

Sposoby wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych

Methods for determining the risk of sewer failures

EMILIA KULICZKOWSKA, KATARZYNA WIJAS

DOI 10.36119/15.2020.4.8

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych metod oceny ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych w odniesieniu do dwóch parametrów tzn. prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przewodów oraz konsekwencje ich występowania. Omówiono czynniki brane pod uwagę oraz sposoby wyznaczania obu parametrów. Rezultatem prowadzonych prac jest wskazanie różnic w określaniu poziomu ryzyka oraz poszczególnych jego parametrów w przedstawionych metodach. Metody wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych są przydatne w planowaniu działań związanych z bezwykopową rehabilitacją, wymianą lub na przykład w planowaniu czyszczenia wnętrza przewodów z osadów.

Słowa kluczowe: ryzyko, prawdopodobieństwo awarii, konsekwencje awarii, przewody kanalizacyjne

The aim of the article was to present the selected method of risk assessment of sewer failures based on two parameters, i.e. probability of sewer failures and consequences of their occurrence. Factors that were taken into account and methods of determining both parameters were discussed. The result was to indicate differences in determining the risk level and some risk parameters in the presented methods. Determining the risk of sewer failure is a useful method in planning activities related to their trenchless rehabilitation, replacement or, for example, planning of cleaning the pipes from deposits.

Keywords: risk, likelihood of failure, consequence of failure, sewers

Wprowadzenie

Długoletnia eksploatacja, błędy popełniane przy projektowaniu i budowie przewodów kanalizacyjnych, a także niewłaściwe działania konserwacyjne, skutkują występowaniem awarii. W odniesieniu do przewodów kanalizacyjnych wyróżnia się dwa rodzaje awarii – konstrukcyjne i eksploatacyjne. Wyznaczanie poziomu ryzyka w odniesieniu do przewodów kanalizacyjnych stało się bardzo przydatną metodą w podejmowaniu decyzji. Na przykład w oparciu o ustaloną wartość ryzyka awarii konstrukcyjnej planuje się działania związane z rehabilitacją lub wymianą przewodu. Z kolei na podstawie wyznaczonej wielkości ryzyka awarii eksploatacyjnej można planować czyszczenie przewodów, wycinanie przerastających korzeni, czy wskazywać termin kolejnej kontroli stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych.

Ryzyko jest miarą, która charakteryzuje bezpieczeństwo, intuicyjnie rozumiane jako zaprzeczenie bezpieczeństwa. Zgod-

nie z definicją miara ryzyka jest zwykle wyrażana jako iloczyn prawdopodobieństwa (względnie intensywności) wystąpienia zdarzenia niepożądanego oraz skutków wywołanych zajściem tego zdarzenia. W zależności od danych, jakimi się dysponuje, może być ono wyznaczane metodą ilościową, jakościową lub ilościowo-jakościową [3, 4].

Stan wiedzy i ocena ryzyka w systemach wodociągowych są znacznie bardziej rozwinięte. Ponieważ systemy te są systemami złożonymi, szereg różnych czynników wpływa na powstawanie w nich awarii. Zaawansowane prace doprowadziły do rozbudowania podstawowego wzoru, według którego ryzyko wyznaczone jest jako iloczyn prawdopodobieństwa i konsekwencji wystąpienia awarii. W najnowszych propozycjach do wyznaczenia ryzyka awarii przewodów wodociągowych stosuje się już nie tylko dwa, ale także trzy, cztery, a nawet pięć parametrów. Bardzo duży wkład w tę dziedzinę, zarówno w skali krajowej, jak i międzyna-

rodowej, ma zespół pracowników z Politechniki Rzeszowskiej [14, 17 – 21].

Z ryzykiem mamy do czynienia praktycznie każdego dnia, na przykład w pracy, w bankowości, czy w medycynie. Popularne powiedzenie odnoszące się do zachowania możliwie najlepszego stanu zdrowia człowieka – „lepiej zapobiegać, niż leczyć” można odnieść również do przewodów kanalizacyjnych. Mając na uwadze ich awaryjność, lepiej ocenić ryzyko awarii i zapobiegać ich występowaniu, niż zmagać się z konsekwencjami awarii, gdy już wystąpią. Według [1] koszt naprawy przewodu kanalizacyjnego, który uległ awarii może być od dwóch do dziesięciu razy wyższy niż koszty działań związanych z zapobieganiem awarii. Stąd tak ważne jest wyznaczanie ryzyka awarii przewodów i jego redukcja poprzez podejmowanie działań zaradczych.

Ryzyko awarii przewodów kanalizacyjnych w większości proponowanych metod opiera się na dwóch parametrach – prawdopodobieństwie i konsekwencjach

dr hab. inż. Emilia Kuliczowska, prof. PŚk, <https://orcid.org/0000-0001-5807-860X> – Katedra Geotechniki, Geomatyki i Gospodarki Odpadami, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Politechnika Świętokrzyska, email: emkulicz@tu.kielce.pl
mgr inż. Katarzyna Wijas, <https://orcid.org/0000-0002-6355-177X> – Katedra Sieci i Instalacji Sanitarnych, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Politechnika Świętokrzyska, email: wijas.katarzyna@wp.pl

ich wystąpienia. Prawdopodobieństwo awarii kanałów najczęściej jest odnoszone do ich stanu technicznego, czasem do ich stanu technicznego, czasem do uwzględnieniem dodatkowych cech charakteryzujących przewód. Konsekwencje awarii są najczęściej opisywane przez czynniki, które mają wpływ na wielkość tych konsekwencji i zazwyczaj są one dzielone na trzy kryteria: środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. Różne są jednak sposoby wyznaczania obu parametrów. Należy podkreślić, że istnieją metody do prognozowania stanu technicznego kanałów, a tym samym określania prawdopodobieństwa ich awarii, jednak nie były one włączone do procedury oceny ryzyka awarii [1]. Takie propozycje zostały opisane również w polskiej literaturze, na przykład w [5, 16].

