

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ MASZYN ROBOCZYCH I TRANSPORTU

KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ



mgr inż. Łukasz SEMKŁO

LOKALIZACJA NIESZCZELNOŚCI W SIECI
WODOCIĄGOWEJ POPRZECZ ANALIZĘ ZMIAN
CIŚNIENIA W WYBRANYCH WĘZŁACH SIECI

Promotor

dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak, prof. PP

Poznań 2015

*Składam podziękowania
dr. hab. inż. Andrzejowi Frąckowiakowi prof. PP
oraz
prof. dr. hab. inż. Michałowi Ciałkowskiemu
za szereg cennych uwag dotyczących niniejszej pracy doktorskiej*

*Osobne wyrazy wdzięczności za okazane
wsparcie kieruję do Żony i córki Marianny*

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI.....	3
STRESZCZENIE	5
1. WSTĘP	6
2. WYZNACZENIE ROZKŁADU PRĘDKOŚCI I CIŚNIEŃ W SIECI WODOCIĄGOWEJ	16
2.1. WYZNACZANIE PARAMETRÓW SIECI WODOCIĄGOWEJ	16
2.2. WYBÓR SPOSOBU WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA STRAT LINIOWYCH Λ	20
2.3. PRZYGOTOWANIE DANYCH DO OBLICZEŃ W PROGRAMIE „SIEĆ” (TRYB 1).....	27
2.4. OPIS PROGRAMU „RUROCIĄGI”	31
2.5. OPIS PROGRAMU „SYMULATIONX”	33
2.6. ZESTAWIENIE I PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ PRZYKŁADOWYCH SIECI WODOCIĄGOWYCH	35
2.7. PODSUMOWANIE.....	44
3 ANALIZA WPŁYWU POŁOŻENIA USZKODZENIA SIECI NA CIŚNIENIE W WĘZŁACH 	46
3.1. ALGORYTM WYZNACZANIA LICZBY I POŁOŻENIA WĘZŁÓW DO POMIARU CIŚNIENIA...46	
3.2. PRZYGOTOWANIE DANYCH DO OBLICZEŃ W PROGRAMIE ”SIEĆ” (TRYB 2).....	50
3.3. ANALIZA NUMERYCZNA WPŁYWU POŁOŻENIA WYCIEKU NA ROZKŁAD CIŚNIENIA W WĘZŁACH SIECI	54
3.4. PODSUMOWANIE.....	65
4. LOKALIZACJA NIESZCZELNOŚCI W SIECI WODOCIĄGOWEJ	67
4.1. WYBÓR METODY POSZUKIWANIA LOKALIZACJI USZKODZENIA W SIECI WODOCIĄGOWEJ.....	67
4.2. PRZYGOTOWANIE DANYCH DO OBLICZEŃ W PROGRAMIE „SIEĆ” (TRYB 3).....	69
4.3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH POSZUKIWANIA NIESZCZELNOŚCI W SIECI WODOCIĄGOWEJ.....	71
4.4. PODSUMOWANIE.....	80
5. WNIOSKI KOŃCOWE.....	82

LITERATURA	84
SPIS RYSUNKÓW	88
SPIS TABEL	92
ZAŁĄCZNIK 1. ROZBUDOWANE PRZYKŁADY SIECI WODOCIĄGOWEJ	94
ZAŁĄCZNIK 2. WARTOŚCI PRĘDKOŚCI W RUROCIĄGACH I CIŚNIENIA W WĘZŁACH W ROZBUDOWANYCH SIECIACH WODOCIĄGOWYCH	97

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiona została metoda wykrywania nieszczelności sieci wodociągowej na podstawie analizy ciśnienia w wybranych węzłach sieci. Zagadnienie to jest ważne, ponieważ uszkodzenie sieci może powodować znaczne szkody nie tylko w jej funkcjonowaniu, ale w całej infrastrukturze terenu.

Realizacja celów postawionych w pracy podzielona została na 3 etapy. Etap 1 sprowadza się do wyznaczenia rozkładów prędkości w poszczególnych rurociągach oraz ciśnień w węzłach sieci wodociągowej. Na podstawie analizy dostępnych wzorów, do wyznaczania współczynnika strat liniowych został wybrany wzór Colebrooka – White’a, a wyniki obliczeń porównane z wynikami otrzymanymi z programu komercyjnego „SimulationX” oraz „Rurociągi”. Z porównania wyników wynika duża zgodność parametrów sieci wyznaczonych niezależnie za pomocą tych programów.

W drugim etapie pracy dokonano analizy wpływu położenia nieszczelności w sieci na rozkłady ciśnień w węzłach sieci. Na tej podstawie sformułowane zostało kryterium wyboru węzłów sieci, w których mierzone jest ciśnienie potrzebne do identyfikacji miejsca wycieku z sieci wodociągowej. Zaproponowany algorytm wyboru tych węzłów w sieci został przetestowany na prostych i złożonych przykładach sieci wodociągowych. Na podstawie analizy zmiennego położenia uszkodzenia w sieci wodociągowej udało się wytypować taką konfigurację węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie. Na tym etapie badań wygenerowane zostały ciśnienia w wytypowanych węzłach sieci, dla losowego położenia miejsca wycieku.

W trzecim etapie badań przedstawiony został algorytm służący do lokalizacji miejsca wycieku wody z sieci. Działanie tego algorytmu podzielone jest na dwa etapy. Na etapie pierwszym przeszukiwana jest cała sieć wodociągowa i wybierany jest rurociąg, w którym znajduje się uszkodzenie. Na etapie drugim znajdowana jest dokładne położenie miejsca wycieku. W rozprawie przedstawiono obliczenia numeryczne na bazie tego algorytmu dla różnych przykładów sieci wodociągowej. Rurociąg, w którym zlokalizowane jest uszkodzenie został tak wybrany, aby dla analizowanego zestawu węzłów pomiarowych znalezienie tego rurociągu w sieci było najtrudniejsze. Miejsce uszkodzenia w tym rurociągu zostało wybrane losowo. Z przeprowadzonych badań wynika, że we wszystkich wariantach węzłów pomiarowych i wybranych lokalizacjach uszkodzenia, program bezbłędnie lokalizował miejsce wycieku.

1. WSTĘP

Sieci wodociągowe od początku swojego istnienia świadczyły o postępie technologicznym danego ludu oraz o postępie naukowym. Pierwsze informacje dotyczące sieci wodociągowej opisał Sextus Julius Frontinus [37] w traktacie *De aquis urbis Romae* [38]. Najstarszą sieć wodociągową odnaleziono w miejscowości Herkulanum, która w wyniku erupcji wulkanu Wezuwiusz uległa zagładzie 24 sierpnia 79r. n.e. dzieląc losy Pompejów. Odkrycia sieci dokonano przez przypadek dopiero ponad 1500 lat później w 1709 roku. Dokładniejsze oględziny wykonane w czasach współczesnych. Odkryto wówczas sieć wodociągową połączoną z wieżą ciśnień oraz sieć kanalizacyjną. Możliwości rozprowadzania wody do domów bogatszej części mieszkańców, zasilania łaźni, zbiorników w postaci fontann, z których ludzie biedniejsi mogli czerpać wodę, znalazły ponowne zastosowanie w Europie dopiero w XIX wieku. System wodociągowy z miasta Herkulanum stosowany był w Starożytnym Rzymie powszechnie. System ten (akwedukty wraz z instalacjami podziemnymi) w samym tylko Rzymie składał się z 11 akweduktów o łącznej długości 420 kilometrów, w tym 47 kilometrów było nad ziemią [41]. Na rysunku 1.1 umieszczono widok kamiennego akweduktu Pont du Gard koło Nimes. Akwedukt ten został wybudowany w okresie 26 p. n.e. – 16 p. n.e.



Rys. 1.1. Akwedukt Pont du Gard [41]

Rury w tych instalacjach wodociągowych wykonane były z ołowiu (rys. 1.2), często stosowano również konstrukcje kamienne (rys. 1.3)

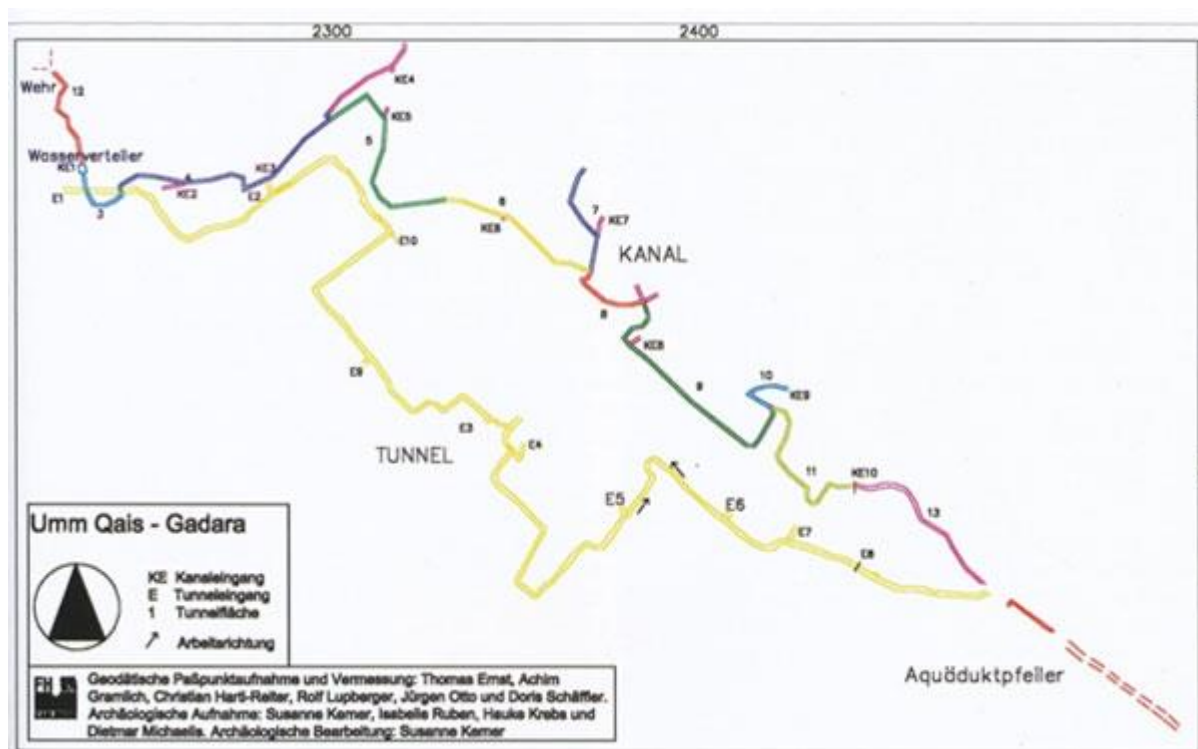


Rys. 1.2. Oryginalne rzymskie rurociągi z widocznym szwem doprowadzające wodę do rzymskich łaźni w Bath, Wielka Brytania [39]



Rys. 1.3. Rury kamienne połączone z akweduktem w miejscowości Malaga [40]

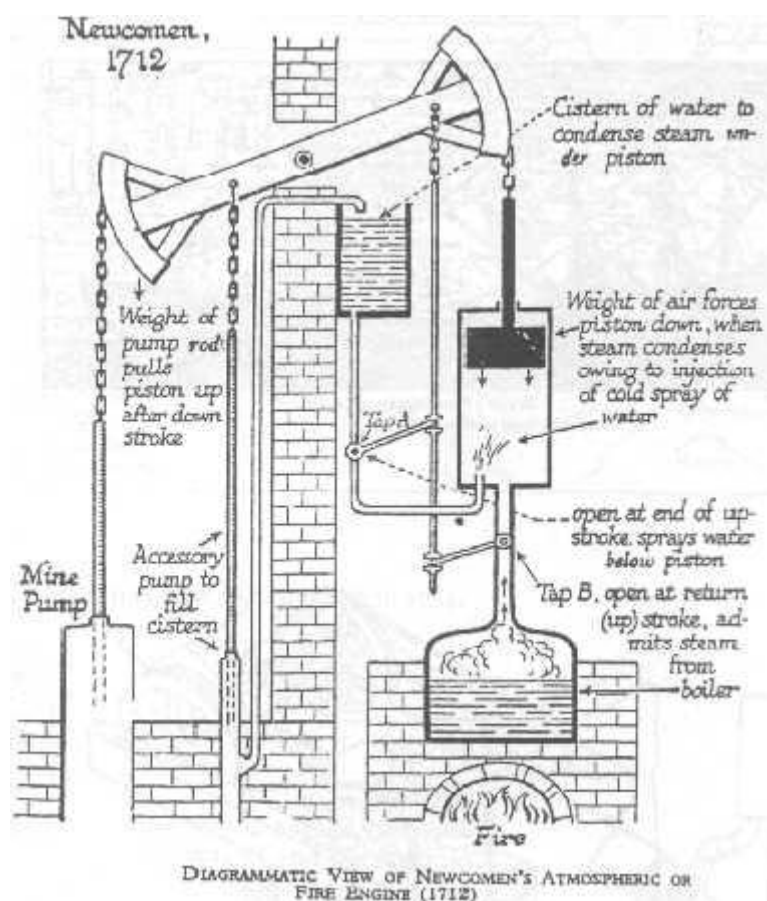
Przykładem układu sieci wodociągowej może być instalacja naziemna i podziemna w miejscowości Gadara (rys. 1.4).



Rys. 1.4. Schemat sieci wodociągowej w miejscowości Gadara [35]

Pierwszy wodociąg ciśnieniowy zbudowany w Europie powstał w Augsburgu w 1548 roku. Pierwsza sieć wodociągowa ciśnieniowa na terenach obecnej Polski wykorzystująca koło wodne powstała w miejscowości Frombork w 1571 [49] i stało się to wcześniej niż w Londynie. W Londynie natomiast zastosowano koło wodne, które pracując w obu kierunkach wykorzystywało dopływy i odpływy wód morskich. Budowę sieci wodociągowej w Londynie rozpoczęto w 1581 roku, a ukończono w 1582 roku [10]. Użycie kół wodnych do dostarczania wody do sieci wodociągowej zostało bardzo mocno rozbudowane w 1682 roku w miejscowości Marly na Sekwanie (Francja). Zastosowano tam 14 kół wodnych, które były napędzane przez 225 pomp. Woda tłoczona była do fontann w królewskim Wersalu. Londyńskie koło wodne zastąpione zostało pompą parową tłoczącą wodę w rurociągach w 1713 roku [4]. Po 10 latach użytkowania pompę parową zastąpiła maszyna parowa Thomasa Newcomena (rys. 1.5) [48].

W 1828 roku dokonano postępu w oczyszczaniu wody dostarczanej za pomocą wodociągów do metropolii miejskich. James Simpson zastosował rewolucyjny jak na początek XIX wieku wynalazek, czyli piaskowy filtr wodny. Został on zainstalowany w sieci wodociągowej pobierającej wodę z Tamizy w mieście Chelsea [20]. Pierwsze chlorowanie wody wodociągowej zastosowano w 1896 w Anglii [12], a pierwsza instalacja chlorowania wody powstała w Belgii w Middelkerke w 1920 roku. W 1906 roku w Nicei we Francji zaczęto ozonować wodę [44].



Rys. 1.5. Atmosferyczna maszyna parowa Newcomena [52]

W czasach obecnych sieci wodociągowe oraz kanalizacyjne są powszechne i znajdują się w każdej miejscowości. Sieci wodociągowe zaczęto rozwijać i modernizować pod względem wykorzystywanych materiałów oraz używanej armatury i urządzeń. W procesie zmiany materiałów uwzględniono zmianę chropowatości i jej wpływ na zwiększenie strat ciśnienia w instalacjach rurociągowych.

Wraz z ciągłym rozwojem instalacji wodociągowych zaczęto zauważać nierozłączny element, który cały czas z tymi systemami jest powiązany, czyli wycieki i nieszczelności. Koszty związane z wyciekami i nieszczelnościami sieci wodociągowych mogą być ogromne. W czasach rzymskich można byłoby założyć, że jeżeli woda nie płynęła do łaźni to konsekwencje tego zdarzenia mogły być tragiczne. Tragiczny los mógł spotkać osobę odpowiedzialną za utrzymanie drożności akweduktów i niewykonanie tego obowiązku mogło taką osobę kosztować życie. W czasach obecnych takie sytuacje nie mają miejsca, ale konsekwencje wycieków w instalacjach są bardzo kosztowne, a im później zostają wykryte, tym są kosztowniejsze. Przykładem takiej sytuacji może być zdarzenie zapadnięcia się asfaltu na jednej z dróg dowolnego miasta. Sytuacja taka generuje ogromne koszty związane nie tylko z naprawą samej instalacji rurociągowej, ale również drogi. W czasach

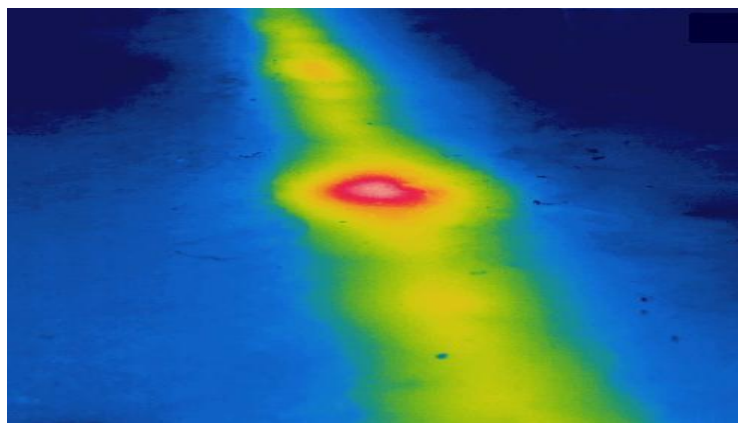
szybkiego wzrostu urbanizacyjnego bardzo ważnym zagadnieniem stało się lokalizowanie nieszczelności.

Lokalizacje nieszczelności można podzielić na cztery główne rodzaje: biologiczne, urządzenia pomiarowe, systemy SCADA, pozostałe.

Metody biologiczne w poszukiwaniu nieszczelności opierają się na ludziach i zwierzętach. Ta metoda jest najbardziej tradycyjną metodą lokalizacji, gdyż wykorzystuje doświadczony personel, który przemieszcza się pieszo lub za pomocą pojazdów wzdłuż rurociągu. Personel ten poszukuje oznak wycieku za pomocą wzroku, węchu (jeżeli transportowany płyn posiada woń) oraz słuchu (odgłosy rozprężania się płynu). Zamiast ludzi można wykorzystać specjalnie wytresowane psy, które są bardziej wrażliwe na zapachy niż ludzie i mogą wyczuć woń płynu.

Urządzenia pomiarowe wykorzystywane do lokalizacji nieszczelności można podzielić na urządzenia wizyjne, akustyczne, wykrywające opary oraz przewody diagnostyczne.

Poszukiwania nieszczelności przy pomocy urządzeń wizyjnych są wykonywane za pomocą kamery wideo zdolnej do rejestrowania promieniowania podczerwonego (kamera termowizyjna). Kamera rejestruje różnicę temperatury, a następnie obrazy są przetwarzane w celu pokazania zmian temperatury całym w spektrum koloru (rys. 1.6).



Rys. 1.6. Obraz z kamery termowizyjnej rurociągu podziemnego z wyciekiem [42]

Dane mogą być nagrywane dla przyszłej rewizji i przetwarzania. Systemy te używane są ogólnie na rurociągach, które mogą pozostawić po sobie ślad termiczny związany z transportowanym medium na odcinku kilku metrów pod ziemią. Ograniczeniem jest ich użycie tylko do rurociągów, które transportują płyny znacząco podnoszące temperaturę otaczającej ziemi, takich jak woda do celów grzewczych, czy para. Zaletą tego systemu jest możliwość analizowania dużych obszarów jednocześnie oraz brak jakichkolwiek prac ziemnych. Technika podczerwieni jest przydatna głównie do obserwowania systemów

Akustyczne metody wykrywania wycieku opierają się na piezoelektrycznych przetwornikach, które przekształcają fale ciśnienia generowane przez płyn uciekający z instalacji w sygnał elektryczny. System ten składa się z piezoelektrycznego przetwornika, wzmacniacza oraz słuchawek (rys. 1.7).



Ogromnym plusem tej metody jest możliwość zlokalizowania nieszczelności z dokładnością nawet jednego metra. Dokładność uzależniona jest od otoczenia, w którym znajduje się rura. Wadą tej metody jest to, że operator systemu pomiarowego może błędnie odczytać informacje o wycieku. Sytuacja taka może mieć miejsce podczas dokonywania pomiarów w pobliżu zaworów, czy zmian geometrii rury lub otoczeniu zewnętrznym (np. w pobliżu pompy). Metoda ta szczególnie używana jest w instalacjach pracujących stale w podwyższonym ciśnieniu.

11 | Strona



Rys. 1.7. Detektor gazu [45]

Ostatnią opisywana metodą związaną z przyrządami pomiarowymi jest metoda oparta o przewód pomiarowy (rys. 1.8) Przewód ten składa się ze światłowodu znajdującego się w bardzo cienkiej osłonie ze stali nierdzewnej o znanej częstotliwości.



Rys. 1.8. Zamocowania przewodu na rurociągu [51]

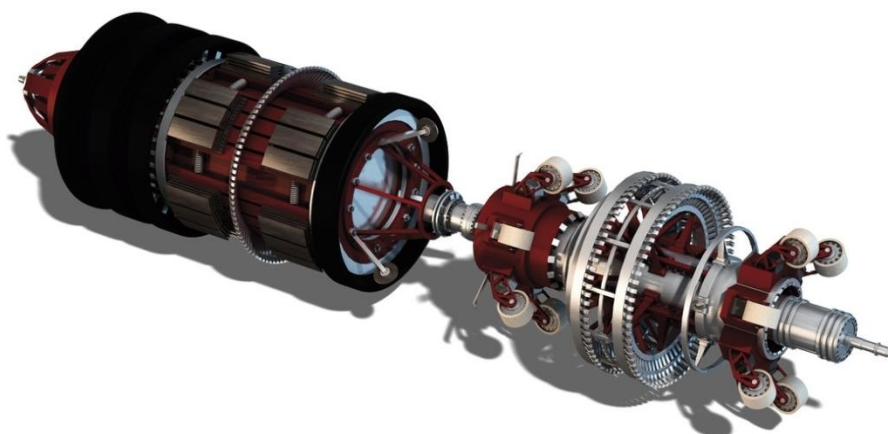
Światłowód znajdujący się w środku posiada znaną wartość oporu oraz długość. W momencie wystąpienia wycieku zmienia się jego charakterystyka dielektryczna. W wyniku tych zmian zwiększa się oporność przewodu i dzięki temu możliwa jest dokładna lokalizacja nieszczelności sieci. Może on być wykorzystywany do lokalizacji nieszczelności w instalacjach transportujących wodę, paliwo, elektrolity, rozpuszczalniki, kwasy, zasady itp. Istnieje możliwość instalacji przewodu w już istniejących instalacjach lub w nowobudowanych. Niestety po wykryciu nieszczelności kabel należy wymienić na nowy.

Jest on bardzo wrażliwy na otoczenie, a w przypadku skraplania się pary z powodu różnicy temperatury może dojść do niewłaściwego wskazania nieszczelności.

Systemy SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), czyli systemy nadzoru i gromadzenia danych są kolejnym sposobem na poszukiwanie nieszczelności, które przekształcają fizyczne parametry zjawiska (takie jak ciśnienie, temperatura, wydajności i gęstość) na elektryczne sygnały mogące zostać zinterpretowane przez system kontroli. Można je zakwalifikować jako mierniki poziomu, indukcji magnetycznej, zmiany temperatury oraz fal naddźwiękowych. Podczas pomiarów system mierzy całkowitą objętość płynu we wszystkich zbiornikach instalacji. Przy zadanych parametrach temperatury oraz ciśnienia objętość jest stała, w razie wystąpienia przecieku ulegnie ona zmianie. Podczas pomiaru przepływu za pomocą systemu SCADA bada się przewodność magnetyczną przepływającego płynu poprzez indukcje magnetyczną. Pomiar prędkości przepływu dokonywany jest w momencie przepływania płynu przez wygenerowane pole magnetyczne, a powstała wartość napięcia jest proporcjonalna do średniej wartości prędkości przepływu.

Ostatni podział lokalizacji nieszczelności można określić jako pozostałe metody. Zawiera on w sobie tak zwane skrobaki oraz modele dynamiczne.

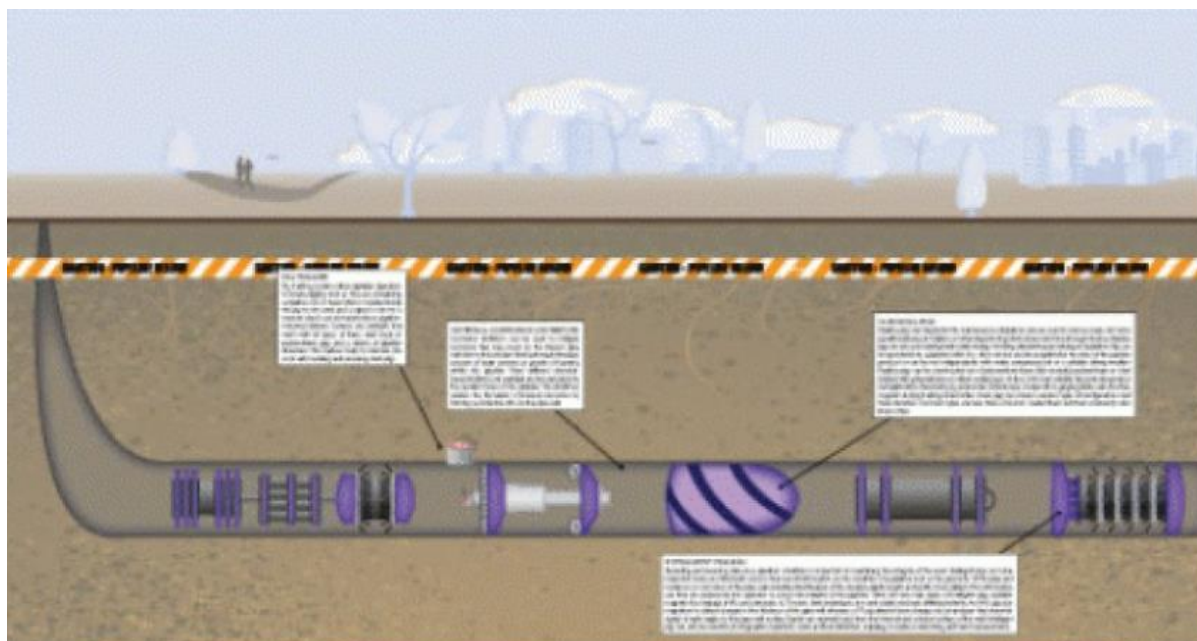
Skrobak (rys. 1.9) (oryginalnie określenie „pig”) jest to robot, który zostaje wpuszczony bezpośrednio do wnętrza instalacji.



Rys. 1.9. Skrobak inteligentny wykorzystywany do oczyszczania instalacji Nord-Stream [46]

Wykorzystuje on technologie magnetyczne do skanowania ścianek wewnętrznych rury i dzięki temu nie tylko odnajduje miejsca gdzie może wystąpić nieszczelność, ale również obszary gdzie ona już występuje. Dodatkowo skrobak zbiera informacje o stanie powstawania warstwy kamienia wytrącającego się z wody w wodociągach. Dużym minusem

stosowania skrobaka jest przygotowanie specjalnego miejsca (stacji dokującej), z którego będzie on wpuszczany do instalacji, co powoduje ograniczenia w jego zastosowaniu. Niektóre rodzaje tych urządzeń pracują tylko i wyłącznie przy wyłączonej instalacji.



Rys. 1.10. Różne rodzaje skrobaków w instalacji [47]

W kategorii „inne” znajduje się również pod kategoria model dynamiczny. Model dynamiczny, czyli określenie danego zjawiska fizycznego za pomocą równań matematycznych. Niniejsza rozprawa doktorska skupia się na tej właśnie metodzie lokalizacji nieszczelności w sieci rurociąkowej transportującej medium jakim jest woda.

Celem pracy jest opracowanie metody lokalizacji nieszczelności w sieci wodociągowej na podstawie zmian ciśnienia w wybranych węzłach sieci. Realizacja celu podstawowego wynika z następujących celów szczegółowych:

1. wyznaczenie rozkładów prędkości w poszczególnych rurociągach oraz ciśnień w węzłach sieci wodociągowej;
2. analiza wpływu położenia nieszczelności w sieci na rozkłady ciśnień w węzłach sieci i na tej podstawie określenie kryterium wyboru węzłów sieci, w których mierzone jest ciśnienie;
3. opracowanie algorytmu obliczeniowego do lokalizacji nieszczelności sieci na podstawie rozkładu ciśnień w węzłach sieci wybranych w pkt. 2.

Układ pracy wynika z realizacji celów szczegółowych.

W rozdziale 2 pracy przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranych konfiguracji sieci wodociągowych otrzymane na podstawie obliczeń z programu autorskiego napisanego w języku C++ i porównaniu tych wyników z otrzymanymi z programu komercyjnego oraz programu napisanego w programie Fortran. Wyniki badań z tej części pracy były publikowane w pracach [22, 23, 24] i prezentowane na konferencjach [25, 26, 27, 28]. Dokonana została szczegółowa analiza wzorów do obliczania liniowych strat ciśnienia w sieci wodociągowej.

W rozdziale 3 przedstawiona została realizacja drugiego celu pracy. Zbadany został wpływ zmiany położenia uszkodzenia sieci na rozkład ciśnienia w poszczególnych węzłach sieci. Wyniki obliczeń przedstawione w tym rozdziale zostały uzyskane na podstawie programu autorskiego napisanego w języku C++. Analiza wyników pozwoliła na wybranie węzłów sieci, w których powinno być zmierzone ciśnienie. Dane z tych obliczeń zostały użyte do wygenerowania uszkodzenia sieci wodociągowej.

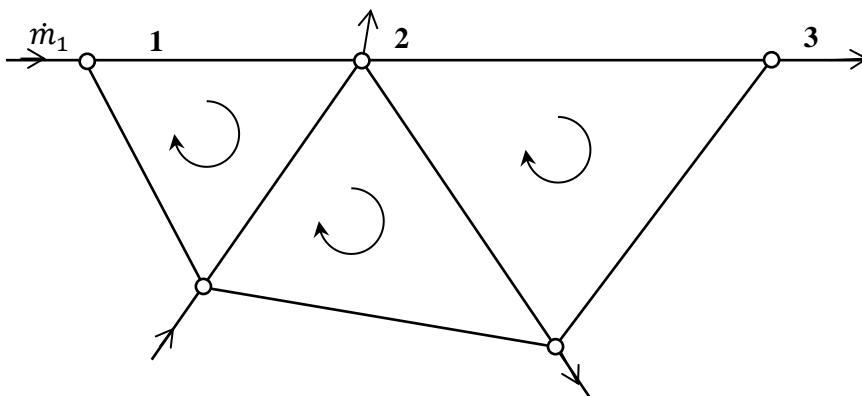
Rozdział 4 zawiera wyniki obliczeń związane z realizacją szczegółowego celu trzeciego, będącego celem głównym pracy, związane z lokalizacją uszkodzenia w wybranych przykładach sieci. W rozdziale opisany jest również algorytm obliczeniowy do lokalizacji uszkodzeń sieci wodociągowej, na podstawie którego został napisany program autorski w języku C++.

Prace kończy rozdział 5, który jest podsumowaniem.

2. WYZNACZENIE ROZKŁADU PRĘDKOŚCI I CIŚNIEŃ W SIECI WODOCIĄGOWEJ

2.1. Wyznaczanie parametrów sieci wodociągowej

Sieć wodociągowa to skomplikowany układ połączeń rurowych, w którym płynie woda. Można ją rozpatrywać podobnie jak sieć elektryczną, do której stosuje się prawa Kirchhoffa. Korzystając z tej analogii można przyjąć, że natężeniu prądu w sieci elektrycznej odpowiada strumień masy (strumień ciepła) w sieci wodociągowej, a spadkowi napięcia na odcinku sieci elektrycznej – spadek ciśnienia. Stąd analogicznie do sieci elektrycznej można zapisać równania bilansu strumienia wody w węzłach sieci wodociągowej oraz bilansu energii (spadku ciśnienia) w odcinkach sieci wodociągowej, rys. 2.1.



Rys. 2.1. Fragment sieci wodociągowej

Dla uproszczenia rozważań założono, że w rozpatrywanym fragmencie sieci nie ma pomp oraz miejsc, w których znajdują się zawory, zasuwy lub inne elementy sieci generujące straty lokalne. Ponadto odcinki rur pomiędzy węzłami mają jednakową średnicę. Założenia te nie umniejszają ogólności rozważań, pozwalają jednak na otrzymanie uproszczonych wzorów dla sieci wodociągowej.

Rozważana sieć wodociągowa składa się z węzłów połączonych rurami o znanych średnicach, długościach oraz chropowatości powierzchni wewnętrznych. Zamknięty układ rur tworzy, podobnie jak w sieci elektrycznej, oczko sieci wodociągowej. Na rysunku 2.1 pokazany jest układ trzech oczek elementarnych sieci wodociągowej. W każdym węźle sieci bilansowany jest strumień masy przepływającej wody (dla gęstości wody $\rho = \text{const}$ bilans strumienia objętości):

$$\sum_{i=1}^{n_k} \dot{m}_{ki} = \dot{m}_{k0}, \quad (2.1)$$

gdzie n_k oznacza liczbę przewodów rurowych należących do rozważanego fragmentu sieci wychodzących z k -tego węzła sieci, \dot{m}_{k0} strumień masy wpływającej lub wypływającej

z zewnątrz do rozważanego fragmentu sieci w k -tym węźle, \dot{m}_{ki} strumień masy wpływający lub wypływający z k -tego węzła sieci przez połączenie należące do rozważanej sieci. Jeśli przez n_w oznaczona zostanie liczba węzłów w rozważanym fragmencie sieci, to liczba równań niezależnych postaci (2.1) jest równa $n_w - 1$. Korzystając z warunku równowagi mechanicznej w oczku sieci wodociągowej, można napisać dla każdego oczka sieci następujące równania:

$$\sum_{i=1}^{n_l} \Delta p_{li} = 0, \quad (2.2)$$

gdzie n_l oznacza liczbę przewodów rurowych należących do l -tego oczka sieci, Δp_{li} spadek ciśnienia wody w i -tym przewodzie rurowym l -tego oczka sieci. Oznaczając przez n_o liczbę elementarnych oczek tworzących sieć wodociągową, do układu równań (2.1) dołączonych zostaje n_o równań postaci (2.2). Połączony układ równań (2.1), (2.2) ma $n_o + n_w - 1$ niezależnych równań. Z układu tego można wyznaczyć prędkości wody w poszczególnych odcinkach rur. Wynika to z następujących wzorów:

$$\dot{m}_{ki} = \rho A_{ki} v_{ki}, \quad (2.3)$$

$$\Delta p_{li} = \lambda(Re, \varepsilon) \frac{l_{li}}{d_{li}} \frac{\rho v_{li}^2}{2}, \quad (2.4)$$

gdzie A_{ki} oznacza przekrój poprzeczny i -tej rury połączonej z l -tym węzłem sieci, v_{ki} prędkość wody w i -tej rurze, Re liczba Reynoldsa, ε chropowatość powierzchni wewnętrznej rury, l_{li} , d_{li} odpowiednio długość i średnicę i -tej rury połączonej z l -tym węzłem sieci.

Wstawiając równania (2.3) i (2.4) do układu równań (2.1) i (2.2) otrzymujemy nieliniowy układ równań:

$$\sum_{i=1}^{n_k} \rho A_{ki} v_{ki} = \dot{m}_{k0}, \quad (2.5)$$

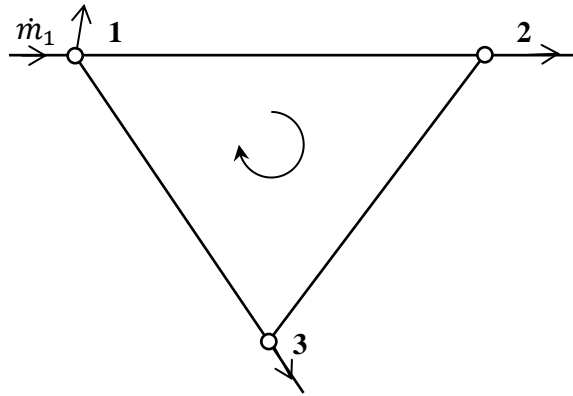
$$\sum_{i=1}^{n_l} \lambda(Re(v_{li}), \varepsilon) \frac{l_{li}}{d_{li}} \frac{\rho v_{li}^2}{2} = 0, \quad (2.6)$$

w którym niewiadomą jest prędkość wody w każdym przewodzie rurowym (elemencie liniowym sieci).

Oznaczając przez n_e liczbę elementów sieci w rozważanym fragmencie sieci wodociągowej należy wykazać, że zachodzi następujący związek:

$$n_o + n_w - 1 = n_e \quad (2.7)$$

Dowód równości (2.7) przeprowadzony zostanie za pomocą indukcji matematycznej. Rozważmy sieć składającą się z jednego oczka, trzech elementów liniowych i trzech węzłów, rys. 2.2. Dla tej sieci spełniona jest równość (2.7).

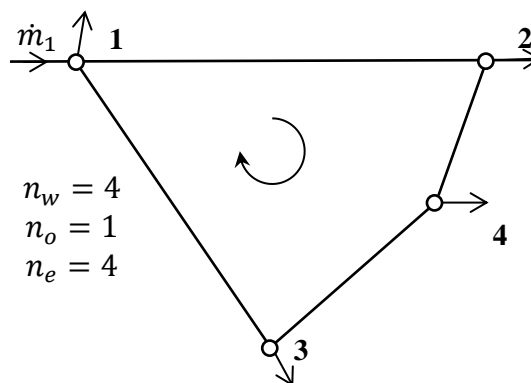


Rys. 2.2. Elementarna sieć wodociągowa

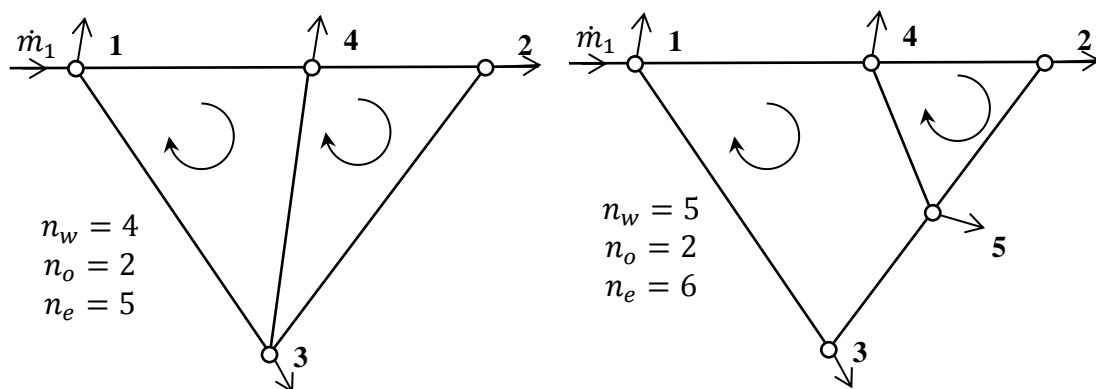
Sieć tę można rozbudować następująco:

- wstawiając dodatkowy węzeł,
- wstawiając dodatkowy element liniowy,
- wstawiając dodatkowe oczko sieci.

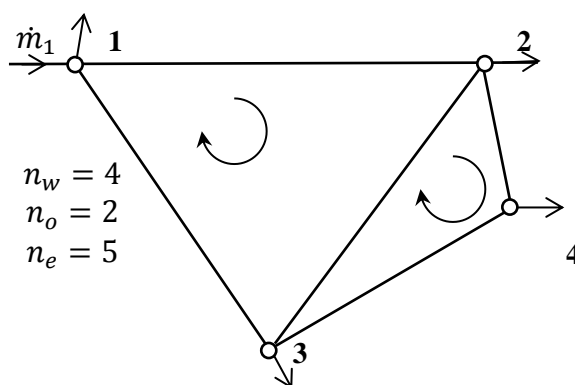
Rozbudowę sieci z dodatkowym węzłem ilustruje rys. 2.3. Dołączenie do sieci dodatkowego węzła powoduje podział jednego elementu liniowego na dwie części, a więc zwiększenie liczby elementów o 1. Zatem równość (2.7) jest spełniona. Dołączenie do sieci dodatkowego elementu liniowego może wygenerować 0, 1 lub 2 dodatkowe węzły oraz dodatkowe oczko. W przypadku braku dodatkowych węzłów może być to element krzywoliniowy, który łączy istniejące węzły. Taki wariant generuje dodatkowe oczko siatki, a więc spełniona jest równość (2.7). Warianty z jednym i dwoma dodatkowymi węzłami ilustruje rys. 2.4. Widać, że tu również spełnione jest równanie (2.7).



