

Analiza krytyczności elementów sieci wodociągowej na podstawie symulacji hydraulicznych z wykorzystaniem biblioteki WNTR

Criticality analysis of water network elements base on hydraulic simulations using the WNTR library

ARIEL ANTONOWICZ, ANDRZEJ URBANIAK

DOI 10.36119/15.2022.6.6

W artykule przedstawiono propozycję algorytmu określającego wpływ braku poszczególnych elementów sieci wodociągowej na jej prawidłowe funkcjonowanie. Na podstawie bazowego modelu hydraulicznego i danych konfiguracyjnych algorytm w sposób automatyczny tworzy zbiór modeli podrzędnych. Następnie po weryfikacji topologicznej modeli podrzędnych zostają uruchomione symulacje hydrauliczne, których wyniki zapisywane są bezpośrednio do wskazanego pliku CSV. Na podstawie wyników symulacji bazowej oraz wyników symulacji modelu podrzędnego algorytm wyznacza klasę ważności analizowanego elementu. Poprawność opracowanej i zaimplementowanej metody zweryfikowano na przykładzie niewielkiej sieci wodociągowej.

Słowa kluczowe: EPANET, WNTR, analiza krytyczności, klasyfikacja elementów sieci wodociągowej, symulacje hydrauliczne.

The article presents a proposal of an algorithm that determines the impact of the lack of individual elements of the water supply system on its proper functioning. Based on the base hydraulic model and configuration data, the algorithm automatically creates a set of sub-models. Then, after topological verification of subordinate models, hydraulic simulations are run, the results of which are saved directly to the indicated CSV file. Based on the results of the base simulation and the results of the sub-model simulation, the algorithm determines the suitability class of the analyzed element. The correctness of the developed and implemented method was verified on the example of a small water supply network.

Keywords: EPANET, WNTR, criticality analysis, classification of water network elements, hydraulic simulations.

Wprowadzenie

Woda jest niezbędnym elementem w każdym aspekcie ludzkiego życia. Szansa na godne i zdrowe życie uzależniona jest od jej jakości i dostępności. Naturalnym zadaniem wydaje się więc zachowanie ciągłości procesu jej dystrybucji z zachowaniem wszelkich norm jakości. Normy oraz regulacje prawne dotyczące jakości wody oraz sposobów zapewnienia odpowiedniej jej ilości pod właściwym ciśnieniem określone zostały w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 roku oraz Ustawie z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków [1, 2]. Należy również pamiętać, że zgodnie z założeniami zrównoważonego rozwoju, które zostały opublikowane przez

Światową Komisję ds. Środowiska i Rozwoju ONZ w 1987 roku strategia eksploatacji zasobów i infrastruktury wodnej powinna funkcjonować w taki sposób, aby zagwarantować zaspokojenie potrzeb obecnych i przyszłych pokoleń [3].

W celu przeprowadzenia procesu uzdatniania wód podziemnych wykorzystuje się Stacje Uzdatniania Wody (SUW), które w zależności od potrzeb odpowiadają również za dezynfekcję, utrzymanie pH na odpowiednim poziomie oraz poprawę jakości dystrybuowanej wody [4, 5]. Po zakończeniu procesu uzdatniania, woda trafia do zbiornika wody czystej, która następnie za pośrednictwem systemu wodociągowego dystrybuowana jest do odbiorców końcowych. W celu usprawnienia procesu zarządzania, planowania i poprawy efektywności Procesu Dystrybucji

Wody (PDW) coraz częściej można spotkać się z propozycjami opracowania i realizacji Systemów Wspomagania Decyzji (SWD) wykorzystujących złożone algorytmy, uczenie maszynowe, lub elementy sztucznej inteligencji. Celem tego typu systemów byłoby monitorowanie, przewidywanie, wnioskowanie oraz wykrywanie drastycznych zmian w Systemach Zbiorowego Zaopatrzenia w Wodę (SZZwW). Poprzez poprawę efektywności PDW rozumie się rozbudowę, renowację oraz konserwację elementów wchodzących w skład infrastruktury wodociągowej. W przypadku analizy topologii sieci wodociągowej, w celu określenia możliwych zmian w systemie (np. rozbudowa, modernizacja) wykorzystuje się modele hydrauliczne reprezentujące rzeczywiste systemy wodociągowe. Na podstawie wyników symulacji

mgr inż. Ariel Antonowicz <https://orcid.org/0000-0002-6447-5449>, prof. dr hab. inż. Andrzej Urbaniak, <https://orcid.org/0000-0001-6765-5560> – Instytut Informatyki i Telekomunikacji, Politechnika Poznańska. Adres do korespondencji/ Corresponding author: ariel.antonowicz@cs.put.poznan.pl, andrzej.urbaniak@cs.put.poznan.pl

przeprowadzonych na opracowanych modelach określa się wpływ dodanego lub usuniętego elementu na proces dystrybucji i działanie całego systemu wodociągowego. W sytuacji konieczności przetestowania wpływu braku wszystkich poszczególnych elementów na funkcjonowanie SZZwW należałoby opracować odrębne modele hydrauliczne. Wykorzystując konwencjonalne oprogramowanie, powyższa czynność zajęłaby bardzo dużo czasu, nawet w sytuacji analizy niewielkiego Systemu Dystrybucji Wody (SDW) [6]. W celu zautomatyzowania procesu dynamicznej zmiany topologii sieci wodociągowej należy więc wykorzystać dostępne narzędzia i aplikacje komputerowe. Przykładem tego typu rozwiązań są m.in. [7, 8]:

