

Wielokryterialna ocena wariantów modernizacji systemu zaopatrzenia w wodę – przykładowa analiza w oparciu o model symulacyjny oraz QGIS

Multi-criteria evaluation of the modernization of the water supply system – case study based on model simulations and QGIS

ARTUR MARCIN JANY, JĘDRZEJ BYŁKA, RAFAŁ BRODZIAK, TOMASZ MRÓZ

DOI 10.36119/15.2024.3.6

W pracy dokonano analizy przypadku modernizacji systemu zaopatrzenia w wodę wybranego fragmentu obszaru miejskiego. Punktem wyjścia do rozważań rozbudowy systemu było zebranie informacji o stanie obecnym. Przedstawiono proces budowy komputerowego modelu hydraulicznego, na przykładzie pokazano w jaki sposób można zastosować GIS w celu integracji informacji pochodzących z różnych baz danych. W pracy wskazano, w jaki sposób określić przyszłe wymagania systemu zaopatrzenia w wodę w kontekście zmian demograficznych. Dla tak zidentyfikowanych wymagań zaproponowano trzy warianty rozbudowy systemu, wszystkie spełniające podstawowe wymagania stawiane systemom wodociągowym w Polsce. W celu wskazania najkorzystniejszego z rozwiązań zdefiniowano kryteria, dla każdego wariantu obliczano oceny częściowe. W celu dokonania końcowego wyboru zastosowano metodę wielokryterialnej analizy decyzji TOPSIS. Wszystkie obliczenia i analizy wykonano z użyciem oprogramowania EPANET oraz QGIS. Praca pokazuje kompleksowe podejście do modernizacji systemu zaopatrzenia w wodę, wykorzystując narzędzia komputerowe.

Słowa kluczowe: analiza wielokryterialna, TOPSIS, systemy wodociągowe, modelowanie systemu zaopatrzenia w wodę, systemy informacji geograficznej, analiza koncepcyjna

The work analyzes the case of modernization of the water supply system of a selected part of an urban area. The starting point for considering the expansion of the system was collecting information about the current state. The process of building a computer hydraulic model is presented, with an example showing how GIS can be used to integrate information from various databases. The paper shows how to determine the future requirements of the water supply system in the context of demographic changes. For the requirements identified in this way, three variants of system expansion were proposed, all of which meet the basic requirements for water supply systems in Poland. In order to indicate the most advantageous solution, key evaluation criteria were defined, and partial scores were calculated for each variant. To make the final selection, the Topsis multi-criteria decision analysis method was used. All calculations and analyses were performed using EPANET, QGIS software.

Keywords: multi-criteria decision analysis, TOPSIS, modeling of the water supply system, geographic information systems

Wprowadzenie

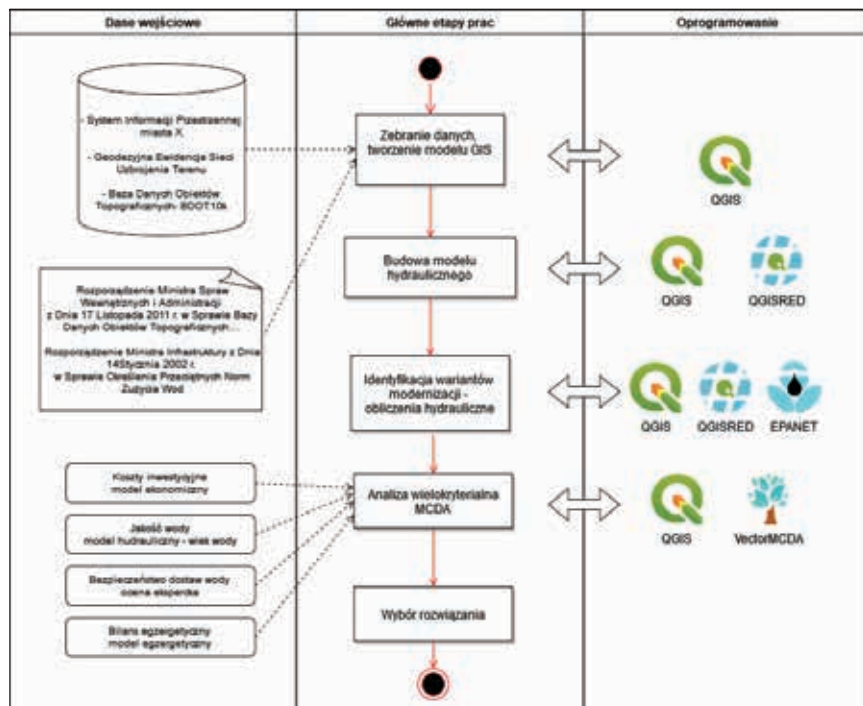
Postępujący proces urbanizacji powoduje dynamiczny rozwój największych ośrodków miejskich w Polsce. Jest to trend ogólnosiwiatowy, według ONZ w 2030 roku mieszkańcy miast stanowić będą ponad 60 procent populacji Ziemi. Prawie cały przyszły wzrost populacji świata będzie koncentrował się w miastach [1].

W Polsce widoczny jest silny trend przenoszenia się mieszkańców z terenów centralnych miast na jego obrzeża, powodując wzrost aglomeracji. Sytuacja taka skutkuje zmieniającymi się uwarunkowaniami pracy systemów zaopatrzenia w wodę. W celu zachowania funkcji systemu, tj. dostarczenia wody o odpowiedniej jakości i ilości pod odpowiednim ciśnieniem, przy zwiększającej się liczbie mieszkań-

ców konieczna jest rozbudowa, modernizacja i budowa nowych elementów systemów zaopatrzenia w wodę.

Rozbudowa systemu zaopatrzenia w wodę poprzedzona jest procesem informacyjno-decyzyjnym, w którym można wyróżnić kilka podstawowych etapów [2], [3]. Proces planowania modernizacji rozpoczyna się od analizy stanu obecnego oraz identyfikacji kierunków przyszłych

mgr inż. Artur Marcin Jany arturjany16@gmail.com, dr inż. Jędrzej Byłka <https://orcid.org/0000-0001-8471-4315>, jedrzej.byłka@put.poznan.pl, dr inż. Rafał Brodziak <https://orcid.org/0000-0002-7320-355X>, rafal.brodziak@put.poznan.pl, prof. dr hab. inż. Tomasz Mróz <https://orcid.org/0000-0003-2129-9198>, tomasz.mroz@put.poznan.pl – Institute of Environmental Engineering, Poznan University of Technology, Poznań, Poland



Rys. 1.
Schemat przedstawiający główne etapy pracy
Picture 1. Main stages of work diagram

zmian. Przedsiębiorstwa planują rozbudowę sieci biorąc pod uwagę ustalenia miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz związane z nimi prognozowane zapotrzebowanie na wodę. Zebrane uwarunkowania stanowią podstawę do przeprowadzenia analiz funkcjonowania systemów wodociągowych w przyszłości. Celem tych analiz jest wskazanie krytycznych obszarów na sieci, np. zbyt dużych przepływów czy braków w dostawach wody do odbiorców, poprzez, na przykład, wykorzystanie komputerowego modelu hydraulicznego i oprogramowania typu GIS [4], [5]. Wobec zidentyfikowanych potencjalnych

