalne wymagania dotyczące materiałów do kontaktu z wodą przeznaczoną do spożycia przez ludzi. Wdrażane podejście prewencyjne ma na celu redukcję zagrożeń w SZZW. Jak do tej pory nie przedstawiono jednak metodyki oceny ryzyka, co stawia polskie przedsiębiorstwa wodociągowe przed poważnym wyzwaniem, do którego należy odpowiednio przygotować się [19].

Podejście oparte na ryzyku wydaje się być optymalne z punktu widzenia bezpieczeństwa konsumentów wody i rozwoju

prof. dr hab. inż. Janusz Rak <https://orcid.org/0000-0001-7713-5841>, prof. dr hab. inż. Barbara Tchórzewska-Cieślak <https://orcid.org/0000-0002-7622-6749>, dr inż. Izabela Piegdoń <https://orcid.org/0000-0003-1094-4569>, dr inż. Dawid Szpak <https://orcid.org/0000-0001-9654-2477>, mgr inż. Jakub Żywiec <https://orcid.org/0000-0002-0823-4229> – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, Rzeszów. e-mail: rakjan@prz.edu.pl, cbarbara@prz.edu.pl, piegi@prz.edu.pl, dsz@prz.edu.pl, j.zywiec@prz.edu.pl

społeczno-gospodarczego. Ocena ryzyka powinna zostać przeprowadzona w trzech etapach obejmujących: obszar zasilania dla punktów poboru wody, następnie system zaopatrzenia w wodę i ostatecznie wewnętrzne systemy wodociągowe [3]. Do polskiego prawodawstwa wprowadzono już obowiązek analizy ryzyka ujęć wody obejmującej ocenę zagrożeń zdrowotnych z uwzględnieniem czynników negatywnie wpływających na jakość ujmowanej wody do końca 2022 roku [16]. Powstały już pierwsze opracowania w tym zakresie, m.in. [12]. Dotychczasowa praktyka wskazuje jednak, że znaczna część, szczególnie mniejszych przedsiębiorstw wodociągowych będzie dążyć do wdrożenia nowych wymagań pod koniec narzuconych terminów. Wydaje się, że środowisko naukowe, szczególnie zgromadzone przy Izbie Gospodarczej Wodociągi Polskie, tj. Zespół ds. bezpieczeństwa wody oraz Zespół ds. implementacji Dyrektywy w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi powinny wypracować szczegółowe wytyczne, które ułatwią przedsiębiorstwom wodociągowym spełnienie minimalnych wymogów Dyrektywy [3].

Celem pracy jest charakterystyka głównych wskaźników niezawodności i bezpieczeństwa stosowanych w ocenie funkcjonowania systemów wodociągowych oraz przedstawienie wyników oceny ryzyka braku dostawy wody dla systemu, który dysponuje tylko jednym znaczącym ujęciem wody.

Ogólna charakterystyka zagrożeń dla systemów wodociągowych

Zagrożenia dla systemów zaopatrzenia w wodę dotyczą dwóch głównych aspektów: jakościowego oraz ilościowego. W pierwszym przypadku należy dotrzymać standardów dotyczących jakości wody ustanowionych przez Ministra Zdrowia [10] oraz w pewnej perspektywie czasowej wynikających z przyjętych Dyrektyw europejskich [3]. W odniesieniu do ilości wody należy dążyć do utrzymania ciągłości dostawy w aspekcie stosowanego powszechnie podziału na ryzyko indywidualne, grupowe i ekonomiczne.

Przynależność SZZW do infrastruktury krytycznej wymaga od przedsiębiorstw wodociągowych zapewnienia ciągłości funkcjonowania oraz szybkiego odtworzenia stanu sprawności w przypadku wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Przez sprawność rozumie się odpowiednie działanie, funkcjonowanie urządzenia lub obiektu. Zagrożenia dla całego systemu

dostawy wody do konsumentów można klasyfikować ze względu na [6, 14]:

- rodzaj przyczyny:
 - wewnętrzne – wynikające bezpośrednio z funkcjonowania poszczególnych obiektów, awarie przewodów magistralnych lub rozdzielczych i armatury, awarie pompowni, zakłócenia w pracy stacji uzdatniania wody,
 - zewnętrzne – np. zanieczyszczenia incydentalne źródła wody, powódź, susza, opady, wichury, osuwiska, jak również brak zasilania energetycznego czy działania osób trzecich – wandalizm, atak terrorystyczny, a nawet cyberterrorystyczny,
- czas trwania:
 - krótkotrwałe (zdarzające się rzadko),
 - długotrwałe (mogące spowodować efekt domina),
 - cykliczne (powracające),
- zasięg:
 - lokalne,
 - rozległe (regionalne, globalne),
- stałość zasięgu terenowego:
 - rozprzestrzeniające się w terenie,
 - nierozprzestrzeniające się w terenie.