- EPANET – środowisko udostępniane na zasadach licencji publicznej opracowane w latach 90. przez US EPA (Agencję Ochrony Środowiska USA). Narzędzie umożliwia przeprowadzenie symulacji hydraulicznych w oparciu o różne wartości początkowe (np. zmienne zapotrzebowanie na wodę). Obecnie środowisko EPANET uważane jest za podstawowe narzędzie edukacyjne oraz badawcze, umożliwiające poznanie PDW oraz realizację prostych testów sieci wodociągowych pod względem hydraulicznym oraz jakościowym;
- Teva-Spot – narzędzie opracowane przez Agencję Ochrony Środowiska, Sandia National Laboratories i Uniwersytet w Cincinnati umożliwiające użytkownikowi określenie szerokiego zakresu danych wejściowych do modelowania i celów wydajnościowych dla projektów systemów ostrzegania o zanieczyszczeniu;
- WNTR – (akronim nazwy: The Water Network Tool for Resilience) narzędzie zaprojektowane w celu symulacji pracy różnorodnych sieci wodociągowych oraz analiza ich odporności na różne czynniki zewnętrzne. Za pośrednictwem dostępnego API (ang. Application Programming Interface), WNTR pozwala na zmianę struktury sieci w łatwy sposób. Dodatkowo taka funkcjonalność umożliwia tworzenie w sposób automatyczny, scenariuszy testujących zachowanie sieci przy określonych warunkach początkowych (wraz z symulacją incydentów zakłócających poprawne działanie sieci) [6, 11, 12, 13].

W artykule poprzez analizę krytyczności elementu infrastruktury wodociągowej rozumie się wpływ jego braku na funkcjonowanie całego SZZwW. Powyż-

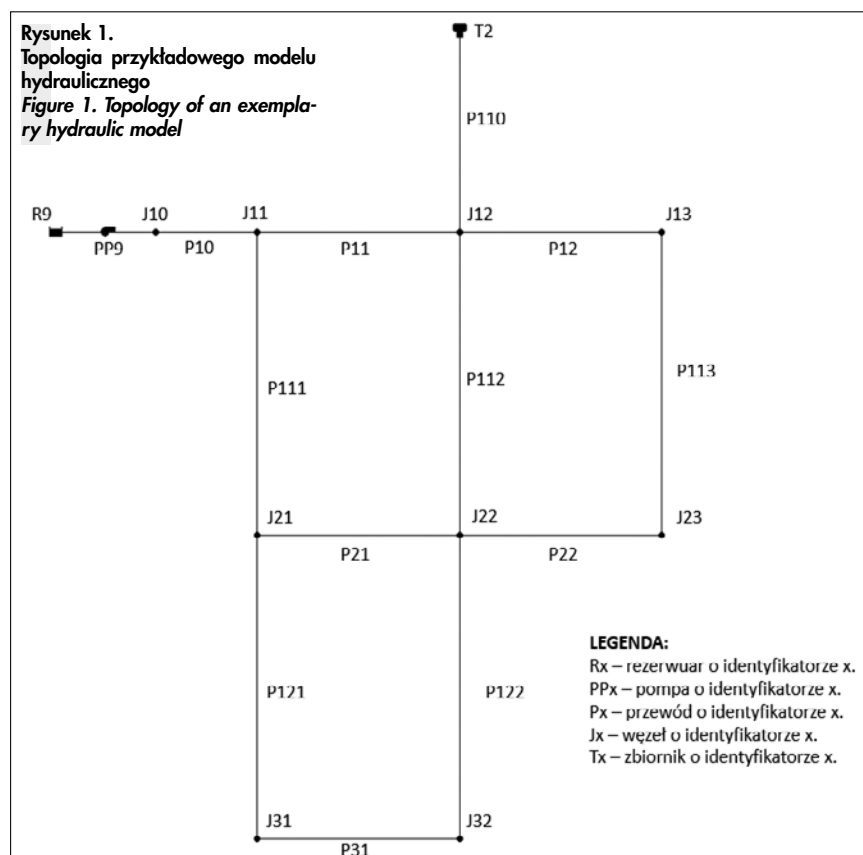
sza analiza ma na celu określenie kategorii ważności analizowanego elementu na tle całego systemu. W procesie opracowania, realizacji i implementacji powyższego zadania wykorzystano język Python oraz bibliotekę WNTR, wykorzystującą silnik obliczeniowy środowiska EPANET.