Rys. 2.3. Elementarna sieć z dodatkowym węzłem sieci



Rys. 2.4. Elementarna sieć z dodatkowym elementem liniowym sieci



Rys. 2.5. Elementarna sieć z dodatkowym oczkiem sieci

Dodatkowe oczko w sieci można uzyskać wstawiając jeden element krzywoliniowy łączący istniejące węzły lub dwa elementy liniowe z jednym węzłem dodatkowym. Pierwszy z tych wariantów został już rozpatrzony, drugi wariant pokazany jest na rys. 2.5.

Przedstawione modyfikacje prostej sieci wodociągowej są prawdziwe dla dowolnej konfiguracji sieci wodociągowej. Niech wzór (2.7) będzie prawdziwy dla sieci o n_w liczbie węzłów, n_e liczbie elementów i n_o liczbie oczek. Zmieniając w opisany powyżej sposób liczbę węzłów, elementów i oczek sieci wodociągowej wzór (2.7) pozostanie prawdziwy.

Równania (2.6) są równaniami nieliniowymi, rozwiązywanymi w procesie iteracyjnym. Po linearyzacji przyjmują postać:

$$\sum_{i=1}^{n_l} \lambda(Re(v_{li_old}), \varepsilon) \frac{l_{li}}{d_{li}} \frac{\rho |v_{li_old}|}{2} v_{li} = 0. \quad (2.8)$$

Przygotowanie danych do obliczeń polega na zdefiniowaniu elementów i oczek sieci oraz informacji związanej ze źródłami i upustami zewnętrznymi. Elementy sieci identyfikowane są przez podanie numerów węzłów, pomiędzy którymi się znajdują, a identyfikacja oczek sieci polega na podaniu numerów elementów, które wchodzą w skład oczka.

2.2. Wybór sposobu wyznaczania współczynnika strat liniowych λ

Do poprawnego wyznaczenia rozkładu prędkości i ciśnień w sieci wodociągowej należy wybrać odpowiedni wzór do wyliczania współczynnika strat liniowych λ . W tabeli 2.1 zestawione zostały wzory do obliczenia tego współczynnika. Wybór wzoru jest istotny, ponieważ wartość tego współczynnika wpływa bezpośrednio zarówno na prędkość przepływu jak i na stratę ciśnienia w poszczególnych łukach sieci. Wzory zamieszczone w tabeli 2.1 zostały opracowane w bardzo szerokim przedziale czasu. Najstarszy wzór pochodzi z 1892 roku i został opracowany w przez Johna Freemana w New Hampshire. Zestawienie wzorów zamyka równanie opracowane 118 lat później. Taka różnica czasowa pokazuje, że zagadnienia związane ze stratami ciśnienia, wywołane tarcie płynącego płynu przez rurociąg, są cały czas aktualne.

Tabela 2.1. Zestawienie wzorów do wyznaczania współczynnika strat liniowych λ

Lp.	Równanie	Autor	Rok powstania
1	$\lambda = 0,0000535 + \frac{0,7257}{(\log(\text{Re}))^{2,297}}$	Freeman [8]	1892
2	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(\text{Re}\sqrt{\lambda}) - 0,8$	Nikuradse, von Karman [18]	1930
3	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot d} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}\right)$	Colebrook, White [7]	1937
4	$\lambda = 0,0055\left(1 + \left(2 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{\text{Re}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)$	Moody [17]	1947
5	gdzie $\lambda = 0,094 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0,225} + 0,53 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{d}\right) + 88 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0,44} \cdot \text{Re}^{-\psi}$ $\psi = 1,62 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0,134}$	Wood [6]	1966
6	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3,715 \cdot d} + \frac{15}{\text{Re}}\right)$	Eck [16]	1973
7	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}}\right)$	Jain, Swamee [31]	1976
8	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot d}\right) + \left(\frac{7}{\text{Re}}\right)^{0,9}\right)$	Churchill [1]	1973

Lp.	Równanie	Autor	Rok powstania
9	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,715 \cdot d} \right) + \left(\frac{6,943}{Re} \right)^{0,9} \right)$	Jain [13]	1976
10	<p>gdzie</p> $\lambda = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(\Theta_1 + \Theta_2)^{1,5}} \right]^{\frac{1}{12}}$ $\Theta_1 = \left[-2,457 \cdot \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\varepsilon}{d} \right] \right]^{16}$ $\Theta_2 = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$	Churchill [14]	1976
11	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(0,134 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{6,1}{Re^{0,915}} \right)$	Walden [32]	1978
12	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7065 \cdot d} - \frac{5,0452}{Re} \cdot \log \left(\frac{1}{2,8257} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right) \right]$	Chen [9]	1979
13	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \cdot \log \left[\frac{Re}{0,135 \cdot Re \left(\frac{\varepsilon}{d} \right) + 6,5} \right]$	Round [15]	1980
14	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{5,158 \cdot \log \left(\frac{Re}{7} \right)}{Re \left(1 + \frac{Re^{0,52}}{29} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,7} \right)} \right)$	Barr [3]	1981
15	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} - \frac{5,02}{Re} \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} - \frac{5,02}{Re} \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} - \frac{13}{Re} \right) \right) \right)$ <p>oraz</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} - \frac{5,02}{Re} \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} - \frac{13}{Re} \right) \right)$	Zigrang, Sylvester [15]	1982

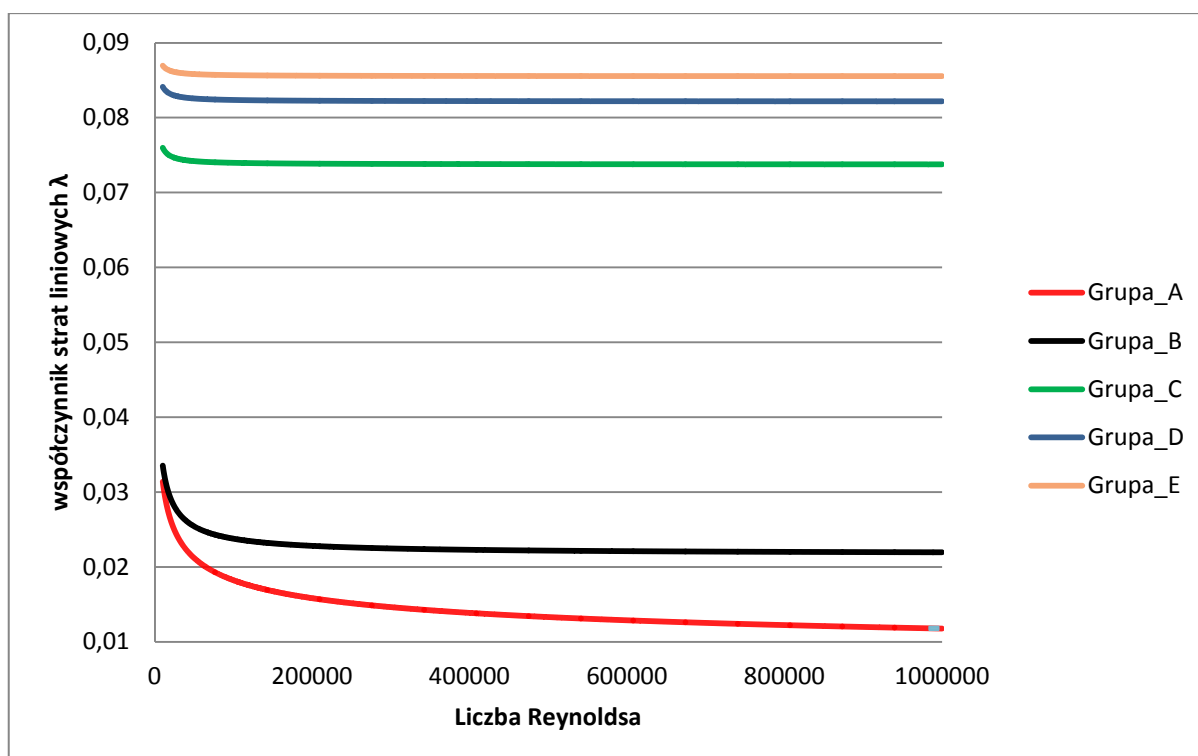
Lp.	Równanie	Autor	Rok powstania
16	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right)$	Haaland [11]	1983
17	<p>lub</p> $\lambda = \left(\Psi_1 - \frac{(\Psi_2 - \Psi_1)^2}{\Psi_3 - 2 \cdot \Psi_2 + \Psi_1} \right)^{-2}$ <p>gdzie</p> $\lambda = \left(4,781 - \frac{(\Psi_1 - 4,781)^2}{\Psi_2 - 2 \cdot \Psi_1 + 4,781} \right)^{-2}$ $\Psi_1 = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{12}{Re} \right)$ $\Psi_2 = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{2,5 \cdot \Psi_1}{Re} \right)$ $\Psi_3 = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{2,51 \cdot \Psi_2}{Re} \right)$	Serghides [29]	1984
18	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{95}{Re^{0,983}} - \frac{96,82}{Re} \right)$	Manadilli [9]	1997
19	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7065 \cdot d} - \frac{5,0272}{Re} \cdot \right.$ $\cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,827 \cdot d} - \frac{4,657}{Re} \cdot \right.$ $\cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{7,7918 \cdot d} \right)^{0,9924} \right.$ $\left. \left. \left. + \left(\frac{5,3326}{208,815 + Re} \right)^{0,9345} \right) \right) \right)$	Monzon, Romeo, Royo [21]	2002
20	<p>gdzie</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,8686 \cdot \ln \left(\frac{0,4587 \cdot Re}{(S - 0,31)^{\frac{S}{S+1}}} \right)$ $S = 0,124 \cdot Re^{\frac{\varepsilon}{d}} + \ln(0,4587 \cdot Re)$	Goudar, Sonnad [30]	2006
21	<p>gdzie</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,8686 \cdot \ln \left(\frac{0,4587 \cdot Re}{(S - 0,31)^{\frac{S}{S+0,9633}}} \right)$	Vatankhah, Kouchakzadeh [34]	2008

Lp.	Równanie	Autor	Rok powstania
	$S = 0,124 \cdot \text{Re} \frac{\varepsilon}{d} + \ln(0,4587 \cdot \text{Re})$		
22	gdzie $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A - \left(\frac{A + 2 \cdot \log\left(\frac{B}{\text{Re}}\right)}{1 + \frac{2,18}{B}} \right)$ $A = \frac{(0,744 \cdot \ln(\text{Re})) - 1,41}{1 + 1,32 \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}}}$ $B = \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} \cdot \text{Re} + 2,51 \cdot A$	Buzzelli [4]	2008
23	$\lambda = \frac{6,4}{\left(\ln(\text{Re}) - \ln \left(1 + 0,01 \cdot \text{Re} \cdot \frac{\varepsilon}{d} \left(1 + 10 \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \right) \right) \right)^{2,4}}$	Avci, Kargoz [2]	2009
24	$\lambda = \frac{0,2479 - 0,0000947(7 - \ln(\text{Re}))^4}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon}{3,615 \cdot d} + \frac{7,366}{\text{Re}^{0,9142}}\right) \right)^2}$	Evangleids, Papaevangelou, Tzimopoulos [19]	2010

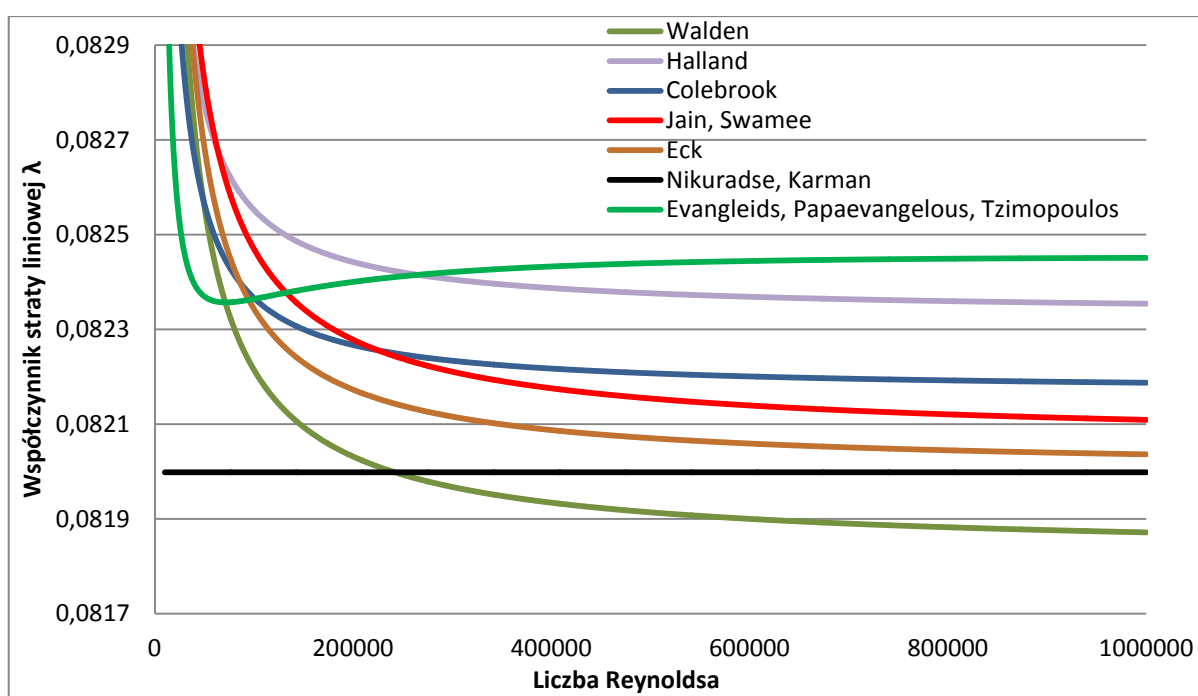
W celu wstępnego wyboru wzoru ze wzorów zawartych w tabeli 2.1, połączone je w 5 grup:

- Grupa_A (Churchill, Jain, Buzzelli);
- Grupa_B (Barr, Manadilli, Serghides, Chen, Zigrang-Sylvester);
- Grupa_C (Round);
- Grupa_D (Jain-Swame, Nikuradse-Karman, Collebrook-White, Eck, Halland, Goudar-Sonnad, Evangleids-Papaevangelou-Tzimopoulos, Vatankhah-Kouchakzadeh, Walden);
- Grupa_E (Avci-Kargoz, Wood).

Na rysunku 2.6 przedstawiono powyższe pięć grup równań. Można zaobserwować duże rozbieżności pomiędzy grupami. Grupa A oraz grupa B znacznie różnią się wartościami od w miarę zbliżonych do siebie wartościami pozostałych trzech grup (C, D, E). Do dalszych rozważań została wybrana tylko grupa D, ponieważ w tej grupie jest najwięcej równań oraz znajduje się w niej wzór Nikuradsego i Karmana (Tabela 2.1, pozycja 2), który został uznany za referencyjny w dalszych badaniach.



Rys. 2.6. Zestawienie krzywych wykreślonych na podstawie wzorów z tabeli 2.1 uszeregowanych w grupach



Rys. 2.7. Zależność $\lambda(Re)$ wyznaczona ze wzorów z grupy D

Z dziewięciu wzorów jakie zostały zaliczone do grupy D, na rys. 2.7 pokazano 7 równań. Równania Goudara-Sonnada oraz Vatankhaha-Kouchakzadeha nie zostały uwzględnione na rys. 2.7, ponieważ nakładają się na krzywą Colebrooka-Whitea. Równania Jain-Swamea,

Nikuradsego-Karmana, Collebrooka-Whitea, Ecka, Hallanda, Evangleidsa-Papaevangelouosa-Tzimopoulouosa i Waldena poddane zostały dalszej analizie porównawczej.

Tabela 2.2. Zestawienie wartości współczynnika λ dla określonych liczb Reynoldsa

Nazwisko	Liczba Reynoldsa				
	150000	200000	300000	400000	500000
Colebrook	0,0823	0,0823	0,0822	0,0822	0,0822
Halland	0,0825	0,0824	0,0824	0,0824	0,0824
Walden	0,0821	0,0820	0,0820	0,0819	0,0819
Eck	0,0822	0,0822	0,0821	0,0821	0,0821
Jain Swamee	0,0823	0,0823	0,0822	0,0822	0,0822
Goundar Sonnad	0,0823	0,0823	0,0822	0,0822	0,0822
Vatankhah Kouchakzadeh	0,0823	0,0823	0,0822	0,0822	0,0822
Evangleids, Papaevangelous Tzimopoulos	0,0824	0,0824	0,0824	0,0824	0,0824
Nikuradse von Karman	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820

Tabela 2.2. cd.

Nazwisko	Liczba Reynoldsa				
	600000	700000	800000	900000	1000000
Colebrook	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822
Halland	0,0824	0,0824	0,0824	0,0824	0,0824
Walden	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819
Eck	0,0821	0,0821	0,0820	0,0820	0,0820
Jain Swamee	0,0821	0,0821	0,0821	0,0821	0,0821
Goundar Sonnad	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822
Vatankhah Kouchakzadeh	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822	0,0822
Evangleids, Papaevangelous Tzimopoulos	0,0824	0,0824	0,0824	0,0825	0,0825
Nikuradse von Karman	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820

W tabeli 2.2 przedstawiono wartości współczynnika straty liniowej λ , na podstawie których wykonany został wykres przedstawiony na rys. 2.7. Do otrzymania tych wartości przyjęto liczbę Reynoldsa w zakresie od 10 000 do 1 000 000. Założono również średnicę wewnętrzną rurociągu 15 milimetrów, chropowatość bezwzględną s lub ε równą 1 milimetr oraz

chropowatość względną $k = 0,0667$. Na rysunku 2.7 można również zaobserwować, że wszystkie wzory od wartości liczby Reynoldsa powyżej 400 tysięcy, aż do ponad jednego miliona niewiele się różnią między sobą.

W celu wyboru wzoru do wyznaczania współczynnika strat liniowych λ zostało wyznaczone odchylenie standardowe pomiędzy współczynnikiem λ wyznaczonym z wytypowanych wzorów i wyznaczonym z równania Nikuradsego i Karmana. Wyniki tych obliczeń przedstawia tabela 2.3.

Tabela 2.3. Odchylenie wybranych równań od wzoru Nikuradsego i von Kármána

Colebrook	0,00013
Halland	0,00025
Walden	0,00009
Eck	0,00003
Jain, Swamee	0,00008
Goundar, Sonnad	0,00014
Vatankhah, Kouchakzadeh	0,00014
Avci, Kargoz	0,00251
Evangleids, Papaevangelous, Tzimopoulos	0,00032

Z analizy wyników zestawionych w tabeli 2.3 wynika, że wzory Colebrooka-Whitea, Waldena, Jaina-Swameea i Ecka są najbardziej zbliżone do wzoru referencyjnego jakim jest równanie Nikuradsego i von Kármána. Można zaobserwować, że wartość najmniejszego odchylenia od wzoru referencyjnego równą 0,00003 posiada wzór Ecka. Kolejnym jest wzór Jaina-Swameea o wartości odchylenia 0,00008 i Waldena o wartości 0,00009. Dopiero czwarte miejsce w tym zestawieniu zajmuje najbardziej znany i obecnie wykorzystywany wzór Colebrooka-Whitea o wartości 0,00013.

Po przeanalizowaniu poszczególnych wartości odchylenia można by uznać, że w dalszych obliczeniach najlepszy będzie wzór Ecka. Jednak ze względu na duży wpływ współczynnika λ na wartości prędkości oraz ciśnienia w rurociągu, mogłoby to uniemożliwić porównanie wyników obliczeń dla sieci wodociągowej z wynikami otrzymanymi z innych programów. Programy te: „SimulationsX” oraz „Rurociągi”, do obliczeń współczynnika straty liniowej wykorzystują równanie Colebrooka-Whitea. Należy zatem rozważyć wybór właśnie tego wzoru do dalszych obliczeń, co umożliwi porównanie wyników obliczeń wszystkich programów komputerowych.

Nic nie stoi na przeszkodzie, aby w kodzie autorskiego programu o nazwie roboczej „Sieć” wymieniać wzory do wyznaczania strat liniowych. Wymaga to niewielkich modyfikacji w kodzie.

2.3. Przygotowanie danych do obliczeń w programie „Sieć” (Tryb 1)

Program do wyznaczania prędkości w rurociągach sieci wodociągowej oraz ciśnień w węzłach tej sieci o nazwie roboczej „Sieć”, został napisany w języku C++. Może być uruchamiany w trzech trybach:

- dla zadanych parametrów sieci wodociągowej wyznaczone są wartości prędkości w poszczególnych elementach sieci oraz ciśnienia w węzłach tej sieci. Jako ciśnienie odniesienia przyjęte zostało ciśnienie w pierwszym węźle równe zero;
- dla wybranego elementu sieci wodociągowej, w którym zakładane jest uszkodzenie, wyznaczone są prędkości w elementach sieci oraz ciśnienia w węzłach sieci. W elemencie uszkodzonym umieszczony jest węzeł dodatkowy, którego położenie jest zmienne;
- dla znanej wartości ciśnień w wybranych węzłach sieci, wyznaczany jest element uszkodzony oraz położenie węzła symbolizującego uszkodzenie w tym elemencie.

W pliku wejściowym dozwolone jest wstawianie tylko wartości liczbowych oddzielonych spacją lub pustą linią.

W pierwszej linii pliku tekstowego znajdują się następujące informacje:

- n_w – liczba węzłów sieci,
- n_u – liczba upustów/źródeł zewnętrznych w sieci,
- n_e – liczba elementów (rurociągów) w sieci,
- n_o – liczba oczek sieci,
- l_o – maksymalna liczba elementów w oczku sieci,
- n_d – numer elementu sieci, w którym umieszczony jest dodatkowy węzeł symbolizujący uszkodzenie sieci (dla pierwszego i trzeciego trybu uruchamiania programu, wartość tego parametru musi być równa 0),
- n_c – liczba węzłów sieci, w których zadane jest ciśnienie potrzebne do lokalizacji uszkodzenia.

Ustawienia parametrów n_d , n_c decydują o trybie obliczeń:

- $n_d = 0$ i $n_c = 0$ – tryb 1,
- $n_d > 0$ i $n_c = 0$ – tryb 2,
- $n_d = 0$ i $n_c > 0$ – tryb 3.

Dla przykładu pokazanego na rys. 2.8. w wariantcie 1, pierwsza linia jest postaci: 5 5 8 4 6 0 0 ($n_w = 5$, $n_u = 5$, $n_e = 8$, $n_o = 4$, $l_o = 6$, $n_d = 0$, $n_c = 0$).

Struktura kolejnych linii pliku tekstowego jest następująca:

- informacje o źródłach i upustach (liczba linii = n_u) przedstawiono w tabeli 2.4

Tabela 2.4. Informacje o źródłach i upustach w trybie 1

<i>numer upustu/źródła</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>Numer węzła 2</i>	<i>prędkość</i> [m/s]	<i>średnica</i> [mm]
			<i>strumień objętości</i> [m ³ /s]	

- informacje o rurociągach (elementach sieci) (liczba linii = n_e) przedstawiono w tabeli 2.5

Tabela 2.5. Informacje o rurociągach w trybie 1

<i>numer rurociągu</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>długość</i> [m]	<i>średnica</i> [mm]	<i>chropowatość</i> [mm]
----------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------	-------------------------	-----------------------------

- informacje o oczkach sieci (liczba linii = n_o) (maksymalna liczba rur w oczku nie może być większa niż l_o) przedstawiono w tabeli 2.6

Tabela 2.6. Informacje o oczkach sieci w trybie 1

<i>numer oczka</i>	<i>liczba rur w oczku (n)</i>	<i>numer rury 1</i>	<i>numer rury 2</i>	<i>numer n – tego rury</i>
------------------------	-----------------------------------	-------------------------	-------------------------	------	------------------------------------

- informacje o ciśnieniu w wybranych węzłach sieci (liczba linii = n_c) (należy podać do obliczeń w wariancie trzecim) przedstawiono w tabeli 2.7

Tabela 2.7. Informacje o ciśnieniu w węzłach w trybie 1

<i>numer węzła</i>	<i>ciśnienie</i> [Pa]
--------------------	-----------------------

Program umożliwia podanie informacji o źródłach i upustach zewnętrznych w dwóch wariantach. Jeśli średnica wlotu/wylotu jest równa zero, to wartość w polu prędkość interpretowana jest jako strumień objętości. Identyfikacja źródeł i upustów zewnętrznych polega na wpisaniu w pozycji nr węzła 1 lub nr węzła 2 wartości 0 (otoczenie). W tej konwencji kolejność 0 10 oznacza źródło zewnętrzne umieszczone w węźle nr 10, a kolejność 10 0 oznacza upust umieszczony w węźle 1. Wartości prędkości/ strumieni objętości podane są jako wartości większe od zera. Dla przykładu z rys. 2.8 ten fragment zbioru pokazany jest w tabeli 2.8.

Tabela 2.8. Przykład informacji o źródłach i upustach w trybie 1

<i>numer upustu/źródła</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>strumień objętości [m³/s]</i>	
1	0	1	1.0	0.0
2	0	2	1.0	0.0
3	0	3	1.0	0.0
4	0	4	1.0	0.0
5	5	0	4.0	0.0
			strumienie się bilansują !!!	

Parametry rur (elementów sieci) dla przykładu z rys. 2.8 (numery rur na rysunku oznaczone są czerwonym kolorem) znajdują się w tabeli 2.9.

Tabela 2.9. Przykładowe parametrów rur

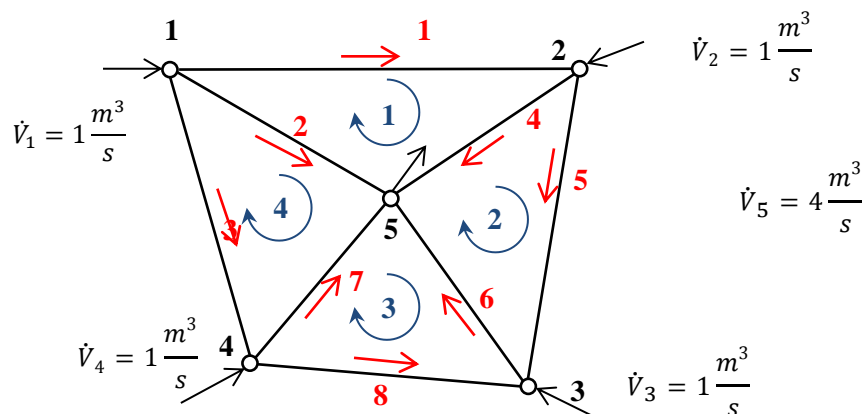
<i>numer rury</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>długość [m]</i>	<i>średnic a [mm]</i>	<i>chropow atość [mm]</i>
1	1	2	1000	500	0.1
2	1	5	771	500	0.1
3	1	4	1000	500	0.1
4	2	3	1000	500	0.1
5	2	5	771	500	0.1
6	3	5	771	500	0.1
7	4	5	771	500	0.1
8	4	3	1000	500	0.1

Parametry oczek sieci dla przykładu z rys. 2.8 (numery oczek na rysunku oznaczone są niebieskim kolorem) ($l_o = 4$) można zobaczyć w tabeli 2.10.

Tabela 2.10. Przykładowe parametry oczek w sieci

<i>numer oczka</i>	<i>liczba rur w oczku (n)</i>	<i>numer rury 1</i>	<i>numer rury 2</i>	<i>numer rury 3</i>	<i>numer rury 4</i>
1	3	1	5	-2	
2	3	4	6	-5	
3	3	7	-6	-8	
4	3	2	-7	-3	

Numerory rur w oczku mają wartości dodatnie lub ujemne. O znaku decyduje orientacja rurociągu w oczku, np. rura o numerze 6 (pomiędzy węzłami sieci 3 i 5) ma znak dodatni w oczku numer 2, a w oczku numer 3 – znak ujemny.



Rys. 2.8. Elementarna sieć wodociągowa

Oryginalna postać zbioru danych do programu sieć jest następująca:

5 5 8 4 6 -1 3

1 0 1 1.0 0.0

2 0 2 1.0 0.0

3 0 3 1.0 0.0

4 0 4 1.0 0.0

5 5 0 3.8 0.0

1 1 2 1000 500 0.1

2 1 5 771 500 0.1

3 1 4 1000 500 0.1

4 2 3 1000 500 0.1

5 2 5 771 500 0.1

6 3 5 771 500 0.1

7 4 5 771 500 0.1

8 4 3 1000 500 0.1

Tabela 2.11. Przykładowe wyniki obliczeń

<i>nr elementu</i>	<i>nr węzła 1</i>	<i>nr węzła 2</i>	<i>prędkość [m/s]</i>
1	1	2	0
2	1	5	5.093
3	1	4	0
4	2	3	0
5	2	5	5.093
6	3	5	5.093
7	4	5	5.093
8	4	3	0

Wyniki obliczeń dla tak skonstruowanego pliku wejściowego przedstawionego powyżej przedstawiają rozkład prędkości w poszczególnych odcinkach sieci (Tabela 2.11) oraz wartości rozkładu ciśnień w poszczególnych węzłach (Tabela 2.12).

Tabela 2.12. Przykładowy rozkład ciśnień w węzłach

<i>numer węzła</i>	<i>ciśnienie [Pa]</i>
1	0
2	0
3	0
4	0
5	-287301

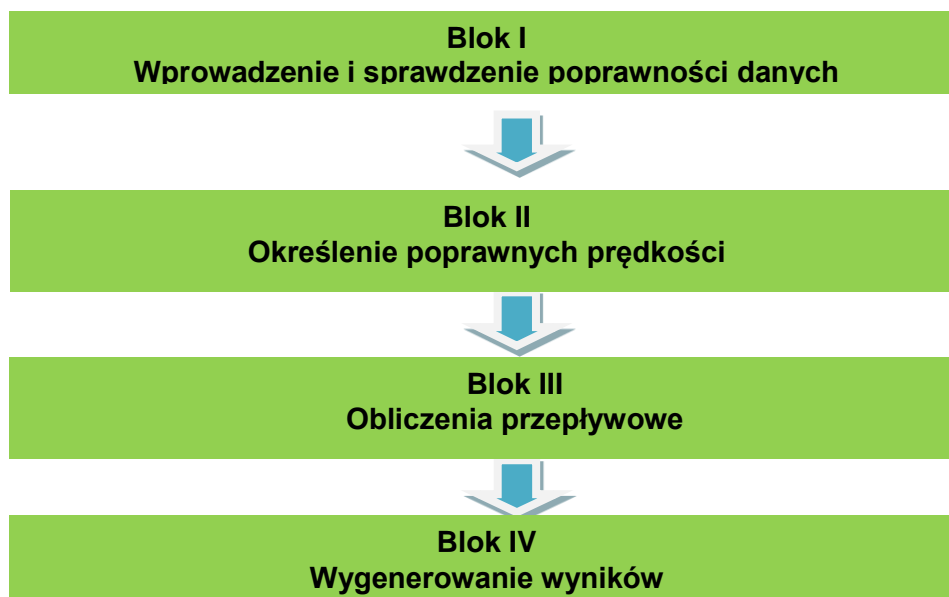
Znak prędkości jest dodatni, jeśli jest zgodny z kierunkiem rury. Dla rury numer 2 woda płynie od węzła 1 do 5.

2.4. Opis programu „Rurociągi”

Program „Rurociągi” napisany został w języku Fortran95 przez prof. dra hab. inż. Michała Ciałkowskiego, Kierownika Katedry Techniki Ciepłej na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Przeznaczony jest do obliczeń hydraulicznych parametrów sieci wodociągowej. Program oblicza kilka podstawowych parametrów takich jak liczba Reynoldsa opisująca charakter przepływu oraz współczynnik strat liniowych i na tej podstawie wyznacza rozkład prędkości oraz ciśnień na poszczególnych łukach sieci hydraulicznej.

W celu prostszego zrozumienia działania programu można przedstawić go w postaci blokowej (rys. 2.9).

Blok pierwszy możemy określić jako wprowadzenie i sprawdzenie poprawności danych zawartych w pliku wsadowym do programu. Blok ten jest odpowiedzialny za poprawne przygotowanie danych, czyli czy wszystkie elementy jakie potrzebuje program dostarczone są w odpowiedniej formie (odstępy pomiędzy poszczególnymi wartościami, czy nie ma pomyłek litera – cyfra lub cyfra – litera, itp.). W bloku tym sprawdzana jest również spójność danych, czyli ich poprawne umiejscowienie, tak aby program bez problemów mógł odczytać plik wsadowy.



Rys. 2.9. Schemat ogólny programu komputerowego do obliczeń przepływowych

Blok drugi obliczane są początkowe wartości prędkości wody przepływającej przez rurociągi. Blok ten odpowiedzialny jest tylko i wyłącznie za obliczenie rozkładu prędkości w analizowanej sieci hydraulicznej. W tej części program analizuje sieć hydrauliczną pod kątem poprawności założonych przez użytkownika kierunków przepływu wody w poszczególnych odcinkach sieci.

Trzeci blok programu zajmuje się obliczeniem trzech parametrów. Pierwszym z nich jest określenie strumieni objętości w danych odcinkach sieci przy pomocy wcześniej wyznaczonej prędkości. Następnie program oblicza drugi parametr jakim jest współczynnik straty liniowej λ w oparciu o równanie Colebrooka-Whitea. Ostatnim etapem jest określenie spadków ciśnienia między poszczególnymi węzłami sieci hydraulicznej.

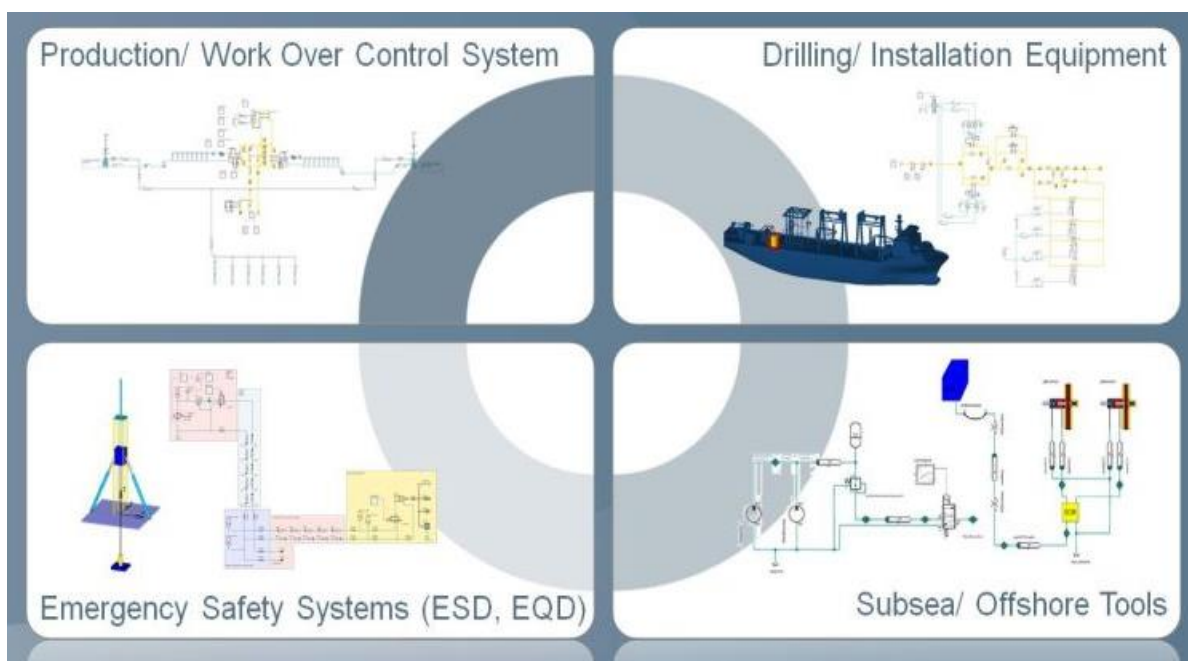
Ostatnią częścią programu jest blok czwarty, w którym następuje wygenerowanie wyników, czyli połączenie wszystkich poprzednich bloków w całość. Wygenerowane wyniki przedstawiane są w postaci tabelarycznej.

Dokładny algorytm działania programu został przedstawiony na III Konferencji Naukowo-Technicznej *Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne*, która odbyła się w Krakowie w 2013 roku. Dodatkowo dokładny proces obliczeniowy został zamieszczony w monografii [31].

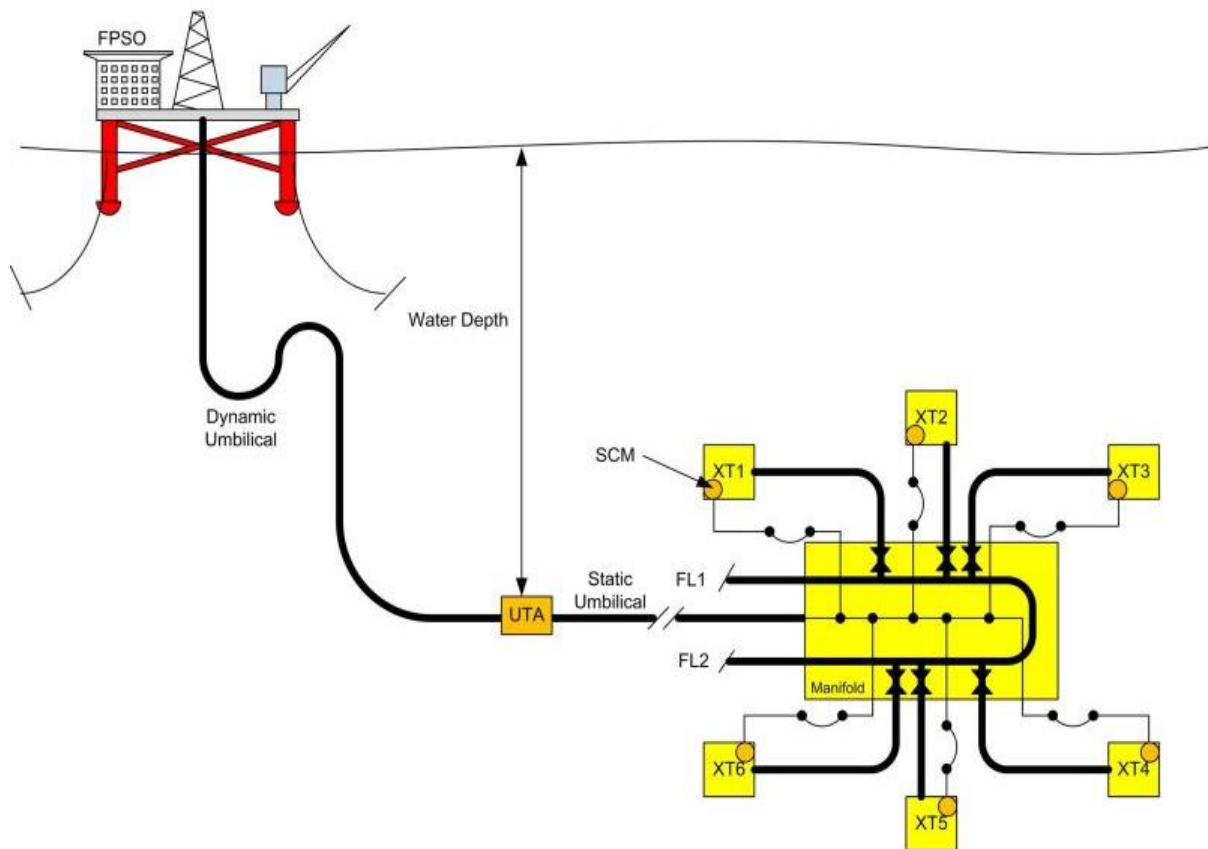
2.5. Opis programu „SimulationX”

Program komercyjny SimulationX został napisany przez firmę ITI GmbH z siedzibą w Dreźnie w Niemczech. Jest on programem kompleksowym, działającym na płaszczyznach modelowania 2D i 3D oraz modelowania statycznego i dynamicznego. Dwie główne dziedziny działania programu to mechanika płynów i automatyka. Program ten pozwala stworzyć symulację działania danego układu jeszcze przed jego wytworzeniem co pozwala zidentyfikować błędy projektowe szybciej niż byłoby to możliwe w systemie rzeczywistym. Oparty na otwartym standardzie Modelica, program SimulationX oferuje platformę, która może być łatwo dostosowana do potrzeb konstruktora. Istnieje możliwość korzystania z gotowych elementów bibliotek ITI, które można dostosować zgodnie z potrzebami lub tworzyć nowe biblioteki i elementy modelu od podstaw [42].

