

# Algorytm selekcji zasuw do zamknięcia w systemach dystrybucji wody z wykorzystaniem analizy przepływów

Valves selecting to close algorithm in water distribution system using flow analysis

ARIEL ANTONOWICZ, MATEUSZ LESZEK, ANDRZEJ URBANIAK, PRZEMYSŁAW ZAKRZEWSKI

DOI 10.36119/15.2024.3.5

Artykuł zawiera propozycję wykorzystania narzędzi symulacyjnych do minimalizacji sumarycznej liczby zasuw, niezbędnych do odseparowania wybranego segmentu sieci wodociągowej bazując na analizie przepływów. Na podstawie modelu hydraulicznego, informacji o lokalizacji zasuw oraz wyników symulacji zaproponowane rozwiązanie wskazuje, które zasuw należy zamknąć, aby w analizowanym przewodzie przepływ nie występował. Zaimplementowany algorytm poza wskazaniem identyfikatorów zasuw niezbędnych do całkowitego odizolowania danego odcinka informuje o możliwości zmniejszenia liczby tych zasuw, a jeśli tak to wskazuje, których zasuw nie trzeba zamykać (i w jakim przedziale czasowym). Wyniki symulacji wraz z propozycją grup zasuw do zamknięcia zapisywane są bezpośrednio do wskazanego pliku CSV. Poprawność opracowanej i zaimplementowanej metody zweryfikowano na przykładzie nierzeczywistego systemu dystrybucji wody.

*Słowa kluczowe:* EPANET, WNTR, symulacje hydrauliczne, typowanie zasuw do zamknięcia.

The article proposes the use of simulation tools to minimize the total number of valves needed to isolate a selected segment of a water supply network based on flow analysis. Based on the hydraulic model, valve location information and simulation results, the proposed solution indicates which valves should be closed so that no flow occurs in the analyzed pipe. The implemented algorithm, in addition to indicating the identifiers of the valves necessary to completely isolate a given section, informs whether it is possible to reduce the number of these valves, and if so, indicates which valves do not need to be closed (and in what time interval). The results of the simulation, together with the proposal of groups of valves to be closed, are saved directly to the indicated CSV file. The correctness of the developed and implemented method was verified on the example of an unreal water distribution system.

*Keywords:* EPANET, WNTR, hydraulic simulations, selecting valves for closure.

## Wprowadzenie

Zasuw odgrywają kluczową rolę w zarządzaniu systemami dystrybucji wody. Pełnią one istotną funkcję w regulacji przepływu i ciśnienia, jednocześnie umożliwiając izolację określonych fragmentów sieci. Zdolność do odseparowania podsystemu poprzez zamknięcie odpowiedniej liczby zasuw pozwala na przeprowadzenie niezbędnych działań naprawczych. Te czynności obejmują naprawę, konserwację lub wymianę uszkodzonych elementów, co skutkuje przywróceniem sprawności danego podsystemu, a w konsekwencji całego systemu wodociągowego. Z perspektywy użytkownika, izolowany fragment sieci składający się

z przewodów wodociągowych i węzłów jest nazywany segmentem lub alternatywnie sektorem. Rozmiar segmentu jest określany przez liczbę składających się na niego elementów, ustalaną na podstawie lokalizacji zasuw oraz ich aktualnego stanu. Znajomość lokalizacji i składu poszczególnych segmentów powinna być systematycznie monitorowana i aktualizowana w sposób dynamiczny, bazując na przeglądach technicznych elementów wykonawczych. Niestety, obecnie często zaniedbywany jest ten proces, co wpływa na opóźnienia w realizacji działań naprawczych. Nadzór nad sprawnością zasuw pozwala uniknąć sytuacji, w której ekipa naprawcza, po dotarciu na miejsce, stwierdza, że stan zasuw nie pozwala na

izolację konkretnego odcinka. W takim przypadku zespół odpowiedzialny za zadanie naprawcze, bazując na danych dotyczących struktury sieci wodociągowej oraz lokalizacji zasuw, identyfikuje dodatkowe zasuw umożliwiające odseparowanie danego segmentu lub grupy segmentów. Istotnym aspektem z punktu widzenia projektowania i realizacji systemów dystrybucji wody jest więc alokacja zasuw umożliwiających odseparowanie danego fragmentu sieci. Istnieje wiele metod i propozycji systemów alokacji zarówno zasuw jak też punktów pomiarowych umożliwiających monitorowanie oraz łatwe zarządzanie procesami modernizacyjnymi przy minimalizacji kosztów związanych z liczbą czujników/zasuw.