Model hydrauliczny – reprezentacja systemu wodociągowego

Celem budowy modeli hydraulicznych jest jak najbardziej zbliżone odwzorowanie warunków panujących w sieci wodociągowej. Analiza pracy SZZwW z wykorzystaniem modeli matematycznych umożliwia obserwację zmienności parametrów hydraulicznych w sposób dynamiczny (z dowolnie przyjętym krokiem czasowym). Metodyka ta jest szczególnie często wykorzystywana w przypadku sieci pierścieniowych, dla których obliczenie przepływów chwilowych metodami tradycyjnymi jest bardzo skomplikowane. Informacjami uzyskiwanymi podczas symulacji pracy systemów dystrybucji są przede wszystkim [14]: prędkość i natężenie przepływu wody w poszczególnych przewodach, straty ciśnienia, wartość ciśnienia w poszczególnych węzłach sieci, wydajność pomp, zużycie energii pomp oraz poziom wody w zbiornikach. Ponadto wykorzystując model hydrauliczny sieci wodociągowej można określić warunki przy-

łączeniowe dla nowych odbiorców, sprawdzić zachowanie sieci w przypadku rozbudowy lub modernizacji sieci, projektować zbiorniki sieciowe, wyznaczyć strefy zasilania z poszczególnych źródeł wody, itp. [14].

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę odwzorowywane za pośrednictwem modeli hydraulicznych reprezentowane są poprzez węzły (ang. nodes) oraz przewody (ang. links). Węzły mogą symbolizować zbiorniki wodne (ang. tanks), rezerwuary (ang. reservoir) oraz punkty poboru wody (ang. junction). Przewody natomiast reprezentują rurociągi (ang. pipes), zasuw (ang. valves) oraz pompy (ang. pumps). W trakcie tworzenia modelu hydraulicznego należy podać informację umożliwiającą jak najlepsze odwzorowanie topologii rzeczywistego systemu wodociągowego. Przykładowymi danymi niezbędnymi w procesie modelowania sieci wodociągowych są: lokalizacja (współrzędne) punktów poboru wody, elementów wykonawczych (np. zasuw i pomp), zbiorników oraz innych źródeł wody. Jedną z kluczowych informacji jest rzędna terenu rozmieszczonych obiektów wodociągowych, ponieważ obliczenia przepływu wody w przewodach wodociągowych bazują na prawie zachowania masy i energii [15, 16]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy model hydrauliczny sieci wodociągowej składającej



się z dziewięciu punktów poboru wody oznaczonych przedrostkiem J (Junction), zbiornika oznaczonego przedrostkiem T (Tank), rezerwuaru oznaczonego przedrostkiem R (Reservoir), pompy oznaczonej przedrostkiem PP (Pump) oraz dwunastu przewodów oznaczonych przedrostkiem P (Pipes).

Analiza krytyczności elementów wchodzących w skład infrastruktury wodociągowej – algorytm

W celu analizy wpływu poszczególnych elementów infrastruktury wodociągowej na cały SZZwW zaproponowano algorytm, którego zadaniem jest utworzenie z bazowego modelu hydraulicznego zbioru modeli podrzędnych, w których każdy kolejny model pozbawiony zostaje innego elementu sieci. Poprzez model

bazowy (referencyjny) rozumie się model hydrauliczny sieci wodociągowej opracowany i skalibrowany przez eksperta dziedzinowego, który zostanie poddany analizie krytyczności. Proces tworzenia modeli podrzędnych zostanie przedstawiony na przykładzie modelu sieci wodociągowej pokazanej na rysunku 1.

(1) Pierwszym krokiem algorytmu tworzącego modele podrzędne jest utworzenie listy elementów wchodzących w skład sieci wodociągowej podzielonej na następujące typy: rezerwuary, zbiorniki, przewody, zasusy oraz pompy. Dla przykładowego modelu listy prezentują się w sposób następujący: lista rezerwuarów = [R9]; lista zbiorników = [T2]; lista zasuw = []; lista pomp = [PP9] oraz lista przewodów = [P10, P11, P12, P111, P112, P113, P121, P122, P21, P22, P31].