Awariom można zapobiegać poprzez [14]:

- zapewnienie ochrony krytycznych elementów podsystemu,
- zdalne monitorowanie pracy podsystemu,
- efektywne funkcjonowanie służb remontowych,
- dywersyfikację zasobów wód,
- opracowanie planu bezpieczeństwa wodnego opartego na analizie ryzyka wynikającego z możliwości zajścia zdarzeń niepożądanych.

Ograniczenie skutków awarii polega na [14, 18]:

- opracowaniu planów reagowania w sytuacji kryzysowej, w tym możliwości zaopatrzenia ludności w wodę do spożycia z alternatywnych źródeł,
- opracowaniu alternatywnych technologii uzdatniania wody w kontekście możliwości pojawienia się zdarzeń incydentalnych,
- opracowaniu systemu informacyjnego oraz działań prewencyjnych,
- bieżącym kontrolowaniu podsystemów SZZW poprzez wykonywanie systematycznych inspekcji, renowacji przewodów oraz modernizacji całego podsystemu,
- zwiększeniu marginesów rezerwowania (alternatywne źródła wody, pojemności awaryjne w sieciowych zbiornikach wodociągowych).

Zarządzanie ryzykiem zagrożeń to systematyczna realizacja polityki zarządzania z wdrażaniem procedur i praktycznym działaniem, mająca na celu sprowadzanie ryzyka zagrożeń zidentyfikowanych w danym obszarze analiz do racjonalnego poziomu, a obejmująca fazę oceny ryzyka, a w niej analizę ryzyka (wskazanie obszaru analiz, identyfikacja zagrożenia, szacowanie ryzyka zagrożenia i wartościowanie ryzyka) oraz fazę reagowania na ryzyko, a w niej postępowanie wobec ryzyka zagrożenia, monitorowanie ryzyka zagrożenia, komunikowanie o ryzyku zagrożenia.

Podstawowe wskaźniki niezawodności stosowane w analizach funkcjonowania systemów wodociągowych

Średni czas pracy bezuszkodzeniowej T_p (ang. *Mean Time Between Failure* – MTBF) jest wartością oczekiwaną zmiennej losowej T_p' określającej czas pracy (zdatności) systemu (lub jego elementów), między dwoma kolejnymi uszkodzeniami [7, 17]:

$$MTBF = E(T_p) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1)$$

gdzie:

$E(T_p)$ – wartość oczekiwana zmiennej losowej T_p .

W analizach eksploatacji systemów stosuje się stacjonarne zależności wskaźnika intensywności uszkodzeń [7, 17]:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2)$$

natomiast dla elementów liniowych wzór (2) przyjmuje postać [7, 17]:

$$\lambda(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \quad (3)$$

gdzie:

MTBF – średnia wartość czasu pracy pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami – $E(T_p)$,

$n(t, t + \Delta t)$ – liczba wszystkich uszkodzeń w przedziale czasu Δt ,

N – liczba badanych elementów lub w przypadku elementów liniowych ich długość w km,

Δt – czas obserwacji.

Średni czas odnowy (ang. *Mean Time To Repair* – MTTR) jest to średnia wartość czasu pracy, liczona do chwili przywrócenia uszkodzonemu obiektowi stanu zdatności. Jest sumą czasu oczekiwania na naprawę MWTTT (ang. *Mean Waiting Time To Repair*) i czasu naprawy rzeczywistej MTR (ang. *Mean Time Repair*) – do momentu włączenia elementu do eksploatacji [7, 17].

$$MTTR = MWTR + MTR \quad (5)$$

Wartość ta jest ściśle uzależniona od warunków, w jakich eksploatowany jest obiekt oraz czasu dostępu do części zamiennych.

Intensywność odnowy $\mu(t)$ określa liczbę niesprawności usuwanych w jednostce czasu, można ją wyznaczyć z danych eksploatacyjnych wg wzoru [7, 17]:

$$\mu(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \quad (6)$$

oraz

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (7)$$

gdzie:

$n(t, t + \Delta t)$ – liczba elementów, których odnowa zakończyła się w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$,

$n(t)$ – liczba elementów, których odnowa zakończyła się do czasu t ,

Δt – długość okresu obserwacji.