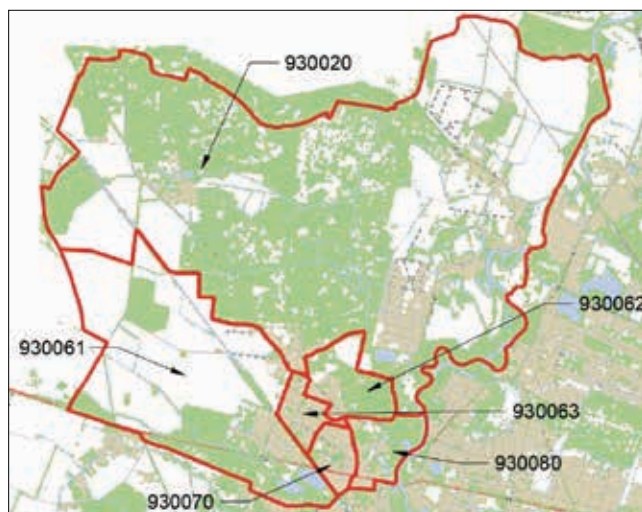
problemów należy przystąpić do poszukiwania ich rozwiązania. Projektowane rozwiązania powinny spełniać wszystkie wymagania w przedziale wartości dopuszczalnych, np. odpowiednie ciśnienie wody we wszystkich punktach sieci. Wybór najlepszego z przygotowanych rozwiązań bardzo często jest decyzją trudną. Mnogość kryteriów i samych wariantów utrudnia ten proces. Zastosowanie metod wielokryterialnej analizy decyzji (MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis) pozwala na otrzymanie jednego, miarodajnego wyniku, ułatwiającego porównanie rozwiązań i wybór [6]. W celu oceny wariantów rozbudowy systemu niezbędna jest

integracja wielu narzędzi, metod oraz baz danych. Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy przedstawiający główne etapy pracy, zastosowane narzędzia oraz koncepcję przepływu danych między systemami. Celem pracy jest wykazanie użyteczności wybranych metod wspomagania podejmowania decyzji, oprogramowania komputerowego wraz z bazami danych do analizy i oceny wariantów rozbudowy sieci

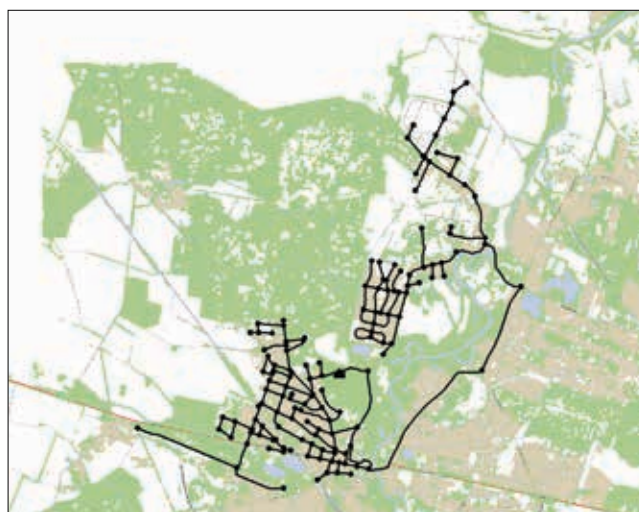
Opis studium przypadku

Opis stanu istniejącego

Rozważania w pracy mają charakter teoretyczny i zostały oparte na danych z ogólnodostępnych systemów informacyjnych. Na potrzeby analiz wybrano przykładowy obszar miejski, z którego wybrano 6 obszarów statystycznych, nazwanych oraz obrysowanych czerwoną linią na rysunku 2. Na podstawie danych dostępnych w Systemie Informacji Przestrzennej miasta X poddano analizie zmiany demograficzne na rozpatrywanych terenach na przestrzeni dziesięciu lat 2011-2020. Analizując dane można dostrzec, iż ogólna liczba mieszkańców wzrosła o około 20%. Warunkiem koniecznym wykonania projektu rozbudowy systemu zaopatrzenia w wodę dla analizowanego obszaru jest poznanie stanu aktualnego i przyszłego w celu odwzorowania go w modelu hydraulicznym. Korzystając z otwartego i darmowego oprogramowania QGIS [7] należącego do kategorii Systemów Informacji Geograficznej, pobrano dane o przebiegu istniejących sieci wodociągowych z serwisu GESUT [8]. Na podstawie informacji o sieci wodociągowej, naniesiono główne przewody (bez przyłączy) do programu EPANET 2.0 [9]



Rys. 2.
Analizowane obszary miasta
Picture 2. Analyzed areas of the city



Rys. 3.
Zarys grafu sieci wodociągowej
Fig. 3. Graph of the water supply network model

(dostępnego jako otwarte oprogramowanie), umożliwiającego modelowanie hydrauliczne sieci. W efekcie powstał graf sieci wodociągowej z naniesionymi średnicami, składający się ze 144 węzłów oraz 176 przewodów, jednak bez przypisanych wielkości poboru wody czy też rzędnych terenu (rysunek 3).

Na potrzeby pracy koniecznym było wyróżnienie obiektów budowlanych, mogących wykazywać zapotrzebowanie na wodę, do tego celu wykorzystano dane pochodzące z Bazy Danych Obiektów Topograficznych – BDOT10k [10], której obiekty zaimportowano do QGISa (z wykorzystaniem usługi WFS). Na rysunku 4 kolorami pomarańczowym, różowym oraz czerwonym wyróżniono budynki poddane analizom. Budynki oznaczone kolorem brązowym to budynki użyteczności publicznej. Do celu analizy uwzględniono jedynie 6 największych tego typu budynków [11]. Opierając się na bazie budynków uzyskanej z systemu BDOT10k, rozpoczęto wyznaczanie zapotrzebowania na wodę dla każdego z tych obiektów. Na potrzeby pracy przyjęto, iż wszyscy mieszkańcy sześciu rozważanych obszarów statystycznych zamieszkują w wyróżnionych budynkach jedno i wielorodzinnych. Znając powierzchnie użytkowe budynków, obliczono łączną powierzchnię użytkową w każdym z rozpatrywanych obszarów, a następnie wyznaczono wskaźnik zaludnienia, dzieląc powierzchnię przez łączną liczbę mieszkańców w danym obszarze. Znając wskaźnik jednostkowy, wyznaczono liczbę mieszkańców każdego z budynków, co było konieczne do wyznaczenia zapotrzebowania na wodę. Po określeniu liczby mieszkańców, przystąpiono do wyznaczenia