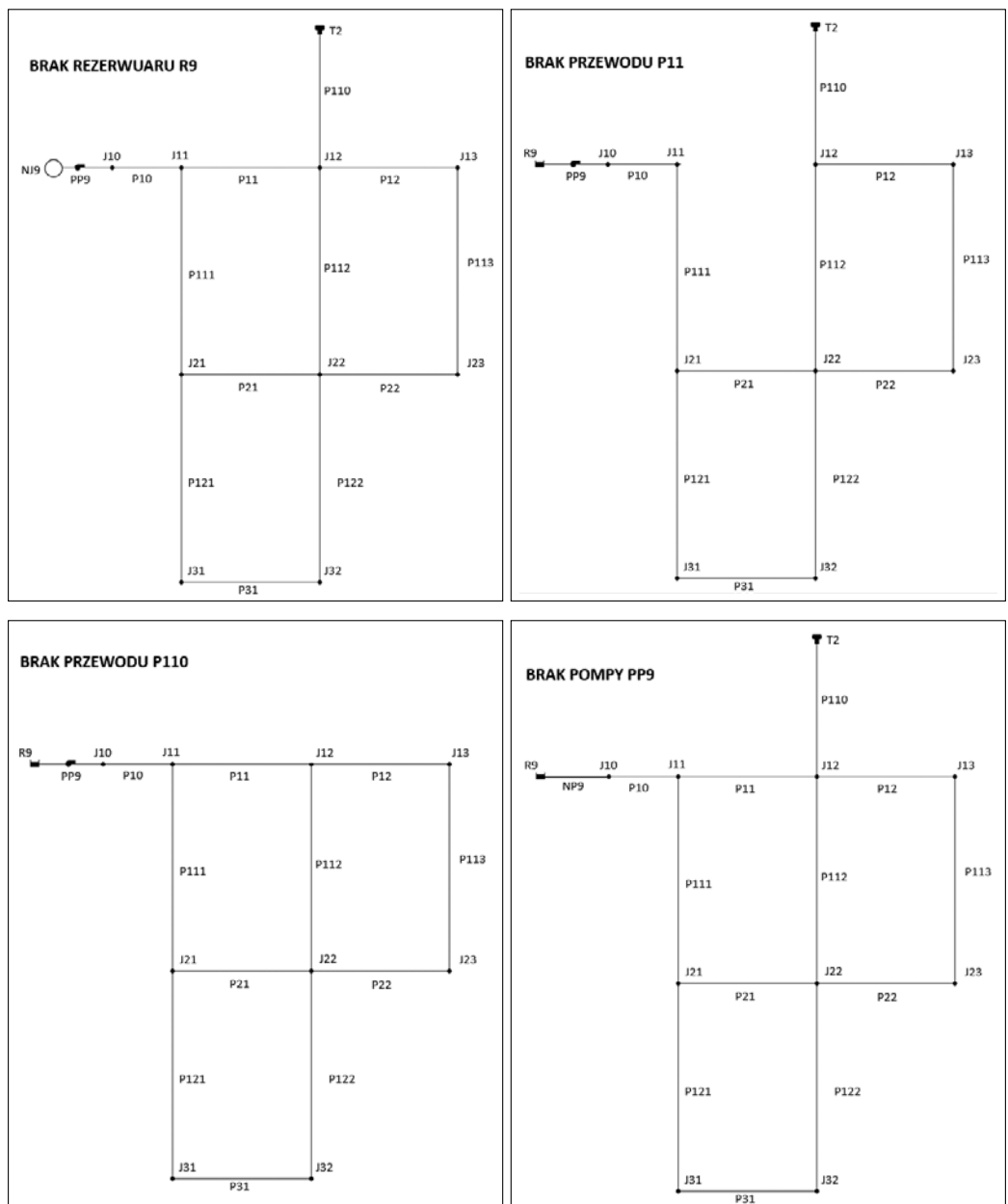
(2) Następnym krokiem algorytmu jest w sposób iteracyjny (na podstawie elementów wygenerowanych list) utworzenie modeli podrzędnych pozbawionych wskazanych elementów. W analizowanym przykładzie algorytm wygeneruje 15 modeli podrzędnych. Na rysunku 2 przedstawiono przykład 4 modeli podrzędnych (brak rezerwuaru R9, brak przewodu P11, brak przewodu P110 oraz brak pompy PP9).

W trakcie tworzenia modeli podrzędnych istnieje możliwość powstania tzw. błędów topologicznych sieci, których obecność uniemożliwi przeprowadzenie symulacji hydraulicznych. W celu zniwelowania błędów topologicznych w trakcie działania pętli programowej kroku (2) algorytm tworzącego modele podrzędne po usunięciu analizowanego elementu algorytm sprawdza dodatkowo, czy:

Rysunek 2.

Zbiór przykładowych modeli podrzędnych dla przykładowego modelu sieci

Figure 2. Example of the collection of sub-models for the sample network model



- usunięcie elementu reprezentowanego za pomocą węzła nie spowoduje wystąpienia sytuacji, w której elementy reprezentowane przez przewody utracą informację o węzle początkowym lub końcowym;
- usunięcie elementu reprezentowanego za pomocą przewodu nie spowoduje sytuacji, w której sieć posiadać będzie węzeł niepodłączony do całego systemu.