Wskaźnik gotowości $K(t)$ definiowany jest jako prawdopodobieństwo, że system będzie w stanie sprawności w danym czasie t [7, 17]:

$$K(t) = \frac{\mu + \lambda \exp[-(\mu + \lambda) \cdot t]}{\mu + \lambda} \quad (8)$$

Wskaźnik zawodności (postoju) K_p określa prawdopodobieństwo, że system będzie znajdował się w stanie zawodności:

$$K_p = 1 - K(t) \quad (9)$$

Najprostszym sposobem podnoszenia niezawodności w systemach wodociągowych jest stosowanie rezerw np. rezerwowo pompy, studnie, rurociągi. Najbardziej rygorystyczne podejście do niezawodności zakłada urządzenie rezerwowo przy jednym pracującym. Im jest więcej pracujących urządzeń, tym większa jest wymagana liczba urządzeń rezerwowych. Przykłady wyznaczenia wskaźników niezawodności różnych obiektów (studni, elementów ujęć, stacji uzdatniania wody, pompowni) można znaleźć m.in. w pracach [2, 5, 6, 7, 9, 14, 17, 18]. Ustalanie wymaganego poziomu niezawodności jest procesem trudnym i długotrwałym, nie ma obecnie uregulowań prawnych w tym zakresie. Najczęściej ustala się go na podstawie danych z eksploatacji, badań symulacyjnych oraz opinii ekspertów. Zalecane wartości wskaźników intensywności uszkodzeń wg kryteriów zaprezentowanych w pracy [6] wynoszą:

- sieć magistralna $\lambda_{w\leq 0,3}$ uszk | (rok·km),
- sieć rozdzielcza $\lambda_{w\leq 0,5}$ uszk | (rok·km),
- przyłącza domowe $\lambda_{w\leq 1,0}$ uszk | (rok·km).

Wskaźniki kosztowe wykorzystywane w analizach niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę zostały scharakteryzowane poniżej [14].

Szacowany średni koszt usuwania awarii:

$$C_{ao} = C_{rob} + C_{tr} + C_{mat} + n_{kz} + C_{str} \quad (10)$$

$$n_{kz} = w_{nkz} \cdot C_{mat} \quad (11)$$

$$C_{str} = Q \cdot t \cdot C_{tar} \quad (12)$$

gdzie:

C_{ao} – koszt jednej awarii,

C_{rob} – koszty robocizny,

C_{tr} – koszty transportowe,

C_{mat} – koszt materiału,

n_{kz} – narzut kosztów zaopatrzenia,

C_{str} – koszty strat wody,

w_{nz} – wskaźnik narzutu zysku,

w_{nkz} – wskaźnik narzutu kosztów zaopatrzenia w wodę,

Q – wielkość strat wody [m^3/d],

t – czas wycieku (czas trwania awarii) [h],

C_{tar} – cena taryfowa wody [zł/ m^3].

Roczny koszt zawodności systemu wodociągowego:

$$C_{ZSZW} = \sum Q_{str} \cdot C_i - \sum Q_{str} \cdot C_{iz} + C_d \quad (13)$$

gdzie:

C_{ZSZW} – koszty zawodności SZW w roku [zł],

$\sum Q_{str}$ – sumaryczne roczne straty wody w wyniku przerwy w dostawie wody do odbiorców wyrażone w [m^3/rok],

C_i – koszt sprzedaży wody brutto [zł/ m^3],

C_{iz} – koszty produkcji wody (koszty uzdatniania, koszty energii, materiałów, itp.),

C_d – roczne koszty dodatkowe (koszty utrzymania brygad remontowo-naprawczych oraz koszty strat wody z innych przyczyn niż zawodność systemu np. w wyniku kradzieży, tzw. nieuniknione straty wody na sieci, płuwanie sieci, itp.).

Iloraz rocznych kosztów zawodności dostawy wody do spożycia do rocznej ilości niedostarczonej wody nazywa się równoważnikiem niedostarczonej wody do spożycia (RNW) i można go wyrazić wzorem [7]:

$$RNW = \frac{C_{ZSZW}}{\sum_i Q_{si}} \quad (14)$$

gdzie:

RNW – równoważnik niedostarczonej wody do spożycia,

Q_{si} – wielkość i -tego rodzaju strat wody, (straty w wyniku awarii poszczegól-

nych obiektów, kradzież wody, nieszczelności przewodów, itp.) [m^3/rok].

Ryzyko braku dostawy wody w sytuacji kryzysowej

Pojęcia niezawodności (ang. *reliability*) i bezpieczeństwa (ang. *safety*) w analizach dotyczących systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZW) przenikają się wzajemnie. Analiza niezawodności powinna obejmować wszystkie zdarzenia zakłócające poprawne funkcjonowanie systemu w danych warunkach eksploatacyjnych. Z kolei analiza bezpieczeństwa powinna dotyczyć jedynie zdarzeń stanowiących zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Jest to podejście stosowane powszechnie także w innych branżach (np. budowlanej, lotniczej). Spójne zarządzanie ryzykiem jest skierowane na szacowanie skutków, w myśl tego, że teorii bezpieczeństwa nie interesują wszystkie uszkodzenia techniczne, a tylko takie, które mogą stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa. Dyrektywa [3] i jej przyszłe zapisy w prawie krajowym wdrożą podejście oparte na ryzyku obejmujące cały łańcuch dostaw w obszarze zasilania, poboru, uzdatniania, magazynowania i dystrybucji wody do punktu zgodności.