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych metod oceny ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych w odniesieniu do dwóch parametrów tzn. prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przewodów oraz konsekwencje ich występowania.

Metoda Pipeline Assessment Certification Program (PACP) do wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych

Amerykańskie wytyczne [15] w załączniku „D” proponują zastosowanie podstawowej definicji ryzyka według wzoru (1), gdzie ryzyko (ang. *Risk*) jest wyznaczane jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia awarii (ang. *Likelihood of Failure – LoF*) oraz konsekwencji jej wystąpienia (ang. *Consequence of Failure – CoF*). Awarię przewodu kanalizacyjnego zdefiniowano, na potrzeby proponowanej metody, jako niezdolność do odprowadzania ścieków (ang. *inability to convey flow*).

$$\text{Risk} = \text{Likelihood of Failure (LoF)} \cdot \text{Consequence of Failure (CoF)} \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo awarii odnosi się do obliczonej wartości liczbowej, która reprezentuje stan techniczny przewodów kanalizacyjnych określony najczęściej z zastosowaniem wytycznych amerykańskich PACP do oceny stanu technicznego przewodów. W celu dokonania takiej oceny proponowana jest metoda szybkiej oceny, tzw. PACP Quick Rating, opisana w załączniku „C” wytycznych [15]. W metodzie tej każdemu odcinkowi poddanemu inspekcji CCTV przypisywany jest kod składający się z czterech znaków. Na przykład, jeżeli przewód kanalizacyjny po przeprowadzeniu inspekcji został opisany

kodelem 5642, oznacza to, że w kanale zaobserwowano sześć uszkodzeń (druga pozycja kodu) zaklasyfikowanych do najwyższej klasy, tzn. klasy 5, oznaczającej najbardziej niekorzystny stan techniczny (pierwsza pozycja kodu) oraz dwa uszkodzenia (czwarta pozycja kodu) przyporządkowane do klasy 4 stanu technicznego. Jeżeli w kanale zaobserwowano więcej niż dziewięć uszkodzeń w danej klasie, wówczas w miejsce pozycji drugiej i czwartej kodu wpisuje się litery, tzn. A = 10 – 14, B = 15 – 19, C = 20 – 24 itd. [2, 15].

Wartość liczbową określającą prawdopodobieństwo awarii jest wyznaczana poprzez podzielenie liczby utworzonej z pierwszych dwóch cyfr takiego kodu przez liczbę 10. Dodatkowo stosuje się następujące zasady:

- jeżeli dane dotyczące oceny stanu technicznego nie są dostępne (brak czterocyfrowego kodu), wówczas:

$$\text{LoF} = \frac{0}{10} = 0,0$$

- jeżeli dane dotyczące oceny stanu technicznego są dostępne, a w przewodzie nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń (kod 0000), wówczas do ilorazu liczby utworzonej z pierwszych dwóch cyfr kodu oraz liczby 10 dodawana jest wartość 1,0:

$$\text{LoF} = \frac{0}{10} + 1,0 = 1,0$$

- jeżeli w przewodzie kanalizacyjnym jest nie więcej niż 9 uszkodzeń z najwyższej zarejestrowanej klasy stanu technicznego (np. kod 5248), liczbę utworzoną z pierwszych dwóch cyfr kodu dzieli się przez 10:

$$\text{LoF} = \frac{52}{10} = 5,2$$

- jeżeli w przewodzie kanalizacyjnym zarejestrowano więcej niż 9 uszkodzeń najwyższej klasy (wówczas w kodzie zamiast drugiej cyfry jest litera, np. 5B21), wówczas litera jest zastępowana wartością 0, a do ilorazu dodawana jest wartość 1,0:

$$\text{LoF} = \frac{50}{10} + 1,0 = 6,0$$

Według proponowanej metody prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przewodu kanalizacyjnego może osiągnąć wartość maksymalną $\text{LoF} = 6,0$ pod warunkiem, że w przewodzie występuje więcej niż dziewięć uszkodzeń klasy piątej. Co więcej, jeżeli $\text{LoF} = 0,0$ nie oznacza to, że prawdopodobieństwo wystąpienia awarii nie istnieje. Jest to informacja, że

brak jest danych dotyczących stanu technicznego przewodu kanalizacyjnego i powinny być one niezwłocznie uzupełnione, by umożliwić prawidłową ocenę prawdopodobieństwa awarii [15].

Do oceny konsekwencji awarii (CoF) przewodów kanalizacyjnych rozważa się kombinacje bezpośredniego i pośredniego wpływu, potencjalnie mogącej wystąpić awarii, na otoczenie oraz społeczeństwo. Czynniki dzieli się na trzy grupy, tzn. ekonomiczne, społeczne oraz środowiskowe [15].