dr inż. Ariel Antonowicz <https://orcid.org/0000-0002-6447-5449>, [ariel.antonowicz@cs.put.poznan.pl](mailto:ariel.antonowicz@cs.put.poznan.pl),  
mgr inż. Mateusz Leszek <https://orcid.org/009-0005-0876-3701>, [mateusz.leszek@cs.put.poznan.pl](mailto:mateusz.leszek@cs.put.poznan.pl), prof. dr hab. inż. Andrzej Urbaniak  
<https://orcid.org/0000-0001-6765-5560>, [andrzej.urbaniak@cs.put.poznan.pl](mailto:andrzej.urbaniak@cs.put.poznan.pl), dr inż. Przemysław Zakrzewski <https://orcid.org/0000-0002-6488-0399>, [przemyslaw.zakrzewski@cs.put.poznan.pl](mailto:przemyslaw.zakrzewski@cs.put.poznan.pl) – Instytut Informatyki i Telekomunikacji, Politechnika Poznańska

Przykładowe badania opisujące tego typu algorytmy alokacji zostały omówione w pracy doktorskiej [12] oraz artykułach naukowych [6, 11, 14]. Przedstawione źródła prezentują działanie algorytmu rozmieszczania pewnej wystarczającej liczby urządzeń pomiarowych w taki sposób, aby na podstawie wartości otrzymać właściwą wiedzę na temat stanu jakości wody w całym systemie dystrybucji wody. Analizowany problem w przedstawionych artykułach można przełożyć na wskazanie lokalizacji zasuw, których odpowiednie rozmieszczenie pozwoli skutecznie zarządzać procesem dystrybucji wody w warunkach normalnych lub szczególnych (np. kryzysowych). Przykładem tego typu rozważań mogą być prace [5, 13], w których to wykorzystując programowanie logiczne CLP-FD (ang. Constraint Logic Programming over Finite Domains) rozwiązuje się problem lokalizacji optymalnej liczby zasuw.

W sytuacji, gdy lokalizacja zasuw jest znana możliwa staje się analiza topologii sieci w celu opracowania tzw. mapy segmentów. Mapa segmentów pozwala określić przynależność poszczególnych

prawidłowe funkcjonowanie sieci wodociągowej. To narzędzie jest używane do analizy i zwiększania odporności infrastruktury wodociągowej na różne wyzwania i zdarzenia.

Zasuw mające za zadanie otwieranie lub zamykanie przepływu w określonym przewodzie, nie są traktowane jako osobne elementy w środowisku EPANET czy WNTR [8, 9, 10]. Te urządzenia wykonawcze są uwzględnione jako właściwości przewodu, w którym są zainstalowane. Aby odseparować określony odcinek w systemie dystrybucji wody, konieczne jest zmniejszenie opcji *Status* przewodu na wartość *Close*. Jest to przydatna funkcja umożliwiająca analizę pracy sieci wodociągowej w sytuacji izolacji poszczególnych odcinków. Warto jednak zauważyć, że wadą tego podejścia jest brak informacji o stanie poszczególnych zasuw (ze względu na założenie EPANET, że wszystkie zasuw można zamknąć) oraz brak danych o ich lokalizacji [3].

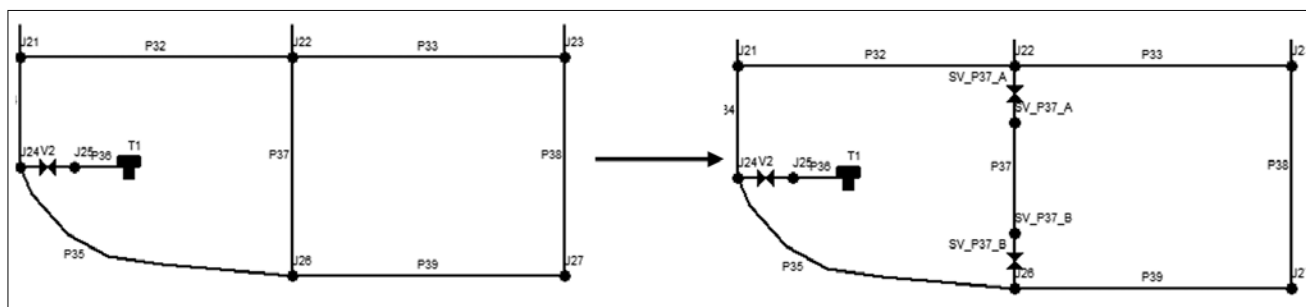
Na rysunku 1 przedstawiono założenie obecności dwóch zasuw odcinających na każdym przewodzie (blisko jego początku i końca). W sytuacji izolacji przewodu

(P37) poprzez zmianę atrybutu *Status* zakłada się, że obie zasuw (SV\_P37\_A oraz SV\_P37\_B) zostają zamknięte.

