

Wielokryterialna metoda wspomaganie decyzji w zakresie typowania przewodów wodociągowych do renowacji lub wymiany

Multi-criteria method for supporting decisions on selecting water pipes for renovation or replacement

MATEUSZ ROŻNOWSKI^{1,2}, DAWID SZPAK², JAKUB ŻYWIEC², BARBARA TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK²

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.03.01

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę mają za zadanie dostarczać wodę do konsumentów w sposób ciągły, pod odpowiednim ciśnieniem oraz o odpowiedniej jakości. Aby spełnić te zadania, sieć wodociągowa musi być stale monitorowana oraz modernizowana. Ze względu na ograniczone środki inwestycyjne przedsiębiorstwa wodociągowe muszą starannie wybierać przewody, których stan techniczny lub niewłaściwa eksploatacja sprzyjają występowaniu awarii i przerw w dostawie wody do odbiorców. W pracy przedstawiono wielokryterialną metodę wspomaganie decyzji FSAW (ang. Fuzzy Simple Additive Weighting Method). Metodę wykorzystano do wytypowania przewodów wodociągowych, które w pierwszej kolejności powinny zostać wymienione lub poddane renowacji. Przedstawione autorskie kryteria decyzyjne oraz wartości parametrów decyzyjnych stanowią istotne narzędzie umożliwiające podejmowanie działań w analizowanej problematyce. Opracowano studium przypadku dla 9 wariantów przewodów wodociągowych. Na podstawie wykonanej analizy określono kolejność renowacji lub wymiany badanych przewodów wodociągowych. Dodatkowym efektem pracy jest opracowanie formuł obliczeniowych do wykorzystania w programie QGIS oraz wizualizacja wyników badań na cyfrowej mapie sieci wodociągowej.

Słowa kluczowe: FSAW, wymiana przewodów wodociągowych, wspomaganie decyzji

Public water supply systems are designed to provide consumers with a continuous supply of water at the right pressure and quality. In order to fulfil these tasks, the water supply network must be constantly monitored and modernised. Due to limited investment funds, water supply companies must carefully select pipes whose technical condition and/or improper operation may lead to failures and interruptions in water supply to consumers. The paper presents a multi-criteria decision support method called FSAW (Fuzzy Simple Additive Weighting Method). The method was used to select water pipes that should be replaced or renovated first. The presented proprietary decision-making criteria and decision parameter values are an important tool for taking action in the analysed issue. A case study was developed for 9 variants of water pipes. Based on the analysis, the order of renovation or replacement of the tested water pipes was determined. An additional result of the work is the development of calculation formulas for use in the QGIS programme and the visualisation of the research results on a digital map of the water supply network.

Keywords: FSAW, replacement of water pipes, decision support

Wprowadzenie

Przed przedsiębiorstwami wodociągowymi stoją wyzwania związane ze starzejącą się infrastrukturą oraz rosnącymi oczekiwaniem konsumentów dotyczącymi jakości i ciągłości dostaw wody. Ze względu na ograniczone środki inwestycyjne przedsiębiorstwa muszą zarządzać siecią

wodociągową w sposób efektywny, tj. osiągać zakładane cele przy możliwie małym wykorzystaniu zasobów. Istotnym problemem jest podjęcie przez zarządców sieci wodociągowych decyzji, które przewody powinny priorytetowo zostać wymienione lub poddane renowacji [1,2]. Wymiana lub odnowa przewodów wodociągowych powinna być prowadzona

przez przedsiębiorstwa wodociągowe ze względu na konieczność ograniczania awaryjności sieci i strat wody [3], w związku z wejściem w życie regulacji UE zawartych w Dyrektywie 2184 z 2020 roku, dotyczących m.in. oceny, zarządzania i redukcji wycieków wody w systemach wodociągowych przedsiębiorstw dostarczających co najmniej 10 000 m³/d lub

Mateusz Rożnowski ORCID 0009-0007-9323-6408 – ¹Szkoła Doktorska Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, Polska, Autor korespondencyjny: e-mail: m.roznowski@prz.edu.pl), Dawid Szpak ORCID 0000-0001-9654-2477 (dsz@prz.edu.pl); Jakub Żywiec ORCID 0000-0002-0823-4229 (j.zywiec@prz.edu.pl); Barbara Tchórzewska-Cieślak ORCID 0000-0002-7622-6749 (cbarbara@prz.edu.pl) – ²Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, Polska

obsługujących co najmniej 50 000 konsumentów [4].

Podjęcie decyzji o wytypowaniu przewodu wodociągowego do renowacji musi uwzględniać m.in. kryteria techniczne przewodu (tj. materiał, wiek, średnicę czy stan techniczny), eksploatacyjne (np. ciśnienie) oraz społeczne (dotkliwość przerwy w dostawie wody dla konsumentów). Z tego względu metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji (MCDM – ang. Multiple Criteria Decision Making) stanowią właściwe narzędzie do szeregowania ważności wariantów decyzyjnych. Przykłady zastosowania tego rodzaju metod obejmują identyfikację pojedynczych przewodów przeznaczonych do wymiany lub renowacji, a także opracowywanie planów odnowy sieci wodociągowej. Pozwała to na systematyczne planowanie prac oraz zabezpieczenie środków finansowych w budżecie [5,6]. W literaturze przedstawiono zastosowania wielokryterialnych metod wspomaganie decyzji do planowania renowacji przewodów wodociągowych. W pracy [7] przedstawiono zastosowanie modelu ELECTRE TRI, oparte go na fizycznych i eksploatacyjnych czynnikach ryzyka, do ustalania priorytetów napraw bądź wymiany przewodów sieci wodociągowej. W analizie uwzględniono zarówno wariant optymistyczny, jak i pesymistyczny w procesie klasyfikacji i priorytyzacji działań remontowych. Autorzy pracy [8] omówili zastosowanie, a następnie porównali metody MCDM – ELECTRE (TRI-C) oraz PROMETHEE (FlowSort), uznając metodę ELECTRE TRI-C za skuteczną. W artykule [9] zaproponowano zastosowanie rozmytej metody TOPSIS w warunkach niepewności danych. Autorzy podkreślają przydatność tej metody w planowaniu działań modernizacyjnych sieci wodociągowej, zwłaszcza w sytuacjach wymagających analizy wielu kryteriów, przy znacznej niepewności danych wejściowych oraz zróżnicowanych ocenach eksperckich. W publikacji [10] zaprezentowano integrację metod AHP oraz VIKOR w procesie planowania wymiany przewodów wodociągowych, wykorzystując AHP do wyznaczenia wag kryteriów decyzyjnych, natomiast VIKOR do hierarchizacji analizowanych wariantów. W analizie uwzględniono 25 km sieci wodociągowej, bazując na programie EPANET. Jako kryteria decyzyjne w analizowanej literaturze przyjmowano takie parametry, jak: ciśnienie, wiek, średnica, materiał, stan techniczny, prędkość i długość [7–11]. Parametr położenia przewodu względem pasa drogowego nie był dotychczas uwzględniany w tego typu opracowaniach. W niniejszej pracy wykorzystano metodę sumy ważonej w ujęciu rozmytym (FSAW – ang. Fuzzy

Simple Additive Weighting Method), która jest korzystniejsza od przedstawionych wyżej metod ze względu na możliwość uwzględnienia niepewności oraz subiektywności ocen poprzez wykorzystanie liczb rozmytych, co poprawia wiarygodność wyników, szczególnie w przypadku nieprecyzyjnych danych. W przeciwieństwie do innych metod w metodzie FSAW nie jest wymagana skomplikowana parametryzacja. Dzięki temu analiza jest bardziej przejrzysta, a interpretacja wyników intuicyjna. Zaproponowana metoda, dzięki swojej klarowności oraz uwzględnieniu niepewności, może mieć szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej, gdzie takie cechy są wymagane.