W metodzie [15] zaproponowano, by konsekwencje, podobnie jak prawdopodobieństwo, podzielić na sześć kategorii, by pokazać, że w równym stopniu wpływają na ryzyko awarii przewodów kanalizacyjnych. Przyjęto skalę od 1 do 6, gdzie 1 to najmniejsze konsekwencje, zaś 6 to największe, najbardziej poważne konsekwencje awarii przewodów kanalizacyjnych. Ocena konsekwencji powinna być dostosowana do wymagań przedsiębiorstwa kanalizacyjnego, które na podstawie własnej wiedzy i doświadczenia potrafi ocenić rozważane parametry oraz ich wpływ na otoczenie. Niektóre z czynników mogą być klasyfikowane nie tylko do jednego kryterium. Na przykład dla przewodu kanalizacyjnego, który uległ awarii, zlokalizowanego pod rzeką, istnieje ryzyko skażenia wód (kryterium środowiskowe), co może spowodować czasowe ograniczenia w rekreacyjnym korzystaniu z kąpielii (kryterium społeczne), a także konieczność zapłaty kar pieniężnych za skażenie wody (kryterium ekonomiczne). W wytycznych zaproponowano czynniki wpływające na konsekwencje awarii, przy czym zaznaczono, że przedsiębiorstwa w ocenie ryzyka mogą dodać swoje czynniki lub wykorzystać na przykład jedynie część spośród zaproponowanych. Zaleca się wyznaczenie ogólnej kategorii konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych (CoF) z zastosowaniem średniej ważonej.

Pierwszym ze wskazanych czynników, który wpływa na konsekwencje awarii przewodów kanalizacyjnych jest średnica przewodu. Kanały o dużych średnicach to takie, które obsługują dużą liczbę klientów, tzn. odbierają ścieki na przykład z dzielnicy lub nawet całego miasta. Przewody o dużych średnicach są zazwyczaj głębiej posadzone, występują na końcowych odcinkach sieci, stąd generują one znacznie wyższe koszty napraw w przypadku awarii. Dlatego też, im większa średnica przewodu, tym wyższa kategoria konsekwencji awarii takiego kanału (tabela 1). Czynnikiem ten może należeć do kryterium zarówno ekonomicznego, jak i społecznego.

Tabela 1. Kategorie konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych w zależności od średnic przewodów [15]

Table 1. Categories of consequences of sewer pipe failure depending on the pipe diameters [15]

Średnica	Kategoria CoF
< 8" (< 203 mm)	1
8" – 10" (203 – 254 mm)	2
10" – 15" (254 – 381 mm)	3
15" – 21" (381 – 533 mm)	4
21" – 30" (533 – 762 mm)	5
≥ 30" (≥ 762 mm)	6

Kolejnym analizowanym czynnikiem jest zagłębienie przewodu kanalizacyjnego. Im głębiej kanał jest ułożony, tym wyższe koszty wiążą się na przykład z jego odkopaniem czy przeprowadzeniem ekspertyzy. Stąd też jest to czynnik głównie ekonomiczny, więc im większe zagłębienie, tym wyższa kategoria konsekwencji awarii takiego przewodu kanalizacyjnego (tabela 2).

Tabela 2. Kategorie konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych w zależności od zagłębienia przewodów [15]

Table 2. Categories of consequences of sewer pipe failure depending on the depth of pipe [15]

Zagłębienie	Kategoria CoF
< 6' (< 1,83 m)	1
6' – 10' (1,83 – 3,05 m)	2
10' – 14' (3,05 – 4,27 m)	3
14' – 18' (4,27 – 5,49 m)	4
18' – 24' (5,49 – 7,32 m)	5
≥ 24' (≥ 7,32 m)	6

Zamiast uwzględniania średnic poszczególnych przewodów, można na przykład określać pozycję danego odcinka (kolejność) w całej sieci kanalizacyjnej. Wymaga to jednak zastosowania szczegółowych map systemu kanalizacyjnego. Ustalenie pozycji kanału polega na zsumowaniu odcinków przewodów od początku sieci, aż do danego odcinka włączenia. Zaproponowano następujący podział na kategorie konsekwencji awarii w zależności od kolejności odcinka od początku sieci kanalizacyjnej (tabela 3).

Alternatywą dla wyznaczania pozycji odcinka w sieci kanalizacyjnej może być

Tabela 3. Kategorie konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych w zależności od kolejności odcinka w sieci kanalizacyjnej [15]

Table 3. Categories of consequences of sewer pipe failure depending on the relative network position [15]

Względna pozycja w sieci	Kategoria CoF
10 lub mniej	1
11 – 30	2
31 – 70	3
71 – 120	4
121 – 150	5
150	6

na przykład liczba obsługiwanych przyłączy kanalizacyjnych, włączonych do sieci kanalizacyjnej od początku sieci aż do rozpatrywanego kanału włącznie. Sumowana jest wówczas liczba przyłączy kanalizacyjnych włączonych do sieci. Rozpatrywane czynniki (pozycja odcinka w sieci lub liczba przyłączy) należą głównie do kryterium społecznego konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych.