Zwiększenie bezpieczeństwa dostawy wody można osiągnąć przede wszystkim poprzez podniesienie liczby podsystemów dostawy wody (PsDoW) lub poprzez zwiększenie niezawodności poszczególnych PsDoW. Praca jednego PsDoW przyczynia się do tego, że system zaopatrzenia w wodę jest bardzo podatny na zagrożenia powodujące brak dostawy wody na skutek czynników naturalnych oraz antropotechnicznych. Dywersyfikacja zasobów wód jest jednym z warunków niezawodnego działania SZW. W przypadku sytuacji kryzysowych dywersyfikacja może zapewnić ciągłość dostaw wody do odbiorców [8].

Najpopularniejszą metodą oceny ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę są metody matrycowe, których możliwości zastosowania zostały szeroko omówione m.in. w pracach [9, 13]. Ryzyko braku dostawy wody może być także interpretowane jako niedobór produkcji wody. Wartość oczekiwaną niedoboru zasilania wyznacza się ze wzoru [7, 14, 15]:

$$E(C = Q) = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot p_i \quad (15)$$

gdzie:

$E(C = \Delta Q)$ – wartość oczekiwana niedoboru zasilania,

i – numer stanu funkcjonowania PsDoW,

- n – maksymalna liczba możliwych stanów niezawodnościowych, $n = 2^m$ (m – liczba wszystkich źródeł zasilania PsDoW),
- ΔQ_i – niedobór zasilania w danym stanie zawodności,
- p_i – prawdopodobieństwo zajścia i -tego stanu funkcjonowania podsystemu dostawy wody.

Wielkość niedoboru zasilania ΔQ oblicza się jako różnicę wymaganej produkcji źródeł zasilania i produkcji źródeł w i -tym stanie według wzoru [7]:

$$\Delta Q = Q_n - \sum_{k_i} Q_{ik} \quad (16)$$

gdzie:

- Q_n – wymagane zapotrzebowanie na wodę, wymagana wydajność systemu w czasie pracy normalnej (najczęściej za wartość Q_n przyjmuje się maksymalne dobowe zapotrzebowanie na wodę $Q_{\max d}$ lub wartość projektową produkcji wody), [m^3/d],
- k_i – liczba uszkodzonych źródeł zasilania w i -tym stanie,
- Q_{ik} – produkcja poszczególnych źródeł zasilania w i -tym stanie przy uszkodzeniach k_i , [m^3/d].

Wartość prawdopodobieństwa p_i wyznacza się według wzoru [7]:

$$p_i = \prod_{j \in S} K_{ij} \cdot \prod_{j \in N} (1 - K_{ij}) \quad (17)$$

gdzie:

- K_{ij} – wskaźnik gotowości j -tego PsDoW,
- $j \in S$ – zbiór tych PsDoW (lub ich elementów), które w i -tym stanie są sprawne, oznaczone symbolem (+),
- $j \in N$ – zbiór tych PsDoW (lub ich elementów), które w i -tym stanie są niesprawne, oznaczone symbolem (-).

W celu oceny ryzyka braku dostawy wody w sytuacji kryzysowej zdefiniowano indeks ryzyka braku dostawy wody (IRBDW), odnosząc wartość oczekiwaną niedoboru wody do wartości nominalnej dostawy wody, co umożliwia również określenie wartości kryterialnych. Wartość ryzyka w celu lepszego jego zobrazowania można wyrazić w procentach, według zależności [7, 14, 15]:

$$IRBDW = \frac{E(\Delta Q)}{Q_n} \quad (18)$$

Przykład aplikacyjny

Do analizy wybrano miasto liczące około 37 000 mieszkańców, średniodobowa produkcja wody uzdatnionej to 5630,78 m^3/d . System zbiorowego

zaopatrzenia w wodę analizowanego miasta jest zaopatrywany w wodę za pomocą dwóch ujęć wody:

- brzegowo-przewodowego o wydajności 17 280 m^3/d ,
- podziemnego (trzy studnie wiercone) o wydajności 348 m^3/d .

Główne źródło wody stanowi ujęcie brzegowo-przewodowe. System posiada zbiornik wody czystej o pojemności 5000 m^3 , który w razie stwierdzenia dużej mętności w wodzie surowej lub wystąpienia ewentualnej sytuacji kryzysowej stanowi zapas wody na około 22 godziny. Ponadto, SZZW jest wyposażony w zbiornik sieciowy końcowy o pojemności 1800 m^3 . Układ sieci wodociągowej jest mieszany, pierścieniowo – rozgałęźny.