Systemy informacji przestrzennej (GIS – ang. Geographic Information System) w przedsiębiorstwach wodociągowych zyskują na popularności ze względu na szerokie zastosowanie, łączące dane przestrzenne (położenie przewodów, zbiorników, uzbrojenia) oraz dane atrybutowe (informacje m.in. o średnicy, wieku, ciśnieniu, materiale i funkcji), co w znacznym stopniu ułatwia zarządzanie rozległymi sieciami wodociągowymi oraz tworzenie wielu analiz łączących dane przestrzenne i atrybutowe [12, 13]. Połączenie wielokryterialnej metody wspomaganie decyzji z narzędziami środowiska GIS daje możliwość odwzorowania przestrzennego oraz przetwarzania dużych zbiorów danych o przewodach wodociągowych [11]. Przykład wykorzystania środowiska GIS z zastosowaniem komercyjnego oprogramowania ArcGIS przedstawiono w pracy [11], w której zaprezentowano wizualizację wyników metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji AHP w procesie modernizacji infrastruktury wody pitnej na przykładzie miasta Tlemcen w Algierii. Autorzy zaimplementowali metodę AHP do programu ArcGIS za pomocą języka programowania Python, przy czym podjęcie decyzji o ewentualnej modernizacji uzależnili od takich kryteriów, jak: średnica, materiał, data posadowienia przewodu, prędkość oraz ciśnienie.

Celem niniejszej pracy jest adaptacja metody FSAW w celu wykorzystania jej potencjału do typowania przewodów wodociągowych do renowacji lub wymiany oraz jej weryfikacja na przykładzie aplikacyjnym. Aby to osiągnąć, zaproponowano kryteria decyzyjne oraz wartości parametrów decyzyjnych umożliwiających wykorzystanie metody FSAW w analizowanej problematyce. Innowacyjność metody polega na zastosowaniu funkcji umożliwiających wdrożenie opracowanej metody w przedsiębiorstwach wodociągowych posiadających dane eksploatacyjne dotyczące przewodów wodociągowych

w środowisku GIS. Na podstawie opracowanych formuł w programie QGIS (programie open source) przeprowadzono wizualizację wyników badań, co stanowi znaczne ułatwienie dla eksploatorów podczas wyznaczania przewodów przeznaczonych do modernizacji na dużym obszarze.

Metodyka badań

Metoda sumy ważonej SAW

Klasyczna metoda sumy ważonej (SAW – ang. Simple Additive Weighting Method) jest jedną z najczęściej stosowanych i najbardziej rozpoznawalnych metod wielokryterialnego podejmowania decyzji [14]. Metoda SAW została opracowana przez Churchmana i Ackoffa w 1954 roku [15]. Jej zaletą jest intuicyjność oraz łatwość interpretacji wyników dzięki postaci rankingu decyzyjnego [14, 16, 17].

Metoda SAW opiera się na liniowej zależności pomiędzy wartością całkowitą oceny wariantu decyzyjnego a częściowymi ocenami pojedynczych kryteriów. W metodzie SAW każdy wariant decyzyjny jest oceniany na podstawie wyznaczonych sum znormalizowanych wartości kryteriów decyzyjnych mnożonych przez przypisane im wagi [14, 17]. Proces obliczeniowy metody SAW obejmuje kilka kroków [14, 16, 17]:

a) Budowa macierzy decyzyjnej

$$R = [r_{ik}], (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

gdzie r_{ik} jest oceną i -tego wariantu decyzyjnego względem k -tego kryterium.

b) Normalizacja macierzy

$$r_{ik} = \frac{f_k(a^i)}{\max_{1 \leq l \leq m} f_k(a^l)} \quad \text{dla stymulanta} \quad (2)$$

$$r_{ik} = \frac{\frac{1}{f_k(a^i)}}{\max_{1 \leq l \leq m} \frac{1}{f_k(a^l)}} = \frac{\min_{1 \leq l \leq m} f_k(a^l)}{f_k(a^i)} \quad (3)$$

dla destymulanta

Parametr r_{ik} powinien spełniać warunek opisany nierównościami:

$$0 \leq r_{ik} \leq 1$$

c) Obliczenie wartości oceny całkowitej

$$p_i = \sum_{k=1}^n w_k r_{ik} \quad (4)$$

gdzie: r_{ik} – ocena i -tego wariantu decyzyjnego względem k -tego kryterium, w_k – waga k -tego kryterium, przy czym

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (5)$$

d) Ranking wariantów

Warianty decyzyjne szereguje się na podstawie wartości p_i od największej do najmniejszej, a następnie wybiera się wariant o najwyższej wartości p_i . Ograniczeniem metody jest konieczność precyzyjnego określenia poszczególnych wag oraz kryteriów decyzyjnych, co często jest bardzo trudne i obciążone subiektywizmem [17].

Zbiory i liczby rozmyte

Zbiory rozmyte wprowadził w 1965 roku L.A. Zadeh w pracy [18]. W przeciwieństwie do zbiorów klasycznych, w których dany element albo należy do zbioru, albo do niego nie należy, zbiory rozmyte mają charakter stopniowalny. Zbiór rozmyty A znajdujący się w przestrzeni X definiuje się jako zbiór par [14, 17–19]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (6)$$

gdzie: x - jest argumentem funkcji przynależności, $\mu_A(x)$ - jest funkcją przynależności, która określa stopień przynależności elementu x do zbioru A .

Jeżeli $\mu_A(x) = 1$ to znaczy, że występuje pełna przynależność elementu x do zbioru A , natomiast jeżeli $\mu_A(x) = 0$ to znaczy, że element x nie przynależy do zbioru A . Wartości pośrednie przedstawiają częściową przynależność elementu do zbioru.

Liczba rozmyta jest szczególnym przypadkiem zbioru rozmytego określonego w przestrzeni rozważań, którą stanowi zbiór liczb rzeczywistych R . Liczbę rozmytą „ A ” definiuje się jako zbiór rozmyty w zbiorze liczb rzeczywistych R . Funkcja przynależności spełnia warunki ciągłości, normalności i wypukłości [17,20]. W pracy zastosowano trójkątne liczby rozmyte, które wykorzystano w kolejnych etapach opracowania.

Trójkątna liczba rozmyta jest najczęściej stosowaną formą liczby rozmytej; opisuje się ją za pomocą trzech parametrów $A = (l, m, u)$, gdzie $l \leq m \leq u$. Jej funkcja przynależności przyjmuje postać [14, 17, 19]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x < m \\ \frac{m-l}{x-l}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (7)$$

Parametry l, m, u odpowiadają wartościom: pesymistycznej, najbardziej prawdopodobnej oraz optymistycznej [14, 17, 19].