## Segmentacja sieci wodociągowej

Chociaż zasuw odcinające nie są traktowane jako odrębne elementy infrastruktury sieci wodociągowej, biblioteka WNTR, pozwala na zdefiniowanie warstwy zasuw (ang. Valve Layer). Warstwa ta umożliwia bardziej rozbudowaną analizę sieci oraz grupowanie przewodów i węzłów sieci w segmenty (na podstawie lokalizacji zasuw). Przykład systemu dystrybucji wody wraz z losowym rozmieszczeniem zasuw przedstawiony został na rysunku 2.

W warstwie zasuw, ich położenie jest określane za pomocą identyfikatora przewodu, na którym się znajdują oraz identyfikatora węzła, do którego są przyległe. Informacje te przechowywane są w strukturze tabelarycznej. W tabeli 1 przedstawiono szczegółową lokalizację zasuw odcinających. Zgodnie ze specyfikacją poszczególne zasuw definiowane są na podstawie identyfikatora przewodu oraz węzła. W celu określenia dokładniejszych



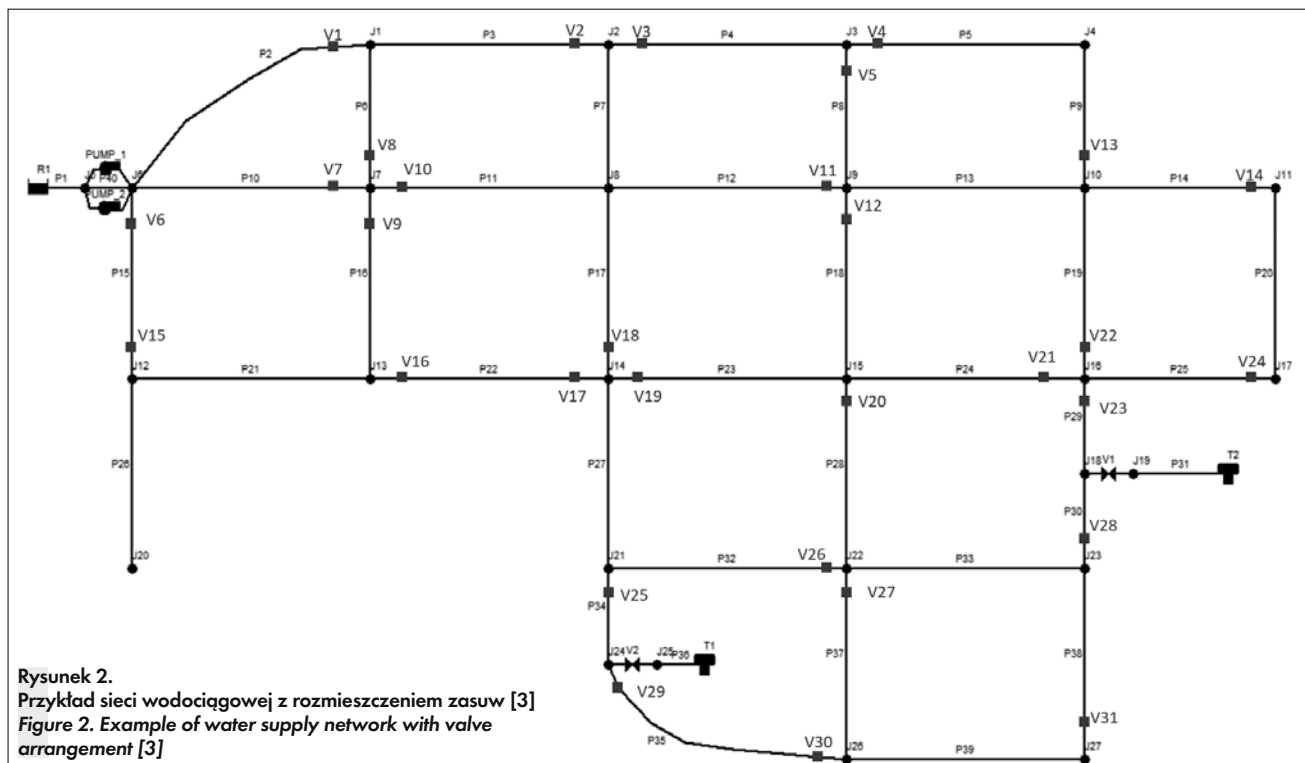
**Rysunek 1.**  
Postrzeganie zasuw odcinających w środowisku EPANET [3]  
*Figure 1. The way of interpreting valves in the EPANET environment [3]*

elementów infrastruktury (np. przewód, pompa) do konkretnych segmentów. W celu automatyzacji procesu segmentacji wykorzystuje się dostępne narzędzia i aplikacje komputerowe, takie jak [1, 4]:

- EPANET – środowisko opracowane przez Agencję Ochrony Środowiska USA (US EPA) w latach 90., służące do przeprowadzania symulacji hydraulicznych sieci wodociągowej;
- WNTR – narzędzie zaprojektowane do symulacji pracy różnych sieci wodociągowej oraz analizy ich odporności na różne czynniki zewnętrzne. Posiada dostępne API, co umożliwia łatwą modyfikację struktury sieci. Ponadto, funkcjonalność WNTR pozwala na automatyczne tworzenie scenariuszy testujących zachowanie sieci w określonych warunkach początkowych, co obejmuje symulację incydentów zakłócających

**Tabela 1. Rozmieszczenie zasuw w przykładowym modelu systemu dystrybucji wody [3]**  
*Table 1. Valves localization in an example model of a water distribution system [3]*

Identyfikator [ID]	Węzeł [ID]	Przewód [ID]	Współrzędne	Identyfikator [ID]	Węzeł [ID]	Przewód [ID]	Współrzędne
V1	J1	P2	(33.0, 95.0)	V17	J14	P22	(58.0, 60.0)
V2	J2	P3	(58.0, 95.0)	V18	J14	P17	(60.0, 62.0)
V3	J2	P4	(62.0, 95.0)	V19	J14	P23	(62.0, 60.0)
V4	J3	P5	(87.0, 95.0)	V20	J15	P28	(85.0, 58.0)
V5	J3	P8	(85.0, 93.0)	V21	J16	P24	(108.0, 60.0)
V6	J6	P15	(10.0, 82.0)	V22	J16	P19	(110.0, 62.0)
V7	J7	P10	(33.0, 80.0)	V23	J16	P29	(110.0, 58.0)
V8	J7	P6	(35.0, 82.0)	V24	J17	P25	(128.0, 60.0)
V9	J7	P16	(35.0, 78.0)	V25	J21	P34	(60.0, 38.0)
V10	J7	P11	(37.0, 80.0)	V26	J22	P32	(83.0, 40.0)
V11	J9	P12	(83.0, 80.0)	V27	J22	P37	(80.0, 38.0)
V12	J9	P18	(80.0, 82.0)	V28	J23	P30	(110.0, 42.0)
V13	J10	P9	(110.0, 82.0)	V29	J24	P35	(60.0, 28.0)
V14	J11	P14	(128.0, 80.0)	V30	J26	P35	(83.0, 20.0)
V15	J12	P15	(10.0, 62.0)	V31	J27	P38	(110.0, 22.0)
V16	J13	P22	(37.0, 60.0)	-	-	-	-



współrzędnych założono, że w przykładowym modelu zasowa znajduje się w odległości dwóch jednostek od węzła. Przykładowo zasowa o identyfikatorze V1, znajdująca się na przewodzie P2 oraz przy węźle J1 o współrzędnych (35, 95) znajduje się w miejscu o współrzędnych (33, 95).

Najczęściej wykorzystywanym algorytmem do wyszukiwania segmentów jest algorytm bazujący na zbiorach macierzy, który został przedstawiony w pracy [7]. Na podstawie trzech macierzy wygenerowanych na podstawie relacji węzłów, przewodów i zasuw otrzymuje się zbiór segmentów oraz elementów wchodzących w ich skład. W macierzy pierwszej (tzw. macierzy A) wiersze reprezentują identyfikatory węzłów, a kolumny przewodów. Na podstawie topologii sieci, macierz uzupełniania jest informacją o zależności między poszczególnymi elementami. Oznacza to przykładowo, że w przypadku, gdy węzeł J1 jest węzłem końcowym lub początkowym przewodu P2, w macierzy o współrzędnych (P2, J1) wpisana zostaje wartość logiczna 1 [2, 3]. W innym przypadku pole to pozostaje puste. W tabeli 2 przedstawiono macierz A analizowanego systemu dystrybucji wody.