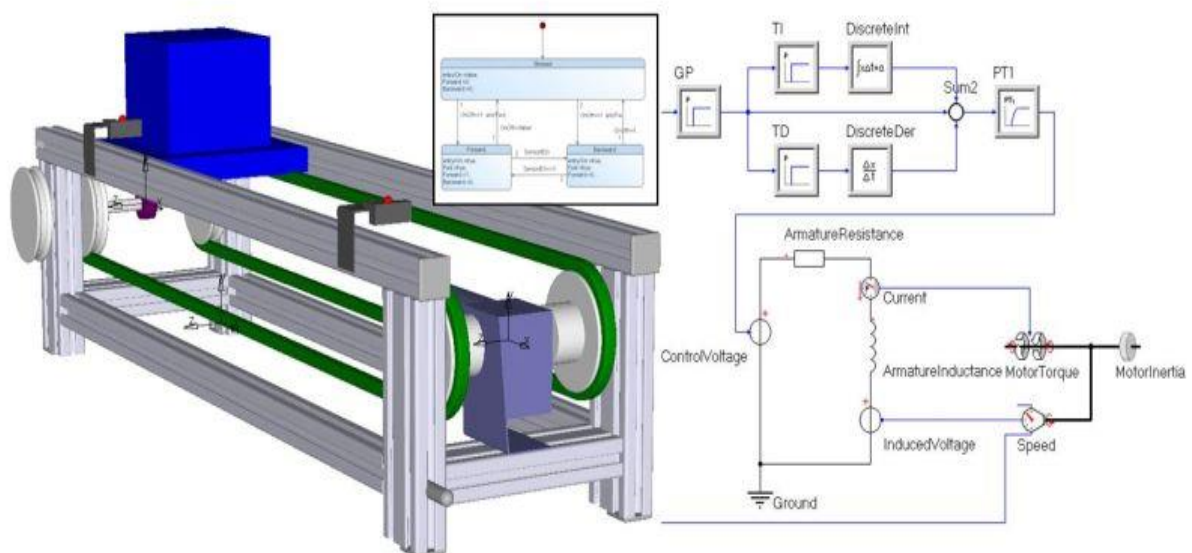
Centralnym obszarem zastosowań programu jest energetyka. Program jest również powszechnie stosowany w branży motoryzacyjnej, w przemyśle elektrycznym, naftowym i gazowym (rys. 2.10, 2.11), lotniczym, stoczniowym. SimulationX jest coraz częściej używany do symulacji dynamicznej systemu obrabiarek(rys. 2.12), wtryskarek, maszyn przetwarzających, maszyn drukarskich i maszyn rolniczych.



Rys. 2.10. Nowoczesne systemy wspierania przemysłu produkcyjnego, przemysłu wydobywczego, systemów bezpieczeństwa oraz instalacji przybrzeżnych do transport gazu i ropy [42]

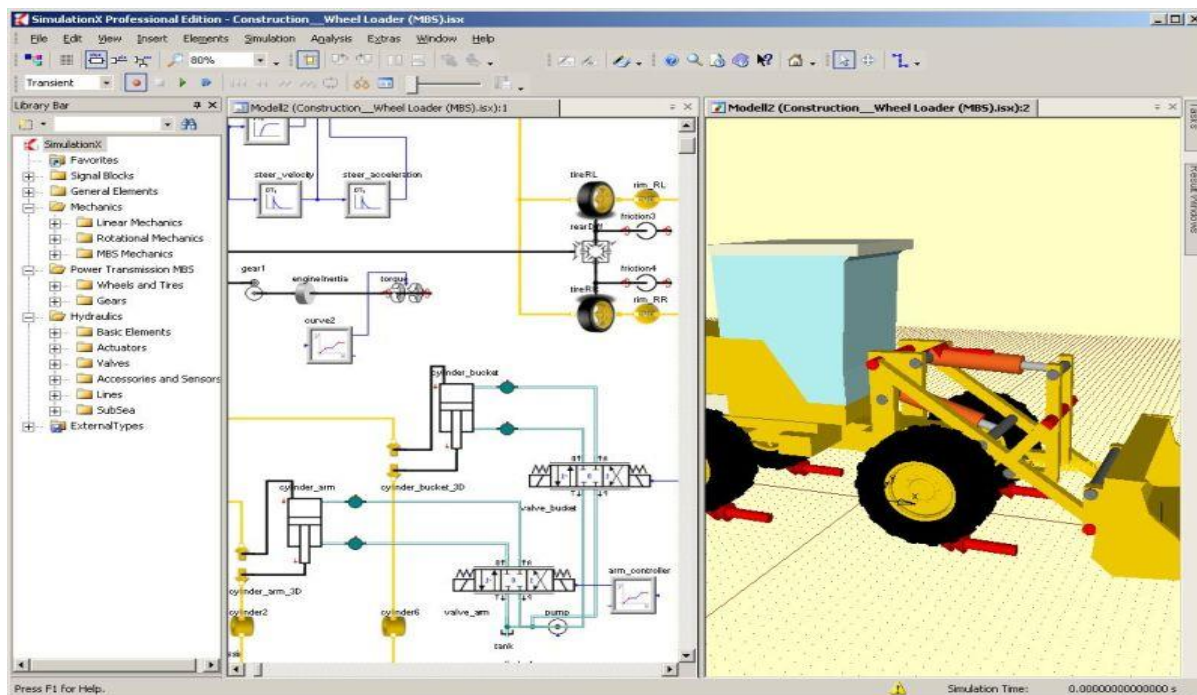


Rys. 2.11. Schemat projektowy dla instalacji wydobywczej [42]



Rys. 2.12. Przykład modelowania przenośnika [42]

Maszyny takie jak koparki, ładowarki (rys. 2.13), mieszalniki do betonu (tak zwane gruszki), systemy pompowe, urządzenia do drążenia tuneli są również możliwe do zamodelowania w SimulationX. Modelować można w tych maszynach poza elementami mechanicznymi, systemy hydrauliczne oraz jednostki sterujące [42].



Rys. 2.13. Modelowanie zjawisk fizycznych w 3D [42]

2.6. Zestawienie i porównanie wyników obliczeń przykładowych sieci wodociągowych

Obliczenia prędkości w rurociągach oraz ciśnienia w węzłach sieci wodociągowej zostały wykonane za pomocą programów „Sieć”, „Rurociagi” i „SymulationX” dla przykładów prostych sieci pokazanych na rysunkach 2.14, 2.16, 2.19, 2.22, 2.25 i złożonych sieci na rysunkach zamieszczonych w załączniku 1.

Prędkości w rurociągach sieci wodociągowej dla przykładów 1 – 5 podane zostały w tabelach 2.13, 2.15, 2.17, 2.19, 2.21, a dla pozostałych przykładów w tabelach zamieszczonych w załączniku 2.

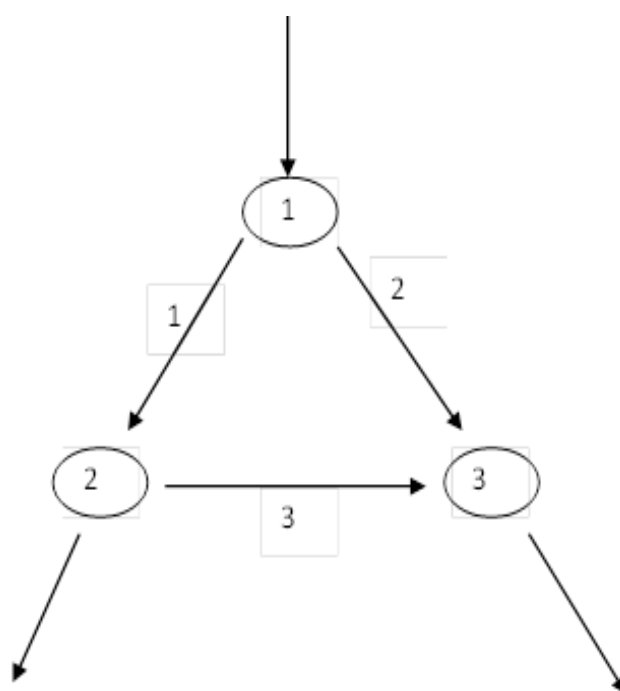
Ciśnienia w węzłach sieci wodociągowej dla przykładów 1 – 5 podane zostały w tabelach 2.14, 2.16, 2.18, 2.20, 2.22, a dla pozostałych przykładów w tabelach zamieszczonych w załączniku 2.

Na rysunkach 2.17, 2.20, 2.23, 2.26 oraz rysunkach w załączniku 2 pokazane zostały różnice pomiędzy prędkościami wyznaczonymi przez programy „Rurociągi” oraz „SymulationX” w stosunku do programu autorskiego „Sieć”

Podobnie na rysunkach 2.15, 2.18, 2.21, 2.24, 2.27 oraz rysunkach w załączniku 2 pokazane zostały różnice spadków ciśnień wyznaczone przez te programy.

Przykład 1

Przykład pierwszy składa się z 3 węzłów oraz 3 łuków (rurociągów). W węźle pierwszym znajduje się zasilanie układu, a w węzłach 2 i 3 umieszczone zostały upusty. Sieć posiada jedno oczko.



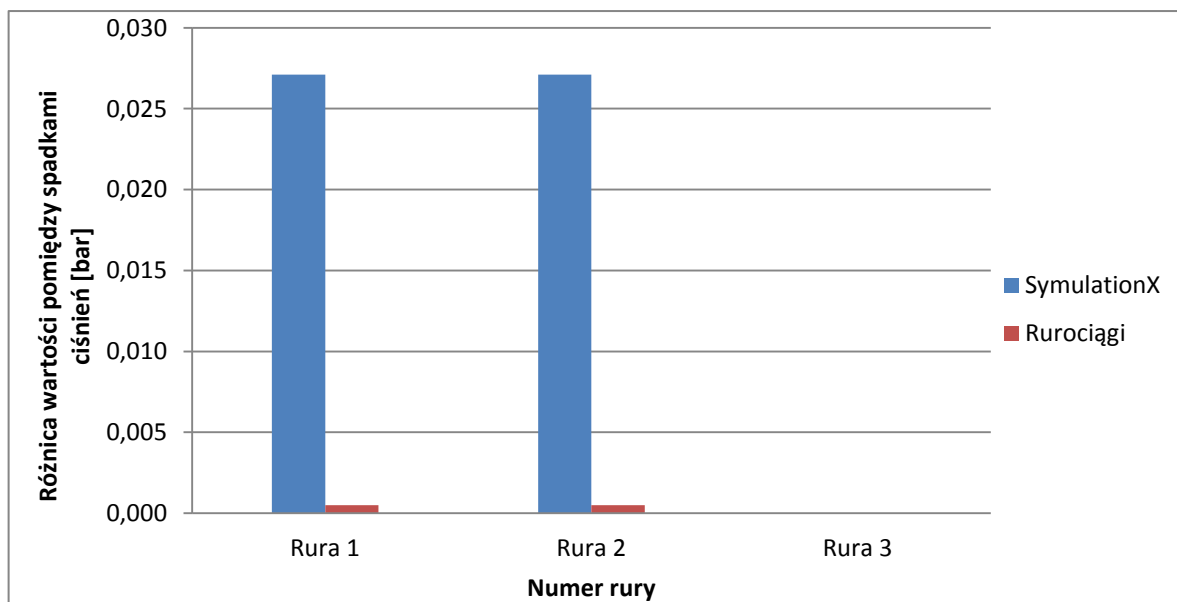
Rys. 2.14. Sieć zbudowana z 3 węzłów i 3 łuków

Tabela 2.13. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 1

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Sieć	Różnica w stosunku do programu „Sieć”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	16,854	16,854	16,854	0,000	0,000
Rura 2	16,854	16,854	16,854	0,000	0,000
Rura 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

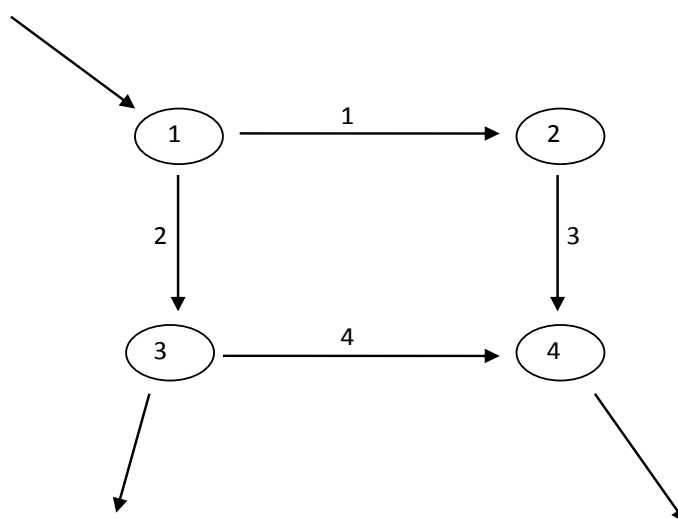
Tabela 2.14. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 1

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	3,000	3,028	3,027	0,027	0,001
Rura 2	3,000	3,028	3,027	0,027	0,001
Rura 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



Rys 2.15. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 1

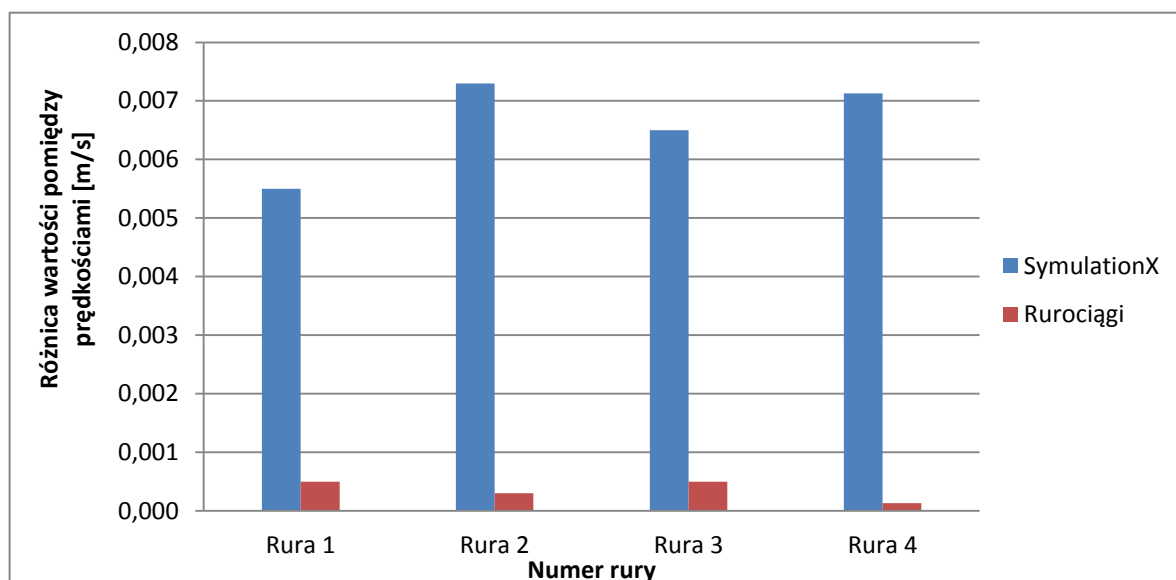
Przykład 2



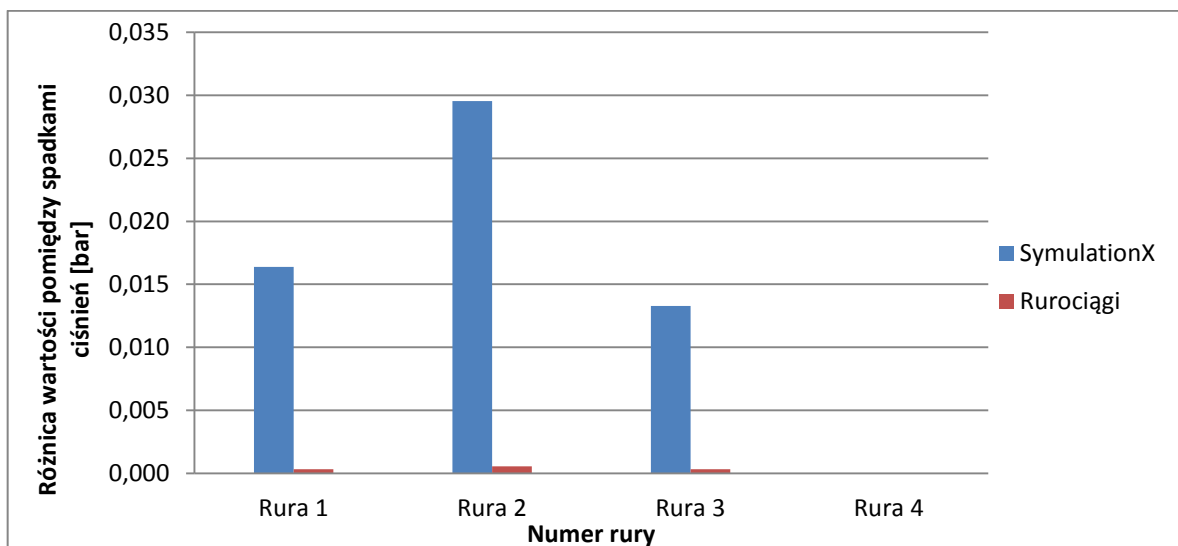
Rys. 2.16. Sieć zbudowana z 4 węzłów i 4 łuków

Tabela 2.15. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 2

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	11,716	11,710	11,711	0,005	0,000
Rura 2	16,854	16,861	16,861	0,007	0,000
Rura 3	11,717	11,710	11,711	0,007	0,000
Rura 4	0,000	0,007	0,007	0,007	0,000



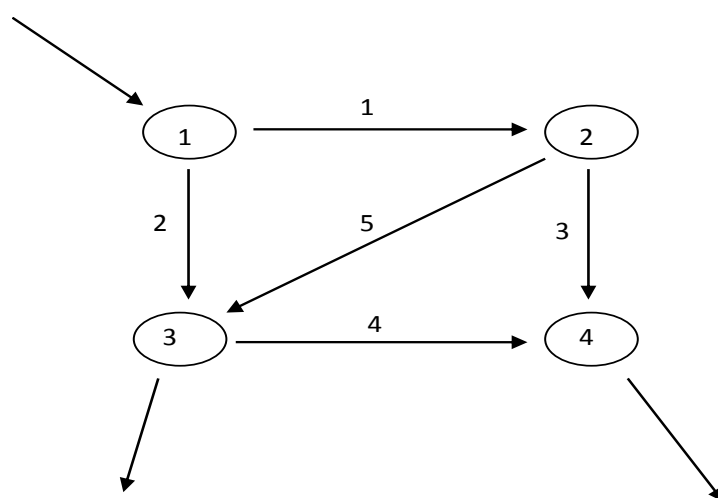
Rys. 2.17. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Siec z pozostałymi programami; przykład 2



Rys. 2.18. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Siec” z pozostałymi programami; przykład 2

Tabela 2.16. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 2

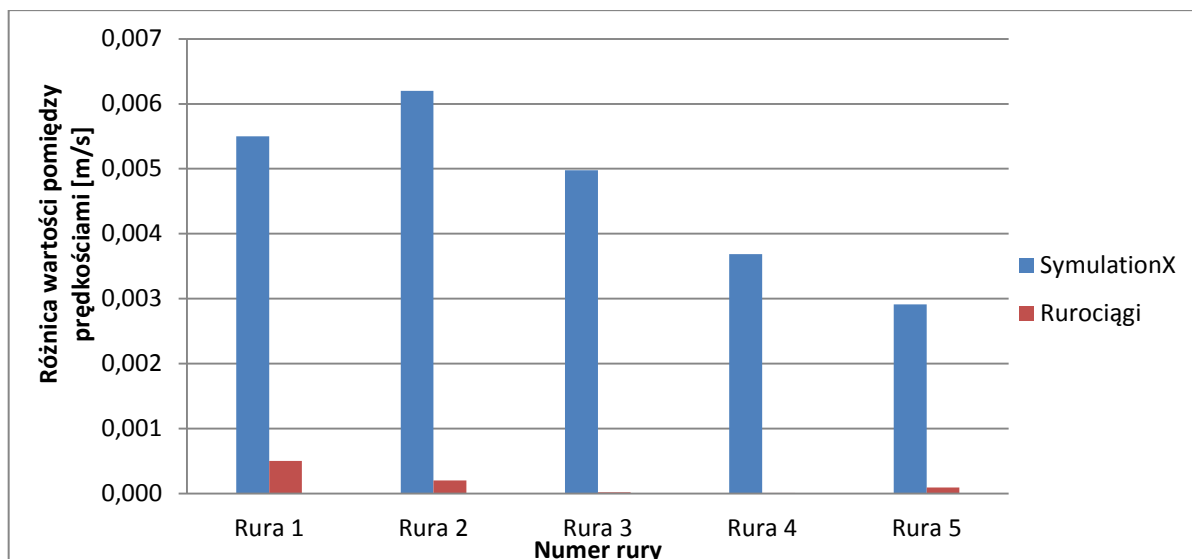
Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	1,498	1,515	1,515	0,016	0,000
Rura 2	3,000	3,030	3,030	0,030	0,001
Rura 3	1,502	1,515	1,515	0,013	0,000
Rura 4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Przykład 3

Rys. 2.19. Sieć zbudowana z 4 węzłów i 5 łuków

Tabela 2.17. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 3

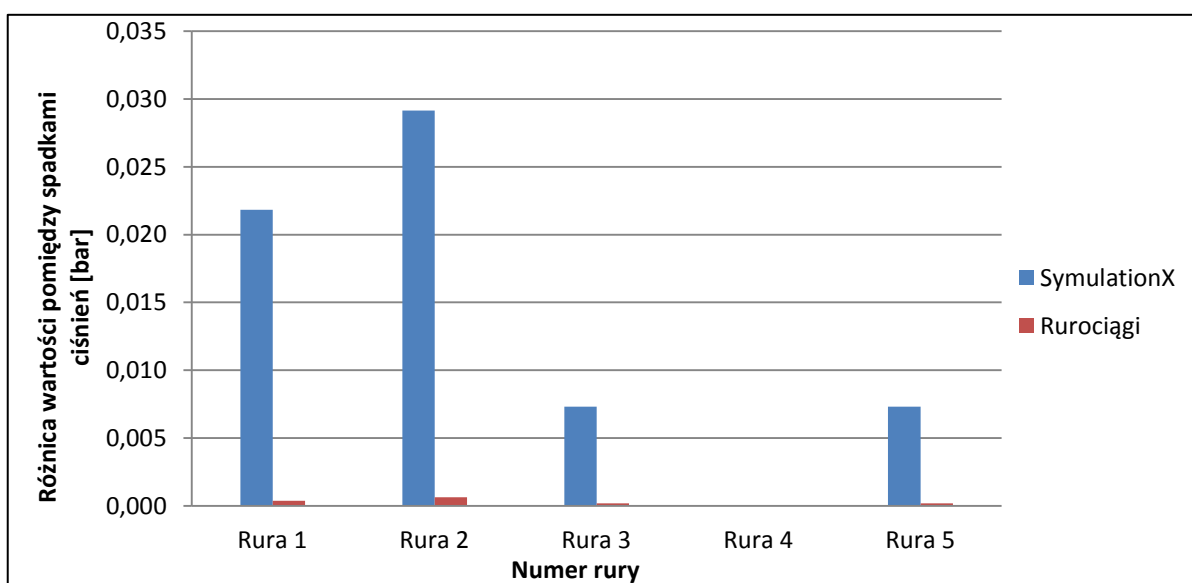
Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	14,583	14,577	14,578	0,005	0,001
Rura 2	16,854	16,860	16,860	0,006	0,000
Rura 3	7,961	7,966	7,966	0,005	0,000
Rura 4	0,000	0,004	0,004	0,004	0,000
Rura 5	6,615	6,612	6,612	0,003	0,000



Rys. 2.20. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Sieć a pozostałymi programami; przykład 3

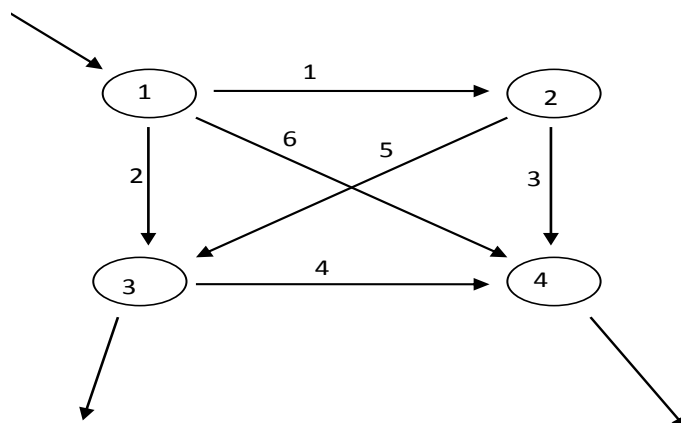
Tabela 2.18. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 3

Numer rury	SymulationX	Rurociągi0	Sieć	Różnica w stosunku do programu „Sieć”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	2,273	2,296	2,295	0,022	0,000
Rura 2	3,000	3,030	3,029	0,029	0,001
Rura 3	0,727	0,734	0,734	0,007	0,000
Rura 4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Rura 5	0,727	0,734	0,734	0,007	0,000



Rys. 2.21. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 3

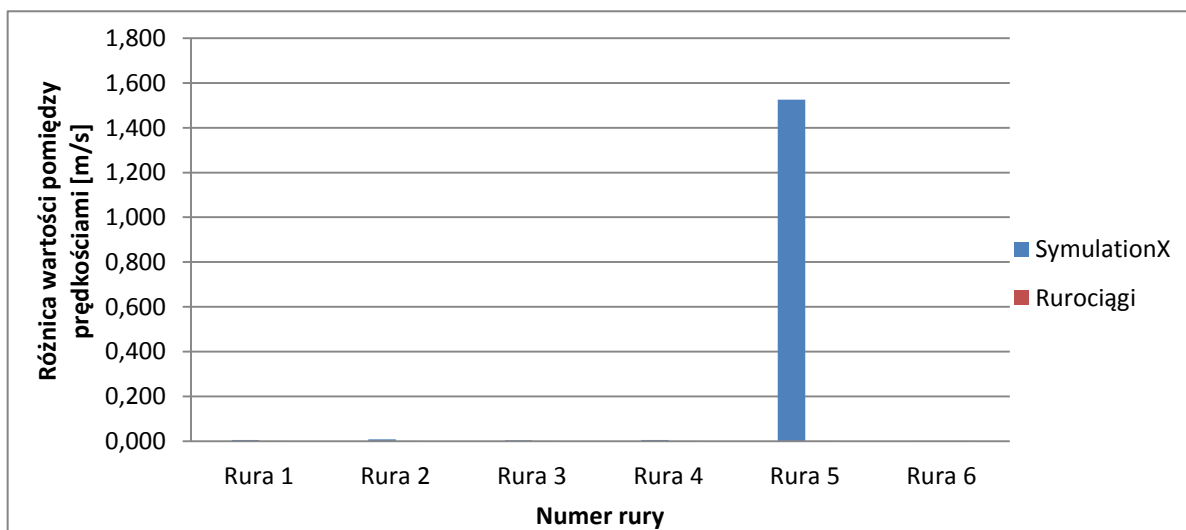
Przykład 4



Rys. 2.22. Sieć zbudowana z 4 węzłów i 6 łuków

Tabela 2.19. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 4

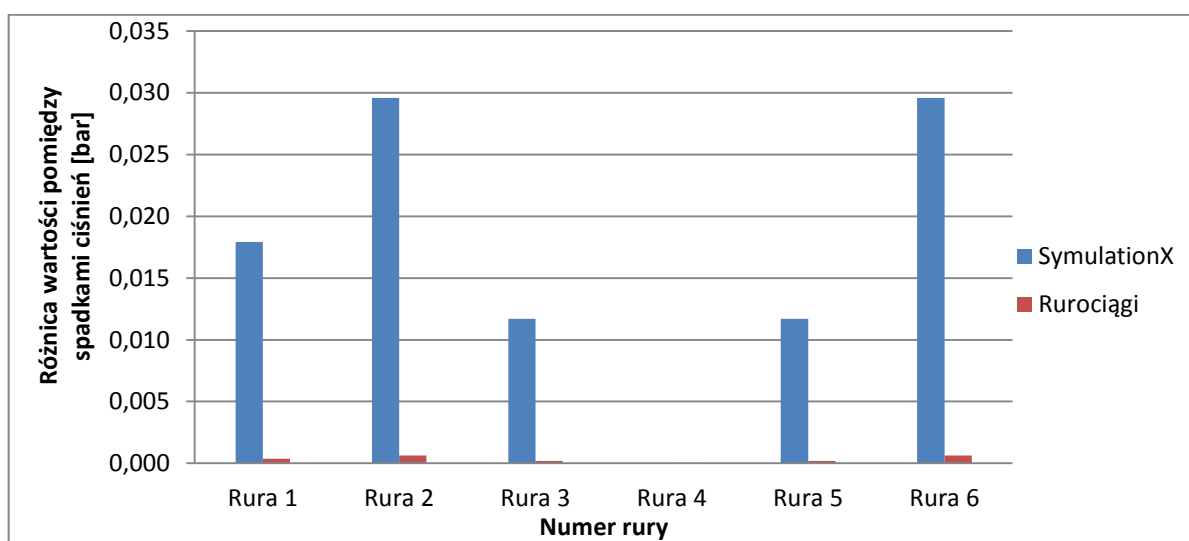
Numer rury	SymulationX	Rurociągi0	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	14,583	14,578	14,579	0,005	0,001
Rura 2	16,854	16,862	16,861	0,007	0,001
Rura 3	7,970	7,966	7,966	0,003	0,000
Rura 4	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000
Rura 5	8,138	6,612	6,612	1,526	0,000
Rura 6	14,056	14,055	14,055	0,001	0,000



Rys. 2.23. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Siec a pozostałymi programami; przykład 4

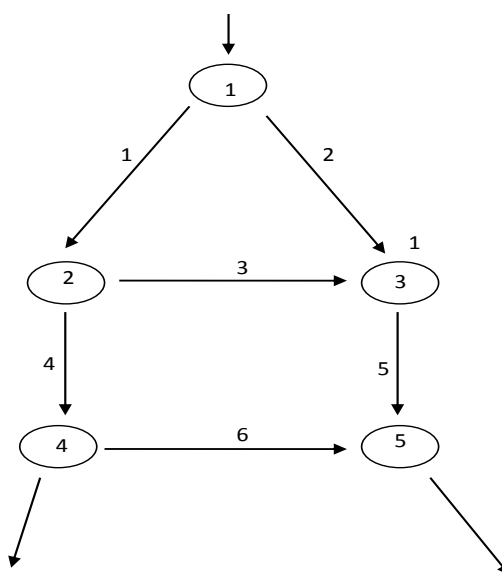
Tabela 2.20. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 4

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	2,278	2,296	2,295	0,018	0,000
Rura 2	3,000	3,030	3,030	0,030	0,001
Rura 3	0,722	0,734	0,734	0,012	0,000
Rura 4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Rura 5	0,722	0,734	0,734	0,012	0,000
Rura 6	3,000	3,030	3,030	0,030	0,001



Rys. 2.24. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Siec” z pozostałymi programami; przykład 4

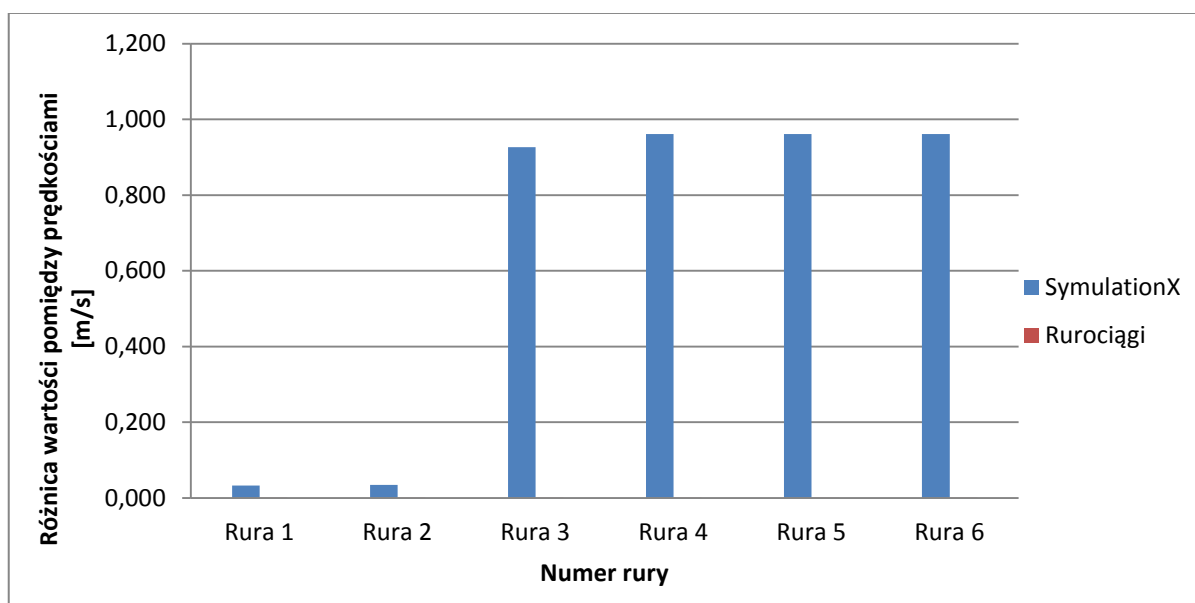
Przykład 5



Rys. 2.25. Sieć zbudowana z 5 węzłów i 6 łuków

Tabela 2.21. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 5

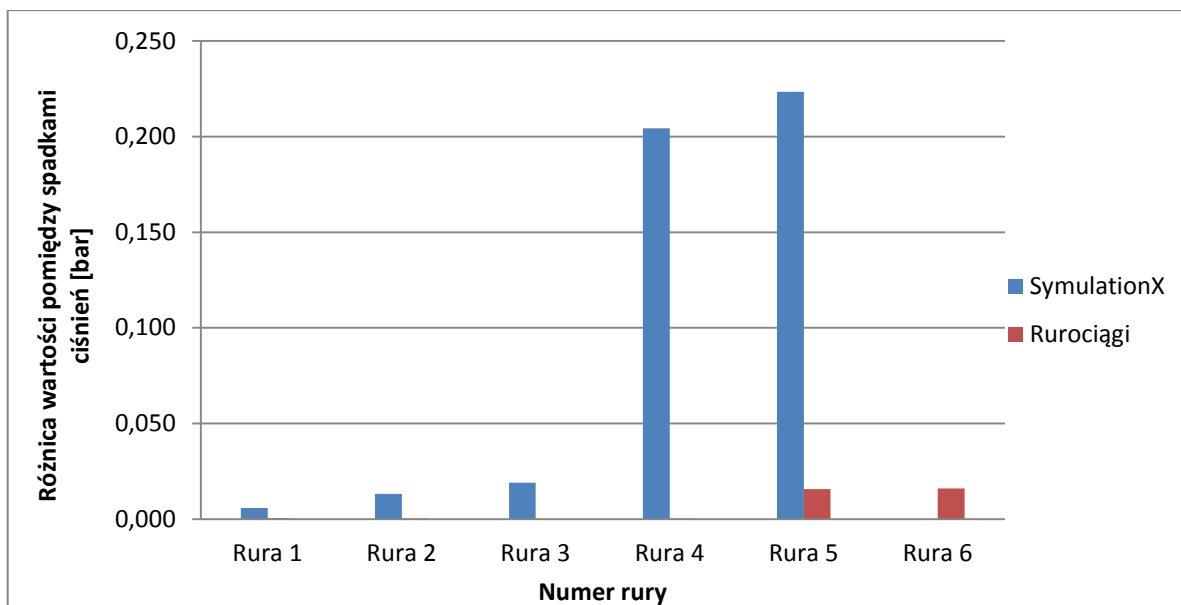
Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	11,227	11,194	11,194	0,033	0,000
Rura 2	11,159	11,193	11,194	0,035	0,001
Rura 3	0,961	0,034	0,034	0,927	0,000
Rura 4	12,189	11,227	11,228	0,962	0,000
Rura 5	10,198	11,160	11,160	0,962	0,000
Rura 6	0,000	0,961	0,961	0,961	0,000



Rys. 2.26. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Siec a pozostałymi programami; przykład 5

Tabela 2.22. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 5

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	1,397	1,391	1,391	0,006	0,000
Rura 2	1,378	1,391	1,391	0,013	0,000
Rura 3	0,019	0,000	0,000	0,019	0,000
Rura 4	1,603	1,399	1,399	0,204	0,000
Rura 5	1,622	1,383	1,399	0,224	0,016
Rura 6	0,000	0,016	0,000	0,000	0,016



Rys. 2.27. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 5

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 2.15, 2.17, 2.18, 2.20, 2.21, 2.23, 2.24, 2.26 i 2.27 można zauważyć, że dwa programy autorskie w znaczącej liczbie przypadków posiadają bardzo niewielkie różnice w wartościach wyników. Pomiędzy programem autorskim, a komercyjnym rozpatrując ciśnienia można zauważyć że różnica w wynikach pomiędzy nimi sięga maksymalnie 30 [kPa]. Różnica jest bardzo niewielka zatem można przyjąć, że program autorski „Sieć” dokonuje poprawnych obliczeń. Rozważając rozkłady prędkości można zaobserwować, że różnice w wynikach sięgają maksymalnie 8-9%.

2.7. Podsumowanie

W powyższym rozdziale przedstawiono sposób określania podstawowych parametrów sieci wodociągowej jakimi są prędkość i ciśnienie w łukach sieci. Metoda wyznaczania tych parametrów opiera się o zachowanie bilansu masy w węzłach oraz o zbilansowanie strat energii w postaci ciśnień w oczkach sieci. Dodatkowo w celu osiągnięcia lepszych wyników obliczeniowych przeanalizowano wzory na współczynnik strat liniowych λ i dokonano wyboru jednego z nich.

Przedstawiono pokrótce programy komputerowe SymulationX oraz Rurociągi, które zostały wykorzystane do weryfikacji poprawności uzyskanych wyników parametrów podstawowych sieci w programie autorskim (Sieć). Przedstawiono kilka przykładów sieci wodociągowych, a prędkości oraz spadki ciśnień wyznaczone za tych programów porównano i zestawiono w tabelach. Na wykresach przedstawiono wartości różnic pomiędzy

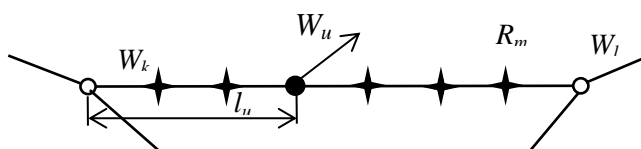
wynikami programu autorskiego, a pozostałymi dwoma programami. Zrealizowany został pierwszy cel szczegółowy pracy doktorskiej.

3 ANALIZA WPŁYWU POŁOŻENIA USZKODZENIA SIECI NA CIŚNIENIE W WĘZŁACH

3.1. Algorytm wyznaczania liczby i położenia węzłów do pomiaru ciśnienia

W poprzednim rozdziale wyznaczone zostały prędkości w poszczególnych rurociągach sieci oraz ciśnienia w węzłach sieci, Warunkiem koniecznym uzyskania prawidłowych wartości tych wielkości było bilansowanie się strumieni objętości wody wpływających i wypływających z analizowanego fragmentu sieci wodociągowej. Problem, który jest przedmiotem pracy badawczej, sprowadza się do znalezienia źródła wycieku z takiej sieci. O ile wartość tego wycieku można bez trudu wyznaczyć, o tyle znalezienie jego lokalizacji nie jest już takie proste. Kryterium, które pozwala na wyznaczenie tej lokalizacji związane jest ze znajomością rozkładów ciśnień w wybranych węzłach sieci wodociągowej, zostanie omówione w następnym rozdziale. W tym rozdziale zostanie wyjaśnione, w jaki sposób wybrane zostaną węzły sieci, w których będzie mierzone ciśnienie oraz ich liczba.

Kryterium wyboru odpowiedniego węzła sieci związane jest z analizą zmienności ciśnienia w węźle, spowodowaną zmianą położenia wycieku w sieci. Rozważana jest podobnie jak w poprzednim rozdziale sieć składająca się z n_e rurociągów i n_w węzłów sieci, tworzących n_o elementarnych oczek sieci. W każdym rurociągu rozważanej sieci, zostanie wydzielonych n_s dodatkowych węzłów, rys. 3.1.