Na podstawie danych uzyskanych od przedsiębiorstwa wodociągowego obliczono wartość oczekiwaną niedoboru wody w sytuacji kryzysowej związanej z unieruchomieniem ujęcia wody lub zbiorników. W tabeli 1 zestawiono projektowe wartości produkcji wody w zakładzie uzdatniania wody (ZUW) – ZI oraz w zbiornikach wodociągowych, które stanowić mogą alternatywne źródło wody w sytuacji kry-

zapotrzebowania na wodę jest mniejsza od wydajności głównego źródła zasilania $Q_n = Q_{\max d} = 7038 m^3/d < Q_{ZI} = 17280 m^3/d$,

- dla stanu eksploatacyjnego, gdy pracuje ZI wraz z uwzględnieniem zbiorników sieciowych (system z nadmiarem),
- pracując same zbiorniki ZB1 i ZB2, system pracuje z niedoborem (tzn. wartość nominalna zapotrzebowania na wodę jest większa od sumy wydajności wszystkich źródeł zasilania w odniesieniu do $Q_{\max d}$).

Ponieważ napełnienie zbiorników wodociągowych zmienia się w różnych godzinach doby (ze względu na podstawową funkcję zbiorników, którą jest wyrównywanie nierównomierności rozbioru wody w dobie) obliczenia wykonano dla czterech różnych objętości wody zgromadzonych w zbiornikach tj. $Q_{ZB} = 25\%$, $Q_{ZB} = 50\%$, $Q_{ZB} = 75\%$, $Q_{ZB} = 100\%$. W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń niedoboru wody dla stanu eksploatacyjnego, gdy pracuje ZI, bez uwzględnienia wpływu zbiorników sieciowych. Przyjęto jako wartość nominalną zapotrzebowania na wodę $Q_{\max d} = 7038 m^3/d$.

Tabela 2. Wyniki analizy ryzyka bezwzględnego braku dostawy wody do podsystemu dystrybucji wody (PsDyW) (pracuje tylko ZI)

Table 2. The results of the absolute risk analysis of lack of water supply to the water distribution subsystem (WDS) (only ZI works)

i	Charakterystyka stanów eksploatacyjnych	Wydajność [m^3/d]	Suma [m^3/d]	Niedobór [m^3/d]	Wskaźniki K	Prawdopodobieństwo zajścia stanu i	Pi·ΔQ
	ZI	QZI	QZ	ΔQ	KZI lub (1 - KZI)	Pi	
1	+	17280	17280	0	0,9659	0,9659	0
2	-	0	0	7038,48	0,0341	0,0341	240,01
Σ							240,01

zysowej oraz odpowiadające im wskaźniki gotowości K (tabela 1), który ma kluczowe znaczenie w obliczeniach. W analizie, ze względu na stosunkowo niewielką wydajność, nie uwzględniono zakładu uzdatniania wody podziemnej.

Tabela 1. Wartości produkcji wody oraz wskaźniki niezawodności K dla ZUW ZI oraz zbiorników ZB1 i ZB2

Table 1. The values of water production and reliability indexes K for Water Treatment Plant (WTP) ZI and water storage tanks ZB1 and ZB2

ZUW	Q [m^3/d]	K [-]
ZI	17280	0,9659
ZB1	5000	0,996
ZB2	1800	0,991

Obliczenia przeprowadzono w wariantach:

- dla stanu eksploatacyjnego, gdy pracuje tylko ZI, bez uwzględnienia pracy zbiorników sieciowych (system pracuje z nadmiarem, tzn. wartość nominalna

Wartość oczekiwana niedoboru zasilania wynosi $E(\Delta Q) = 240,01 m^3/d$. Odnosząc wartość niedoboru wody do wartości maksymalnego zapotrzebowania na wodę otrzymujemy wartość tzw. ryzyka braku dostawy wody – IRBDW, który wyrażony jest w procentach niedoboru wody w sytuacji kryzysowej w danych warunkach eksploatacyjnych. W tabeli 3 przedstawiono

Tabela 3. Standardy ryzyka braku dostawy wody w sytuacji kryzysowej [14]

Table 3. The critical values for the levels of the risk of lack of water supply

Kategoria wodociągu	IRBDW [%]	Poziom ryzyka
I – wodociągi duże, liczba mieszkańców > 500 000	≤ 1	tolerowane
	(1÷3)	kontrolowane
	≥ 3	nieakceptowane
II – wodociągi średnie, liczba mieszkańców 50 000÷500 000	≤ 2	tolerowane
	(2÷4)	kontrolowane
	≥ 4	nieakceptowane
III – wodociągi małe, liczba mieszkańców ≤ 50 000	≤ 3	tolerowane
	(3÷5)	kontrolowane
	≥ 5	nieakceptowane

wartości kryterialne dla oceny ryzyka w zależności od wielkości SZZW [14, 15]. Analizowany system wodociągowy zaopatrza w wodę około 35 000 mieszkańców, co zalicza go do kategorii III – wodociągi małe ($LM \leq 50\,000$).