W celu porównania lub szeregowania liczb rozmytych stosowany jest proces defuzyfikacji. Proces ten sprowadza liczbę roz-

mytą do wartości rzeczywistej (nierozmytej użyteczności). W tym celu najczęściej stosowaną metodą jest metoda środka ciężkości (CoA – ang. Center of Area). Dla trójkątnej liczby rozmytej środek ciężkości wyznacza się na podstawie wzoru [14, 17,20]:

$$A_{CoA} = \frac{l + m + u}{3} \quad (8)$$

Liczby rozmyte znajdują szerokie zastosowanie w rozmytych metodach wielokryterialnego wspomaganiania decyzji, np. FSAW, w których pozwalają modelować nieprecyzyjne oceny ekspertów uzyskane na podstawie dialogu [14, 17].

Metoda sumy ważonej w ujęciu rozmytym FSAW

Metoda FSAW, opracowana przez Tzenga oraz Huangą w 2011 roku [21], jest rozwinięciem omówionej w poprzedniej części pracy metody SAW. Klasyczna metoda SAW polega na normalizacji macierzy ocen, natomiast rozmyta metoda sumy ważonej FSAW daje możliwość uwzględnienia niepewności oraz nieprecyzyjności informacji w procesach decyzyjnych przez wykorzystanie trójkątnych liczb rozmytych dla ocen wariantów lub wag kryteriów decyzyjnych. Przepisanie wag kryteriom decyzyjnym jest kluczowym etapem procesu decyzyjnego ze względu na ich istotny wpływ na końcową ocenę i ranking wariantów. W sytuacji, gdy w procesie decyzyjnym dane mają charakter nieprecyzyjny lub obciążone są niepewnością, zastosowanie liczb rozmytych umożliwia odpowiednie modelowanie nieprecyzyjnych informacji w procesie analizy [14, 16–18, 21]. Proces obliczeniowy metody sumy ważonej w ujęciu rozmytym przedstawiono poniżej w kilku etapach [14, 16, 17, 21]:

Etap I. Budowa rozmytej macierzy decyzyjnej

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ik}], \tilde{r}_{ik} = (l_{ik}, m_{ik}, u_{ik}) \quad (9)$$

Etap II. Normalizacja rozmytych ocen – przeliczanie jest analogiczne jak w metodzie SAW (wzory 2,3);

Etap III. Wyznaczenie rozmytych wag kryteriów – dialog z ekspertem lub ekspertami

Poprzez dialog z ekspertami określono rozmyte wagi \tilde{w}_k , które reprezentują wagę k -tego kryterium. Każda z tych wag jest wyrażona za pomocą trójkątnej liczby rozmytej o parametrach (l_k, m_k, u_k) , gdzie: l_k – przedstawia wartość minimalną wagi (wersja pesymistyczna); u_k – przedstawia wartość maksymalną wagi (wersja optymistyczna); m_k – przedstawia wartość opty-

malną wagi (wersja najbardziej prawdopodobna).

Zakłada się, że

$$\sum_{k=1}^n m_k = 1 \quad (10)$$

oraz $l_k \leq m_k \leq u_k$

Etap IV. Obliczenie rozmytych użyteczności wariantów decyzyjnych i defuzyfikacja

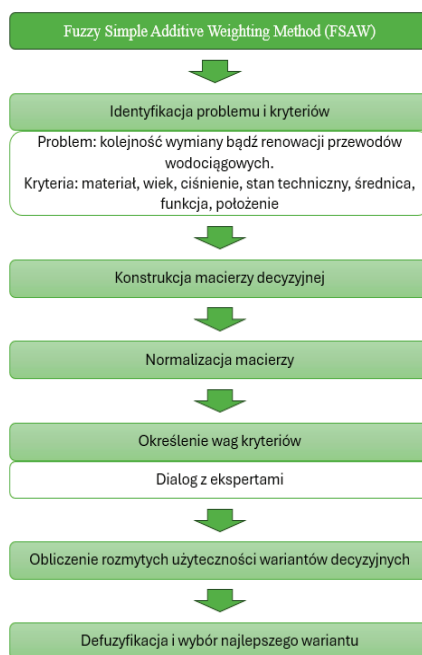
$$\tilde{p}_i = \sum_{k=1}^n \tilde{w}_k r_{ik} \quad (11)$$

gdzie: r_{ik} – znormalizowana wartość wariantu względem kryterium, \tilde{w}_k – waga k -tego kryterium

$$p_i^{CoA} = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (12)$$

Etap V. Ranking wariantów

Warianty decyzyjne szereguje się na podstawie wartości nierozmytych użyteczności p_i , od największej do najmniejszej. Wariant o najwyższej wartości p_i uznaje się za najlepszy. Rysunek 1 przedstawia etapy procesu decyzyjnego z wykorzystaniem



Rys. 1. Etapy metody FSAW we wspomaganianiu procesu decyzyjnego

Fig. 1. Stages of the FSAW method in supporting the decision-making process

metody sumy ważonej w ujęciu rozmytym FSAW.

Metoda SAW znajduje szerokie zastosowanie w klasycznych problemach decyzyjnych opartych na wielu kryteriach, jednak jej ograniczeniem jest brak uwzględniania niepewności danych wejściowych. W procesach decyzyjnych prowadzonych w warunkach niepewności lub nieprecyzyj-

ności danych oraz przy uwzględnianiu opinii eksperckich uzasadnione jest stosowanie rozszerzonej metody w ujęciu rozmytym (FSAW). Logika rozmyta pozwala ograniczyć wpływ nieobiektowności oraz lepiej odwzorować niejednoznaczność danych lub ocen, co może zwiększać wiarygodność wyników w porównaniu z klasyczną metodą SAW [14, 17]. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie różnic pomiędzy metodami SAW i FSAW.

Tab. 1. Podsumowanie porównawcze metod SAW oraz FSAW (opracowane na podstawie [14, 16–19])
Tab. 1. Comparative summary of SAW and FSAW methods (based on [14, 16–19])

Cecha	SAW	FSAW
Typ danych	Liczby rzeczywiste	Liczby rozmyte (trójkątne, trapezowe)
Uwzględnienie niepewności	Brak	Tak
Rodzaj wag	Stałe, rzeczywiste	Rozmyte lub obliczone metodą entropii
Wynik	Jednoznaczny ranking	Ranking na podstawie zdefuzyfikowanych użyteczności
Zastosowanie	Proste problemy decyzyjne	Podjęcie decyzji na podstawie nieprecyzyjnych danych lub wykorzystujących oceny lingwistyczne

Kryteria decyzyjne

Podjęty w pracy problem dotyczy typowania przewodów wodociągowych do renowacji lub wymiany. Kryteria uwzględnione w procesie decyzyjnym, służące do określenia przewodów, które w pierwszej kolejności powinny zostać wymienione, wyznaczono na podstawie badań literaturowych oraz badań własnych. W tabeli 2 przedstawiono kryteria decyzyjne wykorzystane do typowania przewodów wodociągowych do wymiany bądź renowacji.