Gdy algorytm wykryje wystąpienie błędu topologicznego, którego przykłady opisano powyżej, to w sytuacji, gdy usunięto:

- zasuwę lub pompę, algorytm zastąpi usuwany element przewodem o średnicy i długości równej długości i średnicy usuwanego elementu;
- przewód, algorytm usunie również wskazany węzeł sieci nieposiadający podłączenia do innego przewodu (informacja o usunięciu węzła zostaje zapisana w wynikach symulacji);
- rezerwuaru lub zbiornika, zastąpi usuwany element węzłem o zerowym poborze wody.

Usuwanie błędów topologicznych zaobserwować można na rysunku 2, w przypadku usunięcia rezerwuaru R9, który został zastąpiony węzłem NJ9 o zerowym poborze wody, usunięciu przewodu P110, który spowodował usunięcie zbiornika T2 oraz usunięciu pompy PP9, która została zastąpiona przewodem NP9.

Po wygenerowaniu modeli podrzędnych algorytm umożliwia analizę sieci pod względem ciśnienia (ang. pressure), przepływu (ang. flow), zapotrzebowania na wodę (ang. demand) oraz wysokości słupa wody (ang. head) w poszczególnych węzłach. Analiza krytyczności poszczególnych elementów odbywa się na podstawie danych konfiguracyjnych, które pobierane są w momencie uruchomienia algorytmu. Dane konfiguracyjne stanowią odrębny plik w formacie JSON zawierające informacje, takie jak:

- ścieżkę dostępu do modelu bazowego;
- ścieżkę dostępu do folderu przechowującego modele podrzędne;
- czas trwania symulacji oraz krok czasowy;
- kategorie oraz warunki określające przynależność elementów do poszczególnych grup.

Za określenie liczby kategorii oraz warunków przynależności odpowiada ekspert dziedzinowy przekazujący model bazowy. Za pośrednictwem symbolicznej reprezentacji wiedzy ekspert może określić przynależność do kategorii za pośrednictwem reguł wykorzystujących strukturę IF

przesłanka THEN działanie, którego zależą jest brak występowania systemu wnioskującego, ponieważ wszystkie reguły zawierają w działaniu wynik końcowy. Przykładowo algorytm umożliwia przeprowadzenie analizy krytyczności wszystkich elementów wchodzących w skład infrastruktury wodociągowej na przepływ wody w sieci w oparciu o cztery kategorie:

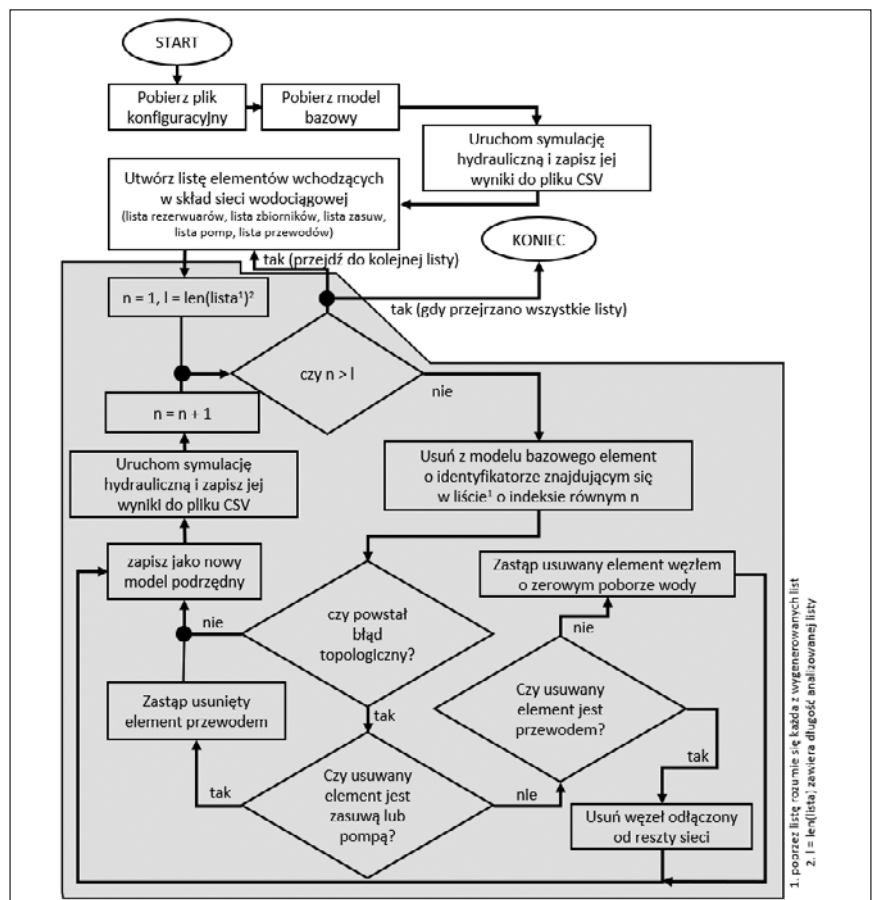
- (C1) – jeśli wynik dobowego przepływu wody jest w zakresie od 90 procent wzwyż względem wyników referencyjnych. Brak analizowanego elementu nie stanowi dużego zagrożenia w funkcjonowaniu SZZwW;
- (C2) – jeśli wynik dobowego przepływu wody mieści się w zakresie od 75 procent do 89 procent względem

wyników referencyjnych. Brak analizowanego elementu stanowi umiarkowane zagrożenie w funkcjonowaniu sieci;