Innymi, równie ważnymi, czynnikami wpływającymi na wielkość konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych są na przykład:

- lokalizacja przewodu kanalizacyjnego – ułożenie przewodu kanalizacyjnego pod drogą główną będzie miało bardziej poważne konsekwencje w przypadku awarii, niż na przykład pod drogą lokalną czy nieutwardzoną. Inaczej będzie również w sytuacji, gdy przewód będzie przebiegał na przykład pod basenem, na co również zwrócono uwagę w [15]; czynnik ten wpływa na konsekwencje zarówno ekonomiczne, jak i społeczne,

z terenów mieszkalnych, jak i przemysłowych, ale także ze szpitali, szkół czy budynków użyteczności publicznej. Odprowadzanie ścieków od tak „znaczących” klientów może być kluczowe dla pracy całej sieci kanalizacyjnej, stąd też czynnik ten uznano za istotny, należący do kryterium społecznego,

- dostępność przewodu kanalizacyjnego – stosunkowo łatwy i szybki dostęp do przewodu kanalizacyjnego jest sprawą kluczową w przypadku awarii takiego przewodu. Możliwość dojazdu, zbadania i naprawy przewodu lub jego wymiany wpływa choćby na czas przeprowadzania takich czynności, a tym samym na możliwie najkrótsze ograniczenia, na przykład w ruchu drogowym [15].

Przykład wyznaczania ogólnej kategorii konsekwencji awarii przewodu kanalizacyjnego (CoF) został przedstawiony w tabeli 4. Dane dla przewodu kanalizacyjnego:

- średnica przewodu – 12" (305 mm),
- zagłębienie kanału – 9' (2,74 m),

Tabela 4. Przykład wyznaczania ogólnej kategorii konsekwencji awarii przewodu kanalizacyjnego [15]

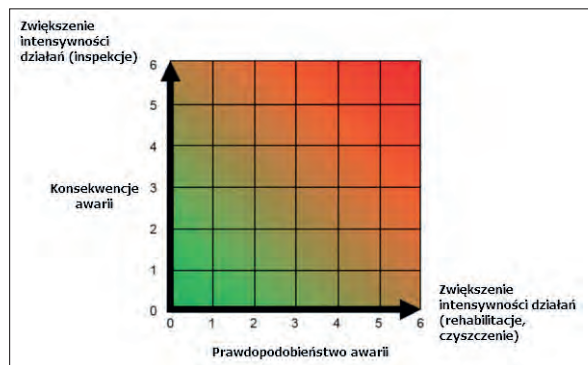
	Kategoria konsekwencji awarii		
	Kryterium ekonomiczne	Kryterium społeczne	Kryterium środowiskowe
Średnica i zagłębienie przewodu			
Średnica 12" (305 mm)	3	3	
Zagłębienie 9' (2,74 m)	2		
Lokalizacja przewodu kanalizacyjnego			
Droga główna	4	4	
Bliskość terenów wrażliwych pod względem środowiskowym			
40 stóp (12 m) od potoku			5
Obsługa klientów o dużym znaczeniu			
2 mile (3,2 km) za szpitalem		3	
Dostępność przewodu kanalizacyjnego			
Brak dostępu	2		
Suma	11	10	5
Suma/Maksymalna suma	11/24 = 0,458	10/18 = 0,555	
Waga kryterium	1/4	1/4	1/2
(Suma/Maksymalna suma) · Waga kryterium	0,458 · 1/4 = 0,115	0,555 · 1/4 = 0,139	0,833 · 1/2 = 0,417
$CoF = 6 \cdot \sum \left(\left(\frac{Suma}{Maksymalna\ suma} \right) \cdot Waga\ kryterium \right)$	$6 \cdot (0,115 + 0,139 + 0,417) = 4,03$		

- bliskość terenów wrażliwych pod względem środowiskowym – nieszczelne przewody kanalizacyjne, z których następuje eksfiltracja ścieków do gruntu i wód gruntowych stanowią zagrożenie skażenia środowiska. Według wytycznych [15] należy ustalić odległości takich przewodów od na przykład zbiorników czy cieków wodnych,
 - obsługiwani klienci – sieci kanalizacyjne odprowadzają ścieki zarówno lokalizacja – droga główna (ang. collector road),
 - obsługa klientów – w odległości 2 mil (3,2 km) za szpitalem,
 - bliskość terenów wrażliwych pod względem środowiskowym – 40 stóp (12 m) od potoku,
 - bez dostępu do przewodu kanalizacyjnego [15].
- W tym przypadku zdecydowano, że kryterium środowiskowe będzie najbardziej

znaczące, zaś ekonomiczne i społeczne nieco mniej istotne. Dlatego też zaproponowano odpowiednio wagi: 1/2, 1/4, 1/4.

Przedstawiony przykład stanowi jedynie propozycję wyznaczania kategorii konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych. Wagi można przyporządkować nie koniecznie kryteriom (jak w przykładzie w tabeli 4), ale konkretnym czynnikom, np. średnica może mieć większą wagę niż zagłębienie itd.

Po ustaleniu kategorii prawdopodobieństwa i kategorii konsekwencji możliwe jest stworzenie macierzy ryzyka (rys. 1).



Rysunek 1. Matryca ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych [13]
Figure 1. Matrix of sewer pipe risk failure [13]

Kolor zielony dotyczy przewodów kanalizacyjnych charakteryzujących się niewielkim ryzykiem awarii – małe prawdopodobieństwo awarii i małe konsekwencje. W miarę wzrostu zarówno prawdopodobieństwa, jak i konsekwencji, następuje stopniowe przejście do wyższych poziomów ryzyka (przejście w kolor czerwony na macierzy). Zwiększanie się prawdopodobieństwa awarii (występowanie w przewodach poważnych uszkodzeń) powinno skutkować bardziej intensywnymi działaniami związanymi z rehabilitacją lub konserwacją przewodów. Zwiększanie się konsekwencji awarii w kierunku bardzo kosztownych napraw, dotkliwych skutków dla środowiska, czy społeczeństwa, powinno skutkować częstszymi badaniami przewodów, czy na przykład czyszczeniem (jasnozielony obszar na wykresie). Kolor ciemnozielony dotyczy tych przewodów, które można poddawać takim zabiegom rzadziej.