rozbiorów dla każdego z budynków. Wszystkich kalkulacji dokonano bezpośrednio w środowisku QGIS, obliczając każdy rozbiór bezpośrednio dla kolejnych budynków (używając narzędzia automatyzującego: kalkulator pól). Wyznaczono również zapotrzebowanie bytowe na wodę dla sześciu wybranych obiektów użyteczności publicznej w oparciu o zapotrzebowanie na jednostkę odniesienia określoną na podstawie [12] oraz analogicznych obliczeń zastosowanych przy budownictwie jedno oraz wielorodzinnym. W celu zobrazowania zmienności rozbiórów wody każdego dnia, zaproponowano wzorzec zmienności godzinowej zaimplementowany bezpośrednio w systemie EPANET, przedstawiony na wykresie na rysunku 5. Wykorzystano wzorzec z innej jednostki osadniczej o podobnym charakterze. W kolejnym kroku wykonano uzupełnienie modelu o brakujące dane w postaci rozbiórów oraz rzędnych terenu. W tym celu wykorzystano wtyczkę QGISRed [13], która umożliwia obliczenia hydrauliczne z wykorzystaniem algorytmów programu EPANET bezpośrednio w środowisku QGIS. Przy jej pomocy zaimportowano do środowiska geoinformacyjnego wcześniej przygotowany, podstawowy model sieci wodociągowej EPANET. W następnym kroku model uzupełniono o dane dotyczące rzędnych terenu. W tym celu skorzystano z danych dostępnych w serwisie GUGIK (Główny Urząd Geodezji i Kartografii). Model w tym momencie składał się z 1157 węzłów oraz 1182 przewodów, jego widok w środowisku QGIS przedstawia rysunek 6. Do celów analizy wariantów rozbudowy systemu model wyeksportowano i dalsze kroki realizowano w programie EPANET.

Zgodnie z danymi publikowanymi przez Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji wybranego miasta X lokalna Stacja Uzdatniania Wody Y zaopatruje około kilkunastu tysięcy mieszkańców, którzy zamieszkują w strefie zasilania analizowanego obszaru. Dobowa produkcja wody, na chwilę przygotowywania artykułu wynosi około 1000 m³/dobę. Do celów artykułu przyjęto zestaw pomp podnoszący ciśnienie Hydro-Vacuum S.A. o oznaczeniu NHVe-50-200-3 połączonych równolegle, o parametrach: wydajność każdej z pomp: 61,65 m³/h, wysokość podnoszenia: 45 mH₂O, liczba pracujących pomp: 3 (przyjęto charakterystykę wielopunktową). Pompy dobrane zostały w oparciu o przepływ godzinowy maksymalny występujący na sieci oraz konieczność utrzymania odpowiedniego ciśnienia w sieci wodociągowej (min. 20 metrów słupa wody w punkcie odbioru oraz max. 60 metrów). Charakterystyka pomp została wprowadzona do modelu.

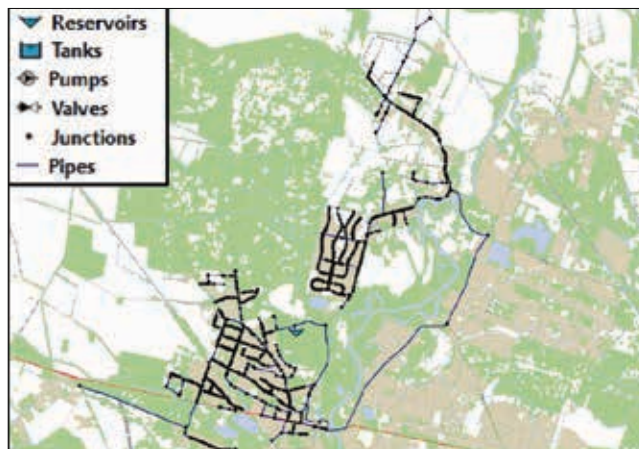
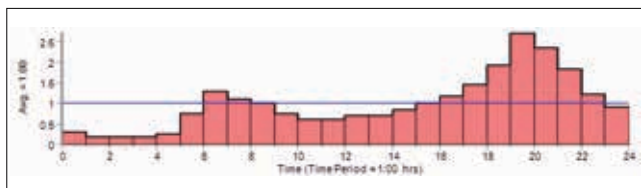
Opis stanu przewidywanego

Utworzony model hydrauliczny obejmował wyłącznie tereny z istniejącymi budynkami. W celu określenia przyszłych kierunków rozwoju pobliskich terenów, poddano analizie miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego. Na rysunku 7 wskazano sześć głównych obszarów rozbudowy analizowanych terenów, dla którego podjęto się oszacowania przyszłego zapotrzebowania na wodę.

Aby określić wpływ przyszłej urbanizacji terenów na system zaopatrzenia w wodę, wyznaczono rozbiory wody. Na potrzeby pracy analizowano łączne rozbiory każdej z sześciu stref, które zostaną przyłączone na pobliskich krańcach sieci.

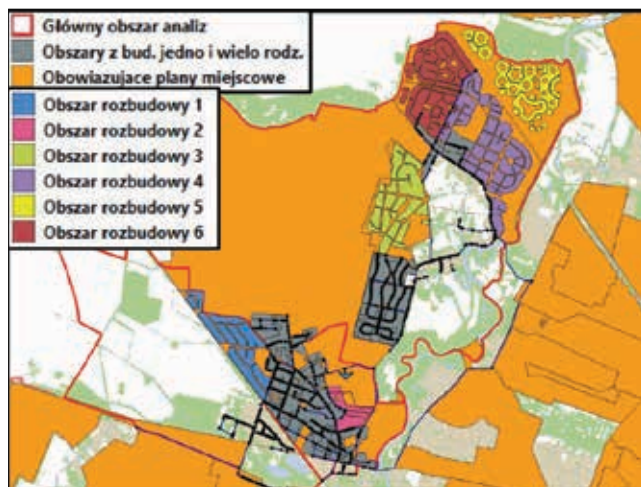


Rys. 4.
Widok zabudowań na podstawie danych z systemu BDOT10k
Fig. 4. View of buildings based on data from the BDOT10k system

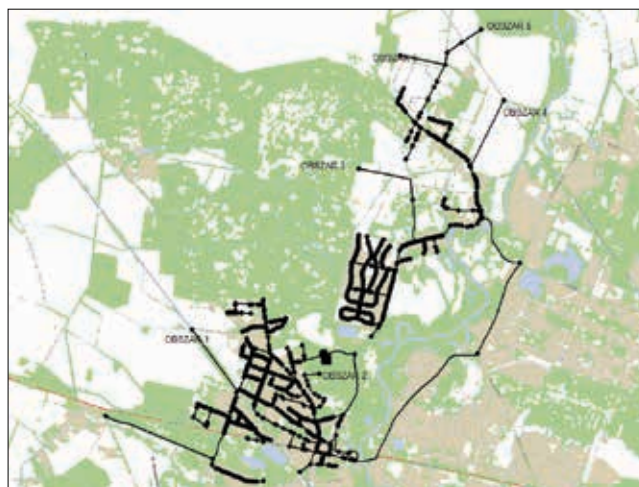


Rys. 6.
Model hydrauliczny przed rozbudową
Fig. 6. Hydraulic model before expansion