Druga macierz (tzw. macierz B) przechowuje informacje dotyczące lokalizacji poszczególnych zasuw. Kolumny i wiersze, analogicznie jak w macierzy A reprezentują identyfikatory węzłów oraz przewodów. Wartość logiczna 1 wpisywana jest do macierzy o określonych współrzęd-

**Tabela 2. Macierz A analizowanej sieci wodociągowej [3]**  
**Table 2. Matrix A of the analyzed water supply network [3]**

	P1	P10	P11	P12	P13	P14	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	PUMP 1	PUMP 2	V2	V1
J5	1																														
R1	1																														
J6		1																													
J7			1																												
J8				1																											
J9					1																										
J10						1																									
J11							1																								
J12								1																							
J13									1																						
J14										1																					
J15											1																				
J21												1																			
J22													1																		
J23														1																	
J16															1																
J12																1															
J24																	1														
J25																		1													
J11																			1												
J17																					1										
J26																						1									
J27																							1								
J20																								1							
J18																															
J19																															
T1																															
T2																															

nych wtedy i tylko wtedy, gdy w pobliżu danego węzła (na określonym współrzędnej przewodzie) zlokalizowana jest zasowa. W tabeli 3 przedstawiono macierz B analizowanego systemu dystrybucji wody.

Trzecia macierz (tzw. macierz C) powstaje w wyniku różnicy macierzy A i B. Tabela 4 przedstawia macierz wynikową.

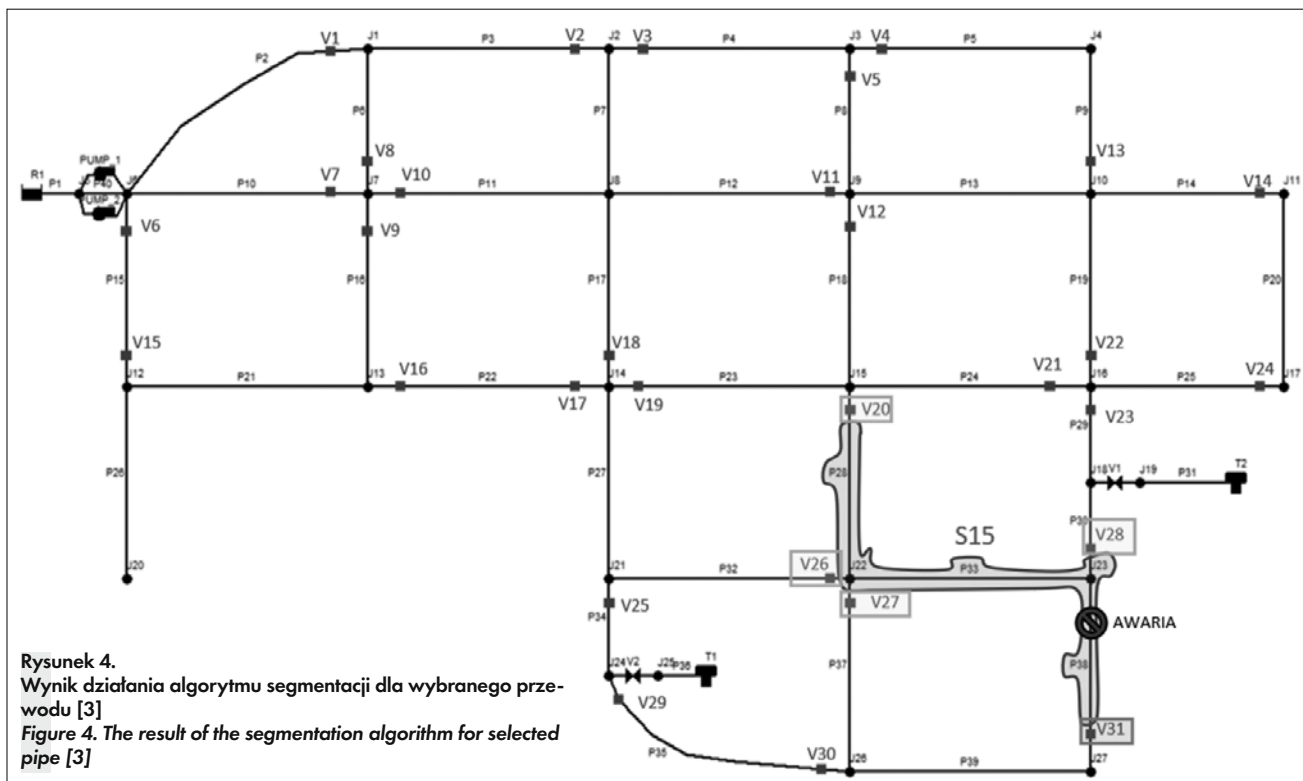
Na podstawie macierzy C wyznaczana jest przynależność wybranych elementów do określonych segmentów. Oznacza to, że w sytuacji np. modernizacji przewodu o identyfikatorze P38 macierz pozwoli wyznaczyć zbiór elementów wchodzą-

cych do tego samego segmentu, w którym znajduje się dany przewód, który należy odizolować. Schemat działania algorytmu wyznaczania segmentu w postaci blokowej przedstawiony został na rysunku 3.