- (C3) – jeśli wynik dobowego przepływu wody mieści się w zakresie od 50 procent do 74 procent względem wyników referencyjnych. Brak analizowanego elementu stanowi poważne zagrożenie w funkcjonowaniu sieci wodociągowej;
- (C4) – jeśli wynik dobowego przepływu wody jest poniżej 50 procent względem wyników bazowych – brak elementu stanowi katastroficzne zagrożenie w funkcjonowaniu sieci.

Fragment struktury pliku konfiguracyjnego dla przykładowego modelu sieci wodociągowej został przedstawiony poniżej:

```
{
  „network_name”: „Net1.inp”,
  „sub_model_path”: „C:\\\\Users\\\\ariel\\\\PycharmProjects\\\\doctorate\\\\networks\\\\”,
  „results_path”: „C:\\\\Users\\\\ariel\\\\PycharmProjects\\\\doctorate\\\\results\\\\”,
  „sim_duration”: 86400,
  „time_step”: 60,
  „categories”: [
    {„C1”: „IF daily_flow_rate >= 0.9 * reference_daily_flow_rate THEN C1”},
    {„C2”: „IF daily_flow_rate >= 0.75 * reference_daily_flow_rate AND daily_flow_rate < 0.89 *
      reference_daily_flow_rate THEN C2”},
    {„C3”: „IF daily_flow_rate >= 0.5 * reference_daily_flow_rate AND daily_flow_rate < 0.74 *
      reference_daily_flow_rate THEN C3”},
    {„C4”: „IF daily_flow_rate < 0.5 * reference_daily_flow_rate THEN C4”}
  ]
}
```



Rysunek 3. Reprezentacja algorytmu w postaci schematu blokowego
Figure 3. A representation of an algorithm in the form of a flowchart

Po uzupełnieniu pliku konfiguracyjnego istnieje możliwość przeprowadzenia symulacji i zapisania wyników do wskazanego pliku CSV. Liczba przeprowadzonych symulacji uzależniona jest od liczby elementów wchodzących w skład analizowanej sieci. Dla przykładowego modelu zostanie wykonanych 16 symulacji hydraulicznych (jedna symulacja bazowa oraz 15 symulacji – po jednej na każdy model podrzędny). Po zakończeniu każdej z symulacji do pliku CSV zapisywane są wszystkie uzyskane wyniki (nawet te, które nie były brane pod uwagę w procesie kategoryzacji). Możliwość dostępu do wszystkich wyników symulacji umożliwia głębszą analizę, która może wpłynąć na zmianę przynależności do poszczególnych kategorii lub usprawni ich rozbudowę (np. o warunek ciśnienia). Na rysunku 3 przedstawiono sposób działania algorytmu w postaci graficznej.

Przypadek testowy – analiza poprawności działania zaproponowanego rozwiązania

W celu weryfikacji poprawności zaproponowanego rozwiązania testom poddano system dystrybucji wody przedstawiony na rysunku 1. Wykonano 16 symulacji (w tym symulacja referencyjna). 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. W komputerze zainstalowany został system operacyjny Microsoft Windows 10 w wersji Home. Czas wykonania algorytmu wyniósł 67 sekund. W trakcie generowania modeli podrzędnych wystąpiły następujące błędy topologiczne:

- usunięcie rezeruaru R9 wymagało utworzenie węzła o zerowym poborze wody.

- usunięcie pompy PP9 wymagało usunięcia dodatkowego węzła (rezeruaru o identyfikatorze R9);
- usunięcie przewodu P110 wymagało usunięcia dodatkowego węzła (zbiornika T2);
- usunięcie zbiornika T2 wymagało utworzenie nowego węzła o zerowym poborze wody.

W tabeli 1 zawarto poglądowe wyniki działania algorytmu przedstawiające wartości przepływów (jednostka: galon amerykański na minutę) w 12 godzinie symulacji dla modelu bazowego oraz symulacji podrzędnych.

Rysunek 4 przedstawia natomiast wyniki kategoryzacji elementów wchodzących w skład sieci wodociągowej na podstawie dobowych wartości przepływów. Algorytm wyznaczył spośród 15 elementów:

- 3 klasy (C1) mających niewielki wpływ na funkcjonowanie sieci;
- 7 klasy (C2) umiarkowanie wpływających na działanie sieci;
- 3 klasy (C3) stanowiących poważne zagrożenie dla sieci;
- 2 klasy (C4), których brak uniemożliwia PDW.