Rys. 5.
Wzorzec godzinowy rozbiórów wody
Fig. 5. Hourly water collection pattern



Rys. 7.
Tereny rozbudowy
Fig. 7. Expansion areas



Rys.8.
Rozbudowany model hydrauliczny
Fig. 8. Extended hydraulic model

Tabela 1. Zapotrzebowanie na wodę dla rozwijanych obszarów
Table 1. Water demand for developed areas

Warstwa QGIS	Powierz. [ha]	Gęstość zalud. [os/ha]	Liczba mieszk. [os]	Zapotrz. [dm ³ /d]	Q _{dśr} [m ³ /d]	N _d [-]	Q _{dmax} [m ³ /d]	Q _{hśr} [m ³ /h]
Obszar 1	25,60	100	2561	130	332,93	1,7	565,98	23,58
Obszar 2	8,69	100	870	130	113,1	1,7	192,27	8,01
Obszar 3	32,57	100	3257	130	423,41	1,7	719,80	29,99
Obszar 4	49,67	100	4968	130	645,84	1,7	1097,93	45,75
Obszar 5	26,46	100	2646	130	343,98	1,7	584,77	24,37
Obszar 6	42,10	100	4210	130	547,3	1,7	930,41	38,77

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń zapotrzebowania na wodę. Mając na uwadze powierzchnie obszarów przyszłej zabudowy oraz zakładając gęstość zaludnienia na poziomie 100 os/ha (przyjęta na podstawie analiz dla sąsiednich zabudowanych jednostek osadniczych), wyznaczono średni godzinowy przepływ dla każdej z omawianych stref. Przyjęto wskaźnik dobowej nierównomierności rozbioru $N_d = 1,7$.

Rys. 8 przedstawia model hydrauliczny oparty na danych miasta X wraz z danymi sześcioma rozbiorami (oznaczonymi obszarami 1-6) obrazującymi przyszłą rozbudowę sieci zgodną z przewidywaniami uchwalonych miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego. Średnice doprowadzające wodę do tych obszarów zostały dobrane jako przedłużenie ostatnich odcinków na sieci, w pracy nie uwzględniano sieci rozdzielczej na tym obszarze.

Analiza potrzeb w zakresie rozbudowy systemu

W pierwszym kroku analizie poddano zmianę przepływów. Tabela 2 przedstawia porównanie zmiany zapotrzebowania na wodę w związku z możliwą rozbudową terenów. Przy założeniu, że obszar będzie w pełni zabudowany, zapotrzebo-

Tabela 2. Porównanie zapotrzebowania na wodę
Table 2. Comparison of network flows

Zapotrzebowanie	Przed rozbudową	Po rozbudowie
Q _{dśr} [m ³ /dobę]	970,83	3386,78
Q _{dmax} [m ³ /dobę]	1650,41	5757,53
Q _{hśr} [m ³ /h]	68,77	239,90
N _d [-]	2,68	2,68
Q _{hmax} [m ³ /h]	184,95	645,22

wanie na wodę wzrośnie 3,5 krotnie. Obecna produkcja stacji uzdatniania wody Y oscyluje w granicach 1000 m³/dobę. Do celów pracy przyjęto, że możliwe jest zwiększenie zdolności produkcyjnych stacji Y do wymaganych wartości.

Przed rozbudową terenów w sieci utrzymywano ciśnienie na poziomie 30-50 mH₂O. Przeprowadzone badania symulacyjne dowiodły, że w przypadku zwiększonego zapotrzebowania, bez rozbudowy istniejącej sieci, duża część odbiorców zostanie pozbawiona dostępu do wody. W celu utrzymania odpowiedniego ciśnienia w sieci po rozbudowie konieczna była zmiana zestawu pompowego. Dobrano zestaw pomp firmy Hydro-Vacuum S.A. o oznaczeniu NHVe.100-200-2 połączonych równolegle o parametrach: przepływ przez jedną pompę: 215,07 m³/h, wyso-

kość podnoszenia: 45 mH₂O, liczba pomp: 3. Tabela 3 przedstawia porównanie prędkości przepływu wody obserwowanych w sieci wodociągowej przed i po ewentualnej rozbudowie. Z obserwacji wynika, iż prędkości przepływu wody po rozbudowie zgodnie z przewidywaniami są znacznie wyższe. Na niektórych odcinkach dochodzą do nawet 3,75 m/s. Oznacza to bardzo duże straty ciśnienia oraz uniemożliwia to poprawną pracę systemu w takich warunkach.

Tabela 3. Prędkości przepływów na sieci: średnie oraz w godzinie maksymalnego poboru
Table 3. Network flow speed: in maximum demand hours and average

Prędkość	Przed rozbudową	Po rozbudowie
Średnia [m/s]	0,11	0,47
Maksymalna [m/s]	1,07	3,75

Analizie poddano tzw. wiek wody, który jest bardzo skorelowany z prędkością przepływu. Prędkość przepływu powinna mieścić się w przedziale 0,5-1,2 m/s, wartości poniżej powodują zwiększenie czasu zatrzymania wody w sieci wodociągowej.

W przypadku ewentualnej rozbudowy jednostki osadniczej nie będzie możliwości zaopatrzenia w wodę z istniejącej sieci. Konieczna więc będzie modernizacja sieci wodociągowej.

Identyfikacja wariantów modernizacji systemu

W przypadku zakładanej rozbudowy na analizowanych obszarach, obecna sieć wodociągowa nie będzie w stanie utrzymać odpowiednich warunków hydraulicznych w przewodach. Przy identyfikacji dopuszczalnych technicznie wariantów modernizacji jako cel nadrzędny przyjęto

uzyskanie warunków hydraulicznych wymaganych dla systemów wodociągowych w Polsce [14]. Na potrzeby analizy zaproponowano trzy warianty:

- Wariant 1 – rozbudowa sieci wodociągowej,
- Wariant 2 – budowa dodatkowej stacji uzdatniania wody,
- Wariant 3 – budowa zbiornika wyrównawczego oraz przepompowni sieciowej.