Tab. 2. Kryteria decyzyjne – opracowanie własne
Tab. 2. Decision criteria - own work

Lp.	Kryteria	Opis	Definicja
1	f_1	Materiał przewodu	Materiał, z jakiego został wykonany przewód wodociągowy
2	f_2	Wiek przewodu	Wiek przewodu wodociągowego od momentu oddania do eksploatacji określony w latach
3	f_3	Cisnienie w przewodzie	Cisnienie wody w przewodzie wodociągowym, określone w $m H_2O$
4	f_4	Awaryjność przewodów	Określona za pomocą wskaźnika intensywności uszkodzeń λ [uszk./(km·rok)]
5	f_5	Średnica przewodu	Średnica nominalna przewodu wodociągowego [mm]
6	f_6	Funkcja przewodu	Podział na zadania przewodów wodociągowych
7	f_7	Położenie przewodu	Określenie położenia przewodu w odniesieniu do pasa drogowego

Kryteria uwzględnione w opracowaniu dotyczące przewodów to: materiał, wiek, ciśnienie, awaryjność, średnica, funkcja oraz położenie. Kryteria takie jak materiał, wiek, ciśnienie, średnica czy funkcja były analizowane w wielu pracach naukowych, m.in. [22–26], pod kątem awaryjności oraz niezawodności sieci wodociągowych, natomiast położenie przewodów względem pasa drogowego jest informacją, którą można uzyskać, korzystając z danych przestrzennych GIS. Zaproponowane kryteria uwzględniono ze względu na ich wysoką istotność w procesach decyzyjnych oraz dostępność danych w większości przedsiębiorstw wodociągowych. Przedstawione kryteria dla metody FSAW mogą być wykorzystywane w sposób uniwersalny we wszystkich spółkach zarządzających sieciami wodociągowymi, które posiadają wymagane dane.

W tabelach 3–9 przedstawiono wartości parametrów dla poszczególnych kryteriów decyzyjnych. Według opracowań [24, 27] materiałem o najwyższym wskaźniku intensywności uszkodzeń jest żeliwo szare, niższym wskaźnikiem odznacza się stal, natomiast najniższy wskaźnik mają tworzywa sztuczne. Wartości parametrów opisujących wiek przewodu przyjęto w oparciu o [28, 29] oraz własne doświadczenia. W pracy [28] autorzy przedstawiają wyniki wskazujące, że prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przewodów starszych niż 20 lat jest 1,675 razy wyższe niż w przypadku przewodów młodszych niż 20 lat. Wskaźnik intensywności uszkodzeń wzrasta istotnie w przewodach liczących więcej niż 30 lat, natomiast w zakresie wieku 10–50 lat zauważalny jest dziesięciokrotny wzrost wskaźnika intensywności uszkodzeń [29]. Na podstawie prac [23, 25] stwierdzono, że obniżenie ciśnienia koreluje ze spadkiem wskaźnika intensywności uszkodzeń. Wyniki pracy [23] wskazują, że po obniżeniu ciśnienia o około 40% średnia wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń obniżyła się w podobnym stopniu. Wartości parametrów opisujących awaryjność przewodu przyjęto w oparciu o prace naukowe [25, 30]. Niższe wartości wskaźników awaryjności dla przewodów magistralnych są związane z tym, że awarie tych przewodów zdarzają się rzadziej niż awarie przewodów rozdzielczych czy przyłączy wodociągowych, a także z faktem, że potencjalna awaria magistrali wiąże się z poważnymi i rozległymi skutkami dla odbiorców wody. W analizie uwzględniono także konsekwencje związane z awarią przewodów o danym zakresie średnic. Największą wartość parametru przydzielono przewodom o średnicy 300 mm i większej ze względu na największe możliwe skutki awarii.

Tab. 3. Kryterium f_1 – wpływ materiału przewodu na ryzyko awarii

Tab. 3. Criterion f_1 – impact of cable material on failure risk

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Mały	1	Tworzywa sztuczne
Średni	2	Stal
Duży	3	Żeliwo szare

Tab. 4. Kryterium f_2 – wpływ wieku przewodu na ryzyko awarii

Tab. 4. Criterion f_2 – impact of pipeline age on the risk of failure

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Mały	1	wiek ≤ 10 [lat]
Średni	2	10–30 [lat]
Duży	3	wiek ≥ 30 [lat]

Tab. 5. Kryterium f_3 – wpływ ciśnienia w przewodzie na ryzyko awarii

Tab. 5. Criterion f_3 – impact of pressure in the pipe on the risk of failure

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Mały	1	ciśnienie ≤ 40 [m H_2O]
Średni	2	40–60 [m H_2O]
Duży	3	ciśnienie ≥ 60 [m H_2O]

Tab. 6. Kryterium f_4 – wpływ dotychczasowej awaryjności przewodu na ryzyko awarii

Tab. 6. Criterion f_4 – impact of previous cable failure rates on the risk of failure

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Przyłącza domowe		
Mały	1	$\lambda \leq 1$ [uszk./km·r]
Średni	2	$1 < \lambda < 3$ [uszk./km·r]
Duży	3	$\lambda \geq 3$ [uszk./km·r]
Sieć rozdzielcza		
Mały	1	$\lambda \leq 0,5$ [uszk./km·r]
Średni	2	$0,5 < \lambda < 1$ [uszk./km·r]
Duży	3	$\lambda \geq 1$ [uszk./km·r]
Sieć magistralna		
Mały	1	$\lambda \leq 0,3$ [uszk./km·r]
Średni	2	$0,3 < \lambda < 0,5$ [uszk./km·r]
Duży	3	$\lambda \geq 0,5$ [uszk./km·r]

Tab. 7. Kryterium f_5 – skutki awarii w zależności od średnicy

Tab. 7. Criterion f_5 – effects of failure depending on diameter

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Małe	1	$\varnothing \leq 110$ [mm]
Średnie	2	110–300 [mm]
Duże	3	$\varnothing \geq 300$ [mm]

Tab. 8. Kryterium f_6 – skutki awarii w zależności od funkcji przewodu
 Tab. 8. Criterion f_6 – effects of failure depending on the function of the pipe

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Małe	1	Przyłącza domowe
Średnie	2	Przewody rozdzielcze
Duże	3	Przewody magistralne

Tab. 9. Kryterium f_7 – wpływ lokalizacji przewodu na ryzyko awarii
 Tab. 9. Criterion f_7 – impact of cable location on the risk of failure

Opis lingwistyczny	Wartość parametru	Kryteria doboru
Mały	1	Poza pasem drogowym
Średni	2	W pasie drogowym (z wyłączeniem jezdni)
Duży	3	W pasie jezdni

Najwyższym priorytetem podczas planowania renowacji sieci wodociągowej powinny zostać objęte przewody magistralne ze względu na najwyższe potencjalne skutki uszkodzenia, natomiast najniższy priorytet przydzielono przyłączom domowym. W pracach [31–33] ruch drogowy został opisany jako potencjalny czynnik wpływający na awaryjność sieci wodociągowej. Ostatnie kryterium decyzyjne uwzględnia podatność na awarię ze względu na obciążenia ruchem drogowym oraz potencjalne skutki awarii, takie jak uszkodzenie drogi.

2.5. Rozmyte wagi kryteriów decyzyjnych

Według [14] algorytm metody FSAW polega na określeniu rozmytej wagi ważności kryteriów, tworzącej trójkątną liczbę rozmytą. Parametry te są określane na podstawie dialogu z ekspertem, który ma za zadanie odpowiedzieć na pytania:

- Jaka jest minimalna wartość wagi?
- Jaka jest maksymalna wartość wagi?
- Jaka jest optymalna wartość wagi?