Dla E (ΔQ) = 240,01 m³/d i $Q_{\max d} = 7038,48$ m³/d, IRBDW = 3,41%, co zgodnie z tabelą 3 odpowiada ryzyku kontrolowanemu.

W kolejnym etapie obliczeń przeanalizowano pracę ZI wraz z jednoczesną pracą zbiorników wodociągowych, pracujących w danej chwili z pewnym napełnieniem. Założono, że pracuje ZI: $Q = 17280$ m³/d (system z nadmiarem) wraz z dodatkowymi źródłami zasilania (zbiorniki sieciowe) ZB1 = 5000 m³, ZB2 = 1800 m³. Założono 25% napełnienie zbiornika ZB1 ($25\% \cdot 5000 \text{ m}^3 = 1250 \text{ m}^3$) oraz 25% napełnienie zbiornika ZB2 – ($25\% \cdot 1800 \text{ m}^3 = 450 \text{ m}^3$). W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń dla stanu, gdy pracuje ZI ze zbiornikami.

Tabela 5. Wyniki analizy ryzyka bezwzględnego braku dostawy wody do PsDyW (praca zbiorników wodociągowych ZB1 i ZB2)

Table 5. The results of absolute risk analysis of lack of water supply (water storage tanks ZB1 and ZB2 works)

i	Charakterystyka stanów eksploatacyjnych		Wydajność [m ³ /d]		Suma [m ³ /d]	Niedobór [m ³ /d]	Wskaźniki K		Prawdopodobieństwo zajścia stanu i	P _i ·ΔQ
	ZB1	ZB2	Q _{ZB1}	Q _{ZB2}	Q	ΔQ	K _{ZB1} lub (1 - K _{ZB1})	K _{ZB2} lub (1 - K _{ZB2})	P _i	
1	+	+	1250	450	1700	5338,48	0,996	0,991	0,9870	5269,27
2	+	-	1250	0	1250	5788,48	0,996	0,009	0,0089	51,89
3	-	+	0	450	450	6588,48	0,004	0,991	0,0039	26,12
4	-	-	0	0	0	7038,48	0,004	0,009	0,000036	0,25
Σ										5347,53

względne braku dostawy wody IRBDW uwzględniając zgromadzoną wodę w zbiornikach ZB1 i ZB2: Q_{ZB} = 25%, Q_{ZB} = 50%, Q_{ZB} = 75%, Q_{ZB} = 100%, która zależy od stanu wody w zbiornikach w danej godzinie doby. Obliczenia dla 50%, 75% oraz 100% przeprowadzono analogicznie jak dla 25%.

Przedstawiona analiza i ocena ryzyka braku dostawy wody w sytuacji kryzysowej

pokazała jak ważną rolę w systemie odgrywają sieciowe zbiorniki wodociągowe. W analizowanym przypadku, całkowita pojemność zbiorników wodociągowych praktycznie pokrywa maksymalne dobowe zapotrzebowanie na wodę. Należy jednak pamiętać, że zbiorniki wodociągowe pracują w cyklu dobowym i w różnych godzinach doby mają różną pojemność. Tak więc ich możliwości zapasowe zależą od

Tabela 4. Wyniki analizy ryzyka bezwzględnego braku dostawy wody do PsDyW (prace ZI oraz zbiorniki)

Table 4. The results of absolute risk analysis of lack of water supply (ZI and water storage tanks works)

i	Charakterystyka stanów eksploatacyjnych			Wydajność [m ³ /d]			Suma [m ³ /d]	Niedobór [m ³ /d]	Wskaźniki K			Prawdopodobieństwo zajścia stanu i	P _i ·ΔQ
	ZI	ZB1	ZB2	Q _{ZI}	Q _{ZB1}	Q _{ZB2}	Q	ΔQ	K _{ZI} lub (1 - K _{ZI})	K _{ZB1} lub (1 - K _{ZB1})	K _{ZB2} lub (1 - K _{ZB2})	P _i	
1	+	+	+	17280	1250	450	18980	0	0,9659	0,996	0,991	0,9534	0
2	+	+	-	17280	1250	0	18530	0	0,9659	0,996	0,009	0,00866	0
3	+	-	+	17280	0	450	17730	0	0,9659	0,004	0,991	0,00383	0
4	-	+	+	0	1250	450	1700	5338,48	0,0341	0,096	0,991	0,03366	179,69
5	-	-	+	0	0	450	450	6588,48	0,0341	0,004	0,991	0,000135	0,89
6	+	-	-	17280	0	0	17280	0	0,9659	0,004	0,009	0,000035	0
7	-	+	-	0	1250	0	1250	5788,48	0,0341	0,996	0,009	0,00031	1,77
8	-	-	-	0	0	0	0	7038,48	0,0341	0,004	0,009	0,0000012	0,0086
Σ													182,35