Wariant 1 – rozbudowa sieci wodociągowej

Pierwszym proponowanym wariantem modernizacji pracy sieci wodociągowej jest rozbudowa sieci przewodów doprowadzających wodę. Przy pomocy komputerowego modelu warunków hydraulicznych sprawdzono, w których przewodach podczas godziny maksymalnych rozbiorów występują największe straty ciśnienia, w celu wskazania lokalizacji dodatkowych przewodów. Rys. 9 obrazuje sytuację w sieci wodociągowej o godzinie 19:00 w odniesieniu do wysokości strat ciśnienia przedstawianych w jednostce mH_2O/km . Analizując rysunek 8 można zauważyć kilka odcinków sieci (zaznaczonych kolorem czerwonym), na których wysokości strat ciśnienia są bardzo duże, dochodzące do nawet $33 mH_2O/km$, przy bardzo dużej prędkości, co uniemożliwia uzyskanie odpowiedniego ciśnienia na krańcach sieci. Celem zniwelowania strat i lepszego rozłożenia przepływów

w sieci, dodano 3 odcinki rurociągów, których parametry przedstawia tabela 4. Odcinki łącznie mają długość blisko 5000 metrów, o trzech różnych średnicach: 225, 250 oraz 315 mm. Lokalizacja odcinków przedstawiona została na rysunku 10, zgodnie z oznaczeniem węzłów w tabeli 4.

Po wprowadzeniu nowych odcinków zaobserwowano poprawę warunków dostawy wody, czego efektem jest brak straty powyżej $15 mH_2O/km$ we wszystkich przewodach na sieci. Konsekwencją eliminacji zbyt dużych przepływów oraz rozbudowy sieci jest otrzymanie odpowiedniej wysokości ciśnienia we wszystkich węzłach w sieci wodociągowej, zapewniającej wymaganą dostawę wody co przedstawione zostało w tabeli 5. Dodatkowo, warto zauważyć znacznie zmniejszoną maksymalną prędkość przepływu obserwowaną na sieci. Średni wiek wody zmniejszył się. Charakterystyczne wartości warunków hydraulicznych sieci przedstawia tabela 5.

Tabela 5. Charakterystyczne parametry pracy sieci – wariant 1
Table 5. Characteristic network operating parameters – variant 1

	Przed zmianami	Po zmianach
Ciśnienie mierzone na sieci dla Q_{hmax} [mH_2O]	-117,13	23,79
Prędkość maksymalna [m/s]	3,75	1,70
Wiek wody średni [h]	11,90	11,07

Tabela 4. Parametry nowych odcinków na sieci – wariant 1
Table 4. Parameters of new sections on the network – variant 1

Lp.	Węzły		Odcinek		Materiał	Średnica	
	Początkowy	Końcowy	Oznaczenie	Długość		Nominalna	Wewnętrzna
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]	[mm]	[mm]
1	X4	X2	17	1489,50	PEHD PN10	250	220,4
2	X5	X4	18	1904,88	PEHD PN10	315	277,6
3	X3	X1	20	558,38	PEHD PN10	225	198,2



Rys. 9.
Lokalizacja odcinków, w których występują największe straty ciśnienia
Fig. 9. Location of sections with the highest pressure losses



Rys. 10.
Lokalizacja nowych odcinków sieci
Fig. 10. Location of new sections of the network

Wariant 2 – budowa dodatkowej stacji uzdatniania wody

Drugim rozważanym wariantem modernizacji pracy sieci wodociągowej jest budowa nowego ujęcia wraz z stacją uzdatniania wody i pompownią oraz odcinkami doprowadzającymi wodę z tej SUW do sieci. W celu określenia najbardziej preferowanej lokalizacji dla nowego ujęcia i stacji, przeanalizowano przepływy w przewodach sieciowych w godzinie maksymalnego rozbioru, co przedstawia rys. 11. Największe przepływy występują tuż przy istniejącej stacji uzdatniania wody, głównej magistrali oraz na odcinku doprowadzającym wodę do trzech nowych obszarów o numerach 4, 5 oraz 6. W związku z powyższym wskazano rzeczywistą lokalizację dla nowej stacji (w celu uproszczenia analiz pominięto dostępność źródła wody). W celu polepszenia warunków hydraulicznych na sieci zaproponowano stację wodociągową o maksymalnej wydajności $303,33 m^3/h$, co stanowi blisko 47% całego zapotrzebowania na wodę w sieci. Za stacją uzdatniania wody umieszczono zestaw pomp firmy Hydro-Vacuum S.A. o oznaczeniu NHVe-65-200-4 połączonych równolegle o parametrach: przepływ przez jedną pompę: $101,11 m^3/h$, wysokość podnoszenia: $35 mH_2O$, liczba pomp: 3.

Tabela 6 przedstawia zestawienie nowych projektowanych odcinków sieci, które umożliwiają dostarczenie wody z nowej stacji wodociągowej do odbiorców. Rys. 12 przedstawia lokalizację nowych elementów sieci opisanych wcześniej w odniesieniu do ukształtowania terenu, w tym zasuwy uniemożliwiającą przepływ wody z nowej stacji w kierunku zachodnim od zaworu.

Badania symulacyjne wykazały, że wprowadzenie powyższych zmian spowodowało, że wartości ciśnień na sieci

Tabela 6. Parametry nowych odcinków na sieci – wariant 2
Table 6. Parameters of new sections on the network – variant 2

Lp.	Węzły		Odcinek		Materiał	Średnica	
	Początkowy	Końcowy	Oznaczenie	Długość		Początkowy	Końcowy
[–]	[–]	[–]	[–]	[m]	[–]	[mm]	[mm]
1	X1	PROJ. SUW	20	352,51	PE	225	198,2
2	X2	PROJ. SUW	21	383,94	PE	225	198,2

kości zbiornika, poddano analizie dane dotyczące przepływów wody w rozważanej lokalizacji tak, aby zapewnić odpowiednią ilość wody dla północno-zachodnich obszarów mieszkalnictwa. Po wprowadzeniu parametrów do programu EPA-NET oraz przeanalizowaniu rzeczywistej



Rys. 11.
Analizowane przepływy w godzinie maksymalnego rozbioru przed zmianami
Fig. 11. Analyzed flows at the maximum hour before the changes



Rys. 13.
Możliwa lokalizacja odcinka X3-X4
Fig. 13. Possible location of section X3-X4

Rys. 12.
Lokalizacja nowych elementów systemu
Fig. 12. Location of new system elements

Tabela 7. Charakterystyczne parametry pracy sieci – wariant 2
Table 7. Characteristic network operating parameters – variant 2

	Przed zmianami	Po zmianach
Ciepłota miarodajna na sieci dla Q_{max} [mH_2O]	- 117,13	20,06
Prędkość maksymalna [m/s]	3,75	1,86
Wiek wody średni [h]	11,90	12,89

mieszczą się w preferowanym przedziale 20-60 mH_2O . Prędkość maksymalna obserwowana w systemie również uległa zmniejszeniu i obserwowana jest na odcinku X3. Jest to jedyny odcinek o takiej prędkości i największych stratach. Rozważyć należy zastosowanie większej średnicy tego przewodu, co spowoduje minimalizację strat ciśnienia. Średnia wartość tzw. wieku wody w stosunku do sytuacji przed zmianami nieznacznie wzrasta do 12,89 godzin. W celu polepszenia wieku wody w systemie zaproponowano budowę dodatkowego połączenia na sieci na wschód od istniejącej stacji uzdatniania wody o długości 250 metrów oraz średnicy nominalnej 225 mm, przedstawionego na rysunku 13, a także oznaczonego węzłami X3 oraz X4. W takim wypadku zaobserwowano spadek wieku wody do poziomu 7,29. Przedstawiona propozycja nie jest konieczna do uzyskania odpowiednich warunków hydraulicznych, ale jest możliwą opcją w celu potencjalnego poprawienia jakości wody. Charakterystyczne parametry pracy sieci przedstawia tabela 7.