Rys. 3.1. Element uszkodzonej sieci wodociągowej

Dla każdego położenia dodatkowego węzła, w którym umiejscowiony jest wyciek, wyznaczane są ciśnienia w węzłach sieci. Węzły dodatkowe oznaczone są na rys. 3.1 jako \times , natomiast węzeł bieżący jako \bullet . Węzły te rozmieszczone są w całym rurociągu. Wyznaczając rozkład ciśnień dla każdego położenia węzła, w którym znajduje się wyciek, można przedstawić diagram zmienności ciśnienia w każdym węźle sieci (rys. 3.2). Oś pozioma diagramu podzielona jest na sektory związane z kolejnym rurociągiem sieci, w którym znalazło się uszkodzenie. Każdy słupek diagramu związany jest z konkretnym położeniem uszkodzenia na danym rurociągu (symbol \bullet z rys. 3,1). Z takiej analizy wynika jak zmienia się ciśnienie w poszczególnych węzłach sieci wodociągowej, przy zmianie

położenia wycieku. Dla k – tego rurociągu ($k = 1, 2, \dots, n_e$), w którym znajduje się uszkodzenie można przyjąć miarę zmienności ciśnienia w wybranym węźle sieci jako

$$s_k = |p_{kmax} - p_{kmin}| \quad (3.1)$$

lub

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (p_{ki} - \overline{p_k})^2} \quad (3.2)$$

gdzie

$$\overline{p_{ki}} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} p_{ki} \quad (3.3)$$

jest średnią arytmetyczną ciśnień w k – tym rurociągu.

Kolejnym etapem badania zmienności ciśnienia w węzłach sieci związanej ze zmianą położenia wycieku jest badanie tej zmienności w kilku węzłach sieci jednocześnie. Na podstawie diagramów zmienności ciśnienia w węzłach sieci wodociągowej tworzone są takie diagramy dla kilku węzłów jednocześnie. Miarą zmienności jest w tym przypadku suma miar zmienności w pojedynczych węzłach, np dla dwóch węzłów pomiarowych wzór ten jest postaci:

$$s_{pq} = s_p + s_q, \quad p = 1, 2, \dots, n_e, \quad q = 1, 2, \dots, n_e, \quad p \neq q, \quad (3.4)$$

a w ogólnym przypadku

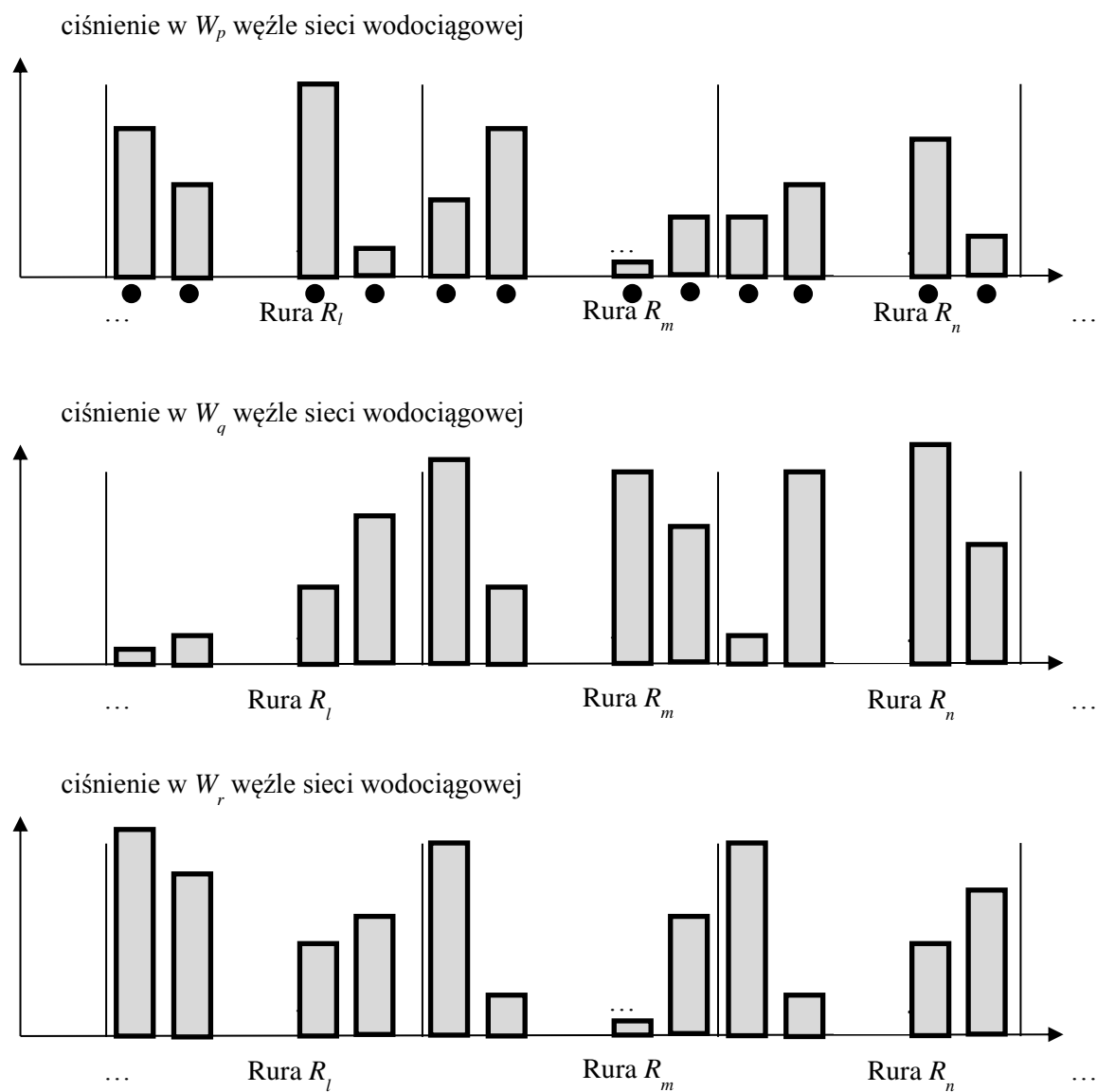
$$s_{p_1 p_2 \dots p_r} = \sum_{i=1}^r s_{p_i}, \quad p_i = 1, 2, \dots, n_e, \quad p_i \neq p_j. \quad (3.5)$$

Dla l – węzłów pomiarowych sieci wodociągowej, liczba kombinacji, które należy wziąć pod uwagę wynosi $\binom{n_e}{l}$. Dla j – tej konfiguracji l – węzłów pomiarowych wyznaczona jest wartość minimum ze wzoru (3.5), która charakteryzuje najmniejszą zmienność ciśnienia w danej konfiguracji węzłów (najsłabsze ogniwo w układzie)

$$s_{jmin} = \min_{(p_1, p_2, \dots, p_r)} (s_{p_1 p_2 \dots p_r}). \quad (3.6)$$

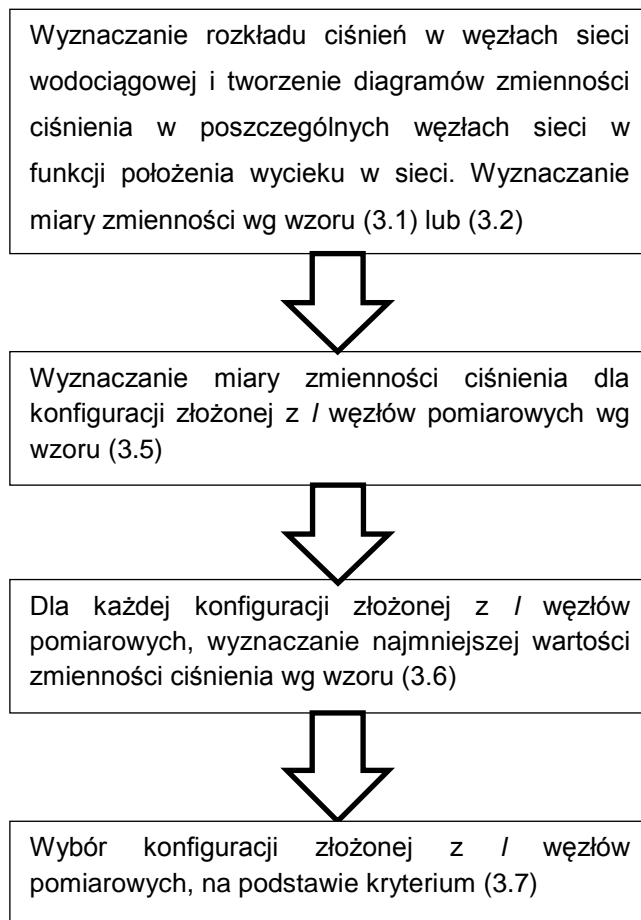
Porównując dla wszystkich konfiguracji l – węzłów pomiarowych wartości wyznaczone ze wzoru (3.6) wybrana zostanie ta konfiguracja l – punktów pomiarowych (q_1, q_2, \dots, q_r) , dla której wartość (3.6) jest największa (najsilniejsze z najsłabszych ogniwo)

$$(q_1, q_2, \dots, q_r): \quad s_{max} = \max_j (s_{jmin}). \quad (3.7)$$

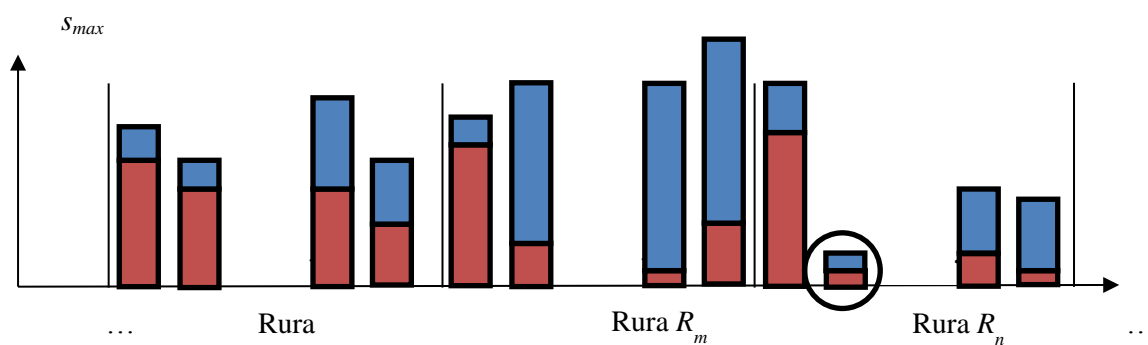


Rys. 3.2. Diagram zmienności ciśnienia w węzłach sieci wodociągowej

Opisany schemat wyboru l węzłów pomiarowych w sieci pokazany jest na rys. 3.3, a przykładowy diagram zmienności ciśnienia dla wybranych na podstawie tego algorytmu dwóch punktów pomiarowych W_r i W_s pokazano na rys. 3.4.



Rys. 3.3. Algorytm wyboru l – węzłów pomiarowych w sieci wodociągowej

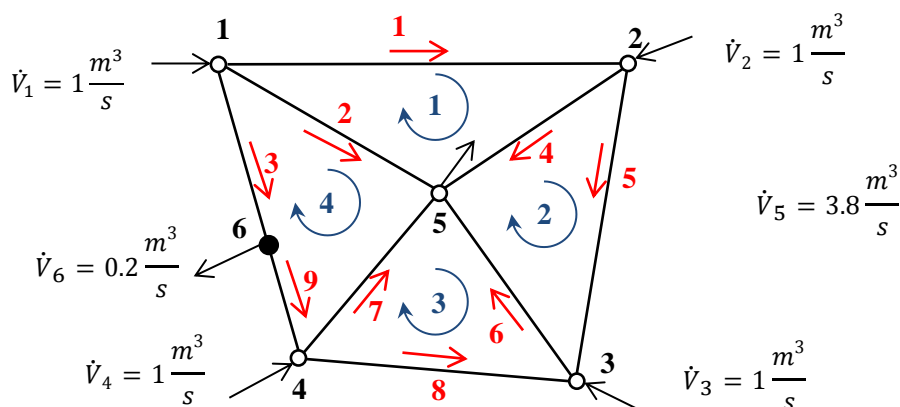


Rys. 3.4. Diagram zmienności ciśnienia dla wybranych dwóch punktów pomiarowych W_r i W_s

3.2. Przygotowanie danych do obliczeń w programie "Sieć" (Tryb 2)

Dla wybranego elementu sieci wodociągowej, w którym zakładane jest uszkodzenie, wyznaczane są prędkości w elementach sieci oraz ciśnienia w węzłach sieci. W elemencie uszkodzonym umieszczony jest węzeł dodatkowy, którego położenie jest zmienne.

Program uruchamia się w tym trybie jeśli parametr n_d jest większy od zera. W stosunku do pierwszego trybu różnice w pliku wejściowym polegają na ustawieniu parametru n_d . Bilans strumieni objętości upustów/źródeł zewnętrznych musi być różny od zera. Dla sieci pokazanej na rys. 3.5 dane wejściowe przedstawione są poniżej (kolorem czerwonym zaznaczone są różnice w stosunku do pliku wejściowego w trybie 1). Pierwsza linia jest w postaci: 5 5 8 4 6 **3** 0 ($n_w = 5$, $n_u = 5$, $n_e = 8$, $n_o = 4$, $l_o = 6$, $n_d = 3$, $n_c = 0$). Układ informacji o źródłach i upustach w trybie 2 został przedstawiony w tabeli 3.1.



Rys. 3.5. Elementarna sieć wodociągowa z dodatkowym węzłem

Tabela 3.1. Informacje o źródłach i upustach w trybie 2

numer upustu/źródła	numer węzła 1	numer węzła 2	strumień objętości [m^3/s]	0,0
1	0	1	1,0	0,0
2	0	2	1,0	0,0
3	0	3	1,0	0,0
4	0	4	1,0	0,0
5	5	0	3,8	0,0
			strumień się nie bilansują !!!	

Parametry rur (elementów sieci) i oczek sieci są identyczne jak w trybie 1.

Działanie programu w tym trybie polega na sprawdzeniu bilansu strumieni objętości upustu/źródeł zewnętrznych. W przypadku nie bilansowania się strumieni, program rozpoczyna działanie od wstawienia dodatkowego węzła w n_d – tej rurze sieci.

W analizowanym przykładzie będzie to węzeł numer 6 wstawiony do rury numer 3 (rys. 3.5). Program automatycznie modyfikuje sieć, dzieląc n_d – tą rurą na dwie części i dokonując korekty oczek. Z dodatkowego węzła wypływa strumień objętości wody o wartości, która brakowała w bilansie strumieni zewnętrznych. W analizowanym przykładzie wartość ta wynosi 0,2. Po modyfikacji struktura sieci została przedstawiona w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Informacje o źródłach i upustach z dodatkowym węzłem

<i>numer upustu/źródła</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>strumień objętości [m³/s]</i>	0,0
1	0	1	1,0	0,0
2	0	2	1,0	0,0
3	0	3	1,0	0,0
4	0	4	1,0	0,0
5	5	0	3,8	0,0
6	6	0	0,2	
			strumienie się bilansują !!!	

Tabela 3.3. Informacje o rurociągach z dodatkowym węzłem

<i>numer rury</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>długość [m]</i>	<i>średnica [mm]</i>	<i>chropowatość [mm]</i>
1	1	2	1000	500	0,1
2	1	5	771	500	0,1
3	1	6	zmienna	500	0,1
4	2	3	1000	500	0,1
5	2	5	771	500	0,1
6	3	5	771	500	0,1
7	4	5	771	500	0,1
8	4	3	1000	500	0,1
9	6	4	zmienna	500	0,1

Tabela 3.4. Informacje o oczkach sieci z dodatkowym węzłem

<i>numer oczka</i>	<i>liczba rur w oczku (n)</i>	<i>Numer rury 1</i>	<i>numer rury 2</i>	<i>numer rury 3</i>	<i>numer rury 4</i>
1	3	1	5	-2	
2	3	4	6	-5	
3	3	7	-6	-8	
4	4	2	-7	-9	-3

Dodatkowy węzeł ma położenie zmienne, co pozwala zbadać wpływ położenia tego węzła w wybranym elemencie sieci na prędkości w elementach sieci (rurach) oraz ciśnień w węzłach sieci. Położenie dodatkowego węzła liczone jest od pierwszego węzła elementu sieci. Wyniki obliczeń podane są w tabelach 3.5 – 3.7

Tabela 3.5. Rozkład prędkości [m/s] w kolejnych elementach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury

rura	25	75	125	175	225	275	325	375	425	475
1	-0,37	-0,35	-0,34	-0,33	-0,32	-0,30	-0,29	-0,28	-0,27	-0,26
2	4,82	4,82	4,82	4,82	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
3	0,64	0,62	0,61	0,60	0,58	0,57	0,56	0,54	0,53	0,52
4	-0,12	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01
5	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84
6	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84
7	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,83	4,83
8	-0,13	-0,14	-0,16	-0,17	-0,18	-0,19	-0,21	-0,22	-0,23	-0,24
9	-0,38	-0,39	-0,41	-0,42	-0,44	-0,45	-0,46	-0,48	-0,49	-0,50

Tabela 3.5. c.d.

rura	525	575	625	675	725	775	825	875	925	975
1	-0,24	-0,23	-0,22	-0,21	-0,19	-0,18	-0,17	-0,16	-0,14	-0,13
2	4,83	4,83	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84
3	0,50	0,49	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,41	0,39	0,38
4	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12
5	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
6	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84
7	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,82	4,82	4,82	4,82
8	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,30	-0,32	-0,33	-0,34	-0,35	-0,37
9	-0,52	-0,53	-0,54	-0,56	-0,57	-0,58	-0,60	-0,61	-0,62	-0,64

Tabela 3.6. Rozkład ciśnień [kPa] w kolejnych węzłach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury

węzeł	25	75	125	175	225	275	325	375	425	475
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,5	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3
3	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3
4	2,4	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6	0,3	0,1
5	-257,9	-258,1	-258,2	-258,4	-258,5	-258,7	-258,8	-258,9	-259,0	-259,2
6	-0,2	-0,5	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,8	-1,9	-2,1	-2,2

Tabela 3.6. c.d.

węzeł	525	575	625	675	725	775	825	875	925	975
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4
3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1

4	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,6	-1,9	-2,1	-2,4
5	-259,3	-259,4	-259,5	-259,6	-259,7	-259,8	-260,0	-260,1	-260,2	-260,3
6	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6

Tabela 3.7. Spadki ciśnień [kPa] w kolejnych elementach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury

rura	25	75	125	175	225	275	325	375	425	475
1	2,5	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3
2	-257,9	-258,1	-258,2	-258,4	-258,5	-258,7	-258,8	-258,9	-259,0	-259,2
3	-0,2	-0,5	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,8	-1,9	-2,1	-2,2
4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
5	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4
6	-260,7	-260,6	-260,6	-260,6	-260,5	-260,5	-260,5	-260,5	-260,4	-260,4
7	-260,3	-260,2	-260,1	-260,0	-259,8	-259,7	-259,6	-259,5	-259,4	-259,3
8	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
9	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,3

Tabela 3.7. c.d.

rura	525	575	625	675	725	775	825	875	925	975
1	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4
2	-259,3	-259,4	-259,5	-259,6	-259,7	-259,8	-260,0	-260,1	-260,2	-260,3
3	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6
4	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
5	-260,4	-260,4	-260,5	-260,5	-260,5	-260,5	-260,6	-260,6	-260,6	-260,7
6	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4	-260,4
7	-259,2	-259,0	-258,9	-258,8	-258,7	-258,5	-258,4	-258,2	-258,1	-257,9
8	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5
9	2,2	2,1	1,9	1,8	1,5	1,3	1,1	0,8	0,5	0,2

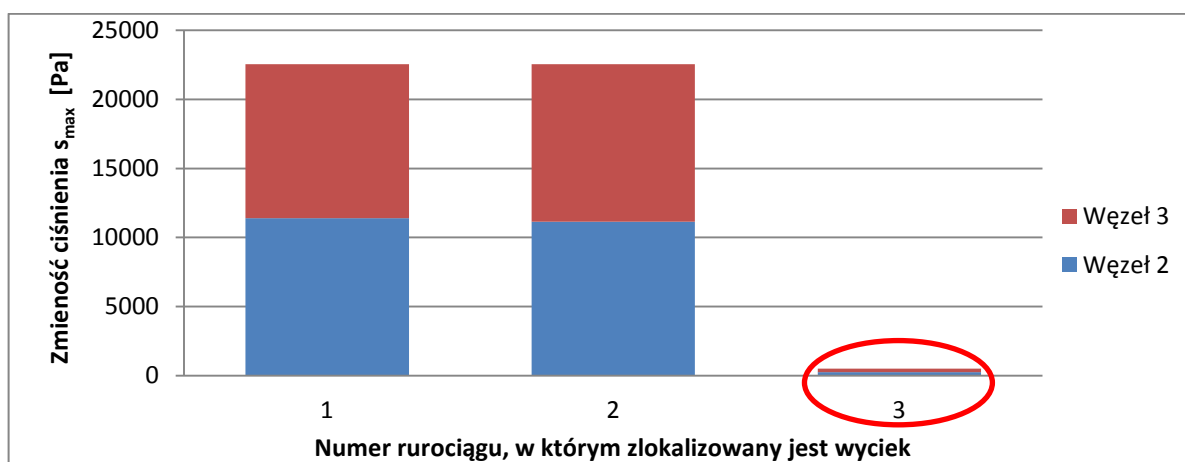
W opisany powyżej sposób można wyznaczyć rozkłady ciśnień i prędkości wody w sieci wodociągowej dla wybranego położenia wycieku. Ten tryb pozwala również na wyznaczenie węzłów sieci, w których powinno być mierzone ciśnienie. Ustawiając parametr n_d w pozycji -1 program automatycznie przechodzi do obliczeń wg algorytmu przedstawionego na rys. 3.3. Jako wynik końcowy obliczeń podane są numery węzłów sieci, w których należy zmierzyć ciśnienie w celu lokalizacji miejsca wycieku, dla konfiguracji złożonej z jednego, dwóch, trzech, czterech, pięciu i sześciu węzłów sieci.

Program uruchomiony w tym trybie pozwala na wybór węzłów, w których znane będzie ciśnienie do identyfikacji położenia uszkodzenia rurociągu.

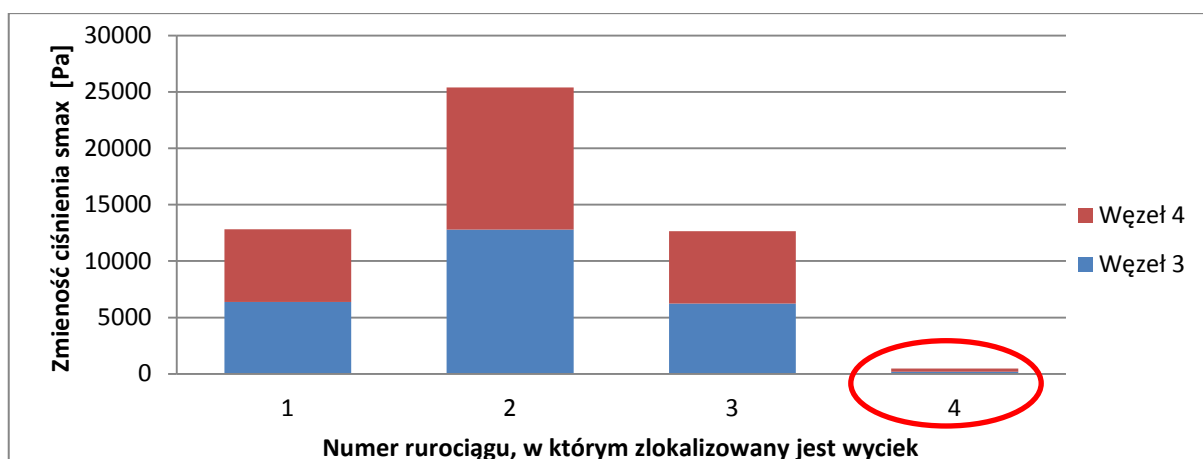
3.3. Analiza numeryczna wpływu położenia wycieku na rozkład ciśnienia w węzłach sieci

Przedstawione w rozdziale wyniki obliczeń dotyczą analizy wpływu położenia wycieku na rozkłady ciśnień w wybranych węzłach sieci. Badania te sprowadzały się do znalezienia konfiguracji od jednego do sześciu węzłów sieci, w których powinno być mierzone ciśnienie. Do tego celu zastosowano algorytm z rys. 3.3. Wg tego algorytmu obliczono rozkłady ciśnień generując w każdej rurze sieci po 20 nieszczelności. Jednocześnie aktywna była tylko jedna nieszczelność. W pierwszej kolejności dla badanych wariantów wyznaczana została zmienność ciśnień wg wzoru (3.1). W ten sposób można zbadać wpływ położenia uszkodzenia na ciśnienie w każdym węźle sieci. Następnie wyznaczona została miara zmienności ciśnienia dla konfiguracji węzłów pomiarowych złożonych odpowiednio od 1 do 6 węzłów wg wzoru (3.5). Dla każdej konfiguracji węzłów pomiarowych została wyznaczona lokalizacja uszkodzenia, w której jest najmniejsza zmienność ciśnienia wg wzoru (3.6). Jest to najslabsze ogniwo każdej konfiguracji, co oznacza, że najtrudniej w tym miejscu zlokalizować wyciek. Ostatecznie wybrana jest ta konfiguracja węzłów sieci, której ta zmienność jest największa – wybór najlepszego spośród najslabszych ogniw wg wzoru (3.7).

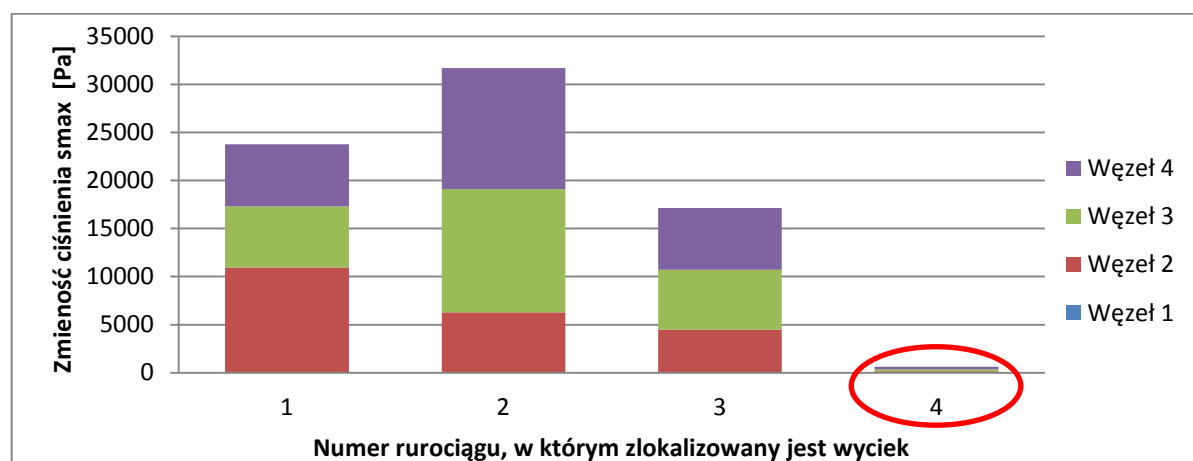
Ze względu na dużą liczbę analizowanych konfiguracji, wykresy prezentowane w tym rozdziale są efektem końcowym dokonanej przez program w trybie 2 selekcji węzłów dla 2, 4 i 6 konfiguracji węzłów sieci. Analizowane przykłady przedstawione są na rysunkach w rozdziale drugim i w załączniku. Na rysunkach (3.6) – (3.23) na osi pionowej podana jest miara zmienności ciśnienia wyznaczona wg wzoru (3.7) zależna od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci. Kółkiem zaznaczona jest rura, w której dla wybranej konfiguracji węzłów pomiarowych najtrudniej zlokalizować uszkodzenie.



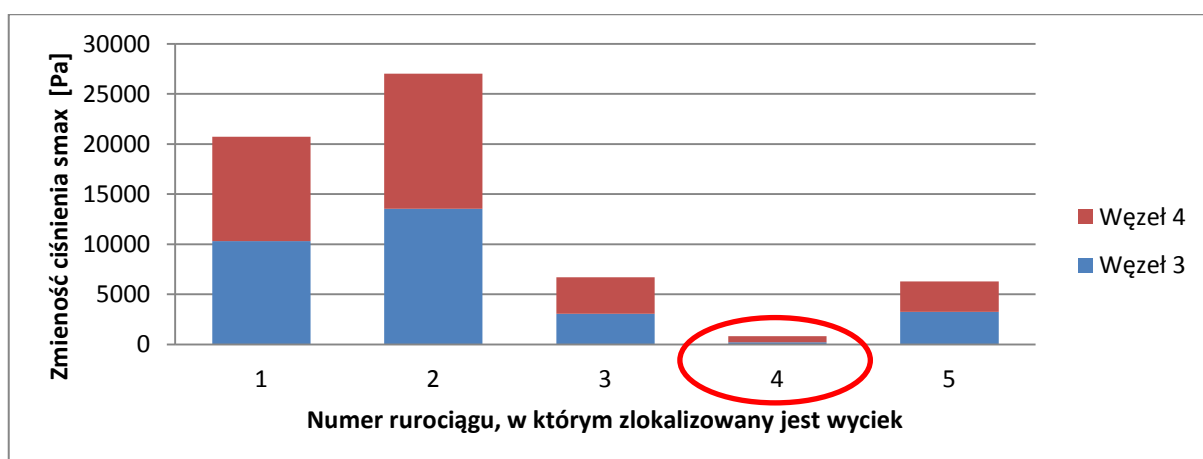
Rys. 3.6. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 1



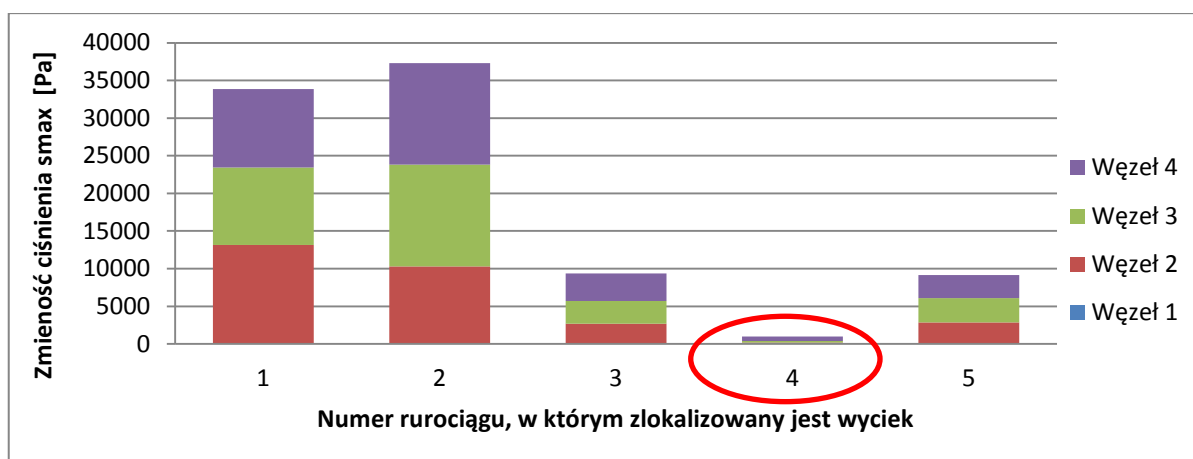
Rys. 3.7. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 2



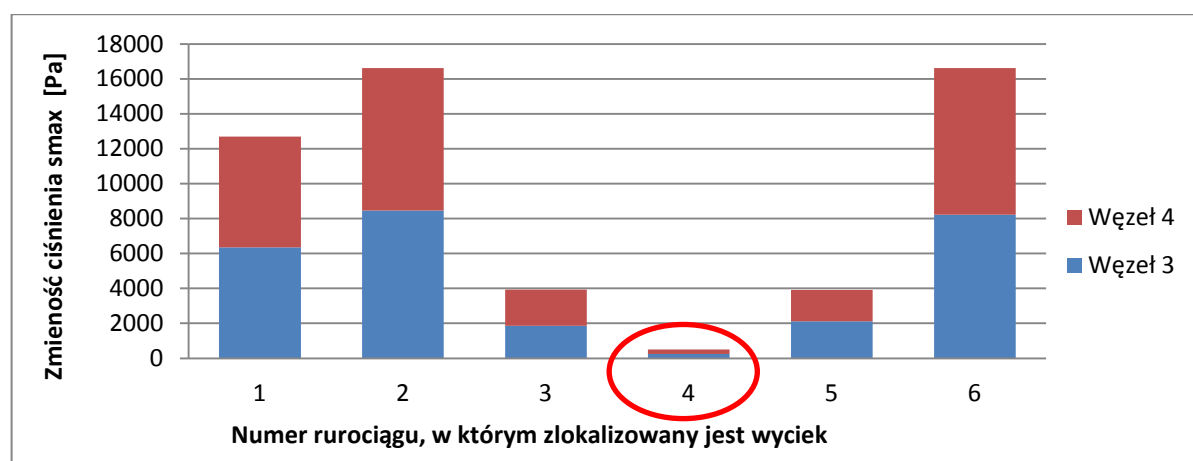
Rys. 3.8. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 2



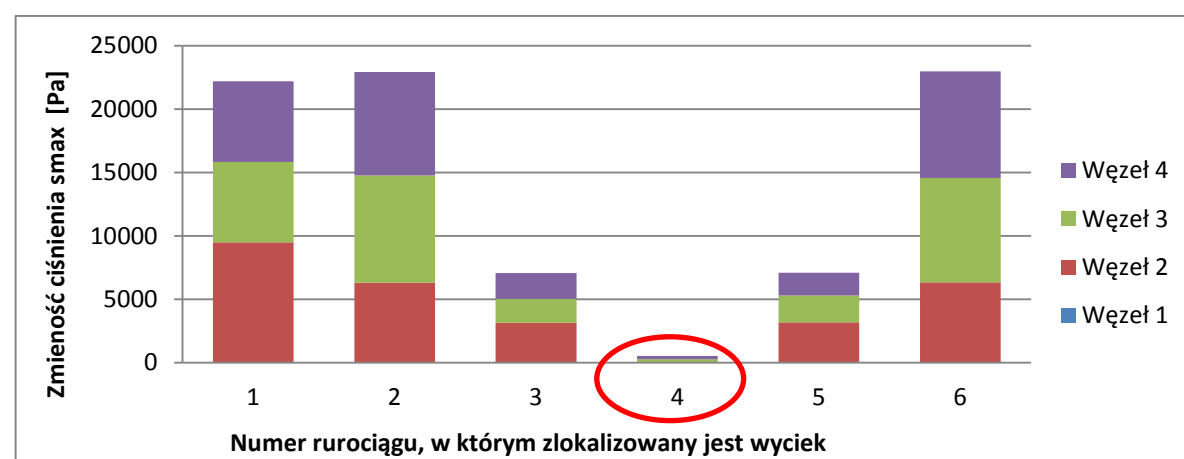
Rys. 3.9. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 3



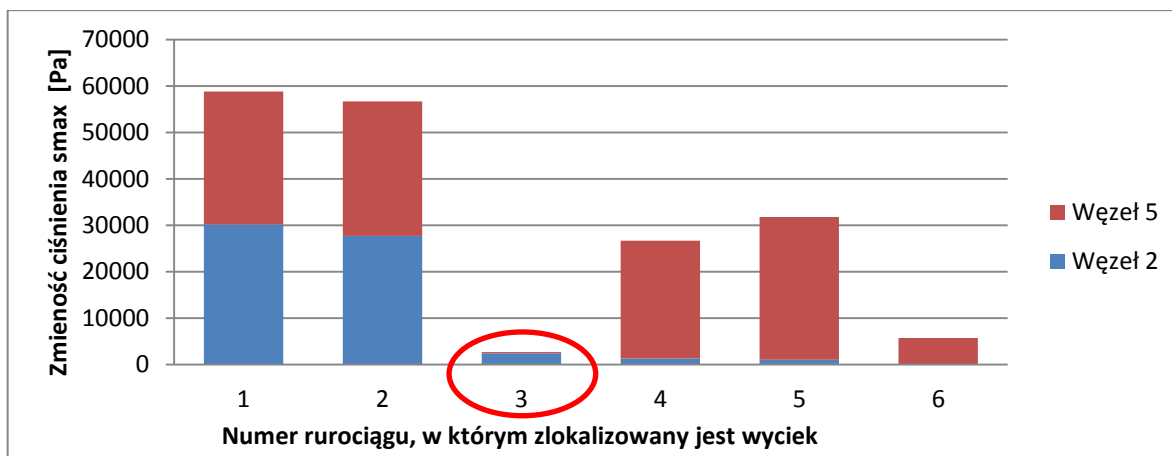
Rys. 3.10. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 3



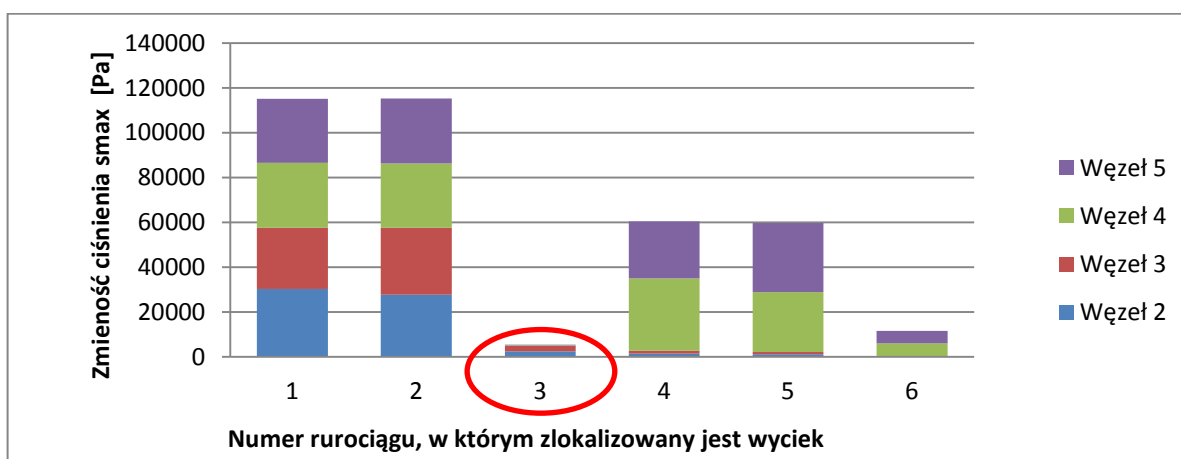
Rys. 3.11. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 4



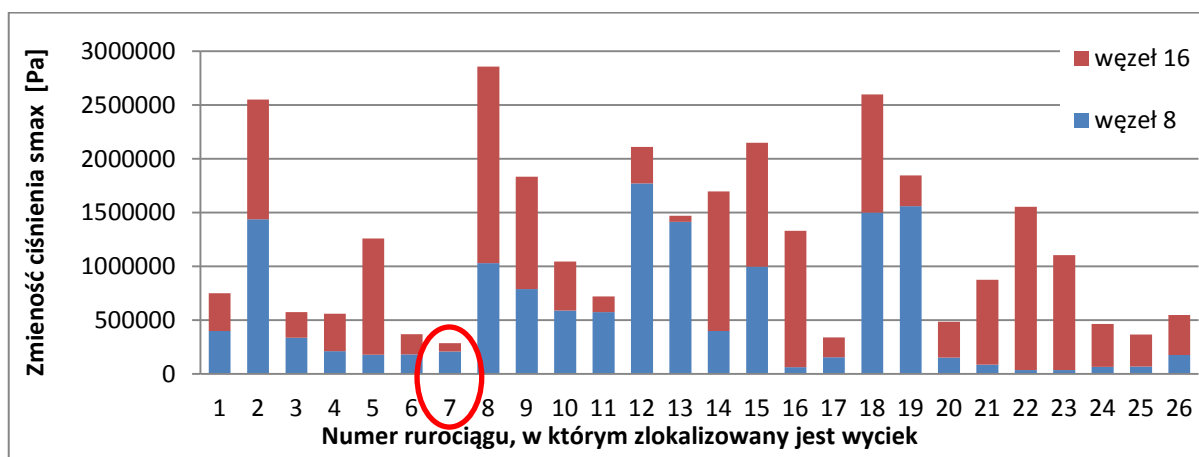
Rys. 3.12. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 4