Wartość oczekiwana niedoboru zasilania wynosi E (ΔQ) = 182,35 m³/d. Dla E (ΔQ) = 182,35 m³/d i $Q_{\max d} = 7038,48$ m³/d, IRBDW = 2,59% co zgodnie z tabelą 3 odpowiada ryzyku tolerowanemu.

W kolejnym etapie przeanalizowano pracę zbiorników wodociągowych ZB1 = 5000 m³ oraz ZB2 = 1800 m³. Założono 25% napełnienie zbiornika ZB1 ($25\% \cdot 5000 \text{ m}^3 = 1250 \text{ m}^3$) oraz 25% napełnienie zbiornika ZB2 – ($25\% \cdot 1800 \text{ m}^3 = 450 \text{ m}^3$). W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń dla stanu gdy pracują tylko zbiorniki ZB1 i ZB2.

Wartość oczekiwana niedoboru zasilania wynosi E (ΔQ) = 5347,53 m³/d. Dla E (ΔQ) = 5347,53 m³/d i $Q_{\max d} = 7038,48$ m³/d, IRBDW = 76% co zgodnie z tabelą 3 odpowiada ryzyku nieakceptowalnemu.

W tabeli 6 zestawiono wyniki wartości oczekiwanej niedoboru wody zaistniałej w sytuacji kryzysowej E(ΔQ), oraz ryzyko

Tabela 6. Zestawienie wyników analizy ryzyka bezwzględnego oraz względnego braku dostawy wody do miasta uwzględniając cztery charakterystyczne napełnienia w zbiornikach

Table 6. The results of the analysis of the absolute and the relative risk of lack of water supply for the city taking into account the four characteristic fillings in the storage tanks

	ZI	ZB1	ZB2	ΔQ [m ³ /d]	E(ΔQ) [m ³ /d]	IRBDW [%]
	Stany eksploatacyjne					
Pracujący ZI oraz zbiorniki o napełnieniu 25%	+	+	+	0	182,35	2,59
	+	+	-	0		
	+	-	+	0		
	-	+	+	5338,48		
	-	-	+	6588,48		
	+	-	-	0		
	-	+	-	5788,48		
	-	-	-	7038,48		
Pracujący ZI oraz zbiorniki o napełnieniu 50%	+	+	+	0	124,69	1,77
	+	+	-	0		
	+	-	+	0		
	-	+	+	3638,48		
	-	-	+	6138,48		
	+	-	-	0		
	-	+	-	4538,48		
	-	-	-	7038,48		

Tabela 6. cd.
Table 6.

Pracujący ZI oraz zbiorniki o napełnieniu 75%	+	+	+	0	67,03	0,95
	+	+	-	0		
	+	-	+	0		
	-	+	+	1938,48		
	-	-	+	5688,48		
	+	-	-	0		
	-	+	-	3288,48		
	-	-	-	7038,48		
Pracujący ZI oraz zbiorniki o napełnieniu 100%	+	+	+	0	9,37	0,13
	+	+	-	0		
	+	-	+	0		
	-	+	+	238,48		
	-	-	+	5238,48		
	+	-	-	0		
	-	+	-	2038,48		
	-	-	-	7038,48		

godziny, w której nastąpiła awaria. Szczegółowa analiza pracy zbiorników wodociągowych wymaga przeprowadzenia symulacji komputerowej z uwzględnieniem modelu hydraulicznego sieci i pompowni drugiego stopnia [1, 4, 11].

Wnioski

Możliwości produkcyjne ujęć wody powierzchniowej często znacznie przewyższają obecne zapotrzebowanie na wodę. Z tego względu nawet systemy wodociągowe posiadające jedno ujęcie, które współpracują ze zbiornikami charakteryzując się niskim poziomem ryzyka braku dostawy wody. Kluczowym aspektem jest tutaj utrzymanie wysokiej wartości wskaźnika gotowości podsystemu dostawy wody. Obowiązek przeprowadzenia oceny ryzyka dla ujęcia wody wynikający z zapisów ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne [16] oraz Dyrektywy UE [3] w tym aspekcie należy ocenić pozytywnie.