Wynikiem działania algorytmu jest uzyskanie informacji o zbiorze węzłów i przewodów wchodzących w skład segmentu. Kolejnym krokiem jest określenie zasuw przynależących do analizowanego segmentu. W tym celu tworzy się trzecią listę (*near\_node\_list*), w której na podstawie macierzy A określa się węzły znajdujące się







Rysunek 4.  
Wynik działania algorytmu segmentacji dla wybranego przewodu [3]  
Figure 4. The result of the segmentation algorithm for selected pipe [3]

przewodzie. Kontrola przepływu polega na sprawdzaniu jego wartości w ciągu trwania całej symulacji. Jeśli we wszystkich krokach symulacji, jego wartość jest mniejsza lub równa wartości zadanej, oznacza to, że analizowany zbiór zasuw jest wystarczający do jego odizolowania.

Symulacje hydrauliczne poszczególnych przypadków testowych uruchamiane są z wykorzystaniem biblioteki WNTR i zakładają 24 godzinną pracę systemu wodociągowego [3]. W oparciu o wyniki symulacji hydraulicznej okazuje się, że w przypadku analizowanej modernizacji lub awarii przewodu P38 ze wskazanego zbioru pięciu zasuw (V20, V26, V27, V28, V31) należy zamknąć tylko cztery z nich.

Zamknięcie zasuw (V20, V26, V27, V28) jest wystarczającym zbiorem potrzebnym do odizolowania przewodu o identyfikatorze P38. Na rysunku 5 przedstawiono analizę przepływu w analizowanym przewodzie dla każdego przypadku testowego scenariusza symulacyjnego.

W przypadku, gdyby scenariusz symulacyjny wskazywał kilka możliwych rozwiązań, które powodują odseparowanie wybranego przewodu sieci, algorytm w sposób automatyczny zaczyna generować kolejne scenariusze symulacyjne. W kolejnych iteracjach scenariusza symulacyjnego badane są różne kombinacje stanu (otwarte/zamknięte) zasuw, które zapisywane są do wskazanego pliku CSV.

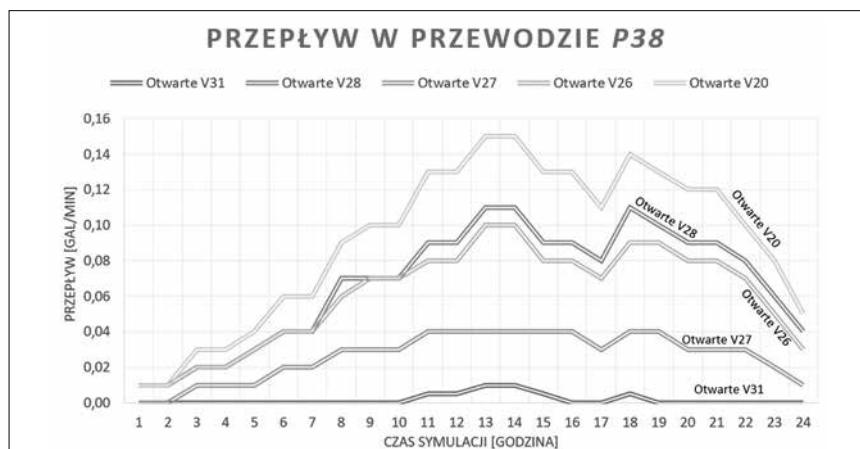
Fragment pliku przedstawiono poniżej:

```
#==== Scenario stage (1)
| Net: AA_pdh.inp | Use
case: 1
(P) P38
(1) V20,V26,V27,V28      T
(2) V20,V26,V27,V31     F
(3) V20,V26,V28,V31     F
(4) V20,V27,V28,V31     F
(5) V26,V27,V28,V31     F
```