Do wyznaczenia wartości wag skorzystano z opinii pięciu ekspertów zajmujących się tematyką awaryjności sieci wodociągowych, których poproszono o wyznaczenie optymalnych wag dla poszczególnych kryteriów decyzyjnych. Suma wag optymalnych dla wszystkich siedmiu kryteriów musiała wynosić 1. Wartości parametrów l , m , u dla trójkątnych liczb rozmytych przyjęto według następującego schematu:

- Jako wartość minimalną wagi przyjęto najmniejszą wartość dla danego kryterium zaproponowaną przez jednego z ekspertów,

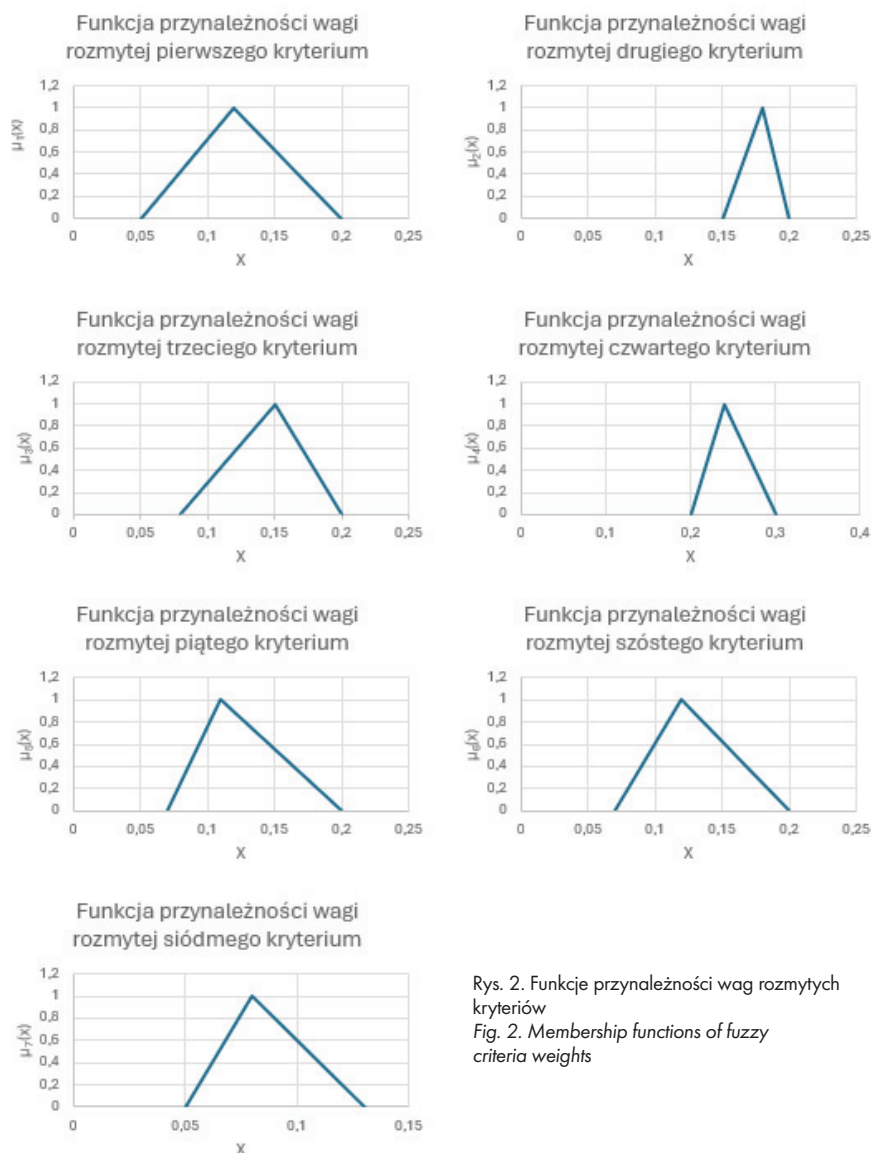
- Jako wartość maksymalną wagi przyjęto największą wartość dla danego kryterium zaproponowaną przez jednego z ekspertów,
- Jako wartość optymalną wagi przyjęto średnią arytmetyczną ocen wszystkich ekspertów.

Opracowane na podstawie dialogu z ekspertami wartości wag dla poszczególnych kryteriów przedstawiono w tabeli 10.

Rysunek 2 przedstawia funkcje przynależności rozmytych wag poszczególnych kryteriów opracowanych na podstawie dialogu z ekspertami.

Tab. 10. Wartości wagi kryteriów decyzyjnych określone na podstawie dialogu z ekspertami
 Tab. 10. Values of decision criteria weights determined on the basis of dialogue with experts

L.p.	Kryterium	Min. wartość wagi	Maks. wartość wagi	Wartość optymalna
f_1	Materiał przewodu	0,05	0,20	0,12
f_2	Wiek przewodu	0,15	0,20	0,18
f_3	Ciśnienie w przewodzie	0,08	0,20	0,15
f_4	Awaryjność przewodu	0,20	0,30	0,24
f_5	Średnica przewodu	0,07	0,20	0,11
f_6	Funkcja przewodu (magistralny, rozdzielczy, przyłącz)	0,07	0,20	0,12
f_7	Położenie przewodu względem drogi	0,05	0,13	0,08



Rys. 2. Funkcje przynależności wag rozmytych kryteriów
 Fig. 2. Membership functions of fuzzy criteria weights

Według opinii ekspertów najważniejszym kryterium decyzyjnym jest awaryjność przewodu o parametrach trójkątnej liczby rozmytej (0,20; 0,24; 0,30). Najmniej istotnym kryterium decyzyjnym jest natomiast położenie przewodu względem drogi o parametrach trójkątnej liczby rozmytej (0,05; 0,08; 0,13).

Wyniki badań

Wytypowanie przewodów do renowacji lub wymiany

Na podstawie zaproponowanych kryteriów decyzyjnych oraz ich wag opracowano studium przypadku dla 9 wariantów przewodów. Parametry analizowanych wariantów wykorzystano do zaprezentowania mechanizmu działania zaproponowanego modelu oraz sformułowania wstępnych wniosków przed implementacją modelu w rzeczywistym systemie wodociągowym. W tabeli 11 przedstawiono parametry przewodów uwzględnione w obliczeniach wariantów decyzyjnych za pomocą metody sumy ważonej w ujęciu rozmytym, natomiast w tabeli 12 – wartości parametrów wejściowych.

Następnie przeprowadzono normalizację ocen wariantów z wykorzystaniem wzoru (2); wyniki przedstawiono w tabeli 13.

Tab. 11. Dane wejściowe
Tab. 11. Input data

Wariant	f ₁	f ₂ [lata]	f ₃ [m]	f ₄ [λ]	f ₅ [d]	f ₆	f ₇
P ₁	PE	6	39	0,80	40	Przyłącza domowe	Poza pasem drogowym
P ₂	Stal	12	52	2,00	50	Przyłącza domowe	Poza pasem drogowym
P ₃	Żeliwo	35	63	3,50	110	Sieć rozdzielcza	W pasie drogowym (z wyłączeniem jezdni)
P ₄	PVC	12	62	0,20	150	Sieć rozdzielcza	W pasie drogowym (z wyłączeniem jezdni)
P ₅	Stal	34	46	0,80	150	Sieć rozdzielcza	W pasie jezdni
P ₆	Żeliwo	9	39	1,20	150	Sieć rozdzielcza	Poza pasem drogowym
P ₇	PE	31	53	0,15	300	Sieć magistralna	W pasie drogowym (z wyłączeniem jezdni)
P ₈	Stal	9	62	0,45	300	Sieć magistralna	W pasie jezdni
P ₉	Żeliwo	28	39	0,67	300	Sieć magistralna	Poza pasem drogowym

Tab. 12. Wartości parametrów wejściowych – opracowanie własne
Tab. 12. Input parameter values - own work