Wyłączenie głównego ujęcia wody powoduje konieczność skorzystania z wody zgromadzonej w zbiornikach wodociągowych, po czym następuje szybki spadek ciśnienia wody w sieci wodociągowej. Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie sieciowych zbiorników wodociągowych w znacznym stopniu wpływa na zmniejszenie ryzyka braku dostawy wody do konsumentów, przy czym istotne znaczenie ma czas wystąpienia

awarii. W artykule uwzględniono pojemność zbiorników wodociągowych oraz fakt, że w ciągu doby magazynują one różną ilość wody. Nie wzięto pod uwagę sytuacji związanych z potencjalnym ograniczeniem wydajności ujęcia wody, np. w przypadku powodzi lub awarii. W tym aspekcie należy uwzględnić wnioski wyciągnięte z analizy ryzyka przeprowadzonej zgodnie z wymogami ustawy dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne [16] oraz Dyrektywy UE [3].

Przedstawione metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa systemów wodociągowych, w tym przede wszystkim metoda oparta na wartości oczekiwanej, stanowią odpowiednie narzędzie pozwalające na ocenę prawdopodobieństwa i ryzyka braku dostawy wody w sytuacji kryzysowej, jak również ocenę potencjalnych możliwości pokrycia tych braków. Szczególnie istotne w zakresie wymagań nowej Dyrektywy [3] jest prewencyjne podejście do eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę, co ma na celu zmniejszenie liczby zdarzeń niepożądanych i odpowiednie zabezpieczenie konsumentów przed ich skutkami.

LITERATURA

- [1] Boryczko K., Piegdoń I., Szpak D., Żywiec J.: „Risk Assessment of Lack of Water Supply Using the Hydraulic Model of the Water Supply”. *Resources* 2021, 10, 43. <https://doi.org/10.3390/resources10050043>
- [2] Budziło B.: „Nieawidomości wybranych systemów

zaopatrzenia w wodę w południowej Polsce”. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków 2010.

- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
- [4] Kowalski D., Kowalska B., Suchorab P.: „Propozycja metody diagnostycznej dla sieci wodociągowej”. *Instal* 7-8/2021, 55-60. DOI:10.36119/15.2021.7-8.8
- [5] Kutyłowska M.: „Neural network approach for failure rate prediction”. *Engineering Failure Analysis* 2015, 47, 41-48. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.10.007
- [6] Kwietniewski M., Rak J. R.: „Nieawidomości infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce”. *Komitet Inżynierii Łąkowej i Wodnej PAN*, Warszawa 2010.
- [7] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczkiwicz H.: „Nieawidomości wodociągów i kanalizacji”. *Arkady*, Warszawa 1993.
- [8] Rak J. R., Boryczko K.: „The issue of water resources diversification in water supply systems”. *Journal of KONBiN* 3(35)/2015. DOI:10.1515/jok-2015-0049
- [9] Rak J. R., Tchórzewska-Cieślak B.: „Ryzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę”. *Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.*, 2013.
- [10] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294).
- [11] Studziński A., Pietrucha-Urbanik K.: „Failure risk analysis of water distributions systems using hydraulic models on real field data”. *Ekonomia i Środowisko*, 2019, 68, 152-165. <https://doi.org/10.34659/d0cp-hn27>
- [12] Szpak D., Boryczko K., Żywiec J., Piegdoń I., Tchórzewska-Cieślak B., Rak J. R.: „Risk Assessment of Water Intakes in South-Eastern Poland in Relation to the WHO Requirements for Water Safety Plans”. *Resources* 2021, 10, 105. <https://doi.org/10.3390/resources10100105>
- [13] Szpak D., Boryczko K., Żywiec J., Rak J. R.: „Metody matrycowe wykorzystywane w analizie ryzyka ujęć wody”. *Instal* 7-8/2021, 40-44. DOI:10.36119/15.2021.7-8.6
- [14] Tchórzewska-Cieślak B.: „Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody”. *Oficina Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, Rzeszów 2011.
- [15] Tchórzewska – Cieślak B., Piegdoń I., Szpak D.: „Water supply of urban agglomeration in crisis situation”. *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars* 2014, Vol. 5, No. 1, 143 – 154.
- [16] Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz. U. 2017 poz. 1566 z późn. zm.).
- [17] Wiczysty A.: „Nieawidomości systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, t. I i II”. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków 1990.
- [18] Wiczysty A., Rak J. R.: „Zaopatrzenie w wodę do picia w sytuacjach nadzwyczajnych”. *Prace naukowe GIG, seria: Konferencje*, 18, 1997, 85-92.
- [19] Zimoch I., Mulik B.: „Dyrektywa w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi – implementacja”. *Instal* 7/2020, 30-34. DOI:10.36119/15.2020.7.5