Wariant 3 – budowa zbiornika

sieciowego z zestawem pompowym

Trzecim wariantem jest budowa zbiornika wyrównawczego na sieci wraz z zestawem podnoszącym ciśnienie oraz do projektowania odcinka sieci wodociągowej. W celu określenia optymalnej lokalizacji dla zbiornika wyrównawczego, poddano analizie średnice przewodów występujących na sieci wodociągowej, które przedstawione zostały na rysunku 14. Opierając się na analizach średnic, przepływów oraz rozbiórów, jako najlepszą lokalizację dla zbiornika wyrównawczego wybrano tereny pobliskie głównej magistrali położonej maksymalnie na północno-zachodzie w omawianym modelu. W celu określenia przewidywanej wiel-

kości zbiornika w modelu ustalono wielkość zbiornika na 250 m^3 , uwzględniając rezerwę wody na cele przeciwpożarowe. Za zbiornikiem umiejscowiono zestaw pomp firmy Hydro-Vacuum S.A. o oznaczeniu NHVe-65-250-5 połączonych równolegle o parametrach: przepływ przez jedną pompę: 101,11 m^3/h , wysokość podnoszenia: 35 mH_2O , liczba pomp: 3.

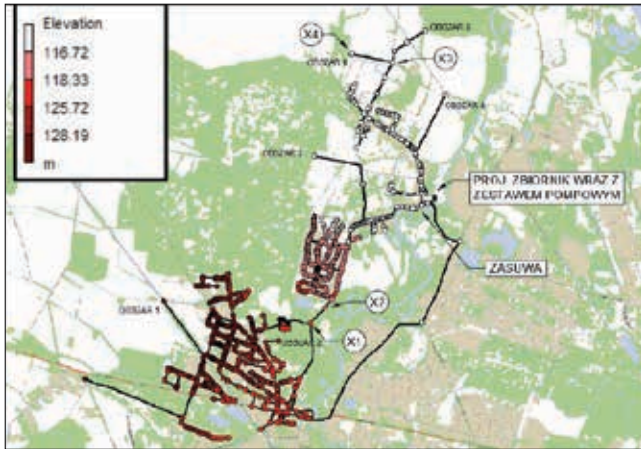
Tabela 8 przedstawia zestawienie nowych przewodów na sieci. Pomiędzy węzłami X1 oraz X2 położono nowy przewód, gwarantujący dostawę wody do środkowych terenów, które zostały odcięte za zbiornikiem przy pomocy zasowy odcinającej. Dla odcinka X3 – X4 przewidziana jest jego modernizacja – zmiana średnicy z DN110 na większą, tj. DN225.

Tabela 8. Parametry nowych odcinków na sieci – wariant 3
Table 8. Parameters of new sections on the network – variant 3

Lp.	Węzły		Odcinek		Materiał	Średnica	
	Początkowy	Końcowy	Oznaczenie	Długość		Nominalna	Wewnętrzna
[–]	[–]	[–]	[–]	[m]	[–]	[mm]	[mm]
1	X1	X2	16	236,19	PE	225	198,2
2	X3	X4	5	467,33	PE	225	198,2



Rys. 14.
Średnice rurociągów przed zmianami
Fig. 14. Pipeline diameters before changes



Rys. 15.
Lokalizacja nowych elementów systemu
Fig. 15. Location of new system elements

Lokalizacja nowych elementów sieci przedstawiona została na rysunku 15.

Wyniki symulacji warunków hydraulicznych w analizowanym wariancie wskazują, iż zachowana jest wysokość ciśnienia z przedziału 20-60 mH₂O. Natomiast straty jednostkowe ciśnienia zostały znacząco zredukowane. Tabela 9 przedstawia parametry ciśnienia, wieku oraz prędkości maksymalnej. Poddając je analizie można zauważyć, iż prędkość maksymalna w sieci jest nadal bardzo wysoka, w dwóch miejscach dochodzi do 2.77 m/s. Ma to jednak również pozytywne skutki w postaci obniżonego średniego wieku wody o wartości 9,93h. Charakterystyczne parametry pracy sieci przedstawia tabela 9.

Tabela 9. Charakterystyczne parametry pracy sieci – wariant 3
Table 9. Characteristic network operating parameters – variant 3

	Przed zmianami	Po zmianach
Ciśnienie miarodajne na sieci dla Q _{hmax} [mH ₂ O]	-117.13	21.23
Prędkość maksymalna [m/s]	3.75	2.77
Wiek wody średni [h]	11.90	9.93

Obliczenia i dyskusja wyników

Przyjęta metoda oceny wielokryterialnej

Ocenę wariantów zaproponowanych rozwiązań zrealizowano z użyciem metody TOPSIS (The Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution) należącej do metod wielokryterialnej analizy decyzji [15]. Metoda wywodzi się z koncepcji rozwiązania kompromisowego, bazuje na zależności podobieństwa do rozwiązania idealnego, polegającej na wybraniu najlepszej możliwości – najbliższej dodatniego punktu idealnego rozwiązania (rozwiązanie optymalne) i naj-

bardziej oddalonej od rozwiązania najgorszego – ujemnego punktu idealnego.

W przebiegu tej metody określa się [6]:

- zbiór rozwiązań: $A = \{A_k \mid k = 1, \dots, n\}$,
- zbiór kryteriów: $C = \{C_j \mid j = 1, \dots, m\}$,
- zbiór ocen rozwiązania A_k ze względu na kryterium C_j : $X = \{x_{kj} \mid k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m\}$
- zbiór wag: $w = \{w_j \mid j = 1, \dots, m\}$.