Wariant	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇
P ₁	1	1	1	1	1	1	1
P ₂	2	2	2	2	1	1	1
P ₃	3	3	3	3	1	2	2
P ₄	1	2	3	1	2	2	2
P ₅	2	3	2	2	2	2	3
P ₆	3	1	1	3	2	2	1
P ₇	1	3	2	1	3	3	2
P ₈	2	1	3	2	3	3	3
P ₉	3	2	1	3	3	3	1
Rozmyte wagi kryteriów	(0,05; 0,12; 0,20)	(0,15; 0,18; 0,20)	(0,08; 0,15; 0,20)	(0,20; 0,24; 0,30)	(0,07; 0,11; 0,20)	(0,07; 0,12; 0,20)	(0,05; 0,08; 0,13)

Tab. 13. Znormalizowane oceny wariantów – opracowanie własne
Tab. 13. Normalised assessments of variants – own work

Wariant	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇
P ₁	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
P ₂	0,67	0,67	0,67	0,67	0,33	0,33	0,33
P ₃	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,67	0,67
P ₄	0,33	0,67	1,00	0,33	0,67	0,67	0,67
P ₅	0,67	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	1,00
P ₆	1,00	0,33	0,33	1,00	0,67	0,67	0,33
P ₇	0,33	1,00	0,67	0,33	1,00	1,00	0,67
P ₈	0,67	0,33	1,00	0,67	1,00	1,00	1,00
P ₉	1,00	0,67	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33
max _{f_i ∈ A'}	3	3	3	3	3	3	3
min _{f_i ∈ A'}	1	1	1	1	1	1	1

Kolejnym etapem było obliczenie rozmytych użyteczności wariantów decyzyjnych; do obliczeń wykorzystano wzór (11).

$$\tilde{p}_1 = 0,33 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,33 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,33 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,33 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,33 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,223; 0,333; 0,477)$$

$$\tilde{p}_2 = 0,67 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,67 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,67 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,33 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,33 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,383; 0,563; 0,777)$$

$$\tilde{p}_3 = 1,00 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 1,00 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 1,00 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,33 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,583; 0,860; 1,187)$$

$$\tilde{p}_4 = 0,33 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 1,00 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,33 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,67 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,390; 0,597; 0,853)$$

$$\tilde{p}_5 = 0,67 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,67 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,67 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,67 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,513; 0,753; 1,063)$$

$$\tilde{p}_6 = 1,00 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,33 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 1,00 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,67 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,437; 0,650; 0,943)$$

$$\tilde{p}_7 = 0,33 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,67 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,33 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 1,00 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 1,00 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,460; 0,683; 0,987)$$

$$\tilde{p}_8 = 0,67 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 1,00 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,67 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 1,00 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 1,00 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,487; 0,760; 1,130)$$

$$\tilde{p}_9 = 0,33 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 1,00 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,33 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,67 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,223; 0,333; 0,477)$$

$$\tilde{p}_6 = 1,00 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,33 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 1,00 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 0,67 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 0,67 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,437; 0,650; 0,943)$$

$$\tilde{p}_7 = 0,33 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 1,00 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 0,67 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,33 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 1,00 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 1,00 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,460; 0,683; 0,987)$$

$$\tilde{p}_8 = 0,67 \cdot (0,05; 0,12; 0,20) + 0,33 \cdot (0,15; 0,18; 0,20) + 1,00 \cdot (0,08; 0,15; 0,20) + 0,67 \cdot (0,20; 0,24; 0,30) + 1,00 \cdot (0,07; 0,11; 0,20) + 1,00 \cdot (0,07; 0,12; 0,20) + 0,67 \cdot (0,05; 0,08; 0,13) = (0,487; 0,760; 1,130)$$

Ostatnim etapem jest defuzyfikacja i wybór najlepszego wariantu. Wykorzystując metodę środka ciężkości (wzór 12), obliczono nierozmyte użyteczności wariantów.

$$p_1^{CoA} = \frac{0,223 + 0,333 + 0,477}{3} = 0,344$$

$$p_2^{CoA} = \frac{0,383 + 0,563 + 0,777}{3} = 0,574$$

$$p_3^{CoA} = \frac{0,390 + 0,597 + 0,853}{3} = 0,613$$

$$p_4^{CoA} = \frac{0,583 + 0,860 + 1,187}{3} = 0,877$$

$$p_5^{CoA} = \frac{0,513 + 0,753 + 1,063}{3} = 0,777$$

$$p_6^{CoA} = \frac{0,437 + 0,650 + 0,943}{3} = 0,677$$

$$p_7^{CoA} = \frac{0,460 + 0,683 + 0,987}{3} = 0,710$$

$$p_8^{CoA} = \frac{0,487 + 0,760 + 1,130}{3} = 0,792$$

$$p_9^{CoA} = \frac{0,533 + 0,787 + 1,143}{3} = 0,821$$

Warianty uszeregowano od największej do najmniejszej wartości nierozmytej użyteczności. Wyniki przedstawiono w tabeli 14.

Tab. 14. Uszeregowana nierozmyta użyteczność wariantów – opracowanie własne
Tab. 14. Ranked fuzzy utility of variants - own work

Wariant	Nierozmyta użyteczność [U* (pi)]
P ₃	0,877
P ₉	0,821
P ₈	0,792
P ₅	0,777
P ₇	0,710
P ₆	0,677
P ₄	0,613
P ₂	0,574
P ₁	0,344

Na podstawie wykonanej analizy zaproponowano kolejność renowacji lub wymiany przewodów wodociągowych. W pierwszej kolejności powinien zostać wymieniony przewód „P₃”. Jest to przewód wykonany z żeliwa szarego, eksploatowany od 35 lat; ciśnienie wewnątrz przewodu wynosi 63 m H₂O, wskaźnik intensywności uszkodzeń dla sieci rozdzielczej wynosi 3,50 uszk./[km·r], średnica przewodu to 110 mm, a jego lokalizacja znajduje się w pasie drogowym (z wyłączeniem jezdni). Przewodem o najniższej wartości nierozmytej użyteczności jest przewód oznaczony jako „P₁”, wykonany z PE, użytkowany od 6 lat; ciśnienie wewnątrz przewodu wynosi 39 m H₂O, wskaźnik intensywności uszkodzeń dla przyłączy wodociągowych wynosi 0,80 uszk./[km·r], średnica przewodu to 40 mm, a jego lokalizacja znajduje się poza pasem drogowym.

Wizualizacja wyników badań z wykorzystaniem środowiska GIS

W przypadku posiadania przez przedsiębiorstwo wodociągowe odpowiedniej bazy danych dotyczących przewodów wodociągowych w GIS możliwe jest przeprowadzenie wizualizacji wyników badań. Obliczenia i wizualizację wykonano w programie QGIS 3.18. Program QGIS, poprzez „kalkulator pól”, umożliwia przetwarzanie formuł obliczeniowych wyrażonych w języku SQL (ang. Structured Query Language). Przykładowe zastosowanie obejmuje m.in. klasyfikację danych w kolumnach na podstawie istniejących danych w tabeli atrybutów. Formuły można edytować w zależności od sposobu wprowadzania danych poszczególnych przewodów wodociągowych do tabeli atrybutów przez przedsiębiorstwa wodociągowe. Dane wejściowe wykorzystane w modelu są tożsame z danymi przedstawionymi w tabelach 11 i 12.