Na podstawie tak przygotowanej macierzy możliwe jest planowanie działań zaradczych, ustalając cel, zakres oraz wysokość środków finansowych, jakie można przeznaczyć na poszczególne zadania. Na podstawie oszacowanych kosztów rehabilitacji przewodów można wrysować na macierz linię. Linie te mogą oznaczać kwotę z budżetu, którą można wykorzystać na rehabilitację przewodów, która byłaby konieczna do ukończenia wszystkich projektów [15].

Metoda Smith'a i Baldwin'a do wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych

W [22] zaproponowano wyznaczanie ryzyka na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii oraz ich konsekwencji. Zastosowanie metody powinno być poprzedzone m. in. monitorowaniem przepływu ścieków i modelowaniem hydraulicznym w celu zidentyfikowania infiltracji oraz przepustowości kanałów, a także oceną stanu technicznego przewodów z zastosowaniem inspekcji CCTV oraz ustaleniem planu dzia-

łań na okres 20 lat. Celami prowadzonych prac były ocena prawdopodobieństwa i konsekwencji awarii infrastruktury podziemnej, przydzielenie każdemu przewodowi punktów (kategorii, poziomów ryzyka), zastosowanie tych punktów celem ustalenia priorytetów zadań, a na koniec aktualizacja kategorii ryzyka w ramach przeprowadzanych systematycznie działań zaradczych (GIS, ModelBuilder).

Zaproponowano, by do określenia prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnych brać pod uwagę parametry konstrukcyjne, hydrauliczne, eksploatacyjne oraz napływ wód przypadkowych do wnętrza kanałów. W celu wyznaczenia kategorii konsekwencji awarii rozpatrywano czynniki dla trzech kryteriów: środowiskowego, społecznego i ekonomicznego.

Prawdopodobieństwu przyporządkowano pięć liczb: 1 (małe prawdopodobieństwo) 3, 5, 8 do 10 (wysokie prawdopodobieństwo). Jest ono wyznaczone z uwzględnieniem czterech kategorii zróżnicowanych wagami, tzn. stan techniczny (waga 50%), stan eksploatacyjny (waga 20%), przepustowość (waga 10%) oraz infiltracja (waga 20%). Dla każdej kategorii podano wskaźnik ją charakteryzujący, tzn. stan techniczny – najwyższa klasa uszkodzenia zaobserwowanego podczas inspekcji CCTV oraz wiek kanału, stan eksploatacyjny – klasa stanu eksploatacyjnego w odniesieniu do inspekcji, przepustowość – przewidywane dociążenie sieci ściekami oraz stopień napływu

wód przypadkowych do kanału. W oparciu o te dane możliwe jest wyznaczenie kategorii prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnego stosując średnią ważoną.

W celu wyznaczenia ogólnej kategorii konsekwencji awarii przewodów kanalizacyjnych zaproponowano pięć wariantów konsekwencji: 1 (małe), 3, 5, 8 do 10 (wysokie). Wskazano trzy kategorie oraz przypisane im wagi w celu poprawnej oceny wielkości strat. Były to:

- czynniki ekonomiczne, o wadze 30% charakteryzowane przez średnicę przewodu (natężenie przepływu ścieków),
- czynniki społeczne, o wadze 30% opisane przez wskaźniki tj. typ drogi, zagospodarowanie terenu, użyczenia, oraz
- czynniki środowiskowe, o wadze 40%, charakteryzowane przez odległość przewodu od wód powierzchniowych i wylotów kanałów burzowych.

W omawianej metodzie wyznaczone prawdopodobieństwo i konsekwencje mogą osiągać wielkość z zakresu od 0 do 10. Ryzyko wyznaczone jest w tej metodzie jako iloczyn obu parametrów i może przyjmować wartości z zakresu 1 – 100. Zgromadzone w opisany sposób dane wprowadzane są do programu ArcGIS ModelBuilder w celu dokonania analizy ryzyka awarii przewodów w całej sieci kanalizacyjnej.

Metoda irańska do wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych

Anbari i in. [1] zaproponowali metodę wyznaczania ryzyka awarii pozwalającą ustalać na przykład priorytety inspekcji przewodów kanalizacyjnych. W celu określenia poziomu ryzyka wykorzystali, podobnie jak w dwóch omówionych poprzednio metodach, prawdopodobieństwo awarii i jej konsekwencje.

Do wyznaczenia prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnych potrzebne było przeprowadzenie czterech etapów prac: przygotowanie danych wejściowych do modelu, nauka (kalibracja) sieci Bayesowskich, walidacja modelu i uzyskanie wyników modelu. Do przygotowania danych wejściowych modelu wykorzystywano dane o zarejestrowanych zdarzeniach awarii, protokoły z inspekcji, mapy GIS, wywiady z ekspertami, obserwacje terenowe i symulacje hydrauliczne. Z powodu braku danych prędkości przepływu ścieków w kanale uzyskano z symulacji hydraulicznej przy użyciu programu SewerCAD. Prawdopodobieństwo awarii wyznaczone było w oparciu o dane zaprezentowane w tabeli 5.