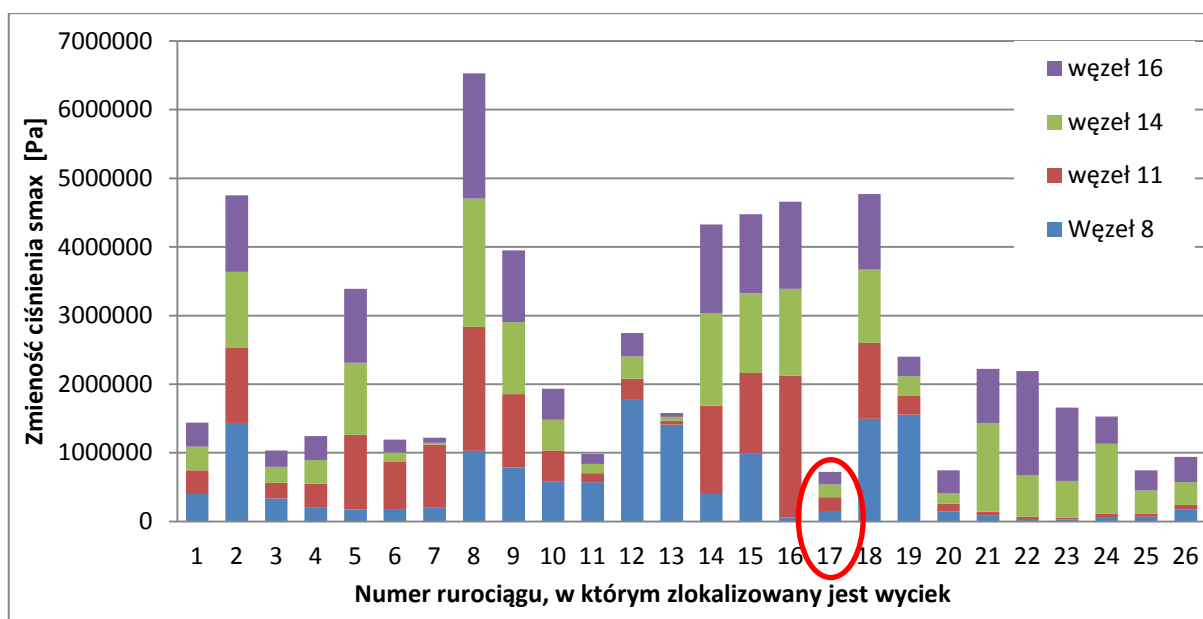
Rys. 3.13. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 5



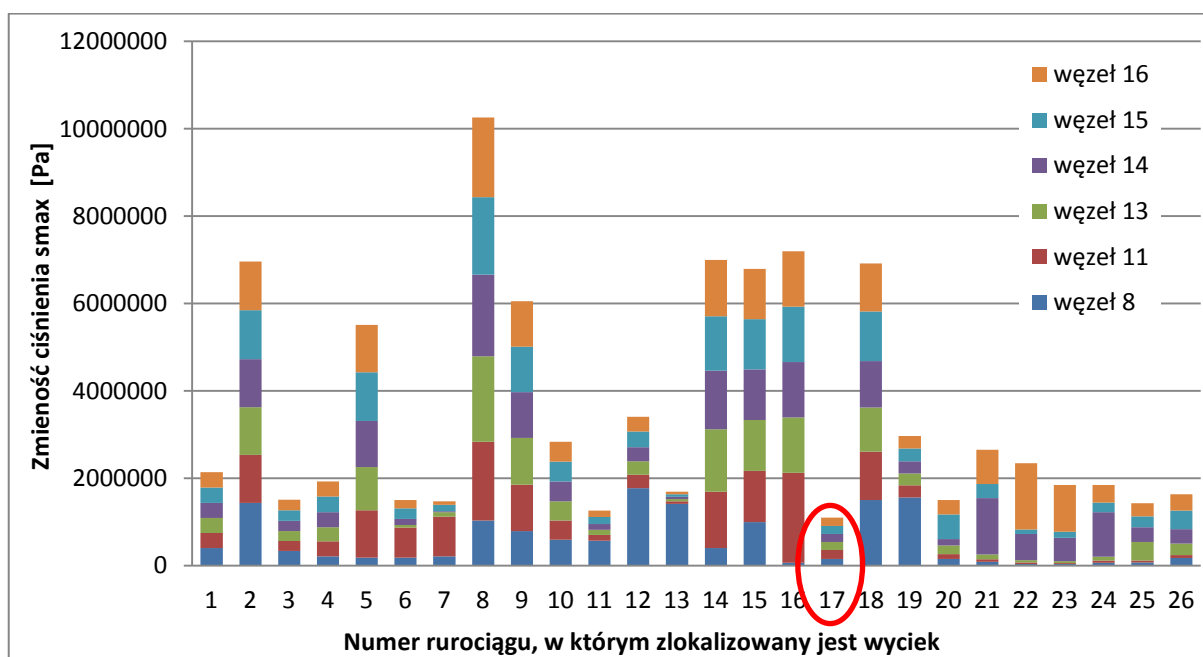
Rys. 3.14. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 5



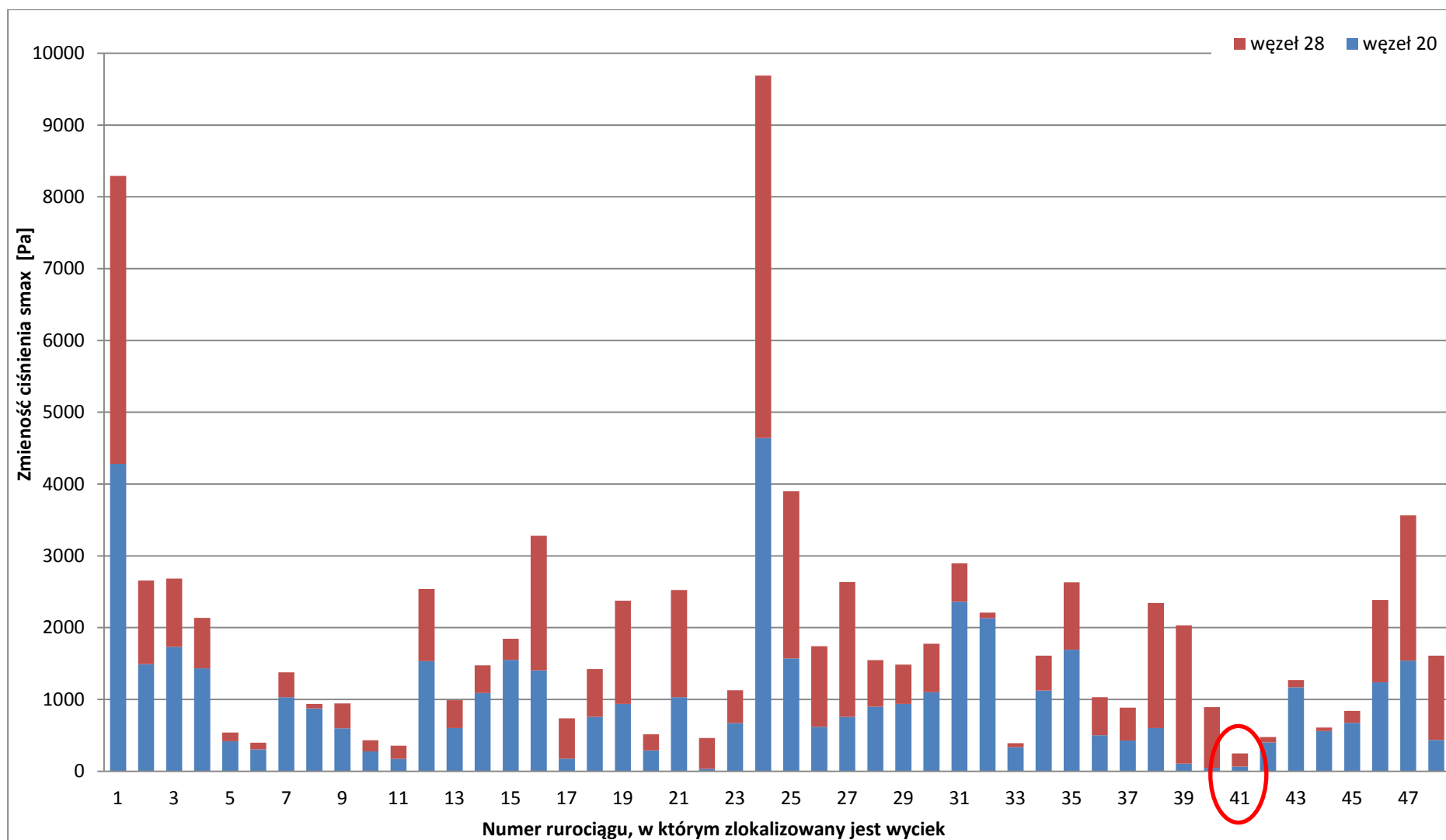
Rys. 3.15. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 6



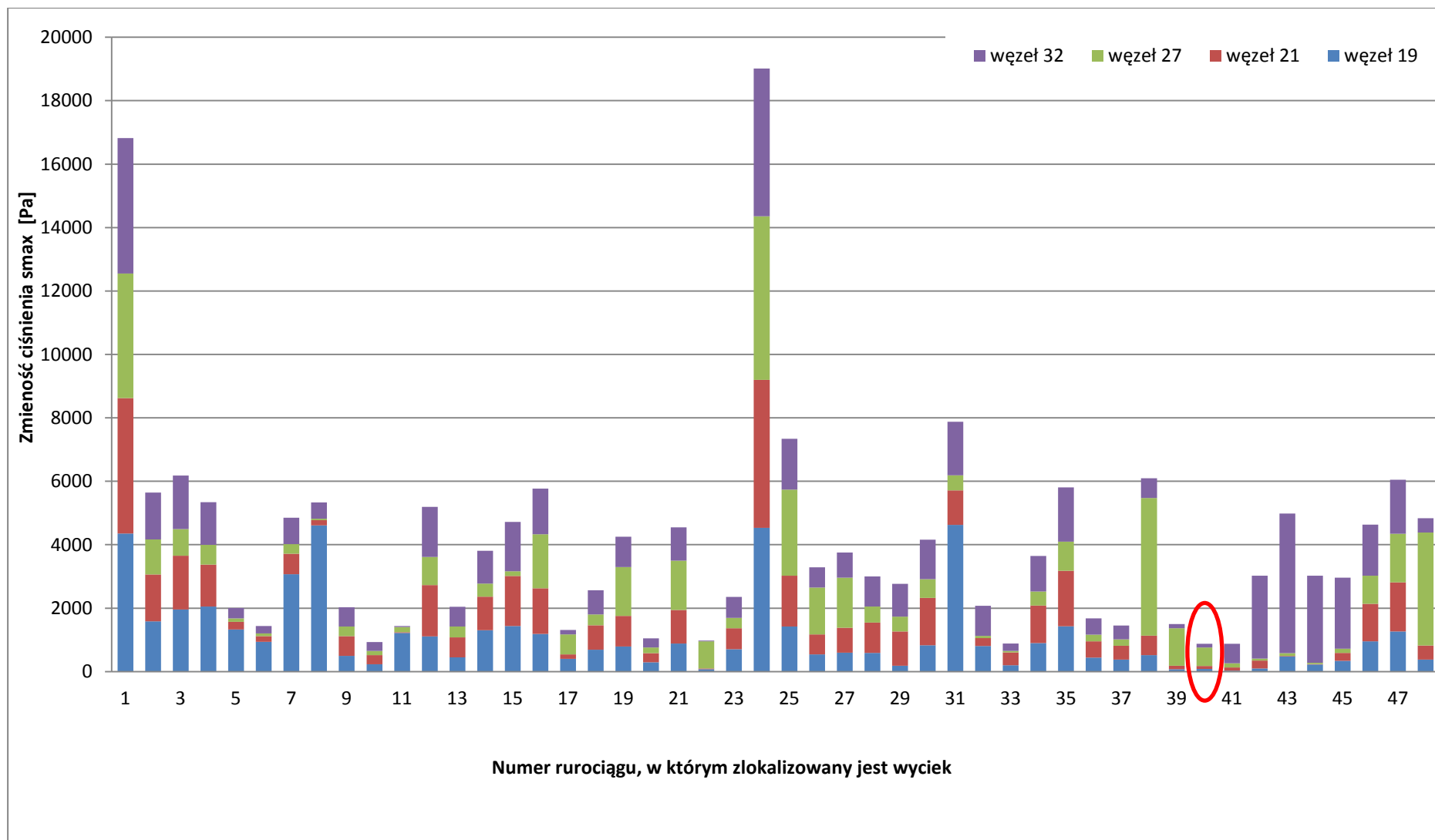
Rys. 3.16. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 6



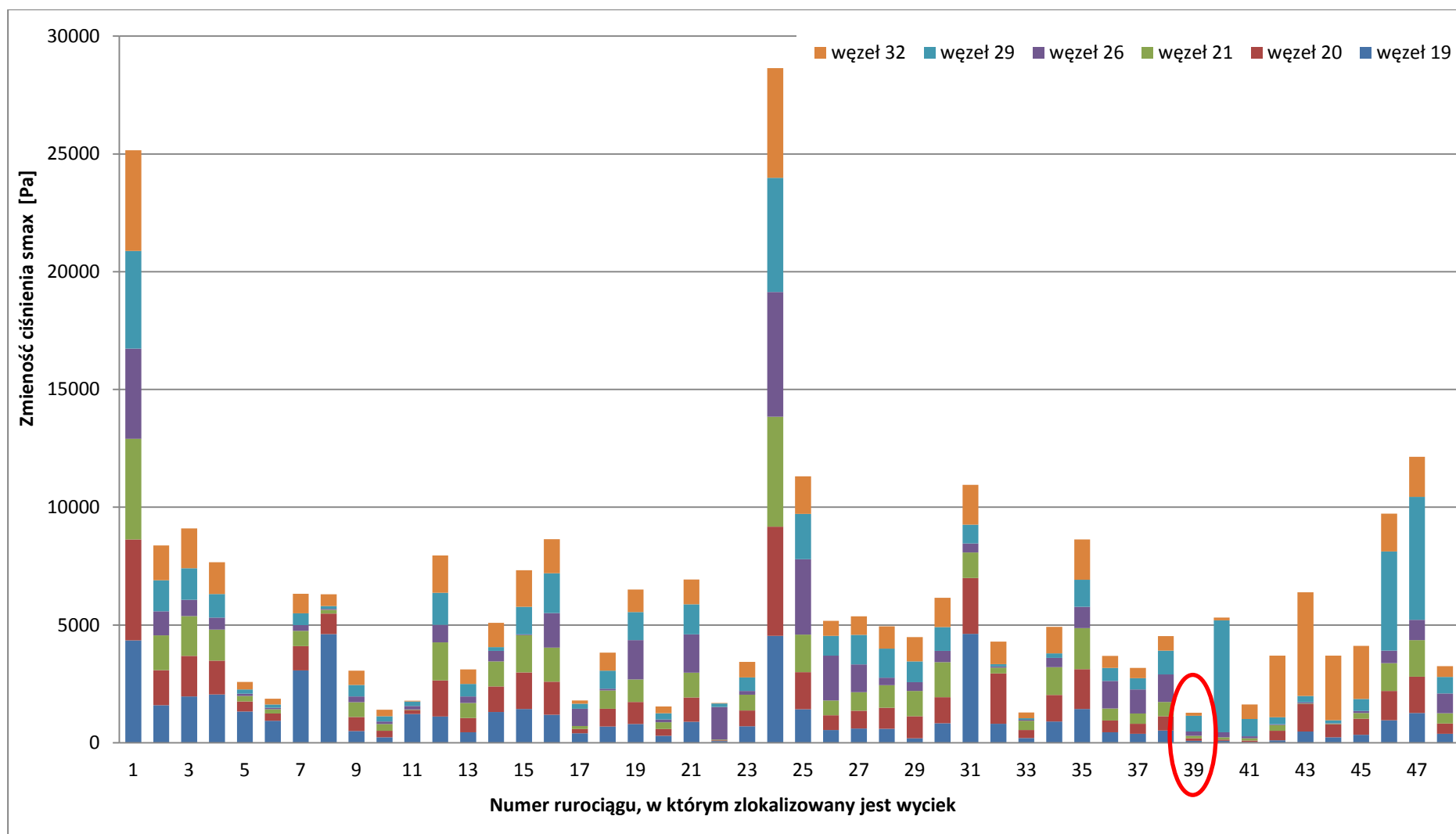
Rys. 3.17. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzłów pomiarowych; przykład 6



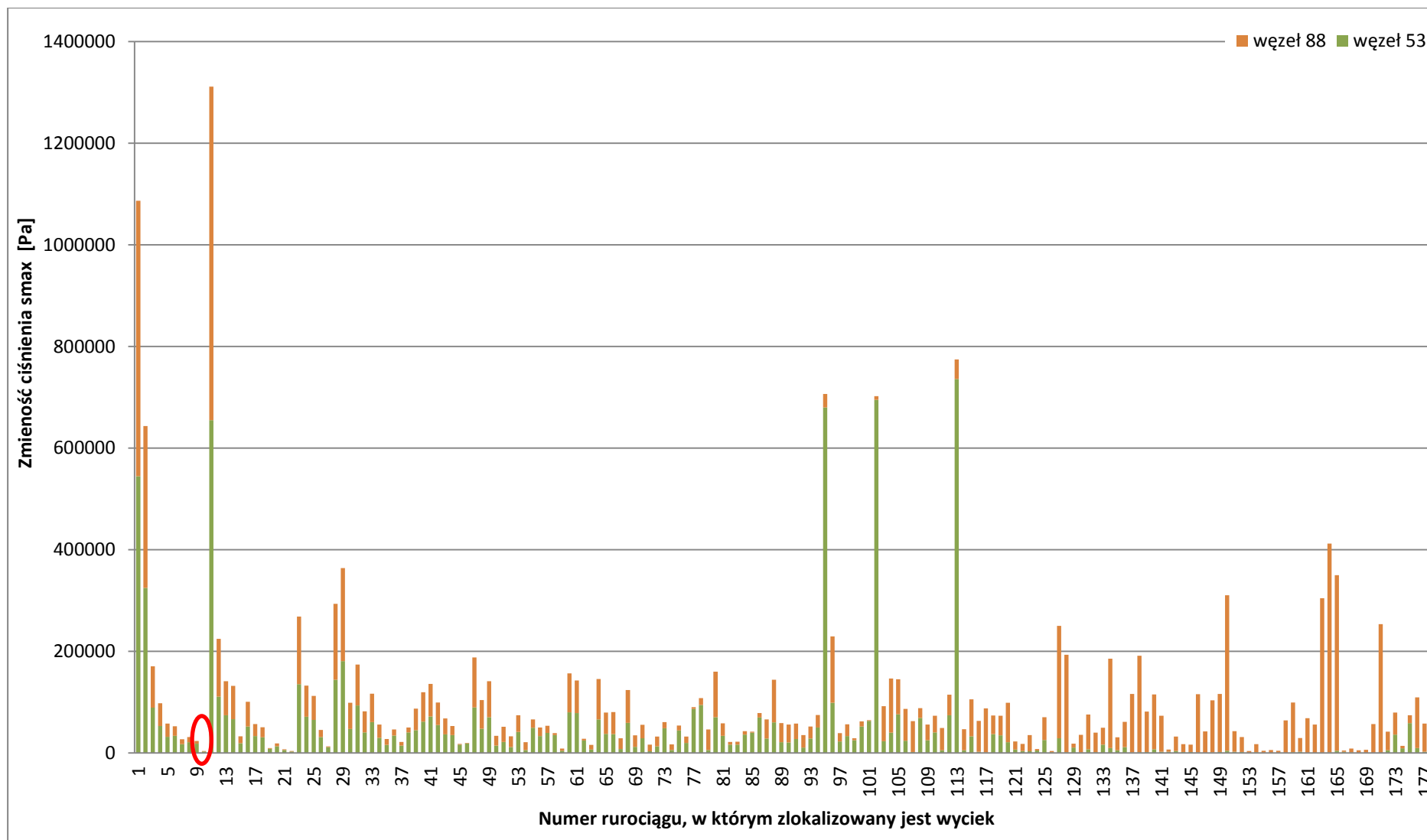
Rys. 3.18. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 7



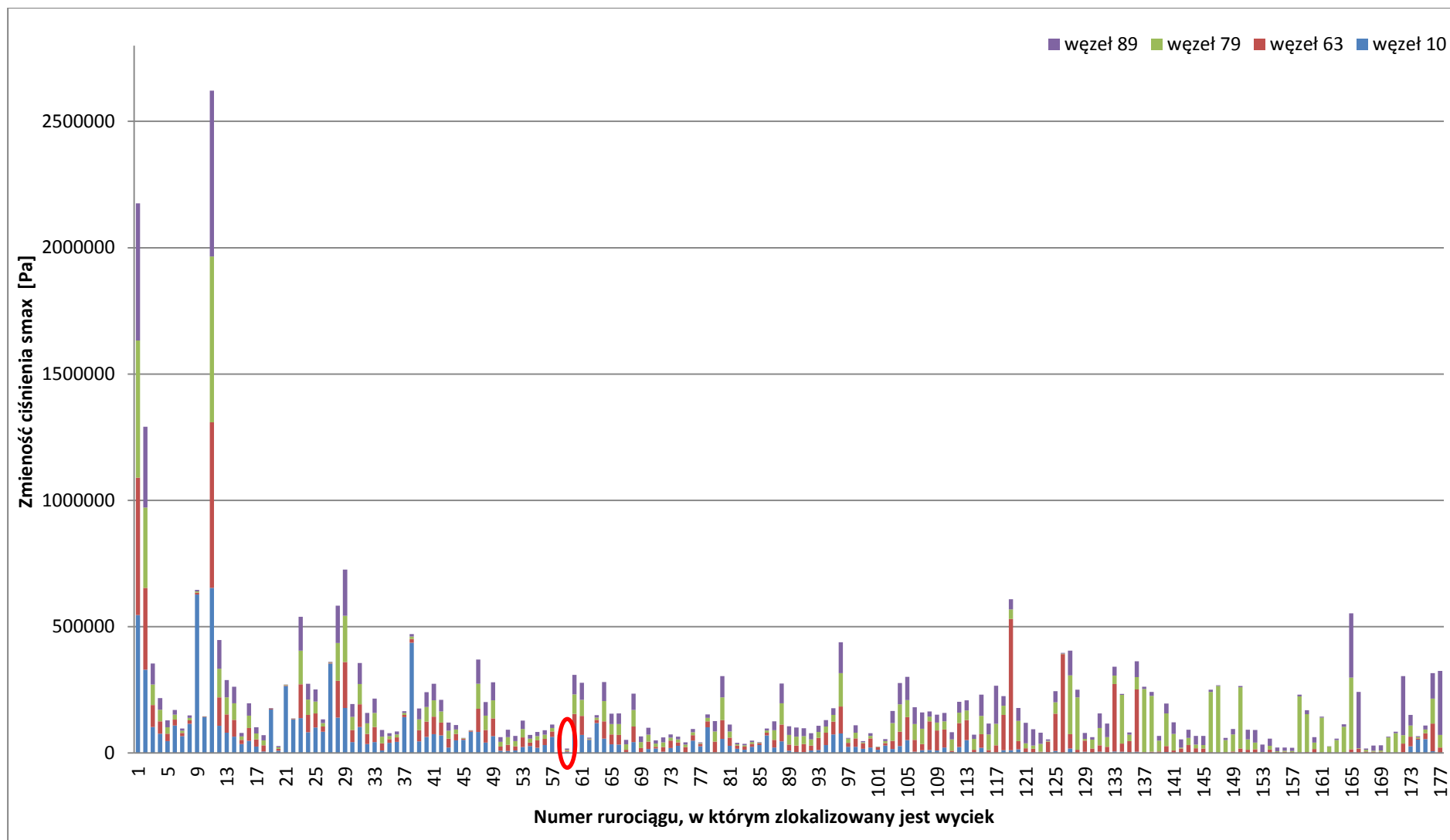
Rys. 3.19. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 7



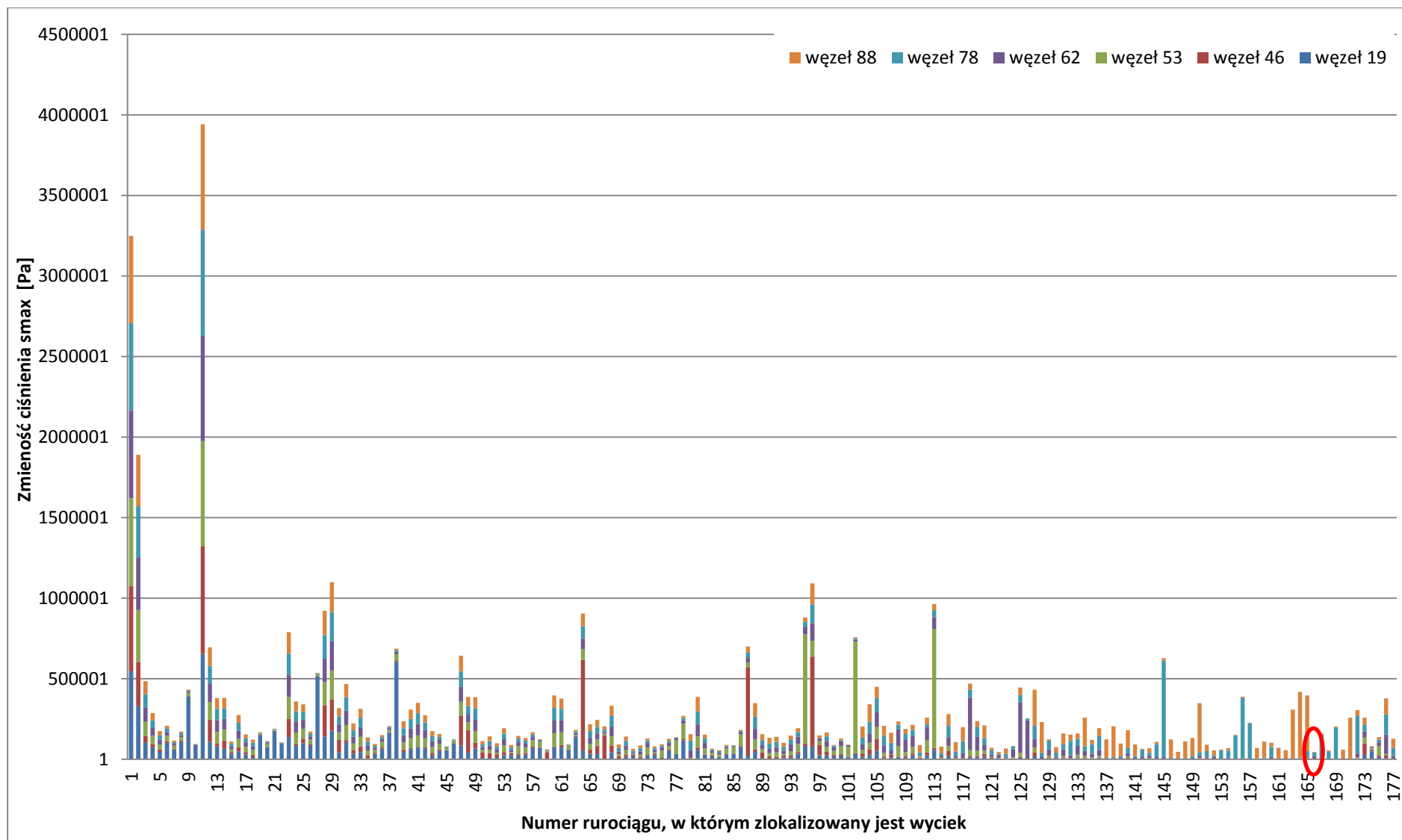
Rys. 3.20. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzły pomiarowe; przykład 7



Rys. 3.21. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 8



Rys. 3.22. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 8



Rys. 3.23. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzły pomiarowe; przykład 8

3.4. Podsumowanie

W rozdziale zbadany został wpływ położenia nieszczelności w sieci wodociągowej na ciśnienie we wszystkich węzłach sieci. Na tej podstawie opracowany został algorytm znajdujący węzły, w których powinno być mierzone ciśnienie w celu wykrycia nieszczelności sieci. Podane zostały kryteria, według których ten wybór następuje. Na podstawie tych rozważań został w programie „Sieć” zaimplementowany ten algorytm, a wyniki działania programu zaprezentowane zostały w rozdziale 3.3. Na podstawie obliczeń zostały wytypowane węzły sieci dla przykładów rozważanych w pracy i zestawione w tabelach 3.8 i 3.9. W tabelach tych zamieszczony jest dla wszystkich wariantów numer rury, w których najtrudniej z pomiarów ciśnienia w wytypowanych węzłach zlokalizować uszkodzenie sieci. Na podstawie tych symulacji wybrano losowo miejsce w takiej rurze i wygenerowano ciśnienia w węzłach sieci. Wartości ciśnień w tych węzłach posłużyły do identyfikacji miejsca wycieku w obliczeniach prezentowanych w następnym rozdziale. Ze względu na dużą liczbę wyników, pokazane zostaną w następnym rozdziale tylko te warianty obliczeń, które w tabelach zaznaczono *.

Tabela 3.8. Zestawienie węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie w celu identyfikacji nieszczelności sieci; numer rury, w której najtrudniej zidentyfikować uszkodzenie; przykłady 1 – 5

	Liczba węzłów	Numery węzła						Numer rury
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	
Przykład 1	1	3						3*
	2	2	3					3
	3	1	2	3				3
Przykład 2	1	4						4*
	2	3	4					4
	3	2	3	4				4
	4	1	2	3	4			4
Przykład 3	1	4						4*
	2	3	4					4
	3	2	3	4				4
	4	1	2	3	4			4
Przykład 4	1	4						4*
	2	3	4					4
	3	2	3	4				4
	4	1	2	3	4			4
Przykład 5	1	5						3*
	2	2	5					3
	3	2	3	5				3
	4	2	3	4	5			3
	5	1	2	3	4	5		3

Tabela 3.9. Zestawienie węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie w celu identyfikacji nieszczelności sieci; numer rury, w której najtrudniej zidentyfikować uszkodzenie; przykłady 6 – 8

	Liczba węzłów	Numery węzła						Numer rury
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	
Przykład 6	1	12						13
	2	8	16					7*
	3	8	12	14				17
	4	8	11	14	16			17
	5	8	11	13	14	16		17
	6	8	11	13	14	15	16	17*
Przykład 7	1	29						33
	2	20	28					41*
	3	19	28	32				33*
	4	19	21	27	32			40
	5	7	21	27	31	32		22*
	6	19	20	21	26	29	32	39*
Przykład 8	1	81						46
	2	53	88					10*
	3	10	72	78				59*
	4	10	63	79	89			59
	5	19	46	63	78	87		101*
	6	19	46	53	62	78	88	122*

Wyniki obliczeń prezentowane w rozdziale 3 są realizacją drugiego szczegółowego celu pracy doktorskiej.

4. LOKALIZACJA NIESZCZELNOŚCI W SIECI WODOCIĄGOWEJ

4.1. Wybór metody poszukiwania lokalizacji uszkodzenia w sieci wodociągowej

Poszukiwanie miejsca uszkodzenia sieci wodociągowej jest zagadnieniem złożonym. Uszkodzenie sieci można rozpatrywać jako dodatkowy węzeł z upustem, który zmienia parametry sieci nieuszkodzonej. Dla uproszczenia rozważań założono, że uszkodzenie sieci jest pojedyncze oraz znane są wartości strumieni wody wpływających i wypływających z rozważanego fragmentu sieci. Ponadto w wybranych n_p węzłach sieci mierzone jest w sposób ciągły ciśnienie.

Pierwsza z metod oparta jest na wielokrotnym wyznaczeniu parametrów uszkodzonej sieci wodociągowej ze zmieniającym się położeniem węzła symbolizującego uszkodzenie sieci. W ten sposób trzeba rozwiązać n_e (liczba elementów sieci) wariantów sieci wodociągowej z jednym uszkodzeniem o znanej wartości upustu (wypływającego z sieci przez dodatkowy węzeł strumienia objętości wody) umieszczonego po kolei w każdym elemencie sieci wodociągowej. Rozwiązywane układy równań są powiększone o jedno dodatkowe równanie bilansu masy.

Oznaczając przez p_{ref_k} ciśnienie zmierzone w k -tym węźle pomiarowym sieci uszkodzonej, a przez p_{kj} ciśnienie wyliczone w k -tym węźle pomiarowym sieci uszkodzonej z uszkodzeniem zlokalizowanym w j -tym elemencie, rozważany jest następujący funkcjonal:

$$J = \sum_{k=1}^{n_p} (p_{kj} - p_{ref_k})^2 \quad (4.1)$$

Wyznaczając wartość tego funkcjonału dla wszystkich wariantów uszkodzonej sieci, wariant rzeczywisty spełnia warunek minimum funkcjonału (4.1).

Opisany sposób lokalizacji uszkodzenia w sieci wodociągowej dla złożonej sieci może być nieefektywny, ponieważ trzeba rozwiązać n_e różnych nieliniowych układów równań algebraicznych, stąd druga metoda lokalizacji uszkodzenia w sieci wodociągowej polega na dołączeniu dodatkowych węzłów w każdym elemencie sieci i rozpatrzeniu wariantów uszkodzenia sieci, w których tylko jeden dodatkowy węzeł jest aktywny, tzn. wartość upustu wody w tym węźle jest różna od zera, a w pozostałych równa zero. Prowadzi to jak w pierwszej metodzie do rozwiązywania n_e równań algebraicznych nieliniowych z różnymi prawymi stronami. Wszystkie układy równań rozwiązywane są jednocześnie, ale ich rozmiar w stosunku do rozmiaru układu rozwiązywanego w metodzie pierwszej jest o $n_e - 1$ równań

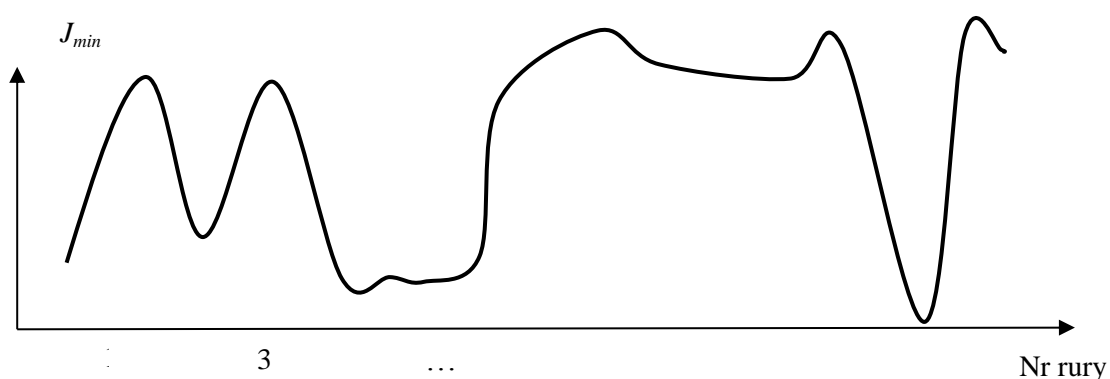
wiekszy. Element, w którym zlokalizowane jest uszkodzenie znajduje się z minimum funkcjonału (4.1).

Trzecia z metod zakłada, że w każdym elemencie sieci znajduje się dodatkowy węzeł, w którym wartość upustu wody może być różna od zera. Położenie upustów jest iteracyjnie tak dobierane, aby funkcjonał (4.1) osiągał minimum. Można to zagadnienie rozszerzyć o dodatkowe parametry związane z położeniem węzłów w elemencie sieci.

Jak widać, opisane metody oparte o poszukiwanie minimum funkcjonału (4.1) mają wady, które powodują różne komplikacje w czasie rozwiązywania algebraicznego układu równań nieliniowych. Jednak najpoważniejszą z nich, zwłaszcza w przypadku dużych sieci jest długi czas obliczeń. Do celów badawczych prezentowanych w tej pracy zdecydowano się na pierwszą z opisanych metod połączoną ze strategią „zgrubną” przeszukiwania sieci wodociągowej, w celu ustalenia rurociągu, w którym zlokalizowany jest wyciek, a następnie dokładne przeszukiwanie wybranego rurociągu. Algorytm wyznaczania nieszczelności sieci składa się zatem z dwóch etapów. W pierwszym etapie dla każdego rurociągu w sieci metodą połowienia wyznaczana jest minimalna wartość funkcjonału (4.1). Proces ten kończy się dla każdego rurociągu, gdy spełniony jest warunek

$$|J_{u2} - J_{u1}| < \varepsilon_r, \quad (4.2)$$

gdzie ε_r jest traktowany jako ułamek długości rurociągu. Wartość tego parametru ma wpływ na długość obliczeń. Mała wartość wydłuża czas obliczeń, a zbyt duża powoduje, że wybór rurociągu, w którym znajduje się uszkodzenie jest nieprawidłowy. Rozkład minimum wartości funkcjonału dla uszkodzenia sieci w kolejnych rurociągach przedstawia rys. 4.1.

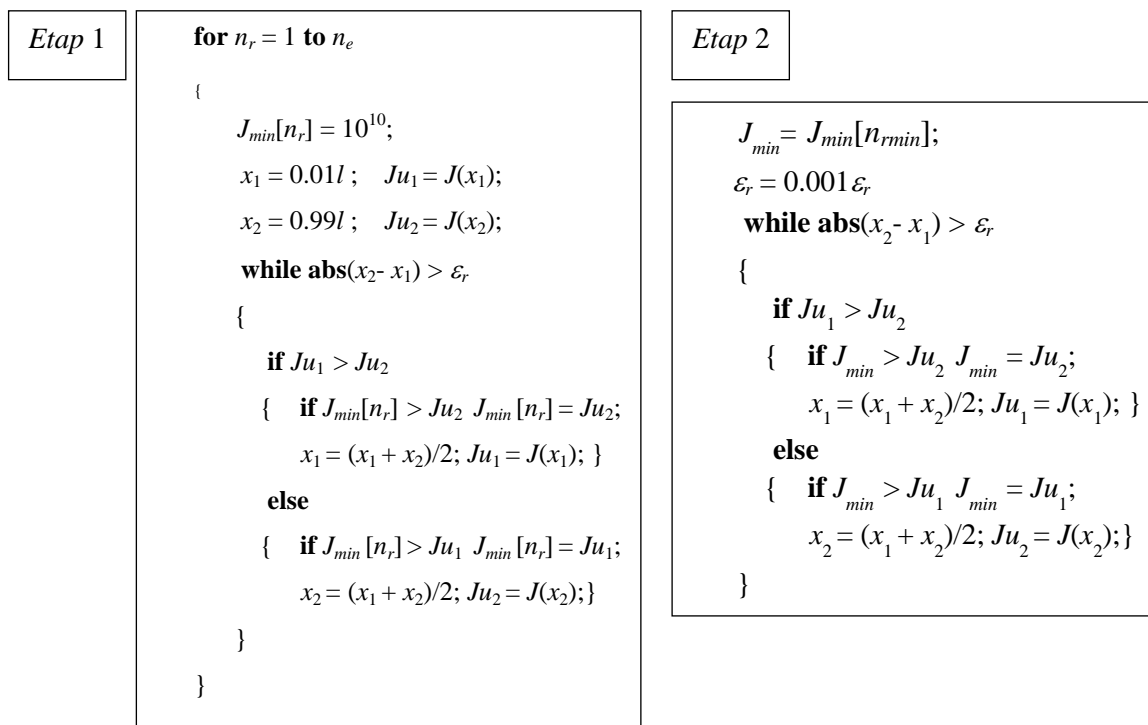


Rys. 4.1 Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia sieci

Widać, że niebezpieczeństwo popełnienia błędu wyboru rurociągu, w którym jest uszkodzenie może być duże, dlatego rozkład minimów funkcjonału (4.1) pozwala na ocenę ryzyka popełnienia błędu. Przy dużej niepewności można zmniejszyć wartość parametru ε_r ,

co zwiększa czas obliczeń lub w drugim etapie można sprawdzić minimum tego funkcjonału w więcej niż jednym rurociągu.

W drugim etapie poszukiwania miejsca wycieku z sieci wodociągowej, w wytypowanym rurociągu, poszukiwana jest lokalizacja podobnie jak w pierwszym etapie z tą różnicą, że wartość parametru ε_r zostaje zmniejszona o kilka rzędów. Algorytm przeszukiwania sieci i znajdowania minimum funkcjonału przedstawia rys. 4.2.



Rys. 4.2 Algorytm poszukiwania miejsca wycieku z sieci wodociągowej

4.2. Przygotowanie danych do obliczeń w programie „Sieć” (Tryb 3)

Z obliczeń w trybie 2 można wybrać lokalizację uszkodzenia. Do przykładowych obliczeń została wybrana lokalizacja uszkodzenia w 3 rurze w odległości 75m od pierwszego węzła sieci. Z tabeli 3.6 wybrano wartości ciśnień odpowiadające lokalizacji uszkodzenia (kolor czerwony) i przedstawiono je w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Wybrane wartości ciśnienia z tabeli 3.6

numer węzła	ciśnienie [Pa]
2	2300
3	2600
5	-258100

Wartość parametru n_c umieszczonego na końcu pierwszej linii i jest on równy 3.