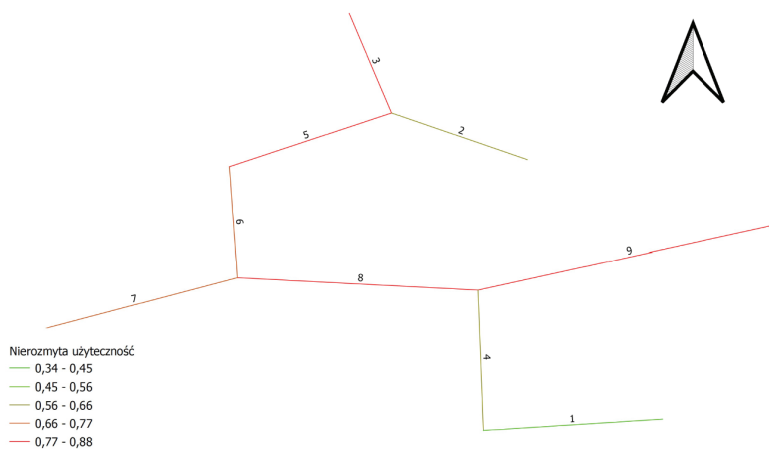
W tabeli 15 przedstawiono zestawienie rozmytych wartości oraz defuzyfikację wyników, na podstawie której dokonano klasyfikacji kolejności przewodów do wymiany bądź renowacji.

Tab. 15. Wyniki końcowe opracowanego modelu obliczeniowego w QGIS – opracowanie własne
Tab. 15. Final results of the computational model developed in QGIS - own work

id	MIN_W	MAX_W	OPT_W	Waga_końc
3	0,583	1,187	0,86	0,877
9	0,533	1,143	0,787	0,821
8	0,487	1,13	0,76	0,792
5	0,513	1,064	0,754	0,777
7	0,46	0,987	0,683	0,71
6	0,437	0,943	0,65	0,677
4	0,39	0,853	0,597	0,613
2	0,383	0,777	0,563	0,574
1	0,223	0,476	0,333	0,344

Na rysunku 3 przedstawiono wizualizację studium przypadku, wykonaną za pomocą programu QGIS 3.18, z wykorzystaniem właściwości warstwy i określeniem stylu za pomocą „symbolu stopniowego” na podstawie wartości „Waga_końc”. Podział na klasy został oparty na wartościach końcowych metody sumy ważonej w ujęciu rozmytym i obejmuje 5 klas, którym przypisano zakresy z wykorzystaniem trybu równych przedziałów. Opcja palety kolorów pozwoliła określić każdy przedział wybranym kolorem.

Wykorzystanie programu QGIS (licencja open source) ma wiele zalet, m.in. możliwość gromadzenia dużych baz danych przestrzennych. Na podstawie zgromadzonych przez zarządzających siecią wodociągową danych o przewodach możliwe jest przeprowadzanie wielu analiz przestrzennych oraz ich wizualizacji bez



Rys. 3. Wizualizacja studium przypadku za pomocą programu QGIS 3.18
Fig. 3. Visualisation of the case study using QGIS 3.18 software

konieczności korzystania z programów zewnętrznych, często dodatkowo płatnych. Opracowywanie i wizualizacja przestrzenna gromadzonych baz danych, szczególnie dużych, umożliwiają operatorom szybkie i intuicyjne podejmowanie działań decyzyjnych.

Podsumowanie

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę mają za zadanie dostarczać wodę do konsumentów w wymaganej ilości i jakości oraz pod odpowiednim ciśnieniem, w sposób ciągły i niezawodny. Aby spełnić wymagania stawiane systemowi wodociągowemu, konieczna jest efektywna wymiana bądź renowacja przewodów wodociągowych narażonych na nieuszczelnienie lub awarię; jest to proces niezbędny do osiągnięcia tego celu. Ze względu na ograniczone finanse przedsiębiorstwa wodociągowe są zmuszone do minimalizacji wydatków. Dlatego konieczne jest opracowanie metody umożliwiającej priorytetyzację przewodów wodociągowych wymagających modernizacji wcześniej niż inne.

W pracy zaproponowano autorską modyfikację metody FSAW. Metoda ta może zostać wykorzystana do typowania przewodów wodociągowych, które w pierwszej kolejności powinny zostać wymienione lub poddane renowacji.

Dzięki tej metodzie, w oparciu o zaproponowane w pracy kryteria decyzyjne oraz wartości parametrów, możliwa jest priorytetyzacja przewodów wymagających w pierwszej kolejności działań naprawczych. Przedstawione kryteria decyzyjne oraz wartości parametrów mogą stanowić istotne opracowanie ułatwiające podjęcie działań w analizowanej problematyce. Dodatkowym aspektem pracy jest opracowanie formuł obliczeniowych do wykorzystania w programie QGIS, umożliwiających opracowanie oraz

wizualizację całej sieci wodociągowej za pomocą zaproponowanej metody sumy ważonej w ujęciu rozmytym. Przedsiębiorstwa wodociągowe posiadające odpowiednie dane wejściowe wprowadzone do tabeli atrybutów przewodów wodociągowych mogą zaimplementować opracowaną metodę lub zmodyfikować ją według własnych potrzeb.

Dalsze badania będą ukierunkowane na adaptację opracowanej metody do rzeczywistej sieci wodociągowej oraz kalibrację opracowanego modelu.

Bibliografia

- Forero-Ortiz, E.; Martinez-Gomariz, E.; Sanchez-Juny, M.; Cardus Gonzalez, J.; Cucchiatti, F.; Baque Viader, F.; Sarrias Monton, M. Models and Explanatory Variables in Modelling Failure for Drinking Water Pipes to Support Asset Management: A Mixed Literature Review. *Appl Water Sci* 2023, 13, 210, doi:10.1007/s13201-023-02013-1.
- Rogers, P.D.; Grigg, N.S. Failure Assessment Modeling to Prioritize Water Pipe Renewal: Two Case Studies. *J. Infrastruct. Syst.* 2009, 15, 162–171, doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:3(162).
- Farouk, A.M.; Rahman, R.A.; Romali, N.S. Non-Revenue Water Reduction Strategies: A Systematic Review. *Smart and Sustainable Built Environment* 2023, 12, 181–199, doi:10.1108/SASBE-04-2021-0071.
- Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the Quality of Water Intended for Human Consumption; 2020;
- Macchiaroli, M.; Dolores, L.; De Mare, G. Multicriteria Decision Making and Water Infrastructure: An Application of the Analytic Hierarchy Process for a Sustainable Ranking of Investments. *Applied Sciences* 2023, 13, 8284, doi:10.3390/app13148284.
- Mutikanga, H.E.; Sharma, S.K.; Vairavamoorthy, K. Multi-Criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water Resour Manage* 2011, 25, 3947–3969, doi:10.1007/s11269-011-9896-9.
- Mohammadi, K. Pipe Renewal Plan in Water Distribution Network Considering Physical and Operational Risk Factors: A Hybrid MCDM-QSPM Technique 2024.
- Caetano, J.; Carriço, N.; Covas, D. Lessons Learnt from the Application of MCDA Sorting