Tabela 5. Czynniki wpływające na prawdopodobieństwo awarii przewodów kanalizacyjnych [1]
Table 5. Impact factors in the calculation of the probability of failure [1]

Typ awarii	Uszkodzenia	Czynniki
Konstrukcyjna	Ścieranie się (erozja) i korozja	Wiek, materiał, powłoki, prędkość przepływu ścieków, ochrona katodowa (w przypadku rur stalowych i żeliwnych)
	Deformacje	Wiek, materiał, zagłębienie, natężenie ruchu drogowego (rodzaj drogi)
	Rysy, pęknięcia, zapadnięcia rur kanalizacyjnych	Wiek, średnica, wymiar, zagłębienie, poziom wód gruntowych*, natężenie ruchu drogowego
Hydrauliczna	Przeciekanie	Wiek, materiał, liczba przykanalików, poziom wód gruntowych
	Zablokowania przez osady	Wiek, materiał, średnica, prędkość przepływu ścieków, rodzaj systemu kanalizacyjnego (rozdzielczy/ogólnospławny)
	Zablokowania przez korzenie	Liczba drzew w sąsiedztwie kanału, gatunek drzew (głębokie lub płytkie korzenie), wiek, materiał, zagłębienie, średnica, liczba podłączonych przykanalików

(* jeżeli poziom wód gruntowych jest powyżej kanału)

W celu wyznaczenia ogólnej wielkości konsekwencji (TC – ang. *Total Consequences*) zastosowano wzór (2):

$$TC = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot Cl_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

gdzie:

- W_i – jest to waga przypisana i – temu czynnikowi wpływającemu na konsekwencje awarii,
- Cl_i – jest to wskaźnik konsekwencji dla czynnika wpływającego na konsekwencje,
- n – liczba czynników wpływających na konsekwencje awarii [1].

Wielkość wag W_i została określona przez grupę ekspertów i przyjmuje wartości z zakresu 0 – 10. Wartości wskaźników Cl_i mają wielkość w zakresie 0 – 100. W przypadku takich czynników jak: średnica przewodu, odległość przewodu kanalizacyjnego od wodociągowego, odległość od rzek oraz liczba klientów nie stosowane są wartości Cl_i , a zmienne ciągłe odpowiadające konkretnym wymiarom [1].

Czynniki wpływające na konsekwencje oraz ich wagi (W_i) i wskaźniki (Cl_i) podane zostały w tabelach 6 – 8.

W prezentowanej metodzie, wartości prawdopodobieństwa i konsekwencji dla poszczególnych odcinków sieci kanalizacyjnej nie mogły zostać przemnożone przez siebie (jak we wzorze (1)), ponieważ parametry zostały wyznaczone za pomocą dwóch różnych metod. Ostatecznie ryzyko zostało wyznaczone z zastosowaniem systemu wnioskowania rozmytego (*FIS* – ang. *Fuzzy Inference System*). Zaprezentowaną

Tabela 6. Wartości wskaźnika Cl_i w zależności od materiału i średnicy rur kanalizacyjnych [1]
Table 6. Cl_i index value depending on the material and the diameter of the sewer pipes [1]

Rury polietylenowe		Rury azbestowo-cementowe	
Średnica (mm)	Cl_i	Średnica (mm)	Cl_i
200	29	200	43
225	31	250	49
250	32	300	60
300	35	350	65
400	51	400	78
500	60	500	100
600	72		

- ryzyko średnie do wysokiego: 50 – 60,
- ryzyko wysokie: 60 – 100 [1].

Polskie propozycje wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych

W [4] zastosowano metodę wstępnej analizy zagrożeń PHA (ang. *Preliminary Hazard Analysis*) do oceny ryzyka awarii sieci kanalizacyjnej w Krakowie. Za kryterium prawdopodobieństwa uszkodzenia przewodów kanalizacyjnych przyjęto wartość wskaźnika jednostkowej intensywności

Tabela 7. Wielkości wskaźników Cl_i oraz wag W_i dla poszczególnych czynników wpływających na konsekwencje awarii [1]

Table 7. Cl_i index value and W_i weights for impact factors with discrete categories values [1]

Czynnik	W_i	Cl_i
Koszt naprawy kanału	8	Główny kanał: 100
		Boczne kanały: 50
Jakość ścieków	6	Ścieki przemysłowe i niebezpieczne zanieczyszczenia: 100
		Ścieki ze szpitali: 75
		Ścieki ze zwykłych gałęzi przemysłu: 50
		Ścieki bytowe: 25
Lokalizacja w obszarze wpływu studni	7	Tak: 100
		Nie: 0
Znaczenie otaczających budynków i znaczenie subskrybentów	6	Szpitala i centra edukacyjne: 90
		Ważne komercyjne i publiczne centra, np. meczety, posterunki straży pożarnej, centra handlowe itp. oraz budynki rządowe: 80
		Centra przemysłowe: 60
		Różne centra publiczne, np. hotele: 35
		Budynki mieszkalne: 30
Typ drogi	8	Autostrada: 100
		Obwodnica: 90
		Droga szybkiego ruchu: 80
		Arteria drogowa: 60
		Droga główna: 45
		Droga lokalna: 20
		Aleja: 10
		Nie zlokalizowany pod drogą: 0
Lokalizacja pod torami kolejowymi lub w ich pobliżu	7	Tak: 100
		Nie: 0
Odległość od miejsc publicznych (z punktu widzenia populacji)	7	Lotnisko, metro i terminale: 100
		Parki, centrum i centra biznesowe (rynk i centra handlowe): 75
		Szpitala, centra edukacyjne i miejsca krytyczne, np. straż pożarna, posterunki policji: 70
		Miejsca kultu religijnego, kultury i sportu: 50
		Inne miejsca publiczne i rządowe, np. urząd gminy, banki itp.: 45
		Nie znajduje się w pobliżu miejsca publicznego: 0