Następnie oblicza się znormalizowany ranking wg. kroków:

$$r_{kj}(x) = \frac{x_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}} \quad (1)$$

Przyjmując: $x_i^* = \max_k x_{ki}$, $x_i^- = \min_k x_{ki}$, x_i^* , x_i^- za najwyższy/pożądany poziom, a x_i^- – to najgorszy spodziewany poziom:

- dla kryteriów korzyści (stymulanta – im więcej tym lepiej):

$$r_{kj}(x) = (x_{kj} - x_i^-) / (x_i^* - x_i^-) \quad (2)$$

- dla kryteriów kosztowych (destymulanta – im mniej tym lepiej):

$$r_{kj}(x) = (x_i^- - x_{kj}) / (x_i^- - x_i^*) \quad (3)$$

Pozwala to obliczyć znormalizowany ranking decyzyjny z uwzględnieniem wag:

$$v_{kj}(x) = w_j r_{kj}(x) \quad (4)$$

Następnie wyprowadza się:

- dodatni punkt idealny (PIS):

$$PIS = A^+ = \{v_1^+(x), v_2^+(x), \dots, v_m^+(x)\} = \{(\max_k v_{kj}(x) \mid j \in J_1), (\min_k v_{kj}(x) \mid j \in J_2)\} \mid k = 1, \dots, n\} \quad (5)$$

- ujemny punkt idealny (NIS):

$$NIS = A^- = \{v_1^-(x), v_2^-(x), \dots, v_m^-(x)\} = \{(\min_k v_{kj}(x) \mid j \in J_1), (\max_k v_{kj}(x) \mid j \in J_2)\} \mid k = 1, \dots, n\} \quad (6)$$

gdzie J_1 oraz J_2 to atrybuty korzyści i kosztów.

Kolejnym krokiem jest obliczenie odległości euklidesowych, jako odstępów pomiędzy wszystkimi wariantami A_k od :

- rozwiązania dodatniego punktu idealnego A^+ :

$$D_k^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{kj}(x) - v_j^+(x))^2}, \quad k = 1, \dots, n \quad (7)$$

- rozwiązania ujemnego punktu idealnego A^- :

$$D_k^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{kj}(x) - v_j^-(x))^2}, \quad k = 1, \dots, n \quad (8)$$

Końcowo wyznacza się współczynniki rankingowe określające podobieństwo wariantów do rozwiązania idealnego:

$$C_k^* = D_k^- / (D_k^* + D_k^-) \quad (9)$$

gdzie $C_k^* \in [0, 1] \forall k = 1, \dots, n$

Tak tworzony jest ranking, który pozwala na wskazanie rozwiązania. Największa wartość współczynnika C_k^* wskazuje na rozwiązanie najlepsze dla rozpatrywanego problemu. Poniżej zaprezentowano analizę dla omawianego przykładu.

Przyjęty zbiór kryteriów oceny

Dla trzech wariantów rozwiązań A modernizacji omawianej sieci wodociągowej, przeprowadzono ocenę względem zbioru kryteriów C. Zaproponowany zbiór kryteriów oceny obejmuje:

- Koszty inwestycyjne; na potrzeby analizy koszty inwestycyjne wyznaczono w oparciu o przykładowe ceny jednostkowe materiałów z katalogów producenta z roku 2021 oraz nakłady

otrzymane w programie QGIS (urządzenia, armatura, rurociągi), bądź w oparciu o wyceny podobnych przedsięwzięć udostępnionych ofert w celach przetargowych (wykonanie i sprzęt – np., kosztów budowy jednego metra sieci wodociągowych, budowa SUW).

- Jakość wody; kryterium jakości wody oparto o wyznaczony w środowisku obliczeniowym EPANET średni wiek wody w wariantach sieci po modernizacji.
- Bezpieczeństwo dostaw wody (BDW); każdy przestój w dostawie wody może powodować przerwy w pracy w zakładach produkcyjnych, czy też niezadowolenie mieszkańców. Istotną jest także rola sieci wodociągowej zapewniającej bezpieczeństwo ludzi oraz mienia na wypadek pożaru. Kryterium bezpieczeństwa dostaw wody oparto na ocenie punktowej BDW w zakresie od 0 – małe bezpieczeństwo, do 10 – duże bezpieczeństwo. Wariant nr 2 zabezpiecza się dodatkowo na wypadek przerwy w pracy bądź awarii podstawowej SUW stąd uznano to rozwiązanie za najbezpieczniejsze BDW=10; dla wariantu nr 3 dodatkowy zbiornik wpływa pozytywnie na bezpieczeństwo przeciwpożarowe, magazynując wodę w dalszej odległości od stacji uzdatniania wody; dzięki powyższemu, minimalizowane jest prawdopodobieństwo znaczących spadków ciśnienia w sieci na wypadek pożaru – ocena BDW=8; jako najmniej bezpieczny uznano wariant nr 1 i przypisano mu ocenę BDW=3.
- Łączne straty egzergii mechanicznej; kryterium łącznych strat egzergii oparto na rocznych stratach egzergii występujących we wszystkich elementach analizowanego systemu. W celu wyznaczenia tych strat stworzono bilans egzergii dla każdego z elementów systemu zaopatrzenia w wodę (sieć, urządzenia, rezerwuary, zestawy pompowe). Szczegółowy opis zasad obliczenia strat egzergii z wykorzystaniem narzędzi modelowania hydraulicznego dostępny jest w literaturze [16], [17]. Wyniki analizy egzegetycznej dla trzech ocenianych wariantów pokazano w Tabeli 10.

Wyniki obliczeń i dyskusja wyników

Zidentyfikowane trzy warianty modernizacji systemu wodociągowego (A_k) oceniono wykorzystując cztery kryteria (C_j)

Tabela 10 Wyniki bilansu egzergetycznego
Table 10. Exergy balance results

Parametr	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Energia mechaniczna pobrana przez silniki pomp	1698,71	2015,13	3029,75
Straty egzergii mechanicznej w pompach	656,22	616,10	1223,03
Egzergia mechaniczna doprowadzona przez pompy	1042,49	1399,04	1806,72
Egzergia mechaniczna wprowadzona przez rezerwuary	1999,68	1889,38	2095,79
Egzergia mechaniczna pobrana przez odbiorców	1845,00	1844,78	1957,04
Suma strat egzergii mechanicznej	1197,18	1443,63	1945,48
Sprawność egzergetyczna	50%	47%	38%

Tabela 11. Zestawienie kryteriów oceny wariantów modernizacji systemu zaopatrzenia w wodę
Table 11. List of evaluation criteria for the variants of modernization of the water supply system

	Wariant 1 – A_1	Wariant 2 – A_2	Wariant 3 – A_3	Wagi – w_i
Koszty inwestycyjne – C_1 [brutto PLN]	5 718 012	11 257 446	1 403 313	10
Jakość wody – C_2 [h]	11,07	12,89	9,93	3
Bezpieczeństwo dostaw wody – C_3 [BDW]	3	10	8	5
Bilans egzergetyczny – Suma strat egzergii – C_4 [kWh]	1197,18	1443,63	1945,48	8

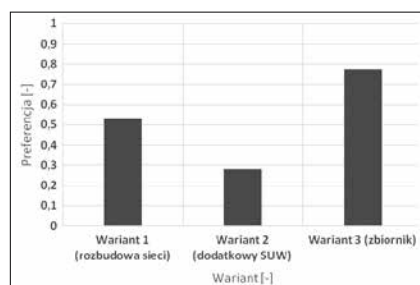
przyjmując wagi kryteriów w_i . Obliczono zbiór X tj. wartości x_{ki} , wyniki zaprezentowano w tabeli 11.