Podsumowanie i wnioski

Wyniki działania algorytmu dla przykładowego modelu sieci wskazują na wysoką niezawodność sieci wodociągowej. Elementem krytycznym analizowanej sieci jest niewątpliwie rezerwar R9 oraz przewód o identyfikatorze P10. Awaria, któregośkolwiek z wyżej wymienionych elementów spowoduje w krótkim czasie brak dostępu do wody przez znaczną grupę

Rysunek 4. Reprezentacja wyniku działania algorytmu
Figure 4. Representation of the result of the algorithm

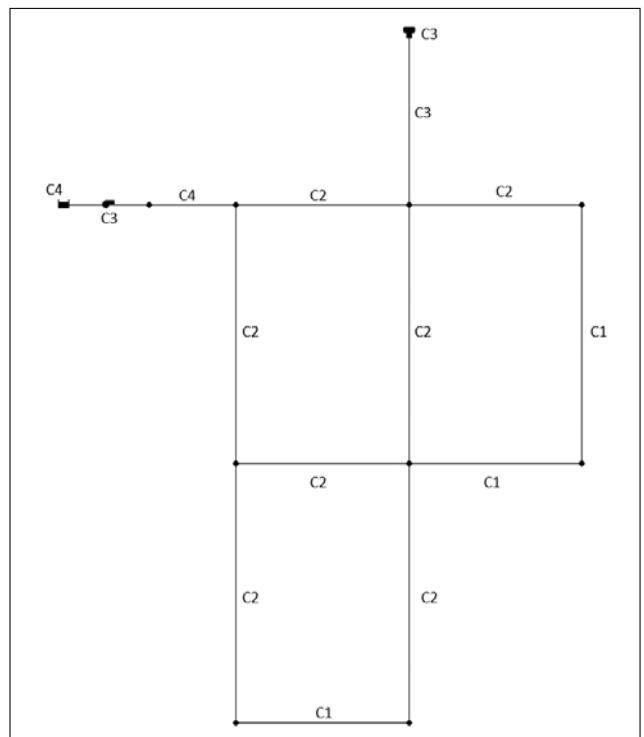


Tabela 1. Wyniki symulacji bazowej oraz modeli podrzędnych (12 godzina symulacji)

ID	P10	P11	P12	P21	P22	P31	P110	P111	P112	P113	P121	P122	PP9
Bazowa	1566.4	1009.8	142.9	120.64	107.1	35.9	-466	406.6	250.5	42.8	136.0	64.8	1566.8
Brak P10	0	-360.1	186.0	-71.4	63.9	31.5	0.0	210.3	403.8	86.0	131.5	68.4	0.0
Brak P11	1100.0	0.0	58.7	593.4	191.3	106.6	0.0	950.0	-208	-41.3	206.6	-6.6	1100.0
Brak P12	1569.7	992.5	0.0	140.1	250.0	37.06	-469	427.2	372.8	-100	137.1	63.0	1569.7
Brak P21	1543.0	1083.4	164.0	0.0	86.0	59.7	-443	309.7	326.4	64.0	159.7	40.3	1543.1
Brak P22	1564.5	1018.9	250.0	110.1	0.0	35.4	-464	395.5	154.5	150.0	135.4	64.6	1564.5
Brak P31	1564.9	1014.9	144.3	149.9	105.7	0.0	-464	399.9	255.8	44.3	100	100	1564.9
Brak P110	1100.0	635.4	162.9	31.7	87.1	32.9	0.0	314.6	322.5	62.9	132.9	67.1	1100.0
Brak P111	1469.8	1319.8	233.2	-266	16.8	16.6	-369	0.0	566.84	133.2	116.6	83.4	1469.7
Brak P112	1585.6	915.7	280.4	225.9	-30.4	43.9	-485	519.6	0.0	180.0	143.9	56.0	1585.6
Brak P113	1567.0	1005.0	100.0	125.9	150.0	36.2	-467	412.0	287.9	0.0	136.2	63.7	1567.0
Brak P121	1559.7	1034.0	149.6	255.6	100.4	-100	-459	375.6	274.8	49.5	0.0	200	1559.6
Brak P122	1568.3	1003.2	141.0	65.2	108.1	100	-468	415.2	243.8	41.0	200	0.0	1568.4
Brak PP9	1100.0	635.4	31.6	87.1	32.9	0	314.5	322.54	62.9	132.9	67.9	-1100	0.0
Brak R9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Brak T2	1100	635.4	162.9	31.6	87.1	32.9	0.0	314.6	322.5	62.9	132.9	67.1	1100

odbiorców. Sposób działania algorytmu przedstawiony został na przykładzie prostego modelu sieci wodociągowej. Warto zaznaczyć, że bez względu na złożoność sieci wodociągowej (np. większa liczba źródeł zasilania) sposób funkcjonowania algorytmu jest niezmienny. Zawsze na początku tworzona jest lista elementów wchodzących w skład analizowanej sieci, spośród której usuwane są kolejno elementy. Następnie po usunięciu następuje walidacja topologiczna nowego modelu podrzędnego i symulacja hydrauliczna. Na podstawie wyników symulacji i określonych kategorii przynależności analizowanemu elementowi zostaje przyznana kategoria. Taki sposób działania w przypadku złożonych sieci pozwoli określić np. ważność poszczególnych źródeł zasilania lub inne newralgiczne punkty sieci.