Tabela 8. Wielkości wskaźników Cl_i oraz wag W_i dla czynników o wielkościach ciągłych (fragment tabeli [1])

Table 8. Cl_i index value and W_i weights for impact factors with continuous variables (a part of table) [1]

Czynnik	W_i	Cl_i
Odległość kanału (d) od poziomu wód gruntowych (m)	5	$Cl = 0,0001d^4 - 0,0124d^3 + 0,4565d^2 - 9,1351d + 100$
Średnica kanału (mm)	8	$Cl = -2E - 10d^4 + 6E - 07d^3 - 0,0006d^2 + 0,2668d + 0,1879$
Odległość kanału od przewodu wodociągowego (cm)	5	$Cl = 0,0071d^2 - 1,7186d + 99,963$
Odległość kanału od rzek (m)	5	$Cl = 4E - 05d^4 - 0,0045d^3 + 0,182d^2 - 4,4603d + 100$
Liczba subskrybentów	7	$Cl = 2E - 08n^3 - 8E - 05n^2 + 0,1329n + 1,2699$

metodę wykorzystano do oceny ryzyka awarii przewodów kanalizacji sanitarnej w Teheranie, dla której określono następujące poziomy ryzyka awarii:

- bardzo małe ryzyko: 0 – 20,
- małe ryzyko: 20 – 40,
- ryzyko małe do średniego: 40 – 50,

uszkodzeń kanałów – λ [$a^{-1} \cdot km^{-1}$], przyjmując trzy kategorie: mało prawdopodobne, gdy $\lambda \leq 0,03 a^{-1} \cdot km^{-1}$ ($W_1 = 1$), dość prawdopodobne, gdy $0,03 < \lambda \leq 0,3 a^{-1} \cdot km^{-1}$ ($W_1 = 2$) i prawdopodobne, gdy $\lambda > 0,03 a^{-1} \cdot km^{-1}$ ($W_1 = 3$). Założono także trzy kategorie konsekwencji awarii:

- małe, gdy awarie o małej złożoności usuwania, na przykanalikach i kanałach bocznych, brak utrudnień w ruchu drogowym, w przewodzie występują odkształcenia, niewielkie rozszczelnienia i pęknięcia ($W_2 = 1$),
- średnie, gdy awarie na przewodach zbiorczych i kolektorach, mogą wystąpić utrudnienia w ruchu drogowym, koszty środowiskowe, uszkodzenia typu zatamania kanałów, pęknięcia, zapadanie się studzienek ($W_2 = 2$),
- duże, gdy awarie na kolektorze głównym, bardzo odczuwalne utrudnienia w ruchu drogowym, uszkodzenie ciągów komunikacyjnych, wysokie koszty środowiskowe, uszkodzenia typu znaczące ubytki, naruszony grunt, zrzut do kanalizacji środków trujących, np. amoniaku ($W_2 = 3$).

Ostatecznie ryzyko (r) wyznaczone było jako iloczyn W_1 i W_2 . Wskazano trzy kategorie akceptacji ryzyka: tolerowane, gdy $r = 1$ (ryzyko bardzo małe) i $r = 2$ (ryzyko małe), kontrolowane, gdy $r = 3$ i $r = 4$ (ryzyko średnie) oraz nieakceptowalne, gdy $r = 6$ (ryzyko duże) i $r = 9$ (ryzyko bardzo duże).

W [8] przedstawiono analizę uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych betonowych i zaproponowano ustalanie kategorii prawdopodobieństwa awarii tych przewodów na podstawie zaobserwowanych w nim uszkodzeń. W [10] opisano metodę wyznaczania ryzyka awarii konstrukcyjnej betonowych przewodów kanalizacyjnych mogącej wystąpić na skutek wewnętrznej korozji ścian rur. Bazując na analizach wykonanych w [9], w [11] opracowano metodę wyznaczania ryzyka zapadania powierzchni dróg spowodowanego złym stanem technicznym przewodów kanalizacyjnych pod nimi posadowionych. W [7] scharakteryzowano zarządzanie ryzykiem awarii środowiskowej spowodowanej przerastaniem korzeni drzew i krzewów do wnętrza przewodów kanalizacyjnych. W [12] przygotowano również metodę wyznaczania ryzyka awarii środowiskowej i konstrukcyjnej dla długo eksploatowanych przewodów kanalizacyjnych kamionkowych.

Należy dodać, że głównym osiągnięciem dotyczącym wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych w wymienionych propozycjach [6 – 12] jest macierzowe ujęcie kategorii prawdopodobieństwa awarii jako funkcji wielkości zaobserwowanych uszkodzeń oraz macierzowe ujęcie kategorii konsekwencji awarii jako funkcji różnych czynników, takich jak np. średnica kanału, zagłębienie przewodu itp.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane zagraniczne sposoby wyznaczania ryzyka

awarii przewodów kanalizacyjnych. Dwie spośród nich zostały opracowane w Stanach Zjednoczonych, natomiast trzecia propozycja została opracowana w Iranie. Zamieszczono także krótki opis polskich propozycji wyznaczania ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych.