Wagi w_i określono z myślą o typowym procesie wykonawczym, podczas którego najbardziej istotny jest koszt inwestycji. Analiza Topsis przeprowadzona została przy pomocy wtyczki do oprogramowania QGIS o nazwie vectorMCDA [18], w tabeli 12 przedstawiono wyniki obliczeń. Punkty idealne oraz najgorsze wskazano jako skrajne wartości pośród rozważanych wariantów modernizacji, wskazano, które kryteria mają charakter stymulanta (korzyść), a które destymulanta (koszt).

Tabela 12. Zmienne dobrane do analizy wielokryterialnej
Table 12. Variables selected for multi-criteria analysis

	Koszty	Jakość	Straty Egzergii	Bezpieczeństwo
Wagi	10	3	8	5
Rodzaj kryterium	koszt	koszt	koszt	korzyść
Rozwiązania dodatniego punktu idealnego	1041362,04	9,93	1197,18	10,0
Rozwiązania ujemnego punktu idealnego	8668233,17	12,89	1945,48	3,0

Uzyskane wyniki przeprowadzonej analizy wielokryterialnej pokazano na rysunku 17. Mając na uwadze przyjęte wagi



Rys. 17. Wyniki wielokryterialnej oceny wariantów rozbudowy
Fig. 17. Results of the multi-criteria assessment of expansion variants

w analizie, najlepszy okazał się wariant nr 3 z dodatkowym zbiornikiem na wodę, a najmniej preferowany – wariant z dodatkową stacją wodociągową z ujęciem, SUW i pompownią.

Podsumowanie i wnioski

Wykorzystanie systemów informacji przestrzennych QGIS w znacznym stopniu ułatwia proces modelowania sieci oraz zwiększa użyteczność modelu. Każdy z trzech stworzonych wariantów modernizacji sieci zapewnia odpowiednie warunki hydrauliczne w sieci. W celu rze-

telnego odwzorowania systemu zaopatrzenia w wodę części miasta X z ujęcia Y, należałoby poddać analizie cały system zaopatrzenia w wodę, z którym ww. stacja wodociągowa współpracuje. Na potrzeby pracy jedynie inspirowano się stanem rzeczywistym, co określono jako wystarczające na potrzeby pracy. Należy jednak pamiętać, iż kryteria jak bezpieczeństwo dostaw wody, lub też jakość nie powinny być pomijane, a w przypadku dysponowania odpowiednimi funduszami należałoby uznawać je za priorytet w tego typu analizach. Cztery przedstawione kryteria oceny użyte do analizy wielokryterialnej określa się jako wystarczające do wyboru najlepszego wariantu

na potrzeby niniejszej pracy. Wśród nich straty egzegii, które są istotnym kryterium oceny modernizacji sieci. W praktyce inżynierskiej powinno się rozważyć szereg dodatkowych kryteriów, takich jak: koszty eksploatacji, jakość wody, dostępność terenów dla inwestycji, czy też wpływ na środowisko. Biorąc pod uwagę cel pracy sformułowano następujące wnioski:

- Nowoczesne narzędzia informatyczne takiej jak GIS, modelowanie sieci, programy do wspomagania podejmowania decyzji mogą być wykorzystane do celu wspomagania podejmowania decyzji dotyczących rozbudowy sieci wodociągowych.
- Publiczne bazy danych takie jak: GESUT, BDOT są użytecznym źródłem danych do wspomagania procesu budowy modelu oraz analiz hydraulicznych. Ze względu na to, że dane o sieciach wodociągowych stanowią strategiczny zasób i nie powinny być publikowane do celów naukowych (sprawdzenia metody badawczej) wykorzystano jedynie otwarte źródła danych. Było to wystarczające do sprawdzenia założonych celów pracy.
- W celu wyboru optymalnego wariantu rozbudowy sieci należy uwzględnić wiele kryteriów. W ramach pracy uwzględniono kryteria: koszty inwestycyjne, tzw. wiek wody, bezpieczeństwo dostawy wody oraz oceny energetycznej układu.

Planuje się kontynuację prac badawczych dedykowanych sprawdzeniu w jaki sposób zastosowanie innych metod oceny wielokryterialnej, kryteriów oraz macierzy preferencji wpłynie na wyniki analizy, stanowiącej podstawę do podejmowania decyzji.

REFERENCES

- [1] D. of E. and S. A. United Nations Population Division, "Population 2030: Demographic challenges and opportunities for sustainable development planning (ST/ESA/SER.A/389)." 2015.
- [2] M. Iwanek and P. Suchorab, "Ocena stanu eksploatacyjnego wybranej sieci wodociągowej," *Instal*, no. nr 12, pp. 39–42, 2019, doi: 10.36119/15.2019.12.5.
- [3] M. Szemla, "Zarządzanie procesem modernizacji sieci wodociągowej w ujęciu Kaizen," *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, no. Nr 11, pp. 346–352, Nov. 2019, doi: 10.15199/17.2019.11.1.
- [4] I. Zimoch, "Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego," *Ochrona Środowiska*, vol. 30, no. 3, pp. 31–35, 2008.
- [5] S. Biedugnis, M. Smolarkiewicz, and A. Czapczuk, "Matematyczne modelowanie sieci wodociągowych," *Rocznik Ochrona Środowiska*, vol. 12, pp. 263–275, 2010.
- [6] G.-H. T. Huang Jih-Jeng, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2011. doi: 10.1201/b11032.
- [7] Q. A. QGIS Geographic Information System, "QGIS.org." Dostęp: 16.05.2021 [Online]. <https://www.qgis.org>
- [8] "Uzbrojenie terenu (GESUT)," *Geoportal.gov.pl*. Dostęp: 06.07.2021 [Online]. <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/uzbrojenie-terenu-gesut/>
- [9] O. US EPA, "EPANET." Dostęp: 16.05.2021 [Online]. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- [10] "Zbiory danych – Otwarte Dane." Dostęp: 06.07.2021 [Online]. <https://dane.gov.pl/pl/dataset>
- [11] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 17 listopada 2011 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych.
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody.
- [13] "QGISRed — QGIS Python Plugins Repository." Dostęp: 20.07.2021 [Online]. <https://plugins.qgis.org/plugins/QGISRed/>
- [14] Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [15] C.-L. Hwang and K. Yoon, "Methods for Multiple Attribute Decision Making," in *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, C.-L. Hwang and K. Yoon, Eds., in *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1981, pp. 58–191. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9_3.
- [16] J. Bylka and T. Mróz, "Exergy Evaluation of a Water Distribution System," *Energies*, vol. 13, no. 23, Art. no. 23, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13236221.
- [17] J. Bylka and T. Mróz, "Ocena egzergetyczna komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę," 2016, pp. 43–57.
- [18] "VectorMCDA — QGIS Python Plugins Repository." Dostęp: 06.07.2021 [Online]. <https://plugins.qgis.org/plugins/VectorMCDA/>