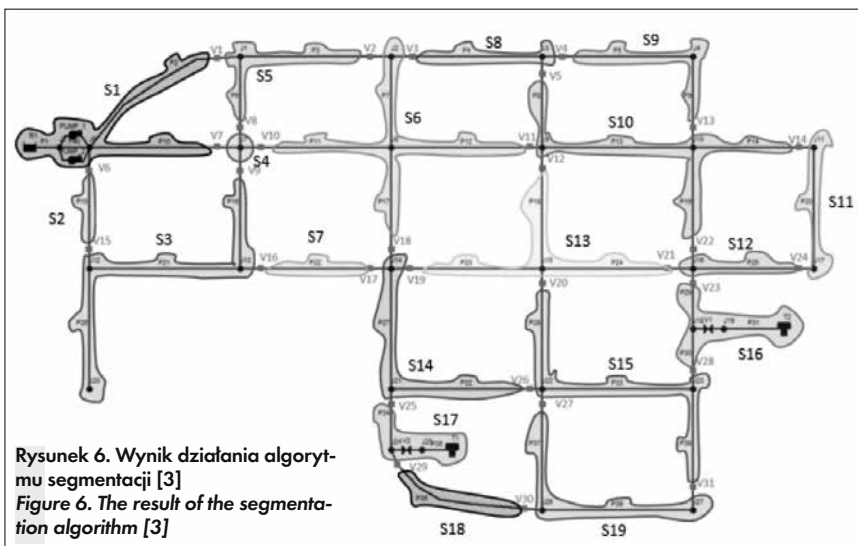
### Przypadek testowy – analiza poprawności działania zaproponowanego algorytmu

W celu weryfikacji poprawności zaproponowanego rozwiązania testom poddano system dystrybucji wody przedstawiony na rysunku 2. Wynik działania algorytmu segmentacji dla całego systemu dystrybucji wody przedstawiony został natomiast na rysunku 6.

W celu minimalizacji sumarycznej liczby zasuw do zamknięcia wykonano łącznie 132 symulacje. Obliczenia wykonano na jednostce komputerowej charakteryzującej się następującymi parametrami: procesor Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, pamięcią RAM 16 GB oraz dyskiem SSD 1 TB. Na komputerze zainstalowany został system operacyjny Microsoft Windows 10 w wersji Home. Czas wykonania wszystkich symulacji wyniósł 18 minut i 11 sekund. W trakcie analizy przepływów okazało się, że w 4 segmentach



Rysunek 5.  
Analiza przepływu w przewodzie P38  
Figure 5. Flow analysis in pipe P38



Rysunek 6. Wynik działania algorytmu segmentacji [3]  
Figure 6. The result of the segmentation algorithm [3]

(z 19) istnieje możliwość minimalizacji liczby zasuw do zamknięcia, gdy:

- w segmencie S6 zasuw V11 i V18 nie muszą zostać zamknięte w sytuacji modernizacji przewodu P11;
- w segmencie S9 zasuw V13 nie musi zostać zamknięta w sytuacji modernizacji przewodu P9;
- w segmencie S15 zasuw V31 nie musi zostać zamknięta w sytuacji modernizacji przewodu P38;
- w segmencie S19 zasuw V31 nie musi zostać zamknięta w sytuacji modernizacji przewodu P39.

### Podsumowanie, wnioski i kierunek dalszych badań

Wyniki działania algorytmu minimalizacji sumarycznej liczby zasuw do zamknięcia przetestowano na przykładowym modelu hydraulicznym nierzeczywistego systemu dystrybucji wody. Bez względu na rodzaj analizowanego systemu pod względem topologii, liczby węzłów czy przewodów sposób działania algorytmu jest niezmienny. Pierwszym krokiem algorytmu jest utworzenie trzech macierzy, na podstawie których wyznaczane są segmenty i zasuw do nich przynależne. Następnie na podstawie scenariusza symulacyjnego i określonych w nim przypadków testowych uruchamiane zostają symulacje hydrauliczne, które analizują przepływ we wskazanym przewodzie. Na podstawie wyników symulacji wskazuje się zasuw, który zamknięcie nie jest konieczne do ograniczenia przepływu w analizowanym przewodzie. Taki sposób działania w przypadku złożonych sieci wodociągowych i sytuacjach nietypowych pozwoli skrócić czas naprawy, konserwacji

lub wymiany uszkodzonego elementu co spowoduje szybsze przywrócenie sprawności danego podsystemu, a w konsekwencji całego systemu dystrybucji wody.