Analiza opisanych metod wykazała dużą złożoność problemu. Prawdopodobieństwo awarii, według propozycji zagranicznych, może być wyznaczane na przykład w oparciu: o stan techniczny przewodu i proste działania matematyczne, o stan techniczny przewodu i inne cechy charakteryzujące kanał, z wykorzystaniem średniej ważonej, a także na podstawie całej bazy zgromadzonych danych o stanie technicznym kanału, jego lokalizacji itp., z zastosowaniem modelu probabilistycznego – sieci Bayesowskich. W polskich propozycjach zaleca się branie pod uwagę stanu technicznego kanału ocenionego w oparciu o inspekcję CCTV kanału i zastosowanie metod macierzowych, a także na podstawie danych o awariach, które wystąpiły w przeszłości i wyznaczanie wskaźnika jednostkowej intensywności uszkodzeń.

Konsekwencje awarii są najczęściej oceniane za pomocą wzoru na średnią ważoną, gdzie uwzględniane są, w zależności od trzech kryteriów tj. środowiskowego, społecznego i ekonomicznego, czynniki wpływające na wielkość konsekwencji awarii, którym przypisywane są wagi uwzględniające ich „ważność” (wagi mogą być przypisane kryteriom lub poszczególnym czynnikom). Wielkość konsekwencji może być także oceniana na podstawie opisów poszczególnych kategorii konsekwencji.

Ostatecznie poziom ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych może być określany z zastosowaniem wzoru, ale także wykorzystując macryce ryzyka, czy na przykład logikę rozmytą.

Przedstawione propozycje pokazują różne podejścia do wyznaczania poziomów ryzyka oraz jego parametrów. Nie jest możliwa jednoznaczna ocena, która z propozycji jest „lepsza”, a która „gorsza”. Temat ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych wymaga więc kontynuowania analiz dotyczących zarówno samych parametrów, jak i sposobów ich wyznaczania.

LITERATURA

- [1] Anbari M.J., Tabesh M., Roozbahani A., 2017, *Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks*, Journal of Environmental Management, 190, 91 – 101
- [2] Daher S., 2015, *Defect – Based Condition Assessment Model and Protocol of Sewer Pipelines*, Praca magisterska, Concordia University, Montreal, Quebec, Kanada
- [3] Królikowska J., Królikowski A., Żaba T., 2015, *Kanalizacja. Podstawy projektowania, wykonawstwa i eksploatacji*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków

- [4] Królikowska, J., 2011, *Damage evaluation of a town's sewage system in southern Poland by the Preliminary Hazard Analysis Method*, Environment Protection Engineering 37(4), 131 – 142
- [5] Kuliczowska E., 2015, *Prognozowany a rzeczywisty stan techniczny XIX. wiecznych kamionkowych przewodów kanalizacyjnych*, Instal, 9, 74 – 79
- [6] Kuliczowska E., 2019, *Wyznaczanie ryzyka awarii przewodów kanalizacyjnych na wybranych przykładach*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2, 59 – 62
- [7] Kuliczowska E., Parka A., 2017, *Management of risk of environmental failure caused by tree and shrub root intrusion into sewers*, Urban Forestry & Urban Greening, 21, 1 – 10
- [8] Kuliczowska, E., 2015, *Analysis of defects with a proposal of the method of establishing structural failure probability categories for concrete sewers*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(4), 1078 – 1084
- [9] Kuliczowska, E., 2016, *An analysis of road pavement collapses and traffic safety hazards resulting from leaky sewers*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 11(4), 251 – 258
- [10] Kuliczowska, E., 2016, *Risk of structural failure in concrete sewers due to internal corrosion*, Engineering Failure Analysis 66, 110 – 119
- [11] Kuliczowska, E., 2016, *The interaction between road traffic safety and the condition of sewers laid under roads*, Transportation Research Part D: Transport and Environment 48, 203 – 213.
- [12] Kuliczowska, E., 2017, *Environmental and structural risk assessment of long operated vitrified clay sewers*, Environment Protection Engineering 44(2), 53 – 67
- [13] Perkins L.L., 2016, *Welcome to PACP Version 7.0 The New Standard to Pipe Asset Management*, NASTT – NE, prezentacja multimedialna
- [14] Pietrucha – Urbanik K., Tchórzewska – Cieślak B., 2018, *Approaches to Failure Risk Analysis of the Water Distribution Network with Regard to the Safety of Consumers*, Water, 10(1679), 1 – 21
- [15] *Pipeline Assessment Certification Program*, Dallas, 7th Edition, 2015, Published by National Association of Sewer Service Companies (NASSCO)
- [16] Raganowicz A., Dziopak J., 2012, *Statystyczno – stochastyczny model prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 59(283), 155 – 172
- [17] Rak J., Pietrucha K., 2008, *Some factors of crisis management in water supply system*, Environment Protection Engineering, 34(2), 57 – 65
- [18] Rak J., Studziński A., 2011, *Ryzyko w eksploatacji sieci wodociągowej*, Instal, 5, 42 – 45
- [19] Rak J., Tchórzewska – Cieślak B., 2006, *Five – parametric matrix to estimate the risk connected with water supply system operation*, Environment Protection Engineering 32(2), 37 – 46
- [20] Rak J., Tchórzewska – Cieślak B., Pietrucha – Urbanik K., 2019, *A Hazard Assessment Method for Waterworks Systems Operating in Self – Government Units*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(762), 1 – 11
- [21] Rak, J., Tchórzewska – Cieślak, B., 2014, *Matrycowe metody analizy ryzyka awarii infrastruktury komunalnej*, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture 31(61), 233 – 244
- [22] Smith E., Baldwin A., 2015, *Using ModelBuilder to Evaluate Risk and Prioritize Sewer Upgrades*, ESRI User Conference, prezentacja multimedialna