Poszukiwanie uszkodzenia rurociągu podzielone jest na dwa etapy:

- po kolei w każdej rurze wstawiony jest dodatkowy węzeł o zmiennym położeniu i wyznaczane jest położenie tego węzła, dla którego jest najmniejsza wartość funkcjonału (4.1) Do wyznaczenia wartości funkcjonału (4.1) w analizowanym przykładzie brane są ciśnienia w węzłach 2, 3 i 5, a ich wartości przedstawiono w tabeli 4.1. Wartości funkcjonałów dla różnych położań dodatkowego węzła zaprezentowano w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Wartości funkcjonałów dla różnych położań dodatkowego węzła

<i>numer rury</i>	<i>numer węzła 1</i>	<i>numer węzła 2</i>	<i>wartość funkcjonału</i>
1	1	2	8,57352e+006
2	1	5	4,15074e+009
3	1	6	4,36423e+006
4	2	3	3,27966e+007
5	2	5	3,70035e+009
6	3	5	3,64702e+009
7	4	5	3,70725e+009
8	4	3	2,55745e+007

najmniejsza wartość funkcjonału (4.1) występuje kiedy dodatkowy węzeł z upustem występuje w rurze numer **3**.

Tabela 4.3. Wartości prędkości w poszczególnych rurociągach

<i>nr elementu</i>	<i>nr węzła 1</i>	<i>nr węzła 2</i>	<i>prędkość [m/s]</i>
1	1	2	-0,353
2	1	5	4,822
3	1	6	0,625
4	2	3	-0,104
5	2	5	4,844
6	3	5	4,846
7	4	5	4,842
8	4	3	-0,143
9	6	4	-0,394

- wytypowana w pierwszym etapie rura, przeszukiwana jest w identyczny sposób jak w czasie działania programu w trybie 2. Zmianie ulega położenie węzła w

wytypowanej rurze i wartość obliczanego funkcjonału (4.1). W rozważanym przykładzie program znalazł odległość uszkodzenia od pierwszego węzła w elemencie trzecim równą **75.02m**. Minimum funkcjonału (4.1) w tym punkcie wynosi **0.021**. Wartości prędkości w poszczególnych rurociągach przedstawiono w tabeli 4.3, a wartości ciśnień w węzłach sieci podane są w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Wartości ciśnienia w poszczególnych węzłach rozpatrywanej sieci

<i>numer węzła</i>	<i>ciśnienie [Pa]</i>
1	0
2	2328
3	2583
4	2133
5	-258066
6	-502

Dla analizowanego przykładu program z dużą dokładnością znalazł uszkodzenie sieci.

4.3. Wyniki obliczeń numerycznych poszukiwania nieszczelności w sieci wodociągowej

Poszukiwanie nieszczelności w sieci wodociągowej podzielone jest na dwa etapy działania algorytmu pokazanego na rys. 4.2. Pierwszy etap sprowadza się do poszukiwania rurociągu, w którym znajduje się uszkodzenie. Wybór rurociągu, w którym jest uszkodzenie, następuje przez porównanie wartości funkcjonałów (4.1). W drugim etapie ustalane jest dokładne miejsce uszkodzenia w wytypowanej rurze.

Tabela 4.5 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 1

numery węzłów pomiarowych	nr rury	węzeł początkowy	węzeł końcowy	funkcjonał (4.1)		położenie wycieku [m]
				Etap 1	Etap 2	
3	1	1	2	1,72e+6		
	2	1	3	1,18e+6		
	3	2	4	7,35e-2	9,14e-7	1,152
2,3	1	1	2	2,81e+6		
	2	1	3	2,79e+6		
	3	2	4	1,53e-1	6,51e-5	1,152

Dla sieci wodociągowych o prostej strukturze (przykłady 1 – 5, pokazane na rysunkach w rozdziale 2), wyniki działania algorytmu przedstawione są w tabelach 4.5 – 4.9. Zielonym

kolorem w tabelach zaznaczona jest prawidłowo znaleziona przez algorytm lokalizacja wycieku z sieci.

Tabela 4.6 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci;
położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 2

numery węzłów pomiarowych	nr rury	węzeł początkowy	węzeł końcowy	funkcjonał (4.1)		położenie wycieku [m]
				Etap 1	Etap 2	
4	1	1	2	5,11e+7		
	2	1	3	1,74e+6		
	3	2	4	1,48e+5		
	4	3	5	5,09e+2	4,10e-7	0,048
3,4	1	1	2	1,06e+8		
	2	1	3	3,52e+6		
	3	2	4	8,73e+5		
	4	3	5	7,43e+2	1,97e-1	0,050
2,3,4	1	1	2	1,20e+8		
	2	1	3	3,96e+6		
	3	2	4	1,24e+6		
	4	3	5	8,59e+2	3,16e-1	0,051

Tabela 4.7 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci;
położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 3

numery węzłów pomiarowych	nr rury	węzeł początkowy	węzeł końcowy	funkcjonał (4.1)		położenie wycieku [m]
				Etap 1	Etap 2	
4	1	1	2	2,36e+7		
	2	1	3	3,84e+6		
	3	2	4	9,70e+4		
	4	3	5	9,64e-2	2,84e-6	1,749
	5	2	3	7,59e+5		
3,4	1	1	2	4,21e+7		
	2	1	3	5,34e+6		
	3	2	4	2,09e+5		
	4	3	5	1,28e-1	4,80e-3	1,749
	5	2	3	7,79e+5		
2,3,4	1	1	2	4,42e+7		
	2	1	3	6,87e+6		
	3	2	4	2,95e+5		
	4	3	5	2,35e-1		
	5	2	3	7,94e+5		

Tabela 4.8 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci;
położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 4

numery węzłów pomiarowych	nr rury	węzeł początkowy	węzeł końcowy	funkcjonał (4.1)		położenie wycieku [m]
				Etap 1	Etap 2	
4	1	1	2	7,34e+6		
	2	1	3	9,94e+5		
	3	2	4	1,07e+4		
	4	3	5	3,83e-4	2,84e-6	1,749
	5	2	3	1,10e+5		
	6	1	4	5,85e+5		
3,4	1	1	2	1,48e+7		
	2	1	3	1,54e+6		
	3	2	4	9,77e+4		
	4	3	5	1,75e-1	4,80e-3	1,749
	5	2	3	1,16e+5		
	6	1	4	1,49e+6		
2,3,4	1	1	2	2,03e+7		
	2	1	3	1,99e+6		
	3	2	4	2,09e+5		
	4	3	5	2,72e-1	5,33e-2	1,749
	5	2	3	2,12e+5		
	6	1	4	1,91e+6		

W przypadku prostych sieci wystarczy pomiar w jednym węźle aby prawidłowo zidentyfikować miejsce uszkodzenia rurociągu. Wartość funkcjonału (4.1) (wyznaczona w 1 etapie) zaznaczona zielonym kolorem jest o kilka rzędów mniejsza niż w pozostałych rurociągach.

Dla sieci o skomplikowanej strukturze (przykłady od szóstego do ósmego – załącznik 1) z powodu dużej liczby danych, zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci (etap pierwszy poszukiwania nieszczelności) została przedstawiona na rys. 4.3 – 4.12. Prawidłowo znaleziony rurociąg, w którym znajduje się fizyczne uszkodzenie oznaczony jest na tych rysunkach kółkiem w kolorze zielonym. Zła identyfikacja oznaczona jest kolorem czerwonym. Na tych rysunkach występują jeszcze kółka koloru pomarańczowego. Są to rurociągi, dla których wartość funkcjonału (4.1) zbliżona jest do wartości tego funkcjonału dla rurociągu, w którym znajduje się rzeczywiste uszkodzenie. Taka sytuacja była uwzględniona w rozważaniach zawartych w rozdziale 4.1. Etap 2 działania algorytmu dla tych przykładów zestawiony jest w tabelach 4.10 – 4.12.

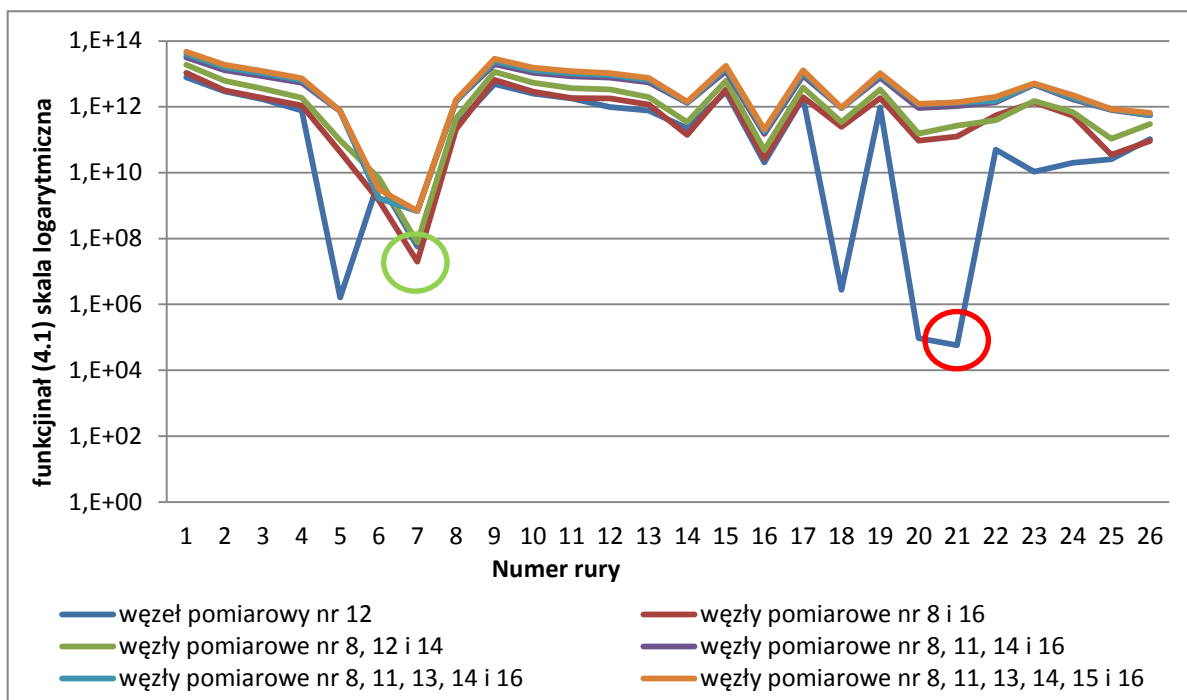
Tabela 4.9 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci;
położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 5

numery węzłów pomiarowych	nr rury	węzeł początkowy	węzeł końcowy	funkcjonał (4.1)		położenie wycieku [m]
				Etap 1	Etap 2	
5	1	1	2	8,56e+6		
	2	1	3	7,14e+6		
	3	2	6	1,66e-1	9,57e-7	0,547
	4	2	4	7,78e+6		
	5	3	5	1,37e+7		
	6	4	5	7,40e+8		
2,5	1	1	2	1,42e+7		
	2	1	3	2,80e+7		
	3	2	6	2,81e-1	1,96e-1	0,550
	4	2	4	8,02e+6		
	5	3	5	1,66e+7		
	6	4	5	7,40e+8		
2,3,5	1	1	2	2,55e+7		
	2	1	3	2,94e+7		
	3	2	6	4,83e-1	2,09e-1	0,550
	4	2	4	8,25e+6		
	5	3	5	1,94e+7		
	6	4	5	7,41e+8		
2,3,4,5	1	1	2	3,35e+7		
	2	1	3	3,86e+7		
	3	2	6	6,48e-1	4,05e-1	0,550
	4	2	4	2,12e+7		
	5	3	5	2,68e+7		
	6	4	5	1,84e+9		

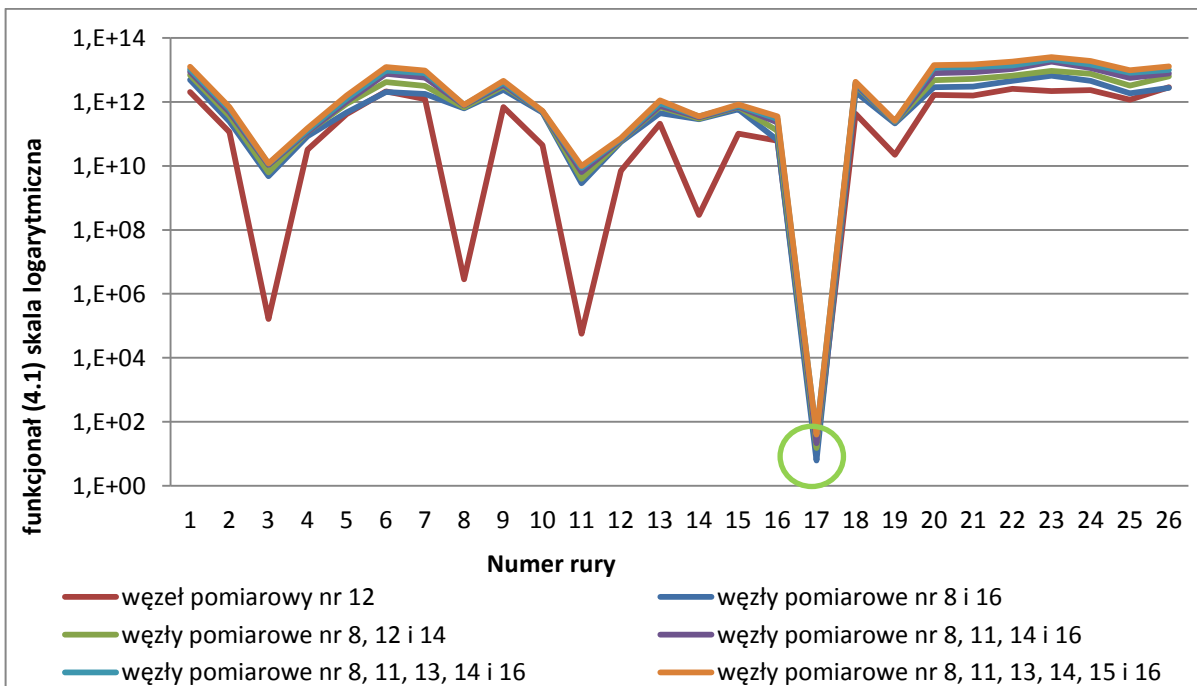
Dla przykładu nr 6 zostały wygenerowane uszkodzenia w dwóch rurociągach o numerach 7 i 17, w których losowo wybrano miejsce uszkodzenia. Identyfikacja tego miejsca nastąpiła przez porównanie w funkcjonał (4.1) ciśnienia referencyjnego w węzłach pomiarowych (warianty obliczeniowe z węzłami pomiarowymi od 1 do 6) z wartościami ciśnień obliczonych podczas poszukiwania przez algorytm miejsca nieszczelności sieci. Na rysunku 4.3 pokazana jest prawidłowa identyfikacja uszkodzonego rurociągu dla wariantów obliczeń z węzłami pomiarowymi od 2 do 6. Dla 1 węzła pomiarowego algorytm źle zidentyfikował miejsce uszkodzenia.

Dla złożonych sieci wodociągowych jeden węzeł pomiarowy to za mało, a prawidłową identyfikację, jak pokazana na rys. 4.4 można uznać za przypadkową. Dla tego przykładu

wyniki obliczeń w drugim etapie działania algorytmu we wszystkich wariantach obliczeń (za wyjątkiem wariantu z jednym węzłem pomiarowym) prawidłowo wskazują miejsce wycieku.



Rys. 4.3. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 7; przykład 6

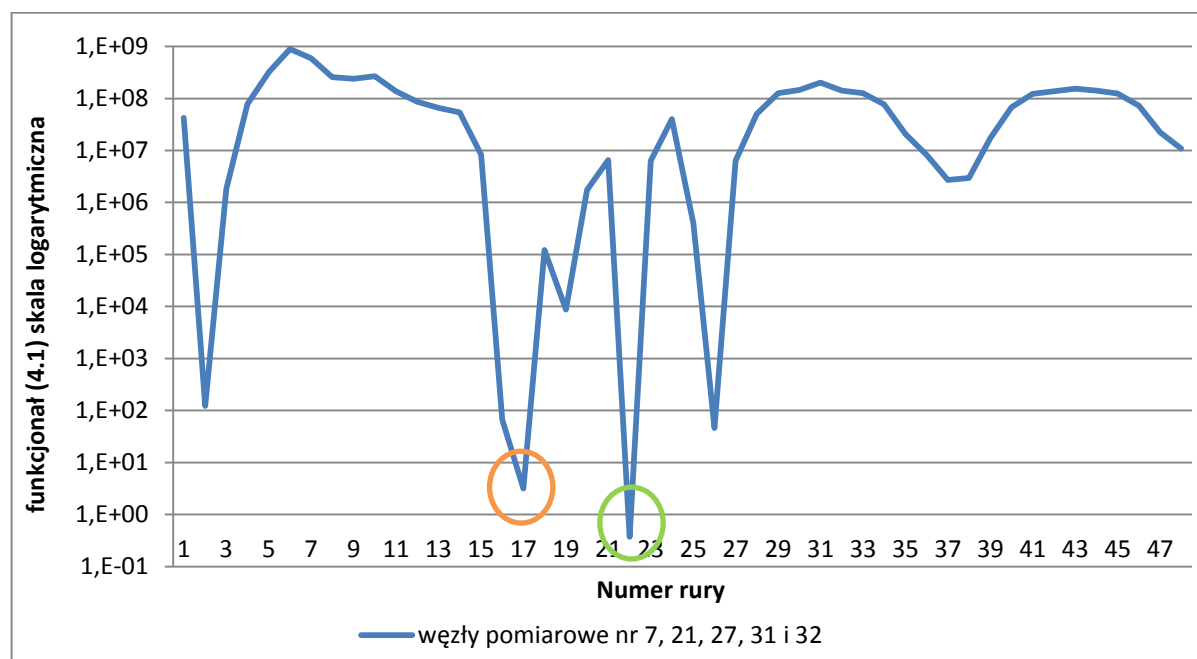


Rys. 4.4. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 17; przykład 6

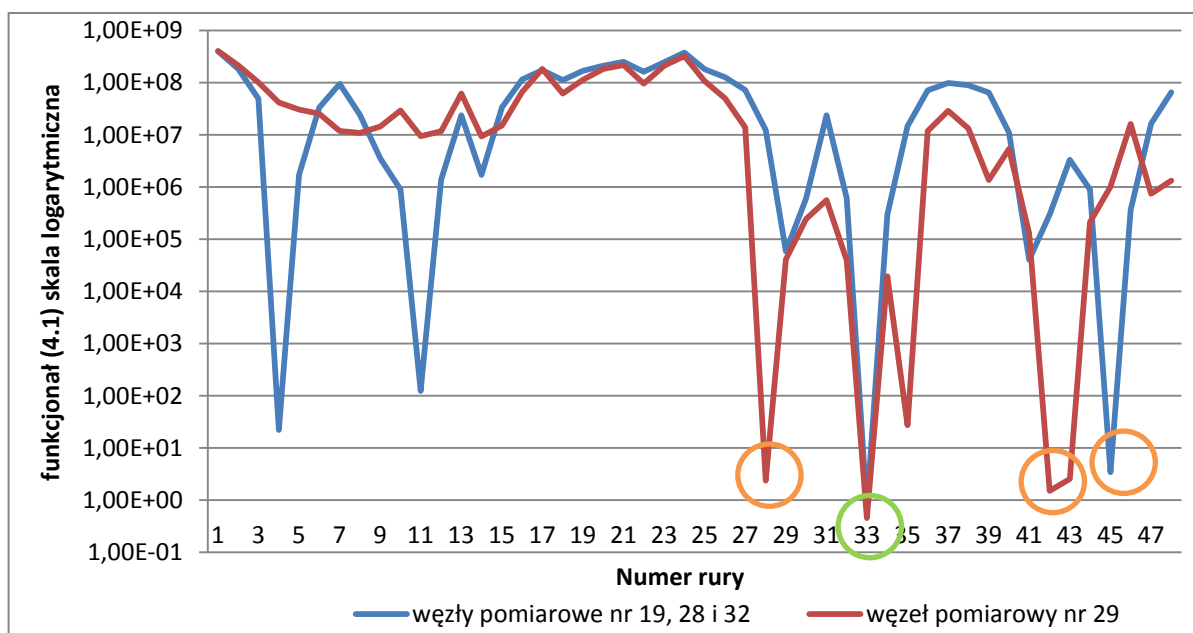
Tabela 4.10 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 6

Numer uszkodzonej rury	liczba węzłów pomiarowych					
	1	2	3	4	5	6
7	196,983 (21)	22,86	22,84	22,86	22,86	22,86
17	320,03	320,04	320,04	320,04	320,04	320,04

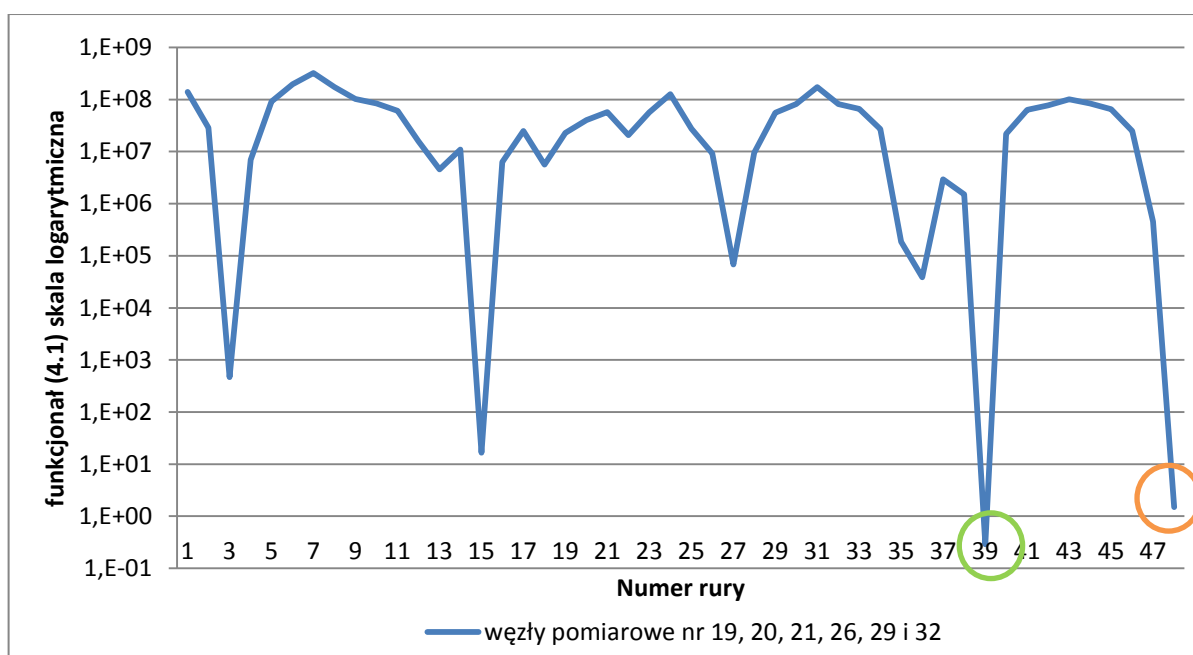
Podobnie jest w przypadku obliczeń dla przykładu 7 i 8. Są to bardziej skomplikowane sieci, dlatego na niektórych rysunkach pojawiają się węzły oznaczone pomarańczowymi kółkami. Widać, że w procesie przeszukiwania sieci istnieje ryzyko złego wytypowania rurociągu, w którym jest rzeczywiste uszkodzenie. Ryzyko to można zmniejszyć ustawiając mniejszą wartość parametru ε_r w algorytmie 4.2. Jednak powoduje to wydłużenie czasu działania tego algorytmu. Z rysunków 4.3 – 4.12 wynika, że wartość tego parametru została wyznaczona prawidłowo. Kółka o kolorze pomarańczowym oznaczają rurociągi, w których wartość funkcjonału (4.1) jest o rząd wielkości większa od wartości funkcjonału oznaczonego kolorem zielonym.



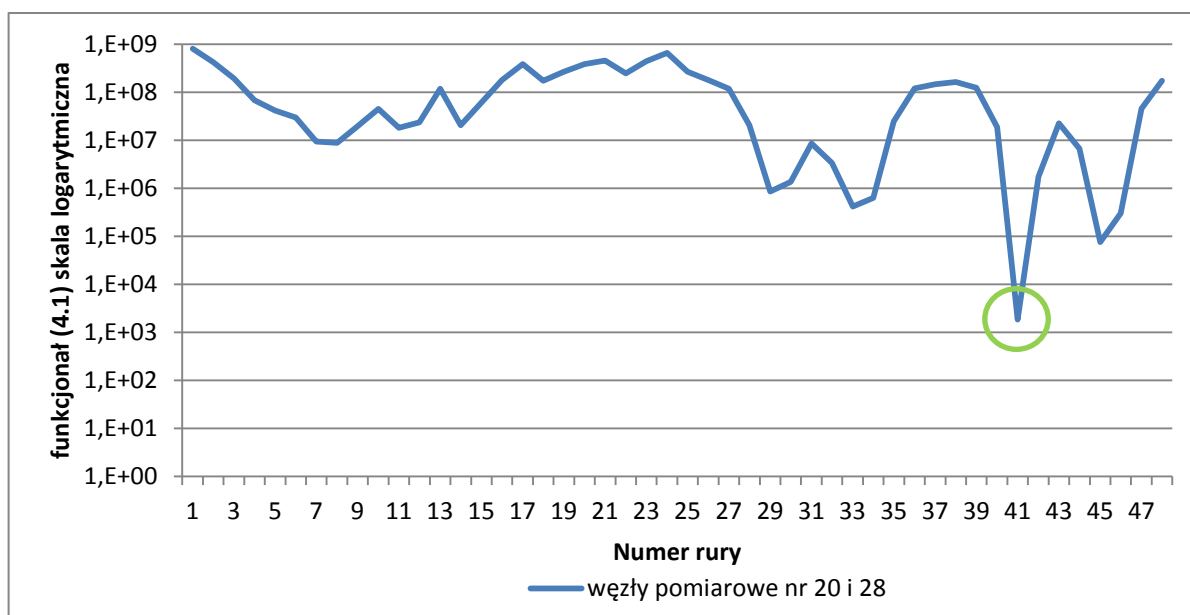
Rys. 4.5. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 22; przykład 7



Rys. 4.6 Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 33; przykład 7



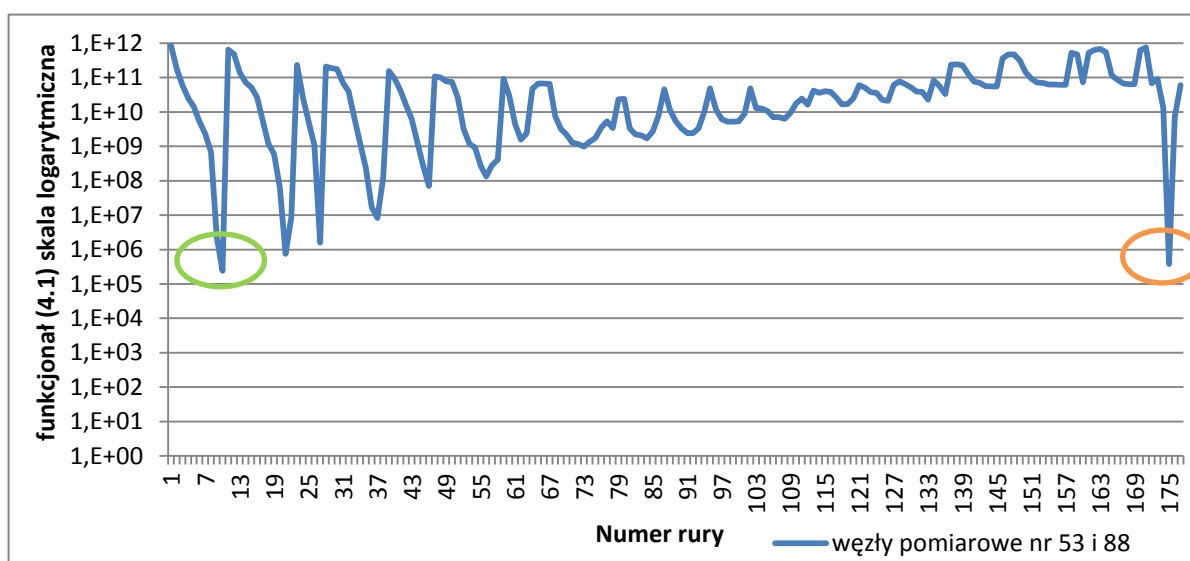
Rys. 4.7. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 39; przykład 7



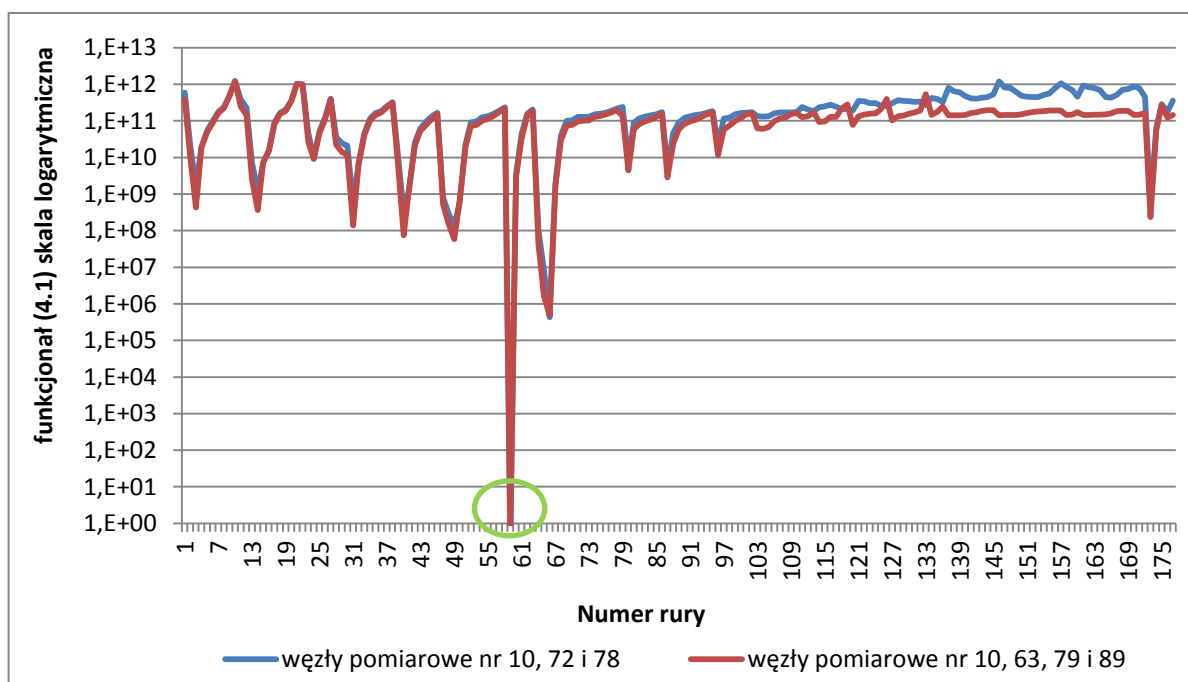
Rys. 4.8. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 41; przykład 7

Tabela 4.11 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 7

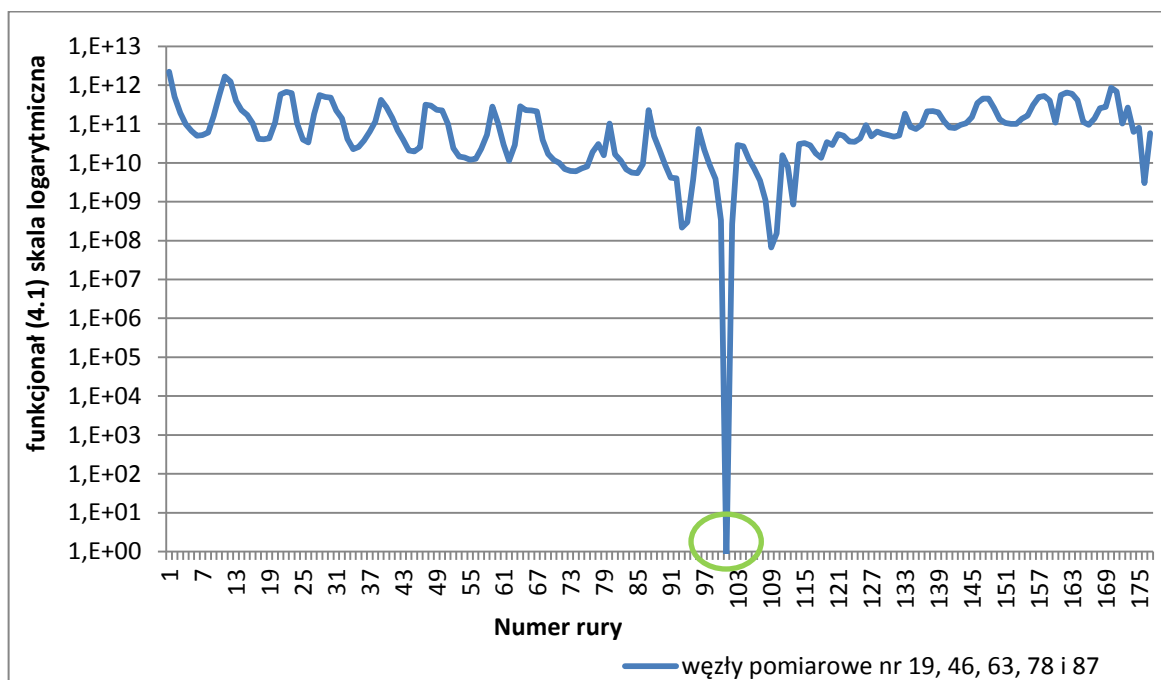
Numer uszkodzonej rury	liczba węzłów pomiarowych					
	1	2	3	4	5	6
33	8,161		8,286			
41		1,506				
39				52,372		52,372
22					25,792	



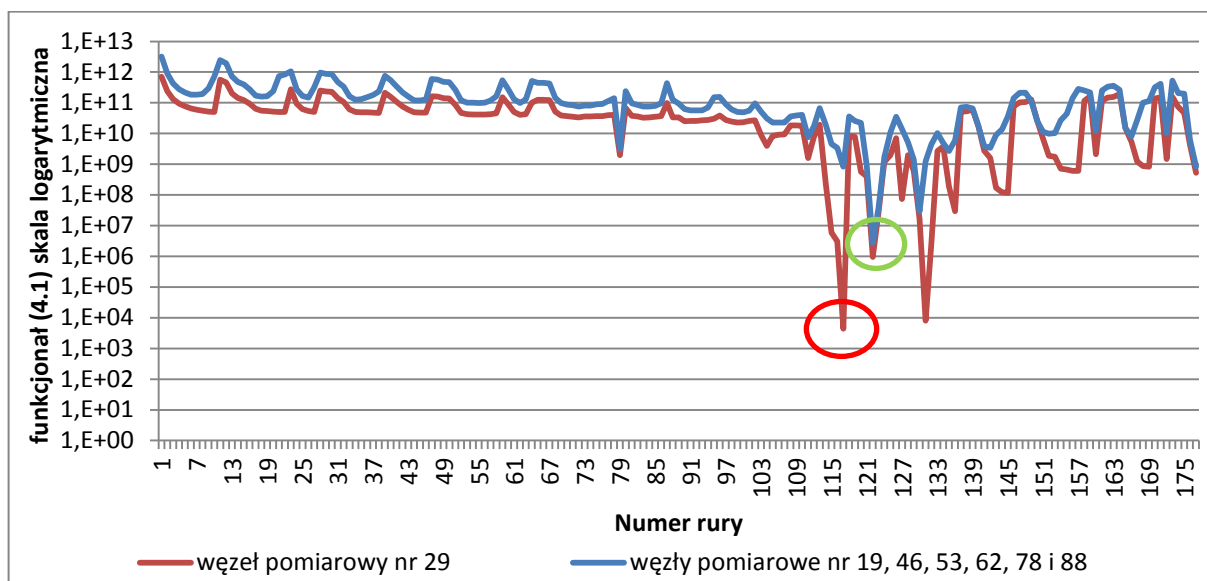
Rys. 4.9. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 10; przykład 8



Rys. 4.10. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 59; przykład 8



Rys. 4.11. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 101; przykład 8



Rys. 4.12. Zależność minimum funkcjonu (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 122; przykład 8

Tabela 4.12 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 7

Numer uszkodzonej rury	liczba węzłów pomiarowych					
	1	2	3	4	5	6
122	15,097 (117)					16,575
10		0,430				
59			5,526	6,418		
101					10,583	

4.4. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono trzy metody poszukiwania nieszczelności oraz dokonano wyboru jednej z nich. Przedstawiony został algorytm znajdowania nieszczelności w sieci wodociągowej składający się z dwóch etapów: pierwszy identyfikujący numer rury w sieci, w której znajduje się uszkodzenie oraz etap drugi znajdujący dokładną lokalizację miejsca wycieku. Na bazie tego algorytm został opracowany moduł programu autorskiego „Sieć” służący do lokalizacji nieszczelności sieci wodociągowej.

Na bazie wybranych do testowania programu przykładów, zostały wykonane symulacje numeryczne lokalizacji wycieku. Wyniki obliczeń wskazują na bezbłędną lokalizację miejsca wycieku we wszystkich wariantach obliczeń. Wyjątkiem jest zastosowanie pojedynczego węzła pomiarowego w sieciach o złożonej strukturze.

Opisany w rozdziale algorytm i obliczenia numeryczne stanowią realizację trzeciego celu szczegółowego pracy.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiona została metoda lokalizacji nieszczelności w sieci wodociągowej na podstawie zmian ciśnienia w wybranych węzłach sieci. Opracowanie tej metody zostało podzielone na 3 etapy.

Etap 1 został opisany w rozdziale drugim pracy, to wyznaczenie rozkładów prędkości w poszczególnych rurociągach oraz ciśnień w węzłach sieci wodociągowej. Głównym problemem jaki był do rozwiązania polegał na ustaleniu rozkładu początkowego prędkości na podstawie tylko bilansu strumieni masy. Ta informacja jest niepełna do wyznaczenia prędkości w sieci, ale równania mają liniowy charakter. Spośród wielu prób wyznaczenia rozkładu początkowego, najskuteczniejszy okazał się algorytm svd (ang. Singular Value Decomposition). Przybliżenie początkowe rozkładu prędkości w sieci jest o tyle istotne, ponieważ pełny układ równań, który służy do wyznaczenia prędkości w rurociągach sieci jest nieliniowy. Przeprowadzona została również szczegółowa analiza równań służąca wyborowi wzoru do obliczania współczynnika strat liniowych. Wyniki uzyskane za pomocą programu autorskiego, napisanego w języku C++ zostały porównane z wynikami obliczeń z dwóch różnych programów.

Etap 2 badań przedstawiony jest w trzecim rozdziale pracy. Etap ten dotyczy analizy wpływu położenia nieszczelności w sieci na rozkłady ciśnień w węzłach sieci. Na tej podstawie sformułowane zostało kryterium wyboru węzłów sieci, w których mierzone jest ciśnienie potrzebne do identyfikacji miejsca wycieku z sieci wodociągowej. Zaproponowany algorytm wyboru tych węzłów w sieci został przetestowany na prostych i złożonych przykładach sieci wodociągowych. Na podstawie analizy zmiennego położenia uszkodzenia w sieci wodociągowej udało się wytypować konfigurację od 1 do 6 węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie. Z punktu widzenia zaproponowanego kryterium jest to najbardziej czuła na uszkodzenia w dowolnym miejscu sieci konfiguracja węzłów. Pozytywna weryfikacja poprawności przyjętego kryterium została dokonana na trzecim etapie badań, ponieważ do poszukiwania nieszczelności w sieci zostały wygenerowane wartości ciśnień w węzłach wskazanych przez analizę dokonaną na tym etapie.

Etap 3 badań przedstawiony jest w czwartym rozdziale pracy. Na tym etapie opracowany został algorytm do wyszukiwania nieszczelności w sieci na podstawie znanych ciśnień w wybranych węzłach sieci. Algorytm ten składa się z dwóch etapów: z przeszukiwania całej sieci z dokładnością potrzebną do wytypowania rury, w której znajduje się uszkodzenie i drugiego etapu który pozwala na dokładne znalezienie miejsca wycieku. Przedstawione zostały obliczenia numeryczne na bazie tego algorytmu dla przykładów sieci

wodociągowej. Ciśnienia w wybranych węzłach sieci zostały wygenerowane z obliczeń wykonanych w etapie drugim. Rurociąg, w którym zlokalizowane jest uszkodzenie został tak wybrany, aby dla analizowanego zestawu węzłów pomiarowych znalezienie tego rurociągu w sieci było najtrudniejsze. Miejsce uszkodzenia w tym rurociągu zostało wybrane losowo. Z przeprowadzonych badań wynika, że we wszystkich wariantach węzłów pomiarowych i wybranych lokalizacjach uszkodzenia, program bezbłędnie lokalizował miejsce wycieku.