- Methods to Pipe Network Rehabilitation Prioritization. *Water* 2022, 14, 736, doi:10.3390/w14050736.
9. Salehi, S.; Jalili Ghazizadeh, M.; Tabesh, M. A Comprehensive Criteria-Based Multi-Attribute Decision-Making Model for Rehabilitation of Water Distribution Systems. *Structure and Infrastructure Engineering* 2018, 14, 743–765, doi:10.1080/15732479.2017.1359633.
 10. Orasanin, G.; Simic, S.; Kosarac, A.; Vaskovic, S.; Milic, A.D. Water Supply Network Renewal Strategic Planning Utilizing the VIKOR Method 2024.
 11. Berrezel, Y.A.; Abdelbaki, C.; Rouissat, B.; Boumaaza, T.; Saber, M.; Goosen, M.; Kumar, N. Automated GIS-Based Decision Tool for Rehabilitation of a Drinking Water Infrastructure in Tlemcen, Algeria. *Appl Water Sci* 2024, 14, 124, doi:10.1007/s13201-024-02190-7.
 12. Patel, K.; Nihalani, S. A Review of Urban Water Networks Management Using GIS. *MethodsX* 2023, 11, 102261, doi:10.1016/j.mex.2023.102261.
 13. Ayad, A.R.; Awad, H.A.; Yassin, A.A. Geographic information systems in water distribution networks.; January 2012; Vol. 5.
 14. Trzaskalik, T. Wielokryterialne wspomaganie decyzji: metody i zastosowania; Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne: Warszawa, 2014; ISBN 978-83-208-2118-5.
 15. Churchman, C.W.; Ackoff, R.L. An Approximate Measure of Value. *OR* 1954, 2, 172–187, doi:10.1287/opre.2.2.172.
 16. Trzaskalik, T. Wielokryterialne Wspomaganie Decyzji. Przegląd Metod i Zastosowań. In *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, 2014; Vol. 74, pp. 239–263.
 17. Kacprzak, D. Metoda SAW z przedziałowymi danymi i wagami uzyskanymi za pomocą przedziałowej entropii Shannona. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach* 2018, 144–155.
 18. Zadeh, L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control* 1965, 8, 338–353, doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
 19. Pedrycz, W.; Czogała, E. *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*. ISSN 0434-0825 1983.
 20. Kaufmann, A.; Gupta, M.M. *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*; Elsevier Science Inc.: USA, 1988; ISBN 0-444-70501-5.
 21. Tzeng, G.H. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*; CRC Press: Boca Raton, Fla, 2011; ISBN 978-1-4398-6157-8.
 22. Kwietniewski, M. Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych. In *Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje: XXV konferencja naukowo-techniczna, Szczecin - Międzyzdroje, 24-27 maja 2011. T. 1*; Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego: Szczecin, 2011; Vol. I, pp. 127–140 ISBN 978-83-7663-075-5.
 23. Hołtoś, H. Ilościowa Ocena Wpływu Wybranych Czynników Na Parametry i Koszty Eksploatacyjne Sieci Wodociągowych; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007;
 24. Barfuss, S.L. *Water Main Break Rates in the USA and Canada: A Comprehensive Study*. 2023.
 25. Kwietniewski, M.; Rak, J.R. Reliability of water supply and sewage infrastructure in Poland; Committee of the Pol. Acad. of Sci.: Warsaw, 2010; ISBN 978-83-89687-51-7.
 26. Tchórzewska-Cieślak, B.; Pietrucha-Urbanik, K.; Piegdoń, I. The Failure Risk Analysis of the Water Supply Network. *Water* 2023, 15, 3815, doi:10.3390/w15213815.
 27. Pietrucha-Urbanik, K. Failure Prediction in Water Supply System – Current Issues. In *Theory and Engineering of Complex Systems and Dependability*; Zamojski, W., Mazurkiewicz, J., Sugier, J., Walkowiak, T., Kacprzyk, J., Eds.; Advances in Intelligent Systems and Computing; Springer International Publishing: Cham, 2015; Vol. 365, pp. 351–358 ISBN 978-3-319-19215-4.
 28. Karadirek, I.E.; Kaya-Basar, E.; Akdeniz, T. A Study on Pipe Failure Analysis in Water Distribution Systems Using Logistic Regression. *Water Supply* 2024, 24, 176–186, doi:10.2166/ws.2023.335.
 29. Pietrucha-Urbanik, K.; Studziński, A.; Rzeszowska, P. Wybrane aspekty kosztów oraz awaryjności przewodów przykładowego systemu wodociągowego. *Rocznik Ochrona Środowiska* 2016, 18, 616–627.
 30. Tchórzewska-Cieślak, B.; Szpak, D.; Żywiec, J.; Rożnowski, M. The Concept of Estimating the Risk of Water Losses in the Water Supply Network. *Journal of Environmental Management* 2024, 359, 120965, doi:10.1016/j.jenvman.2024.120965.
 31. Moerman, A.; Wols, B.A.; Diemel, R. The Effects of Traffic Loads on Drinking Water Main Failure Frequencies in the Netherlands. *Water Practice and Technology* 2016, 11, 524–530, doi:10.2166/wpt.2016.057.
 32. Robert, D.J.; Chan, D.; Rajeev, P.; Kodikara, J. Effects of Operational Loads on Buried Water Pipes Using Field Tests. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2022, 124, 104463, doi:10.1016/j.tust.2022.104463.
 33. Chaudhuri, C.H.; Choudhury, D. Protection of Pipeline below Pavement Subjected to Traffic Induced Dynamic Response. *Sci Rep* 2023, 13, 4995, doi:10.1038/s41598-023-31615-7.

Nadchodzące wydarzenia

MARZEC

24-26.03.26 **NADARZYN** Valves&Pumps Expo, Targi branży armatury przemysłowej, pomp, zaworów i technologii przepływu, Stowarzyszenie SPAP Polska Armatura przemysłowa

KWIECIEŃ

13-14.04.26 **WROCLAW** NOVA WODA – I Ogólnopolska Konferencja samorządowych praktyków, Oczyszczanie ścieków – jak zmienić źródło problemów w źródło perspektyw, UPr Wrocław i inni

14-16.04.26 **POZNAŃ** Międzynarodowe Targi Instalacyjne, Instalacje

MAJ

10-13.05.26 **MIEDZYDROJE** GAZTERM, Konferencja Paliwa gazowe fundamentem przemiany energetycznej, Bezpieczeństwo infrastruktury energetycznej, Organizator Studio 4u

12-13.05.26 **STRYKÓW** Targi Grupy SBS - GRUPA hurtowni instalacyjnych

20-22.05.26 **TRZEBNICA** Konferencja „Woda, ścieki, odpady – infrastruktura i technologia”, Politechnika Wroclawska

20-22.05.26 **BIAŁYSTOK** Konferencja INNOwacje w dekarbonizacji budownictwa i systemach energetycznych – INNOBuild2026”, Politechnika Białostocka

25-27.05.26 **POLAŃCZYK** Konferencja Naukowo-techniczna „Problematyka eksploatacji systemów w inżynierii środowiska”, Zjazd Dziekanów kierunku Inżynieria Środowiska, Politechnika Rzeszowska

26 -28.05.26 **BYDGOSZCZ** Targi WOD-KAN

CZERWIEC

9-11.06.26 **NADARZYN** COLD-TECH Poland 2026 – branżowe targi technologii chłodzenia, PTAK Warsaw Expo

16-19.06.26 **KARPACZ** XVII edycja Międzynarodowej Konferencji „Air, Heat and Energy”, Politechnika Wroclawska

16-18.06.26 **NADARZYN** FiltraTec Expo 2026 – Targi Technologii Filtracji i Zastosowań Filtrów, PTAK Warsaw Expo