Analiza krytyczności elementów została przeprowadzona wyłącznie na podstawie danych o przepływach. W celu uwzględnienia np. wymaganych wielkości ciśnienia należałoby zmodyfikować kategorie w pliku konfiguracyjnym (dodając warunek "AND pressure_in_each_node >= 100").

Zaproponowane rozwiązanie stanowi dobrą bazę rozwojową dla Systemów Wczesnego Ostrzegania EWS (ang. Early Warning System) oraz Systemów Wspomagania Decyzji DSS (ang. Decision Support System). Na podstawie bazowego modelu hydraulicznego sieci wodociągowej oraz dodatkowych informacji (podział na klasy oraz warunki przynależności do poszczególnych klas) algorytm umożliwia uzyskanie informacji o wpływie braku poszczególnych elementów na funkcjonowanie SZZwW.

Algorytm analizy krytyczności elementów sieci wodociągowej został opracowany na zasadzie licencji wolnego oprogramowania (ang. open-source). Odmianą

zależą tego typu rozwiązania jest brak kosztów licencji. Ponadto oprogramowanie może ewoluować w czasie rzeczywistym. Oznacza to, że deweloperzy mogą swobodnie dodawać nowe funkcjonalności oraz modyfikować już istniejące. Python jako język skryptowy pozwala na łatwą rozbudowę istniejących rozwiązań o dodatkowe funkcjonalności lub modyfikację istniejących skryptów.

Wadą proponowanego rozwiązania jest brak interfejsu GUI (ang. Gateway User Interface), który na chwilę obecną uniemożliwia osobom nieznanym się na programowaniu korzystanie z algorytmu. Dlatego warto zastanowić się nad możliwością opracowania i zrealizowania prostego interfejsu użytkownika.

Natomiast dodatkowym atutem zaproponowanego rozwiązania jest możliwość określenia wpływu nowo dodanych elementów na punkty krytyczne sieci wodociągowej. Tego typu funkcjonalność może zostać wykorzystana w sytuacji projektowania modernizacji oraz rozbudowy istniejącego systemu dystrybucji wody.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
- [2] Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków
- [3] „Our common Future – Chapter 2: Towards Sustainable Development, Form A/42/427”, Report of the World Commission on Environment and Development, 1987.
- [4] Mays L., Urban Water Supply Handbook, Mc Graw Hill, New York, 2002.
- [5] Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th edition, WHO, 2017.
- [6] Antonowicz A., Nowak M., Urbaniak A., Task Scheduling Algorithm for Renovation Teams of Water Distribution Systems, W:

Proceedings of the 2020 21st International Carpathian Control Conference (ICCC) : Virtual Conference, Košice, Slovak Republic October 27 – 29, 2020 / red. Ivo Petráš, Ján Kačur: IEEE, 2020 – s. 1

- [7] Eason G., Noble B., Sneddon I. N., *Opflow*, AWWA, vol. 42, no. 5, 2016, pp. 11.
- [8] Bałut A., Urbaniak A., *Management of Water Pipeline Network Supported by Hydraulic Models and Information System*, Proc. of ICC'2011, Velke Karlovic, Czech Republik, 25-28 May 2011, ISBN: 978 – 1-61284-359-9
- [9] Rossman L.A., *Epanet 2 User Manual*, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268, EP/600/R-00/057, September 2000
- [10] Antonowicz A., Bałut A., Urbaniak A., Zakrzewski P., *Algorithm for Early Warning System for Contamination in Water Network 2019 20th ICC'2011*, 26-29 May 2019, E-ISBN: 978-1-7281-0702-8
- [11] 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.
- [12] 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
- [13] 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.
- [14] Ścieranka G. *Modelowanie hydrauliczne sieci wodociągowych – wybrane aspekty, Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne*, nr1 Styczeń 2016 s. 58 – 61
- [15] *Computers Application in Hydraulic Engineering*, wyd. Eighth edition, Bentley Institute Press, Exton, Pa, 2013
- [16] Zakrzewski P., Mazurkiewicz J., Antonowicz A., *Wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji do dynamicznego określania punktu pracy obiektów wod-kan*, *Miesięcznik Instal nr 9*, 2018, strony: 53-57.