Podsumowując, w pracy udało się rozszerzyć wiedzę związaną z lokalizacją nieszczelności w sieciach wodociągowych. Algorytmy przedstawione w pracy mogą być w przyszłości rozwijane. Poniżej przedstawiono kilka propozycji:

- szersza analiza pod kątem wielkości rozbudowania sieci oraz jej złożoności;
- rozbudowa programu autorskiego o możliwość analizowania sieci pod kątem poszukiwania większej liczby nieszczelności w danej sieci niż jedna;
- zweryfikowanie metody badawczej na obiekcie rzeczywistym;
- wprowadzenie zagadnień optymalizacyjnych w poszukiwaniu węzłów pomiarowych (ich liczba oraz umiejscowienie w sieci).

LITERATURA

- [1] Asker M., Turgut O. E., Coban M. T., *A review of non-iterative friction factor correlation for the calculation of pressure drop in pipes*, Bitlis Eren University, Journal of Science and Technology, ISSN-2146-7706, vol. 4, no. 1, pp. 1-8, 2014
- [2] Avci A, Karagoz I. A new explicit equation for friction factor in smooth and rough pipes. Journal of Fluid Engineering Vol. 131 No. 6, ASME 20093
- [3] Barr, D.I.H., *Solutions of the Colebrook-White Function for Resistance to Uniform Turbulent Flow*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 71, 529-536, 1981
- [4] Buzelli D., *Calculating friction in one step*, Mach Des Vol 80 No 12, 2008 s. 54–55
- [5] Cielak J., Małecka I., Małecki Z. J., *Dawne wodociągi w Kaliszu*, Zeszyty Naukowe Inżynieria lądowa i wodna w kształtowaniu środowiska nr4, s. 30 – 38, Kalisz, styczeń 2012
- [6] Coban T. M., *Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-White equation for the calculation of pressure drop in pipes*, Jurnal of Naval Science and Engineering, vol. 8, No. 1, pp.1-13, 2012
- [7] Colebrook C. F., *Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws*, Journal of the Institution of Civil Engineers, Paper No. 5204, London, 1939
- [8] Freeman J. R., *Experiments upon the flow of water in pipes and pipe fittings*, New Hampshire, June 28 to October 22 1892, published by The American Society of Mechanical Engineering, New York, 1941
- [9] Ghanbari A., Farshad F. F., Rieke H. H., *Newly developed friction factor correlation for pipe flow and flow assurance*, Journal of Chemical Engineering and Materials Science, Vol. 2, pp. 83-86, June 2011
- [10] Goldsmith H., Carter D., *Financing the evolution of London's water services:1582 to 1904*, Milan European Economy Workshops, Working papier n. 2015-02, Gennaio, 2015
- [11] Grabarczyk Cz., *Przepływy cieczy w przewodach. Metody Obliczeniowe*, Envirotech, Poznań 1997, ISBN 83-901701-4-0
- [12] Jacangelo J. G., Trussell R. R., *International report water and wastewater disinfection: trends, issues and practices*, Water science and technology: water supply vol 2 no 3 s. 147-157, IWA Publishing, London, 2002, ISSN 1606-9749
- [13] Jain AK. Accurate explicit equations for friction factor. Journal of Hydraulic Division Vol 102 No. 5, ASCE, 1976 s. 674–677

- [14] Kurnatowski J., *Zastosowanie wzoru colebrooka-Whitea do obliczeń przepływów w sieci dolnej Odry*, II Konferencja Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki, Świnoujście, 2005
- [15] Lipovka A. Y., Lipovka Y. L., *Determining hydraulic friction factor for pipeline systems*, Jurnal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, vol 1, pp. 62-68, July 2014
- [16] Mohsenabadi S. K., Biglari M. R. , Moharrampour M., *Comparison of Explicit Relations of Darcy Friction Measurement with Colebrook-White Equation*, Applied mathematics in Engineering, Management and Technology 2 (4) 2014:570-578, ISSN 2322-5572;
- [17] Moody L. F., *Friction factor for pipe flow*, ASME Trans. 66, 671-684, November 1944
- [18] Nikuradse J., *Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren*, Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Forschungsheft 356, September/Oktober 1932
- [19] Papaevangelou G., Evangelides C., Tzimopoulos C., *A new explicit relation for friction coefficient f in the Darcy - Weisbach equation*, Protection and Restoration of the Environment, Korfu 05-09 czerwiec 2010;
- [20] Roberts G., *Chelsea to Cairo – 'Taylor-made' water trough eleven reigns and six continents*, Thomas Telford, 2006, ISBN 07277-3411-3
- [21] Romeo E, Royo C, Monzon A., *Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes*. Chemistry Engineering Journal Vol 86 No. 3, 2002 s. 369–374
- [22] Semkło Ł., Ciałkowski M., Krzyślak P.: *"Analiza rozkładu prędkości i ciśnienia w sieci wodociągowej"*, Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, odnawialne źródła energii, pod redakcją Wiesława Zimy i Dawida Talera; Kraków 2013; ISBN 978-83-7242-721-2
- [23] Semkło Ł., Nowak A., *„Analiza spadku ciśnienia wywołanego wyciekami na instalacji hydraulicznej”*, Zastosowanie analizy termodynamicznej do opisu zjawisk fizycznych i urządzeń energetycznych, pod redakcją Mariusza Szewczyka; Rzeszów 2014; ISBN 978-83-7199-951-8
- [24] Semkło Ł., Ciałkowski M., Krzyślak P., *The theory of graphs as a potencial tool for modeling of combined heat and power plant network elements*”, Journal of Mechanic and Transport Engineering, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Vol. 66, no. 4, s. 57-70, 2014
- [25] Semkło Łukasz, Krzyślak Piotr, Ciałkowski Michał: *Modeling of the CHP(Combined Heat and Power) plant network elements, 26th Turbomachinery Workshop, 10-12 September 2012 Dresden*
- [26] Semkło Łukasz, Ciałkowski Michał, Krzyślak Piotr: *Analys of distribution of velocity and pressure in the water supply, 27th Turbomachinery Workshop, 4-6 September 2013 Szczyrk*

- [27] Semkło Ł., Ciałkowski M., Krzyślak P.- *Analiza rozkładu ciśnień i prędkości w sieci wodociągowej*, III Konferencja Naukowo-Techniczna Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne, Kraków, 2013
- [28] Semkło Ł., Nowak A., *Analiza spadku ciśnienia wywołanego wyciekami na instalacji hydraulicznej*, XXII Zjazd Termodynamików, Polańczyk 2014
- [29] Serghides, T.K., *Estimate friction factor accurately*, Chemistry Engineering Vol. 91, 1984, s. 63-64
- [30] Sonnad J. R., Goudar C. T., *Turbulent Flow Friction Factor Calculation Using a Mathematically Exact Alternative to the Colebrook-White Equation*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132(8), 2006, s. 863-867, ISSN 0733-9429
- [31] Swamee P.K., Jain A.K., *Explicit equations for pipe-flow problems*, Journal of the Hydraulics Division (ASCE), Vol 102 (5), 1976, s. 657–664;
- [32] Taler D., Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, odnawialne źródła energii, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013, ISBN 978-83-7242-721-2
- [33] Walden H., Stasiak J., *Mechanika cieczy i gazów część pierwsza*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1971
- [34] Vatankhah AR, Kouchakzadeh S., *Discussion: Exact equations of pipe flow problems, by PK Swamee & PN Rathie*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 47, No. 4, s. 537-538, IAHR 2009
- [35] <http://www.ancient-origins.net/ancient-places-asia/qanat-firaun-most-spectacular-underground-aqueduct-ancient-world-001557> (z dnia 14.10.2015)
- [36] <http://biuro-inzynierskie.com/lokalizacja.html> (z dnia 17.11.2011)
- [37] <http://www.britannica.com/biography/Sextus-Julius-Frontinus#ref2558> (z dnia 20.09. 2015)
- [38] <http://www.britannica.com/topic/De-aquis-urbis-Romae> (z dnia 20.09.2015)
- [39] [http://www.ekologia.pl/srodowisko/specjalne/woda-zrodlo-zycia-rzecz-o-dostarczaniu - wody-do-miast-w-europie-i-polsce-w-dawnych-wiekach,15262.html](http://www.ekologia.pl/srodowisko/specjalne/woda-zrodlo-zycia-rzecz-o-dostarczaniu-wody-do-miast-w-europie-i-polsce-w-dawnych-wiekach,15262.html) (z dnia 20.09. 2015)
- [40] <http://www.hydriaproject.net/en/the-water-management-in-the-region-of-tunis-through-history/water-works-ancient-carthage/> (z dnia 14.10.2015)
- [41] <http://www.imperiumromanum.edu.pl/kultura/architektura-rzymska/budowle-rzymskie/akwedukty-rzymskie/> (z dnia 14.10.2015)
- [42] <http://www.infraredimagingsservices.com/commercial> (z dnia 17.11.2011)
- [43] <http://www.itisim.com/simulationx/> (z dnia 23.11.2014)
- [44] <http://www.lenntech.com/library/ozone/history/ozone-history.htm> (z dnia 20.09.2015)
- [45] <http://www.multipino.pl/offer609450.html> (z dnia 18.11.2011)
- [46] <https://www.nord-stream.com/press-info/images/intelligent-pig-3488/?page=3>

(z dnia 14.10.2015)

- [47] http://pipelinesinternational.com/news/advertise_on_the_pipelines_international_pipeline_pigging_poster/56374 (z dnia 17.11.2015)
- [48] https://pl.wikipedia.org/wiki/Atmosferyczny_silnik_parowy (z dnia 20.09.2015r.)
- [49] <http://podroze.wm.pl/76654,Frombork-to-nie-Kanal-Kopernika.html#axzz3oLUdW3j5> (z dnia 20.09.2015)
- [50] <http://www.slideshare.net/alfonbambino/rome-water-supply> (z dnia 14.10.2015)
- [51] <http://www.yokogawa.com/solution/hse/solution05.htm> (z dnia 18.11.2011)
- [52] <http://3d-cad.cba.pl/wp-content/uploads/2011/05/Silnik-Thomasa-Newcomena.jpg> (z dnia 14.10.2015)

Spis Rysunków

Rys. 1.1. Akwedukt Pont du Gard [29].....	6
Rys. 1.2. Oryginalne rzymskie rurociągi z widocznym szwem doprowadzające wodę do rzymskich łaźni w Bath, Wielka Brytania [18].....	7
Rys. 1.3. Rury kamienne połączone z akweduktem w miejscowości Malaga [31]	7
Rys. 1.4. Schemat sieci wodociągowej w miejscowości Gadara [30]	8
Rys. 1.5. Atmosferyczna maszyna parowa Newcomena [32].....	9
Rys. 1.6. Obraz z kamery termowizyjnej rurociągu podziemnego z wyciekami [33]	10
Rys. 1.7. System akustyczny do pomiaru nieszczelności [34].....	11
Rys. 1.7. Detektor gazu [35]	12
Rys. 1.8. Zamocowania przewodu na rurociągu [36]	12
Rys. 1.9. Skrobak inteligentny wykorzystywany do oczyszczania instalacji Nord-Stream [37]	13
Rys. 1.10. Różne rodzaje skrobaków w instalacji [38].....	14
Rys. 2.1. Fragment sieci wodociągowej.....	16
Rys. 2.2. Elementarna sieć wodociągowa	18
Rys. 2.3. Elementarna sieć z dodatkowym węzłem sieci	18
Rys. 2.4. Elementarna sieć z dodatkowym elementem liniowym sieci	19
Rys. 2.5. Elementarna sieć z dodatkowym oczkiem sieci	19
Rys. 2.6. Zestawienie krzywych wykreślonych na podstawie wzorów z tabeli 2.1 uszeregowanych w grupach	24
Rys. 2.7. Zależność $\lambda(Re)$ wyznaczona ze wzorów z grupy D	24
Rys. 2.8. Elementarna sieć wodociągowa	30
Rys. 2.9. Schemat ogólny programu komputerowego do obliczeń przepływowych	32
Rys. 2.10. Nowoczesne systemy wspierania przemysłu produkcyjnego, przemysłu wydobywczego, systemów bezpieczeństwa oraz instalacji przybrzeżnych do transport gazu i ropy [17].....	33
Rys. 2.11. Schemat projektowy dla instalacji wydobywczej [17].....	34
Rys. 2.12. Przykład modelowania przenośnika [17]	34
Rys. 2.13. Modelowanie zjawisk fizycznych w 3D [17].....	35
Rys. 2.14. Sieć zbudowana z 3 węzłów i 3 łuków	36
Rys. 2.15. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 1	37
Rys. 2.17. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Sieć z pozostałymi programami; przykład 2	38

Rys. 2.18. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 2	38
Rys. 2.19. Sieć zbudowana z 4 węzłów i 5 łuków	39
Rys. 2.20. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Sieć a pozostałymi programami; przykład 3.....	40
Rys. 2.21. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 3	40
Rys. 2.23. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Sieć a pozostałymi programami; przykład 4.....	41
Rys. 2.24. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 4	42
Rys. 2.26. Różnice pomiędzy prędkościami w rurociągach wyliczonymi przez program Sieć a pozostałymi programami; przykład 5.....	43
Rys. 2.27. Różnice w spadkach ciśnienia wyliczone przez program „Sieć” z pozostałymi programami; przykład 5	44
Rys. 3.1. Element uszkodzonej sieci wodociągowej	46
Rys. 3.3. Algorytm wyboru I – węzłów pomiarowych w sieci wodociągowej	49
Rys. 3.4. Diagram zmienności ciśnienia dla wybranych dwóch punktów pomiarowych W_r i W_s	49
Rys. 3.5. Elementarna sieć wodociągowa z dodatkowym węzłem	50
Rys. 3.6. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 1	54
Rys. 3.7. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 2	55
Rys. 3.8. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 2	55
Rys. 3.9. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 3	55
Rys. 3.10. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 3	56
Rys. 3.11. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 4	56
Rys. 3.12. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 4	56
Rys. 3.13. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 5	57

Rys. 3.14. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 5	57
Rys. 3.15. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 6	57
Rys. 3.16. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 6	58
Rys. 3.17. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzłów pomiarowych; przykład 6	58
Rys. 3.18. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 7	59
Rys. 3.19. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 7	60
Rys. 3.20. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzły pomiarowe; przykład 7	61
Rys. 3.21. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 2 węzły pomiarowe; przykład 8	62
Rys. 3.22. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 4 węzły pomiarowe; przykład 8	63
Rys. 3.23. Zależność zmienności ciśnienia w wybranych węzłach sieci od lokalizacji wycieku w rurze sieci; 6 węzły pomiarowe; przykład 8	64
Rys. 4.1 Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia sieci	68
Rys. 4.2 Algorytm poszukiwania miejsca wycieku z sieci wodociągowej.....	69
Rys. 4.3. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 7; przykład 6.....	75
Rys. 4.4. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 17; przykład 6.....	75
Rys. 4.5. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 22; przykład 7	76
Rys. 4.6 Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 33; przykład 7	77
Rys. 4.7. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 39; przykład 7	77
Rys. 4.8. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 41; przykład 7	78
Rys. 4.9. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 10; przykład 8.....	78

Rys. 4.10. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 59; przykład 8.....	79
Rys. 4.11. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 101; przykład 8.....	79
Rys. 4.12. Zależność minimum funkcjonału (4.1) od lokalizacji uszkodzenia w kolejnych rurach sieci; nieszczelność sieci znajduje się w rurze nr 122; przykład 8.....	80
Rys. Z1.1. Sieć zbudowana z 16 węzłów i 26 łuków	94
Rys. Z1.2. Sieć zbudowana z 32 węzłów i 44 łuków	95
Rys. Z1.3. Sieć zbudowana z 90 węzłów i 177 łuków	96
Rys. Z2.1. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 6	97
Rys. Z2.2. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 6	97
Rys. Z2.3. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 7	100
Rys. Z2.4. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 7	101
Rys. Z2.5. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 8	105
Rys. Z2.6. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 8	106

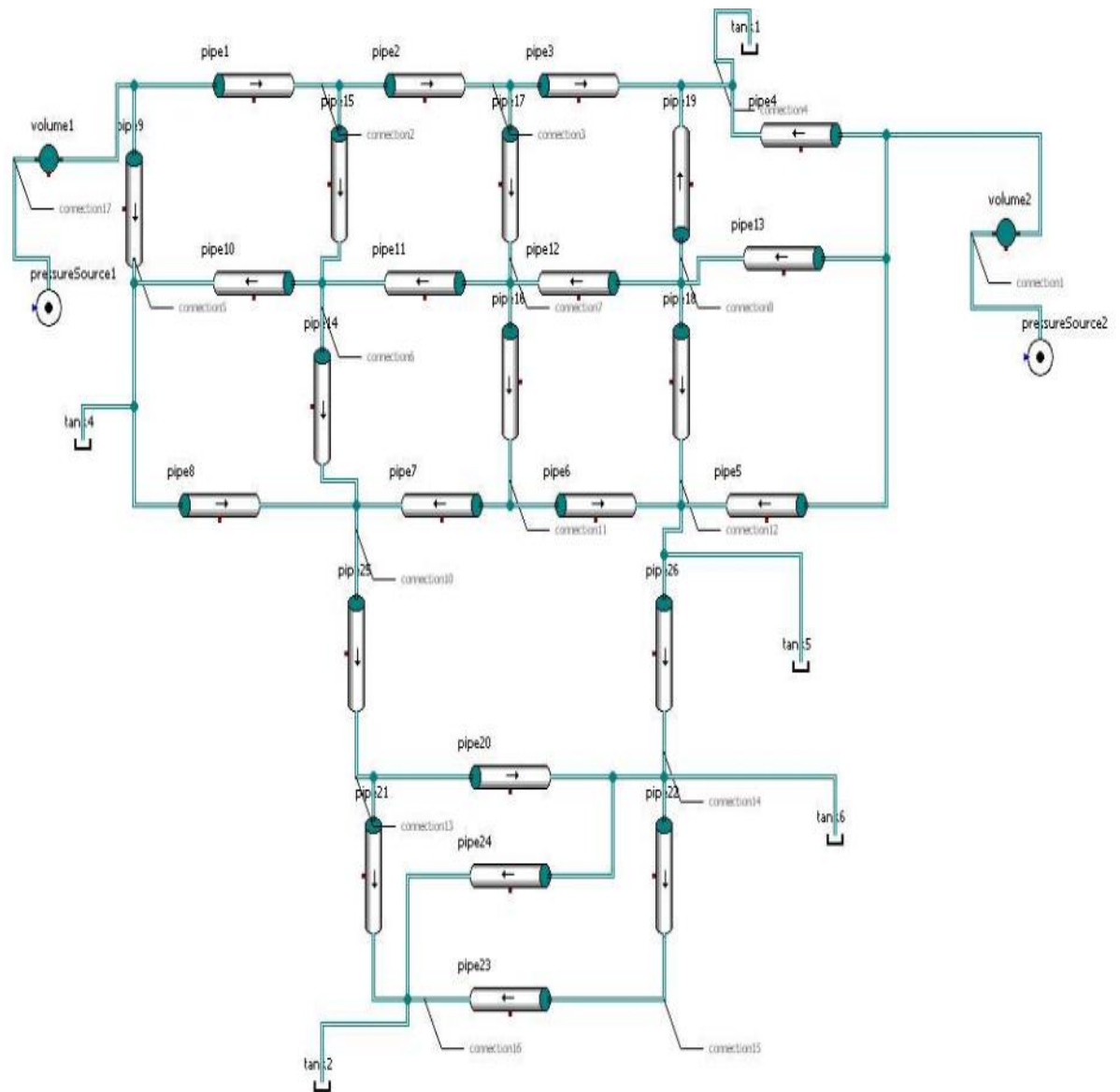
SPIS TABEL

Tabela 2.1. Zestawienie wzorów do wyznaczania współczynnika strat liniowych λ	20
Tabela 2.2. Zestawienie wartości współczynnika λ dla określonych liczb Reynoldsa	25
Tabela 2.3. Odchylenie wybranych równań od wzoru Nikuradsego i von Kármána.....	26
Tabela 2.4. Informacje o źródłach i upustach w trybie 1	28
Tabela 2.5. Informacje o rurociągach w trybie 1	28
Tabela 2.6. Informacje o oczkach sieci w trybie 1	28
Tabela 2.7. Informacje o ciśnieniu w węzłach w trybie 1	28
Tabela 2.8. Przykład informacji o źródłach i upustach w trybie 1	29
Tabela 2.9. Przykładowe parametrów rur	29
Tabela 2.10. Przykładowe parametry oczek w sieci.....	29
Tabela 2.11. Przykładowe wyniki obliczeń.....	30
Tabela 2.12. Przykładowy rozkład ciśnień w węzłach	31
Tabela 2.13. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 1	36
Tabela 2.14. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 1	37
Tabela 2.15. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 2	38
Tabela 2.16. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 2	39
Tabela 2.17. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 3	39
Tabela 2.18. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 3	40
Tabela 2.19. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 4	41
Tabela 2.20. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 4	42
Tabela 2.21. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 5	43
Tabela 2.22. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 5	43
Tabela 3.1. Informacje o źródłach i upustach w trybie 2	50
Tabela 3.2. Informacje o źródłach i upustach z dodatkowym węzłem	51
Tabela 3.3. Informacje o rurociągach z dodatkowym węzłem	51
Tabela 3.4. Informacje o oczkach sieci z dodatkowym węzłem	51
Tabela 3.5. Rozkład prędkości [m/s] w kolejnych elementach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury	52
Tabela 3.6. Rozkład ciśnień [kPa] w kolejnych węzłach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury	52
Tabela 3.7. Spadki ciśnień [kPa] w kolejnych elementach sieci w funkcji odległości od pierwszego węzła rury	53
Tabela 3.8. Zestawienie węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie w celu identyfikacji nieszczelności sieci; numer rury, w której najtrudniej zidentyfikować uszkodzenie; przykłady 1 – 5	65

Tabela 3.9. Zestawienie węzłów, w których powinno być mierzone ciśnienie w celu identyfikacji nieszczelności sieci; numer rury, w której najtrudniej zidentyfikować uszkodzenie; przykłady 6 – 8	66
Tabela 4.1. Wybrane wartości ciśnienia z tabeli 3.6.....	69
Tabela 4.2. Wartości funkcjonałów dla różnych położzeń dodatkowego węzła	70
Tabela 4.3. Wartości prędkości w poszczególnych rurociągach.....	70
Tabela 4.4. Wartości ciśnienia w poszczególnych węzłach rozpatrywanej sieci.....	71
Tabela 4.5 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 1	71
Tabela 4.6 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 2	72
Tabela 4.7 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 3	72
Tabela 4.8 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 4	73
Tabela 4.9 Wartości funkcjonału (4.1) dla założonych nieszczelności w kolejnych rurach sieci; położenie wycieku liczone jest od węzła początkowego; przykład 5	74
Tabela 4.10 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 6	76
Tabela 4.11 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 7	78
Tabela 4.12 Odległość miejsca uszkodzenia w [m] liczona od pierwszego węzła rury; kolorem czerwonym zaznaczona jest błędna identyfikacja; przykład 7	80
Tabela Z2.1. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 6.....	98
Tabela Z2.2. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 6.....	99
Tabela Z2.3. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 7.....	102
Tabela Z2.3.cd	103
Tabela Z2.4. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 7.....	103
Tabela Z2.4.cd	104
Tabela Z2.5. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 8.....	107
Tabela Z2.6. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 8.....	111

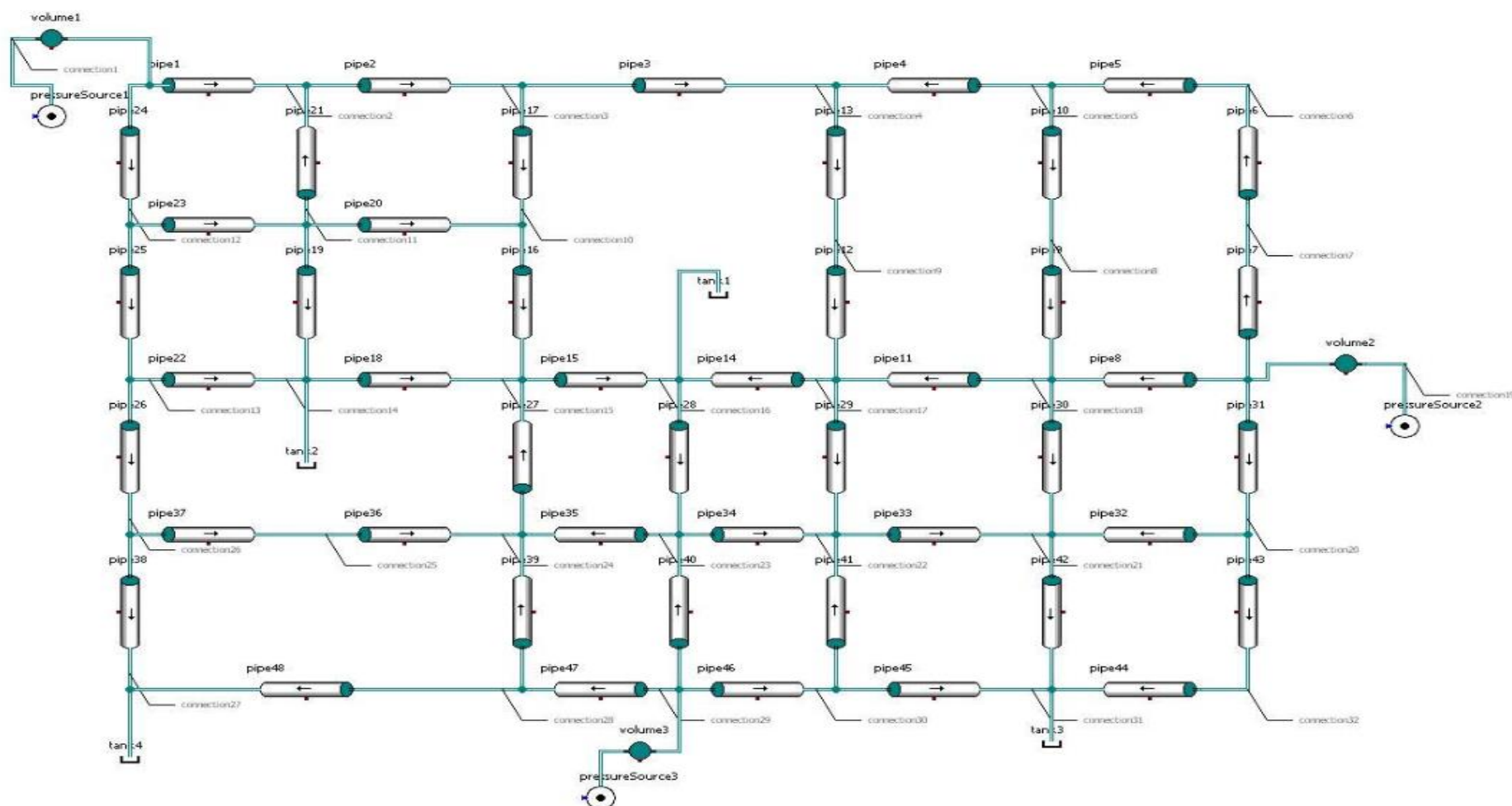
Załącznik 1. Rozbudowane przykłady sieci wodociągowej

Przykład 6



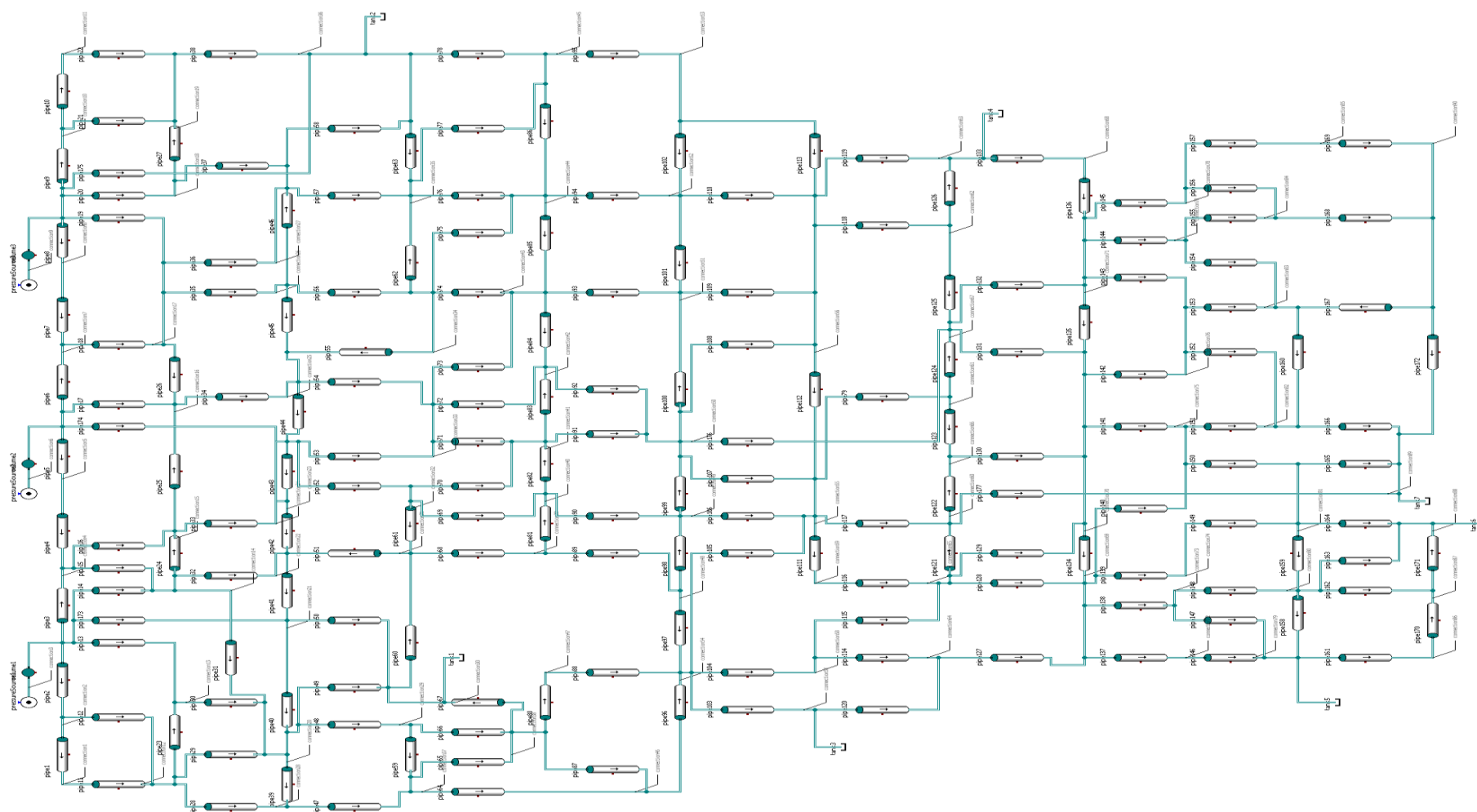
Rys. Z1.1. Sieć zbudowana z 16 węzłów i 26 łuków

Przykład 7



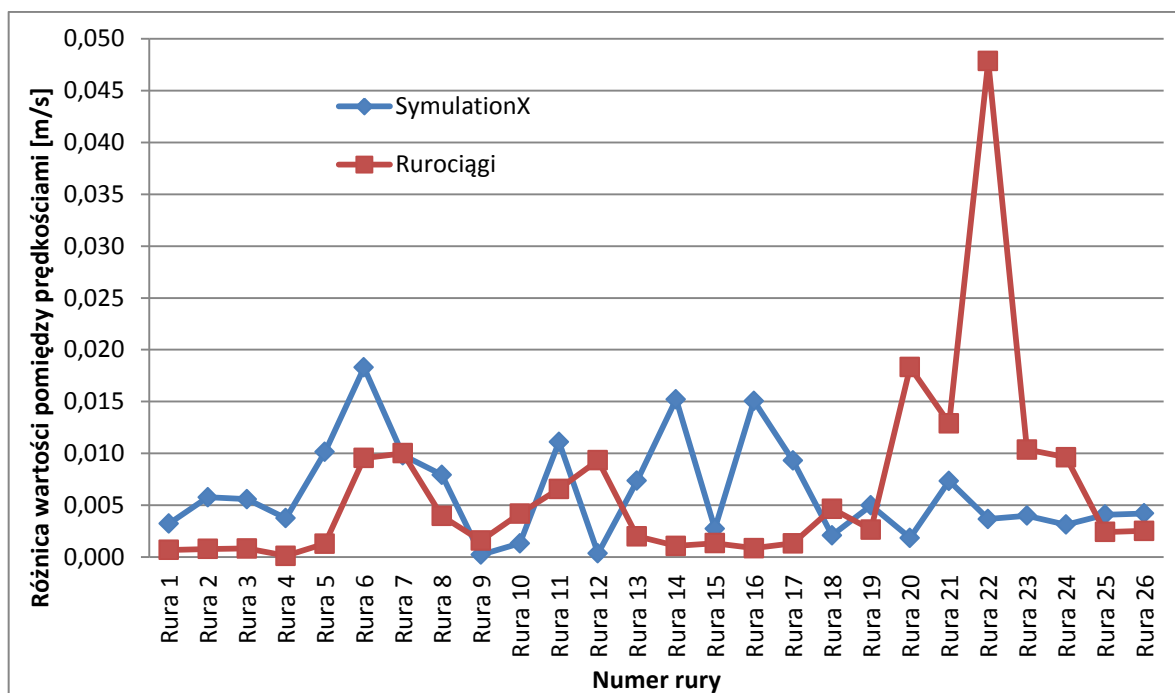
Rys. Z1.2. Sieć zbudowana z 32 węzłów i 44 łuków

Przykład 8

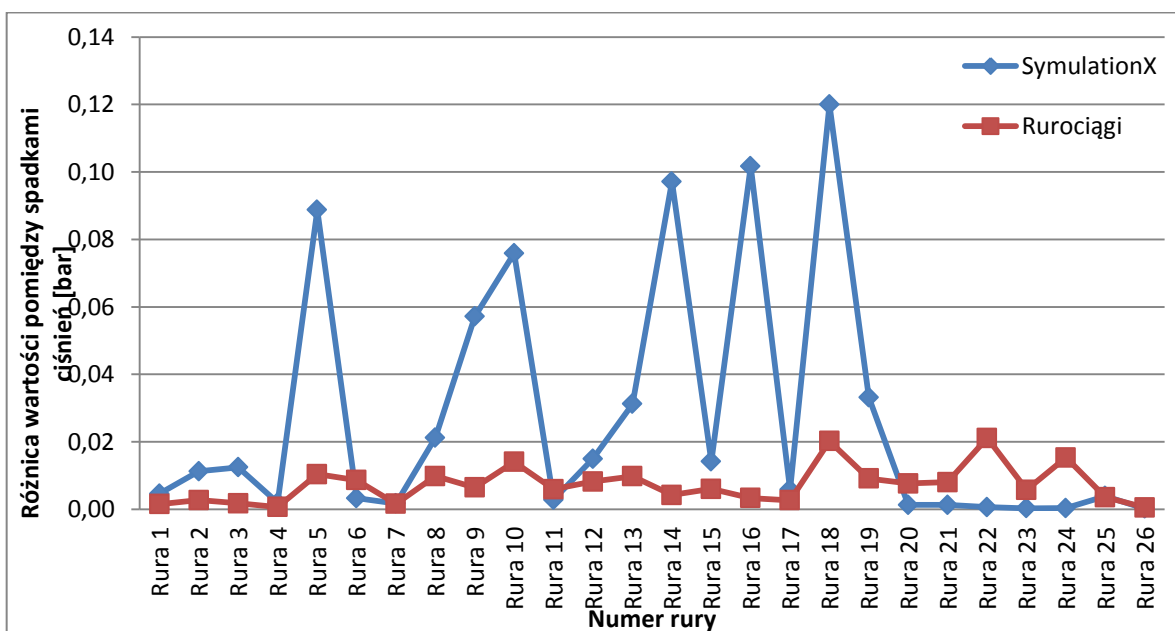


Rys. Z1.3. Sieć zbudowana z 90 węzłów i 177 łuków

Załącznik 2. Wartości prędkości w rurociągach i ciśnienia w węzłach w rozbudowanych sieciach wodociągowych



Rys. Z2.1. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 6



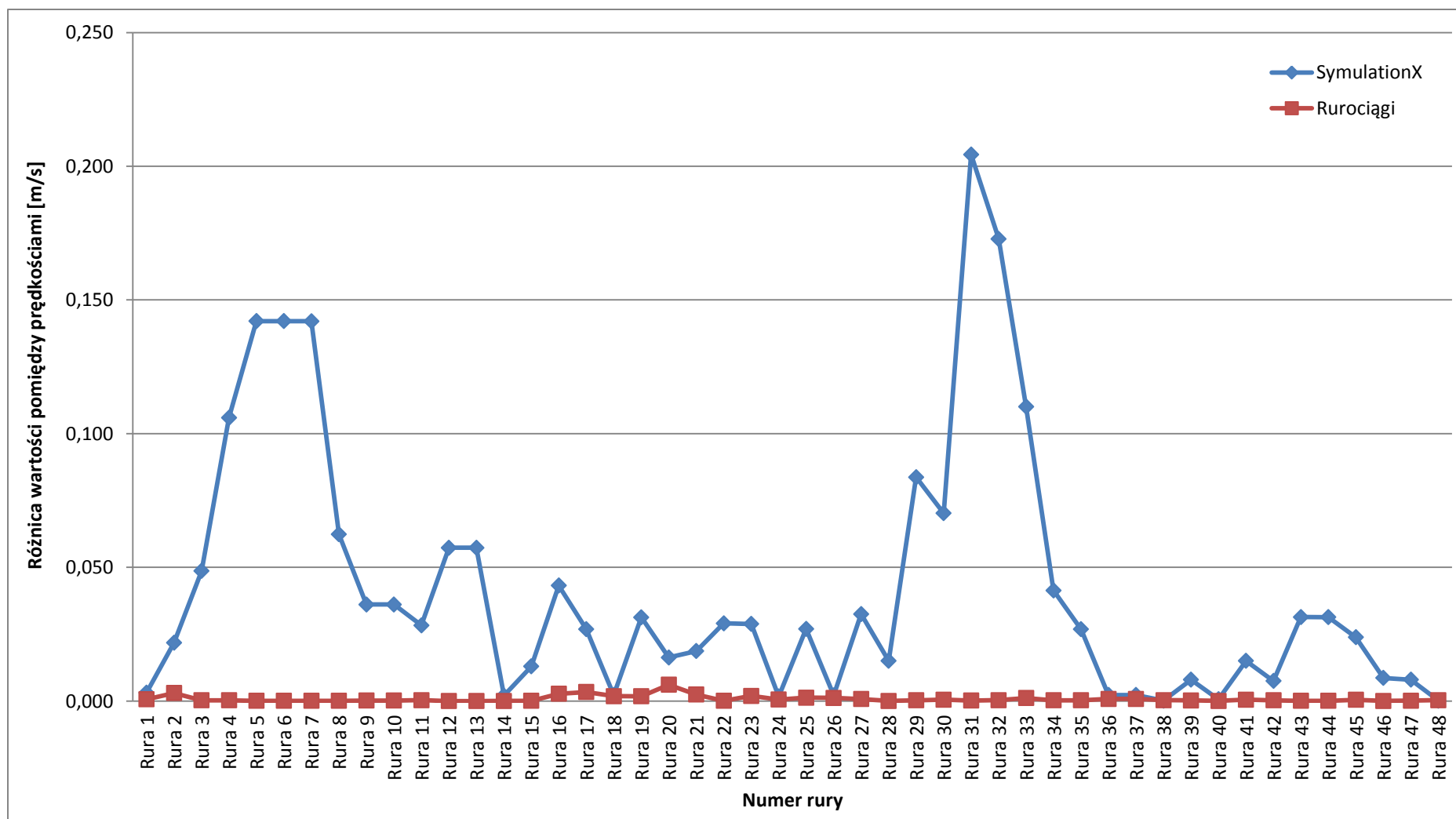
Rys. Z2.2. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 6