Rozwiązanie zaproponowane w artykule może stanowić moduł systemu wspomagania decyzji, dzięki któremu poprzez minimalizację liczby zasuw do zamknięcia zaoszczędzić można czas, który z punktu widzenia sytuacji nietypowej (np. wielu awarii) jest bardzo cenny (zaoszczędzenie czasu na dojazd ekipy naprawczej, lokalizację zasuw i jej zamknięcie). Ponadto algorytm zaimplementowany został z wykorzystaniem języka Python i biblioteki WNTR, które zgodnie z zasadami wolnego oprogramowania nie generują kosztów związanych z licencją. Każdy programista może w sposób swobodny analizować, modyfikować i dodawać nowe funkcjonalności.

Warto zastanowić się nad rozbudową zaproponowanego rozwiązania o nowe algorytmy, które w sposób bardziej dokładny i obszerny będą mogły analizować przepływy w sieci wodociągowej w celu minimalizacji liczby zasuw, niezbędnych do odseparowania wybranego odcinka sieci wodociągowej. Przykładowo można zastanowić się nad implementacją algorytmów genetycznych, które będą testować wpływ zamknięcia wybranego zbioru zasuw (z różnych segmentów, nie tylko tego, w którym znajduje się analizowany przewód) na przepływ w wybranym przewodzie lub grupie przewodów. Dodatkowo należy rozważyć implementację interfejsu graficznego ułatwiającego komunikację między użytkownikiem a funkcjami zrealizowanego algorytmu. Obecnie brak interfejsu użytkownika

ka wymaga znajomości programowania w języku skryptowym Python.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Antonowicz A., Urbaniak A., Analiza krytyczności elementów sieci wodociągowej na podstawie symulacji hydraulicznych z wykorzystaniem biblioteki WNTR, INSTAL nr 6, str. 43 – 48, 2022, DOI: 10.36119/15.2022.6.6
- [2] Antonowicz A., Bałut A., Urbaniak A., Zakrzewski P., Algorithm for Early Warning System for Contamination in Water Network 2019 20th ICCCC, 26-29 May 2019, E-ISBN: 978-1-7281-0702-8
- [3] Antonowicz A., Algorytmy wspomaganie decyzji w zakresie działań naprawczych na przykładzie systemu dystrybucji wody, Rozprawa doktorska, prom. Andrzej Urbaniak, Politechnika Poznańska, 2023
- [4] Bałut A., Urbaniak A., Management of Water Pipeline Network Supported by Hydraulic Models and Information System, Proc. of ICCCC'2011, Velke Karlovic, Czech Republic, 25-28 May 2011, ISBN: 978 – 1-61284-359-9
- [5] Cattafi, M., Gavanelli, M., A CLP(FD) program for the optimal placement of valves in a water distribution network, 2011, źródło: <http://www.ing.unife.it/docenti/MarcoGavanelli/>.
- [6] Hu C., Ren G., Liu C., Li M., Jie W., A Spark-based genetic algorithm for sensor placement in large scale drinking water distribution systems, Springer Cluster Computing volume 20, 2017, s.1089–1099
- [7] Hwandon J., Strategic valve location in a Water Distribution System, Polytechnic Institute and State University in Civil and Environmental Engineering, Virginia, 2005
- [8] Klise, K.A., Murray, R., Haxton, T. (2018). An overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR), In Proceedings of the 1st International WDSA/CCWI Joint Conference, Kingston, Ontario, Canada, July 23-25, 075, 8p.
- [9] Klise, K.A., Bynum, M., Moriarty, D., Murray, R. (2017). A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study, Environmental Modelling and Software, 95, 420-431, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.022
- [10] Klise, K.A., Hart, D.B., Moriarty, D., Bynum, M., Murray, R., Burkhardt, J., Haxton, T. (2017). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, U.S. Environmental Protection Agency Technical Report, EPA/600/R-17/264, 47p.
- [11] Liu H., et al. Failure impact analysis of isolation valves in a water distribution network, Journal of Water Resources Planning and Management 143.7, 2017, s. 235-242
- [12] tangowski Rafał, Algorytm alokacji punktów monitorowania jakości w systemach dystrybucji wody pitnej, Rozprawa doktorska, Wydział elektrotechniki i automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012
- [13] Nonato M., Alvisi S., Optimal Placement of Valves in a Water Distribution Network with CLP(FD), Theory and Practice of Logic Programming 11(4), 2011, s. 731-747, DOI:10.1017/S1471068411000275
- [14] Shiddiqi, Ary Mazharuddin, et al. Sensor Placement Strategy to Localize Leaks in Water Distribution Networks with Fluctuating Minimum Night Flow, 13th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS). IEEE, 2021