Tabela Z2.1. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 6

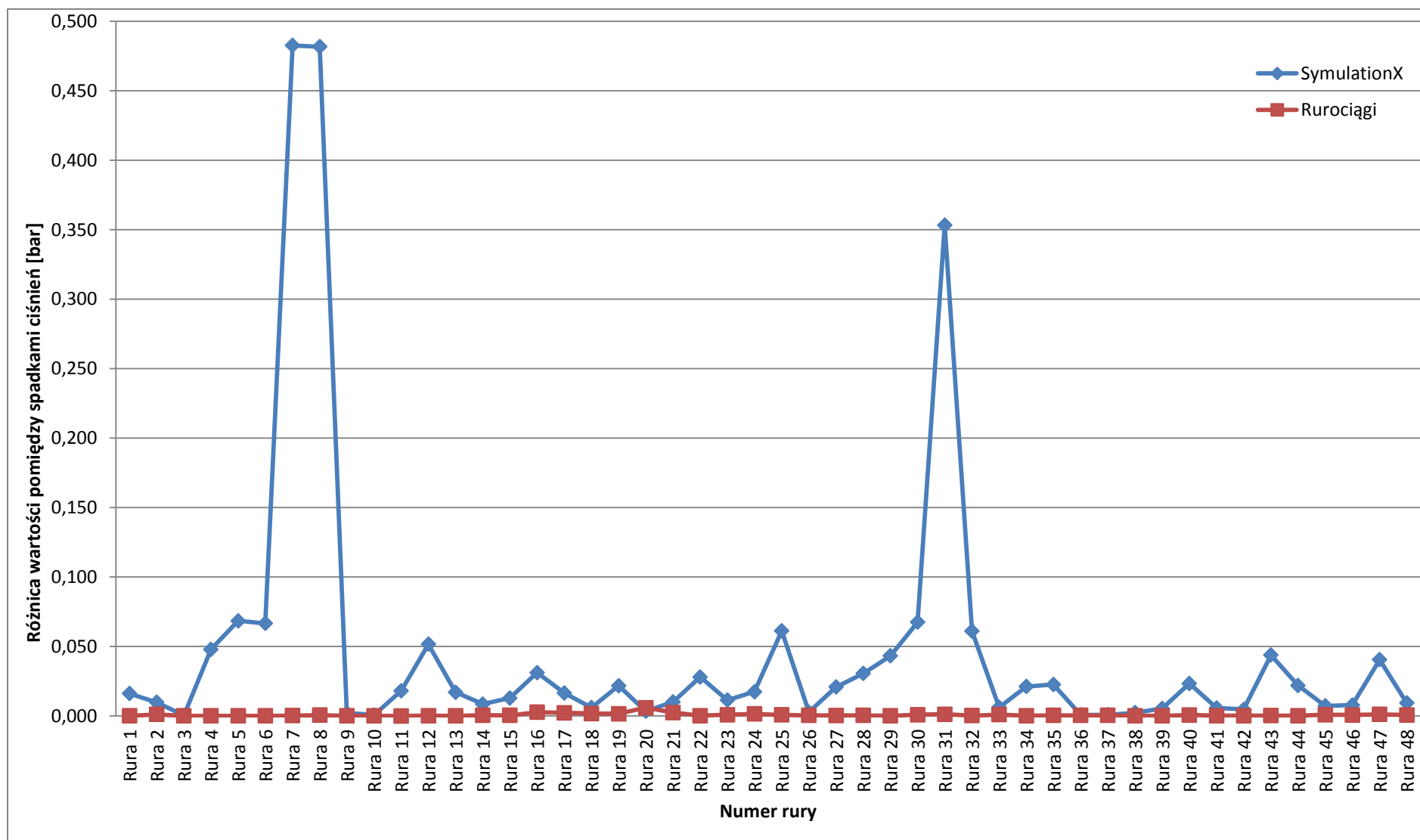
Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	0,54158	0,53767	0,53836	0,003	0,001
Rura 2	0,85231	0,84575	0,84654	0,006	0,001
Rura 3	0,49511	0,50151	0,50069	0,006	0,001
Rura 4	0,92972	0,92609	0,92597	0,004	0,000
Rura 5	0,65122	0,66008	0,66137	0,010	0,001
Rura 6	0,13331	0,12457	0,11502	0,018	0,010
Rura 7	0,02890	0,02869	0,03871	0,010	0,010
Rura 8	0,04887	0,03698	0,04094	0,008	0,004
Rura 9	1,32889	1,33070	1,32912	0,000	0,002
Rura 10	0,34265	0,34817	0,34397	0,001	0,004
Rura 11	0,01572	0,02026	0,02683	0,011	0,007
Rura 12	0,13265	0,14164	0,13231	0,000	0,009
Rura 13	0,81822	0,81285	0,81086	0,007	0,002
Rura 14	0,29290	0,27876	0,27769	0,015	0,001
Rura 15	0,65124	0,64716	0,64850	0,003	0,001
Rura 16	0,28836	0,27244	0,27329	0,015	0,001
Rura 17	0,05039	0,03978	0,04109	0,009	0,001
Rura 18	0,32024	0,31348	0,31814	0,002	0,005
Rura 19	0,36539	0,35776	0,36041	0,005	0,003
Rura 20	0,07894	0,06246	0,08078	0,002	0,018
Rura 21	0,06585	0,08610	0,07319	0,007	0,013
Rura 22	0,00000	0,05151	0,00367	0,004	0,048
Rura 23	0,00000	0,01436	0,00399	0,004	0,010
Rura 24	0,00000	0,01277	0,00313	0,003	0,010
Rura 25	0,06435	0,06602	0,06843	0,004	0,002
Rura 26	0,00000	0,00168	0,00421	0,004	0,003

Tabela Z2.2. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 6

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
Rura 1	0,69429	0,68814	0,68969	0,005	0,002
Rura 2	1,70505	1,69110	1,69380	0,011	0,003
Rura 3	0,60066	0,61484	0,61308	0,012	0,002
Rura 4	3,00000	3,00260	3,00194	0,002	0,001
Rura 5	3,00000	3,07830	3,08872	0,089	0,010
Rura 6	0,05799	0,05261	0,06128	0,003	0,009
Rura 7	0,01109	0,01102	0,00937	0,002	0,002
Rura 8	-0,04689	0,03549	0,02565	0,021	0,010
Rura 9	3,00000	3,06360	3,05714	0,057	0,006
Rura 10	0,59652	0,68649	0,67242	0,076	0,014
Rura 11	-0,01073	0,01383	0,00790	0,003	0,006
Rura 12	0,10925	0,11601	0,12421	0,015	0,008
Rura 13	2,30495	2,28350	2,27373	0,031	0,010
Rura 14	0,54963	0,65100	0,64677	0,097	0,004
Rura 15	1,70918	1,68900	1,69503	0,014	0,006
Rura 16	0,52781	0,62615	0,62950	0,102	0,003
Rura 17	0,01486	0,01173	0,00908	0,006	0,003
Rura 18	0,69505	0,79477	0,81499	0,120	0,020
Rura 19	0,69505	0,71911	0,72821	0,033	0,009
Rura 20	0,03035	0,02398	0,03164	0,001	0,008
Rura 21	0,03035	0,03967	0,03164	0,001	0,008
Rura 22	0,00000	0,02175	0,00062	0,001	0,021
Rura 23	0,00000	0,00607	0,00029	0,000	0,006
Rura 24	0,00000	0,01569	0,00033	0,000	0,015
Rura 25	0,01655	0,01690	0,02046	0,004	0,004
Rura 26	0,00000	0,00072	0,00019	0,000	0,001



Rys. Z2.3. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociągi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 7



Rys. Z2.4. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 7

Tabela Z2.3. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 7

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
1	2	3	4	5	6
Rura 1	2,27597	2,27850	2,27915	0,003	0,001
Rura 2	0,86951	0,88827	0,89131	0,022	0,003
Rura 3	0,30932	0,26038	0,26067	0,049	0,000
Rura 4	0,92146	0,81515	0,81546	0,106	0,000
Rura 5	1,17239	1,03020	1,03029	0,142	0,000
Rura 6	1,17237	1,03020	1,03029	0,142	0,000
Rura 7	1,17235	1,03020	1,03029	0,142	0,000
Rura 8	2,26564	2,20320	2,20330	0,062	0,000
Rura 9	0,25095	0,21502	0,21483	0,036	0,000
Rura 10	0,25095	0,21502	0,21483	0,036	0,000
Rura 11	1,27230	1,24360	1,24396	0,028	0,000
Rura 12	0,61216	0,55477	0,55479	0,057	0,000
Rura 13	0,61215	0,55477	0,55479	0,057	0,000
Rura 14	1,36281	1,36070	1,36078	0,002	0,000
Rura 15	0,80125	0,78838	0,78827	0,013	0,000
Rura 16	1,37816	1,33770	1,33496	0,043	0,003
Rura 17	1,17885	1,14860	1,15198	0,027	0,003
Rura 18	1,19836	1,20250	1,20064	0,002	0,002
Rura 19	1,91924	1,88610	1,88789	0,031	0,002
Rura 20	0,19928	0,18908	0,18298	0,016	0,006
Rura 21	1,40656	1,39030	1,38784	0,019	0,002
Rura 22	1,23432	1,26330	1,26339	0,029	0,000
Rura 23	0,71188	0,68495	0,68303	0,029	0,002
Rura 24	2,26052	2,25940	2,25881	0,002	0,001
Rura 25	1,54877	1,57450	1,57578	0,027	0,001
Rura 26	0,31450	0,31122	0,31239	0,002	0,001
Rura 27	0,62140	0,65319	0,65395	0,033	0,001
Rura 28	1,55814	1,57310	1,57318	0,015	0,000
Rura 29	0,52172	0,43766	0,43798	0,084	0,000
Rura 30	1,24439	1,17470	1,17416	0,070	0,001
Rura 31	1,98648	2,19110	2,19088	0,204	0,000
Rura 32	0,64260	0,81579	0,81545	0,173	0,000
Rura 33	0,00604	0,11728	0,11612	0,110	0,001
Rura 34	0,28899	0,33066	0,33036	0,041	0,000
Rura 35	0,82651	0,85364	0,85336	0,027	0,000
Rura 36	0,53724	0,54032	0,53953	0,002	0,001
Rura 37	0,53725	0,54032	0,53953	0,002	0,001
Rura 38	0,85176	0,85155	0,85192	0,000	0,000

Tabela Z2.3.cd

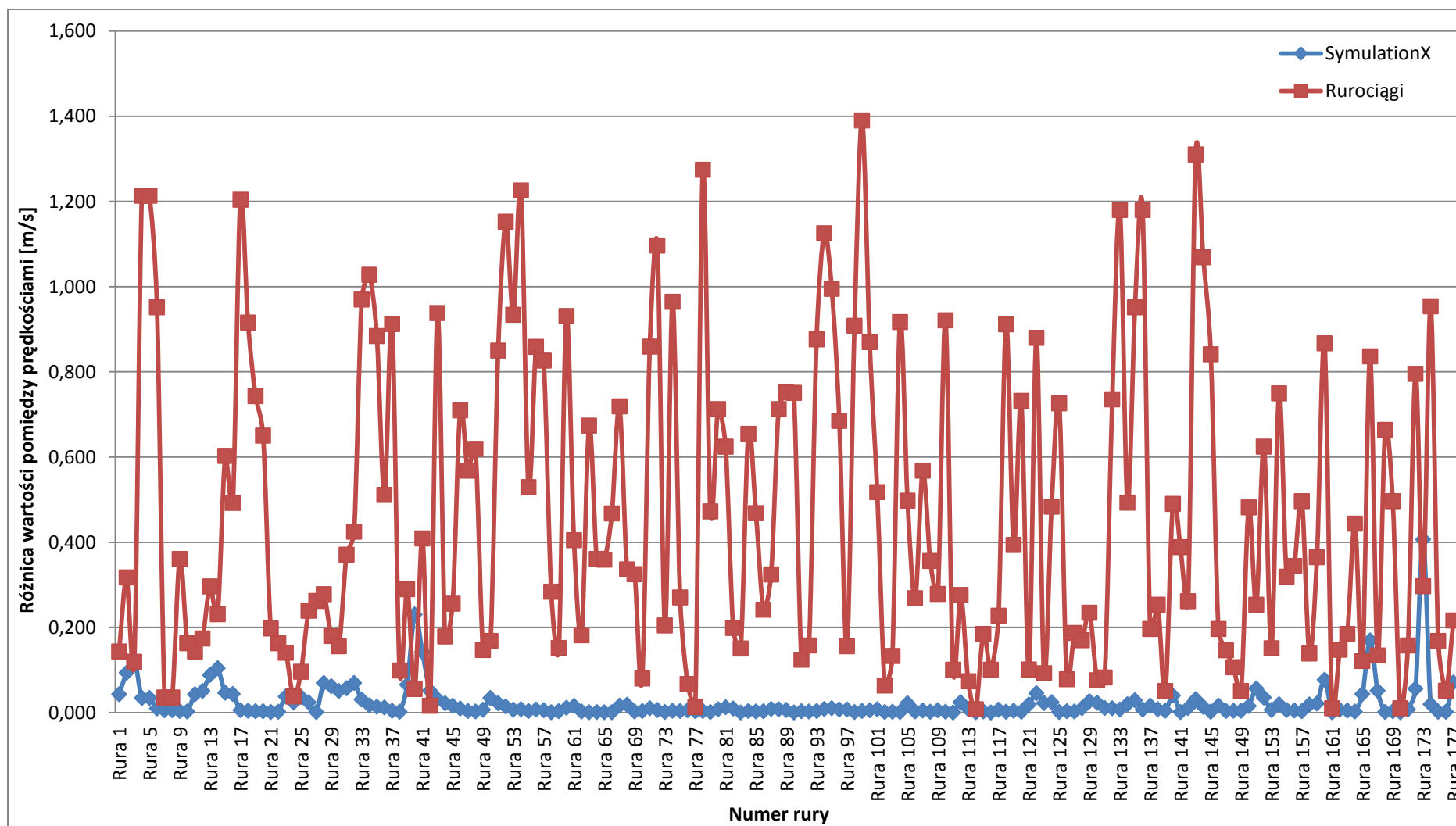
1	2	3	4	5	6
Rura 39	0,33212	0,33988	0,34012	0,008	0,000
Rura 40	2,09552	2,09610	2,09617	0,001	0,000
Rura 41	0,23878	0,22427	0,22374	0,015	0,001
Rura 42	1,88103	1,87320	1,87350	0,008	0,000
Rura 43	1,34399	1,37530	1,37543	0,031	0,000
Rura 44	1,34404	1,37530	1,37543	0,031	0,000
Rura 45	2,32146	2,29810	2,29761	0,024	0,000
Rura 46	2,08252	2,07380	2,07387	0,009	0,000
Rura 47	2,27055	2,27870	2,27856	0,008	0,000
Rura 48	1,93860	1,93880	1,93844	0,000	0,000

Tabela Z2.4. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 7

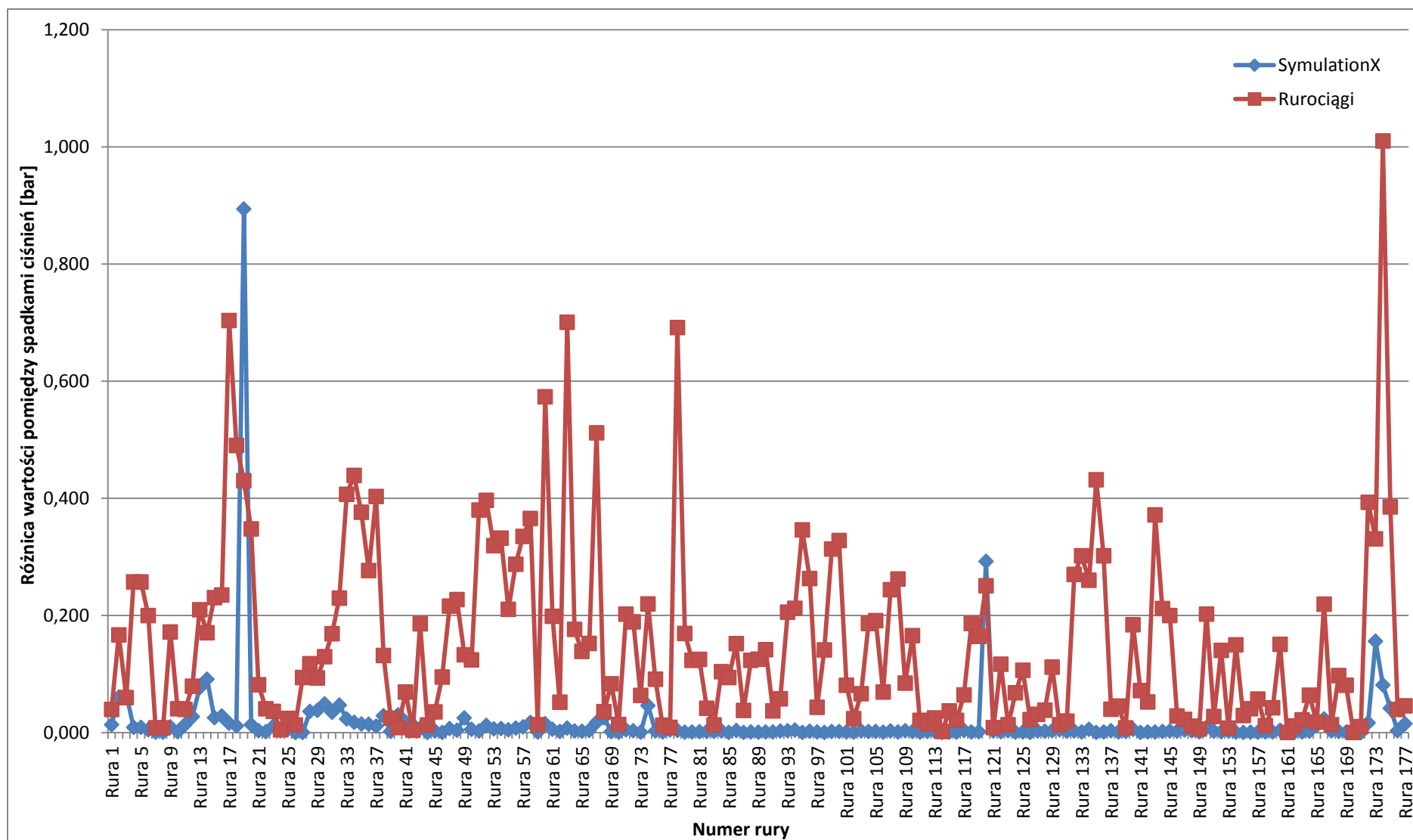
Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
1	2	3	4	5	6
Rura 1	1,09424	1,11020	1,11031	0,016	0,000
Rura 2	0,19949	0,20817	0,20932	0,010	0,001
Rura 3	0,06299	0,06326	0,06333	0,000	0,000
Rura 4	0,22075	0,26860	0,26864	0,048	0,000
Rura 5	0,33667	0,40523	0,40512	0,068	0,000
Rura 6	0,33666	0,27016	0,27008	0,067	0,000
Rura 7	0,33666	0,81947	0,81924	0,483	0,000
Rura 8	1,08534	1,56770	1,56709	0,482	0,001
Rura 9	0,05667	0,05474	0,05463	0,002	0,000
Rura 10	0,01868	0,01805	0,01800	0,001	0,000
Rura 11	0,58322	0,56511	0,56513	0,018	0,000
Rura 12	0,32928	0,27774	0,27760	0,052	0,000
Rura 13	0,10855	0,09156	0,09152	0,017	0,000
Rura 14	1,33144	1,34040	1,33993	0,008	0,000
Rura 15	0,52481	0,51232	0,51193	0,013	0,000
Rura 16	0,67158	0,64311	0,64045	0,031	0,003
Rura 17	0,50989	0,49105	0,49334	0,017	0,002
Rura 18	0,52481	0,53251	0,53078	0,006	0,002
Rura 19	1,20951	1,18620	1,18771	0,022	0,002
Rura 20	0,01312	0,01061	0,01648	0,003	0,006
Rura 21	0,69625	0,68861	0,68618	0,010	0,002
Rura 22	0,55285	0,58102	0,58087	0,028	0,000
Rura 23	0,16909	0,15853	0,15767	0,011	0,001
Rura 24	1,62140	1,64030	1,63882	0,017	0,001
Rura 25	0,82575	0,76373	0,76451	0,061	0,001

Tabela Z2.4.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 26	0,06535	0,06769	0,06808	0,003	0,000
Rura 27	0,22278	0,24323	0,24360	0,021	0,000
Rura 28	1,11283	1,14380	1,14340	0,031	0,000
Rura 29	0,16487	0,12152	0,12161	0,043	0,000
Rura 30	0,74781	0,68115	0,68033	0,067	0,001
Rura 31	1,71511	2,06950	2,06833	0,353	0,001
Rura 32	0,11804	0,17931	0,17909	0,061	0,000
Rura 33	0,00028	0,00548	0,00641	0,006	0,001
Rura 34	0,05374	0,07508	0,07492	0,021	0,000
Rura 35	0,36523	0,38829	0,38787	0,023	0,000
Rura 36	0,13004	0,13120	0,13080	0,001	0,000
Rura 37	0,13004	0,13120	0,13079	0,001	0,000
Rura 38	0,48751	0,48972	0,48985	0,002	0,000
Rura 39	0,07332	0,07870	0,07874	0,005	0,000
Rura 40	1,88717	1,91110	1,91046	0,023	0,001
Rura 41	0,03283	0,03876	0,03858	0,006	0,000
Rura 42	1,16685	1,17170	1,17154	0,005	0,000
Rura 43	0,85659	0,90066	0,90042	0,044	0,000
Rura 44	0,42831	0,45033	0,45021	0,022	0,000
Rura 45	1,13374	1,12740	1,12655	0,007	0,001
Rura 46	1,86626	1,87480	1,87412	0,008	0,001
Rura 47	2,17908	2,22070	2,21959	0,041	0,001
Rura 48	0,82092	0,83082	0,83018	0,009	0,001



Rys. Z2.5. Porównanie różnic prędkości w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociągi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 8



Rys. Z2.6. Porównanie różnic spadków ciśnienia w rurach sieci wodociągowej wyznaczonej za pomocą programu „Sieć” i „Rurociagi” (linia brązowa) oraz programem „Sieć” i „SymulationX” (linia niebieska); przykład 8

Tabela Z2.5. Rozkład prędkości w sieci wodociągowej; przykład 8

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
1	2	3	4	5	6
Rura 1	1,13209	1,03150	1,17498	0,043	0,143
Rura 2	2,51152	2,28770	2,60510	0,094	0,317
Rura 3	2,11099	2,35430	2,23506	0,124	0,119
Rura 4	1,43017	0,18251	1,39608	0,034	1,214
Rura 5	1,43015	0,18251	1,39608	0,034	1,214
Rura 6	1,25222	0,31041	1,26177	0,010	0,951
Rura 7	0,84305	0,87310	0,83755	0,005	0,036
Rura 8	0,84305	0,87310	0,83755	0,005	0,036
Rura 9	2,34744	1,99050	2,35100	0,004	0,361
Rura 10	1,05789	0,89708	1,06007	0,002	0,163
Rura 11	1,13210	1,03150	1,17498	0,043	0,143
Rura 12	1,37949	1,25630	1,43012	0,051	0,174
Rura 13	2,37186	2,16390	2,46005	0,088	0,296
Rura 14	2,44574	2,31870	2,54953	0,104	0,231
Rura 15	1,91328	1,35720	1,95971	0,046	0,603
Rura 16	1,62796	1,17950	1,67143	0,043	0,492
Rura 17	2,42697	1,22830	2,43211	0,005	1,204
Rura 18	2,09532	1,18350	2,09932	0,004	0,916
Rura 19	2,40835	1,66270	2,40557	0,003	0,743
Rura 20	2,81555	2,16820	2,81837	0,003	0,650
Rura 21	1,28960	1,09340	1,29093	0,001	0,198
Rura 22	1,05790	0,89708	1,06007	0,002	0,163
Rura 23	1,04636	0,94348	1,08389	0,038	0,140
Rura 24	0,37902	0,36488	0,40264	0,024	0,038
Rura 25	0,30429	0,17224	0,26798	0,036	0,096
Rura 26	0,27553	0,01257	0,25141	0,024	0,239
Rura 27	0,38363	0,64386	0,38208	0,002	0,262
Rura 28	1,94998	1,74120	2,01929	0,069	0,278
Rura 29	1,60803	1,49010	1,66970	0,062	0,180
Rura 30	1,32558	1,22040	1,37616	0,051	0,156
Rura 31	2,17916	1,86560	2,23634	0,057	0,371
Rura 32	1,80090	1,44540	1,87026	0,069	0,425
Rura 33	2,31133	1,37220	2,34205	0,031	0,970
Rura 34	2,39830	1,38800	2,41554	0,017	1,028
Rura 35	2,31890	1,44820	2,33223	0,013	0,884
Rura 36	1,90941	1,41050	1,92124	0,012	0,511
Rura 37	2,43202	1,52440	2,43629	0,004	0,912
Rura 38	2,73129	2,63430	2,73308	0,002	0,099
Rura 39	0,02500	0,38011	0,09046	0,065	0,290

Tabela Z2.5.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 40	0,26406	0,54974	0,49436	0,230	0,055
Rura 41	0,24305	0,79437	0,38542	0,142	0,409
Rura 42	0,89653	0,93183	0,94765	0,051	0,016
Rura 43	1,22989	0,26004	1,19822	0,032	0,938
Rura 44	0,12287	0,27952	0,10105	0,022	0,178
Rura 45	0,56464	0,32510	0,58068	0,016	0,256
Rura 46	0,07543	0,79496	0,08523	0,010	0,710
Rura 47	1,92503	1,36110	1,92883	0,004	0,568
Rura 48	1,88562	1,26420	1,88317	0,002	0,619
Rura 49	2,98829	3,14220	2,99514	0,007	0,147
Rura 50	3,59605	3,72990	3,56205	0,034	0,168
Rura 51	2,45452	1,58290	2,43250	0,022	0,850
Rura 52	2,01957	0,88105	2,03357	0,014	1,153
Rura 53	1,39887	0,47163	1,40564	0,007	0,934
Rura 54	1,69056	0,47278	1,69858	0,008	1,226
Rura 55	1,39532	0,86963	1,39868	0,003	0,529
Rura 56	1,82975	0,97835	1,83679	0,007	0,858
Rura 57	2,19018	1,36940	2,19551	0,005	0,826
Rura 58	2,07600	2,36050	2,07679	0,001	0,284
Rura 59	0,29494	0,14033	0,29187	0,003	0,152
Rura 60	2,46892	3,41150	2,48038	0,011	0,931
Rura 61	0,55271	0,97270	0,56812	0,015	0,405
Rura 62	1,04972	1,23400	1,05243	0,003	0,182
Rura 63	1,64065	2,31350	1,63995	0,001	0,674
Rura 64	0,94755	0,58834	0,94888	0,001	0,361
Rura 65	1,27246	0,91304	1,27182	0,001	0,359
Rura 66	1,59072	1,12390	1,59129	0,001	0,467
Rura 67	1,94464	2,67940	1,96055	0,016	0,719
Rura 68	0,53840	0,85597	0,52024	0,018	0,336
Rura 69	0,80689	0,48468	0,80933	0,002	0,325
Rura 70	0,66000	0,57633	0,65612	0,004	0,080
Rura 71	0,99735	0,14835	1,00747	0,010	0,859
Rura 72	1,16140	0,07112	1,16753	0,006	1,096
Rura 73	0,93072	0,72494	0,92923	0,001	0,204
Rura 74	1,12733	0,16720	1,13155	0,004	0,964
Rura 75	1,04807	0,78121	1,05149	0,003	0,270
Rura 76	0,62686	0,69920	0,63221	0,005	0,067
Rura 77	0,97245	0,98905	0,97578	0,003	0,013
Rura 78	1,90120	3,17210	1,89743	0,004	1,275
Rura 79	0,65374	0,18010	0,65225	0,001	0,472

Tabela Z2.5.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 80	0,97445	0,25400	0,96666	0,008	0,713
Rura 81	0,40839	1,04530	0,42077	0,012	0,625
Rura 82	0,66010	0,86855	0,66987	0,010	0,199
Rura 83	0,28845	0,13832	0,28879	0,000	0,150
Rura 84	0,22391	0,87462	0,22053	0,003	0,654
Rura 85	0,49808	0,96882	0,50054	0,002	0,468
Rura 86	0,93108	1,17560	0,93412	0,003	0,241
Rura 87	0,05585	0,38846	0,06408	0,008	0,324
Rura 88	0,97445	0,25400	0,96666	0,008	0,713
Rura 89	0,94679	0,18929	0,94100	0,006	0,752
Rura 90	1,05861	0,30796	1,05843	0,000	0,750
Rura 91	1,28571	1,15820	1,28251	0,003	0,124
Rura 92	1,09688	0,94182	1,09926	0,002	0,157
Rura 93	1,33607	0,46354	1,33972	0,004	0,876
Rura 94	1,24195	0,12482	1,25012	0,008	1,125
Rura 95	0,00237	1,00740	0,01247	0,010	0,995
Rura 96	0,89171	0,19989	0,88480	0,007	0,685
Rura 97	1,03269	1,18130	1,02533	0,007	0,156
Rura 98	0,08589	0,99200	0,08433	0,002	0,908
Rura 99	0,17712	1,56330	0,17340	0,004	1,390
Rura 100	0,11723	0,99261	0,12290	0,006	0,870
Rura 101	0,28012	0,79011	0,27249	0,008	0,518
Rura 102	0,43034	0,49262	0,42881	0,002	0,064
Rura 103	1,43467	1,56550	1,43279	0,002	0,133
Rura 104	1,20863	0,29329	1,21007	0,001	0,917
Rura 105	0,25560	0,73159	0,23391	0,022	0,498
Rura 106	1,14984	0,87923	1,14751	0,002	0,268
Rura 107	0,95930	1,53180	0,96403	0,005	0,568
Rura 108	0,51568	0,87360	0,51781	0,002	0,356
Rura 109	0,93873	0,66603	0,94433	0,006	0,278
Rura 110	1,09174	0,17267	1,09380	0,002	0,921
Rura 111	0,82802	0,72772	0,82811	0,000	0,100
Rura 112	0,36109	0,10904	0,38532	0,024	0,276
Rura 113	0,43271	0,51475	0,44128	0,009	0,073
Rura 114	0,84070	0,84793	0,83996	0,001	0,008
Rura 115	0,36794	0,55464	0,37012	0,002	0,185
Rura 116	0,82803	0,72772	0,82811	0,000	0,100
Rura 117	1,24410	1,02280	1,25041	0,006	0,228
Rura 118	1,21509	0,30167	1,21339	0,002	0,912
Rura 119	1,40272	1,00490	1,39851	0,004	0,394
Rura 120	0,56958	1,30340	0,57150	0,002	0,732

Tabela Z2.5.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 121	0,15207	0,27213	0,17092	0,019	0,101
Rura 122	0,04903	0,88333	0,00374	0,045	0,880
Rura 123	0,40927	0,52383	0,43169	0,022	0,092
Rura 124	0,24447	0,70393	0,22056	0,024	0,483
Rura 125	0,13056	0,85811	0,13202	0,001	0,726
Rura 126	1,08454	1,15980	1,08137	0,003	0,078
Rura 127	0,27111	0,45544	0,26846	0,003	0,187
Rura 128	0,75847	0,93829	0,76863	0,010	0,170
Rura 129	0,28543	0,49308	0,25868	0,027	0,234
Rura 130	0,45830	0,35950	0,43542	0,023	0,076
Rura 131	0,55597	0,62791	0,54546	0,011	0,082
Rura 132	0,66682	1,39170	0,65655	0,010	0,735
Rura 133	0,41236	1,59950	0,41980	0,007	1,180
Rura 134	0,22565	0,69908	0,20616	0,019	0,493
Rura 135	0,25909	1,18150	0,23035	0,029	0,951
Rura 136	0,41236	1,59950	0,41980	0,007	1,180
Rura 137	0,35910	0,57145	0,37520	0,016	0,196
Rura 138	0,49827	0,75906	0,50603	0,008	0,253
Rura 139	0,32247	0,37712	0,32645	0,004	0,051
Rura 140	0,07540	0,52569	0,03556	0,040	0,490
Rura 141	0,46817	0,85506	0,46693	0,001	0,388
Rura 142	0,34679	0,59732	0,33613	0,011	0,261
Rura 143	0,12878	1,40780	0,09757	0,031	1,310
Rura 144	0,21142	1,26660	0,19788	0,014	1,069
Rura 145	0,17337	1,01240	0,17164	0,002	0,841
Rura 146	0,35910	0,57145	0,37520	0,016	0,196
Rura 147	0,25275	0,40298	0,25647	0,004	0,147
Rura 148	0,24552	0,35608	0,24957	0,004	0,107
Rura 149	0,32247	0,37712	0,32645	0,004	0,051
Rura 150	0,28591	0,78339	0,30155	0,016	0,482
Rura 151	0,25766	0,45402	0,20094	0,057	0,253
Rura 152	0,27024	0,85870	0,23462	0,036	0,624
Rura 153	0,20533	0,04825	0,19908	0,006	0,151
Rura 154	0,11855	0,84863	0,09895	0,020	0,750
Rura 155	0,09287	0,41793	0,09893	0,006	0,319
Rura 156	0,06617	0,40594	0,06146	0,005	0,344
Rura 157	0,10720	0,60649	0,11019	0,003	0,496
Rura 158	0,18039	0,30006	0,16134	0,019	0,139
Rura 159	0,19645	0,53958	0,17498	0,021	0,365
Rura 160	0,25968	1,04960	0,18257	0,077	0,867
Rura 161	0,05144	0,04079	0,05070	0,001	0,010

Tabela Z2.5.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 162	0,12403	0,27840	0,13071	0,007	0,148
Rura 163	0,13755	0,31720	0,13249	0,005	0,185
Rura 164	0,25697	0,69825	0,25462	0,002	0,444
Rura 165	0,15495	0,07733	0,19841	0,043	0,121
Rura 166	0,78759	1,45430	0,61812	0,169	0,836
Rura 167	0,06419	0,24921	0,11547	0,051	0,134
Rura 168	0,15904	0,82387	0,16038	0,001	0,663
Rura 169	0,10720	0,60649	0,11019	0,003	0,496
Rura 170	0,05144	0,04079	0,05070	0,001	0,010
Rura 171	0,07259	0,23762	0,08001	0,007	0,158
Rura 172	0,33043	1,18120	0,38604	0,056	0,795
Rura 173	3,08868	2,38570	2,68227	0,406	0,297
Rura 174	2,12634	1,19190	2,14587	0,020	0,954
Rura 175	2,31143	2,14530	2,31353	0,002	0,168
Rura 176	0,84775	0,79821	0,84943	0,002	0,051
Rura 177	1,34715	1,63400	1,41760	0,070	0,216

Tabela Z2.6. Spadki ciśnienia w rurociągach sieci; przykład 8

Numer rury	SymulationX	Rurociągi	Siec	Różnica w stosunku do programu „Siec”	
				SymulationX	Rurociągi
1	2	3	4	5	6
Rura 1	0,17940	0,15343	0,19299	0,014	0,040
Rura 2	0,74020	0,63371	0,80065	0,060	0,167
Rura 3	0,54180	0,66727	0,60744	0,066	0,060
Rura 4	0,27090	0,00483	0,26195	0,009	0,257
Rura 5	0,27090	0,00483	0,26196	0,009	0,257
Rura 6	0,21424	0,01909	0,21893	0,005	0,200
Rura 7	0,10712	0,11445	0,10635	0,001	0,008
Rura 8	0,10712	0,11445	0,10635	0,001	0,008
Rura 9	0,65548	0,49351	0,66534	0,010	0,172
Rura 10	0,15928	0,12003	0,16092	0,002	0,041
Rura 11	0,17940	0,15343	0,19299	0,014	0,040
Rura 12	0,35880	0,30685	0,38599	0,027	0,079
Rura 13	0,94276	0,80942	1,01929	0,077	0,210
Rura 14	0,99623	0,91654	1,08717	0,091	0,171
Rura 15	0,45442	0,24928	0,47972	0,025	0,230
Rura 16	0,48118	0,27446	0,50953	0,028	0,235
Rura 17	0,98251	0,29486	0,99850	0,016	0,704
Rura 18	0,75475	0,27610	0,76624	0,011	0,490
Rura 19	0,96900	0,50501	0,07514	0,894	0,430
Rura 20	0,90968	0,57542	0,92311	0,013	0,348

Tabela Z2.6.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 21	0,31855	0,24005	0,32186	0,003	0,082
Rura 22	0,15928	0,12003	0,16093	0,002	0,041
Rura 23	0,15624	0,13115	0,16736	0,011	0,036
Rura 24	0,02676	0,02518	0,02981	0,003	0,005
Rura 25	0,04047	0,01074	0,03494	0,006	0,024
Rura 26	0,01352	0,00033	0,01332	0,000	0,013
Rura 27	0,06436	0,15814	0,06409	0,000	0,094
Rura 28	0,47010	0,38841	0,50619	0,036	0,118
Rura 29	0,47076	0,41542	0,50859	0,038	0,093
Rura 30	0,62700	0,54657	0,67596	0,049	0,129
Rura 31	0,57354	0,43945	0,60808	0,035	0,169
Rura 32	0,57590	0,39354	0,62290	0,047	0,229
Rura 33	0,63745	0,25416	0,66078	0,023	0,407
Rura 34	0,68121	0,25939	0,69861	0,017	0,439
Rura 35	0,64121	0,27972	0,65580	0,015	0,376
Rura 36	0,63921	0,37683	0,65362	0,014	0,277
Rura 37	0,69853	0,30642	0,70947	0,011	0,403
Rura 38	2,02596	1,92300	2,05452	0,029	0,132
Rura 39	0,00066	0,02701	0,00241	0,002	0,025
Rura 40	0,01211	0,05107	0,04247	0,030	0,009
Rura 41	0,00974	0,09698	0,02765	0,018	0,069
Rura 42	0,11924	0,12831	0,13210	0,013	0,004
Rura 43	0,20755	0,01412	0,19980	0,008	0,186
Rura 44	0,00328	0,01597	0,00289	0,000	0,013
Rura 45	0,05352	0,02066	0,05613	0,003	0,035
Rura 46	0,00199	0,09711	0,00218	0,000	0,095
Rura 47	0,45940	0,25052	0,46626	0,007	0,216
Rura 48	0,44275	0,21979	0,44668	0,004	0,227
Rura 49	1,43024	1,58800	1,45510	0,025	0,133
Rura 50	1,41813	1,53690	1,41263	0,006	0,124
Rura 51	0,71019	0,32767	0,70748	0,003	0,380
Rura 52	0,50050	0,11629	0,51262	0,012	0,396
Rura 53	0,36775	0,05530	0,37434	0,007	0,319
Rura 54	0,36447	0,03934	0,37145	0,007	0,332
Rura 55	0,36610	0,16045	0,37105	0,005	0,211
Rura 56	0,41962	0,13979	0,42719	0,008	0,287
Rura 57	0,57873	0,25325	0,58826	0,010	0,335
Rura 58	1,39179	1,77470	1,40915	0,017	0,366
Rura 59	0,01599	0,00372	0,01718	0,001	0,013
Rura 60	0,71768	1,30620	0,73280	0,015	0,573
Rura 61	0,12138	0,32558	0,12716	0,006	0,198

Tabela Z2.6.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 62	0,15712	0,21057	0,15889	0,002	0,052
Rura 63	0,81306	1,52150	0,82089	0,008	0,701
Rura 64	0,30902	0,13519	0,31153	0,003	0,176
Rura 65	0,31111	0,17478	0,31347	0,002	0,139
Rura 66	0,32710	0,17850	0,33065	0,004	0,152
Rura 67	0,66039	1,18970	0,67777	0,017	0,512
Rura 68	0,04931	0,11054	0,07460	0,025	0,036
Rura 69	0,14011	0,05797	0,14140	0,001	0,083
Rura 70	0,07005	0,05543	0,06942	0,001	0,014
Rura 71	0,20279	0,00555	0,20770	0,005	0,202
Rura 72	0,18764	0,00188	0,19084	0,003	0,189
Rura 73	0,17970	0,11669	0,18017	0,000	0,063
Rura 74	0,17807	0,00443	0,22396	0,046	0,220
Rura 75	0,22120	0,13297	0,22396	0,003	0,091
Rura 76	0,06408	0,07760	0,06507	0,001	0,013
Rura 77	0,36378	0,37718	0,36814	0,004	0,009
Rura 78	0,44928	1,14430	0,45275	0,003	0,692
Rura 79	0,18239	0,01263	0,18187	0,001	0,169
Rura 80	0,13792	0,01357	0,13679	0,001	0,123
Rura 81	0,03058	0,15706	0,03215	0,002	0,125
Rura 82	0,07007	0,11341	0,07198	0,002	0,041
Rura 83	0,01516	0,00366	0,01686	0,002	0,013
Rura 84	0,00794	0,11480	0,01067	0,003	0,104
Rura 85	0,04313	0,13740	0,04339	0,000	0,094
Rura 86	0,29970	0,45478	0,30307	0,003	0,152
Rura 87	0,00208	0,03959	0,00194	0,000	0,038
Rura 88	0,13792	0,01357	0,13680	0,001	0,123
Rura 89	0,13115	0,00501	0,13048	0,001	0,125
Rura 90	0,15946	0,01884	0,16049	0,001	0,142
Rura 91	0,22443	0,18824	0,22536	0,001	0,037
Rura 92	0,23959	0,18458	0,24222	0,003	0,058
Rura 93	0,24018	0,03802	0,24348	0,003	0,205
Rura 94	0,21114	0,00331	0,21537	0,004	0,212
Rura 95	0,00015	0,34628	0,00024	0,000	0,346
Rura 96	0,27793	0,01246	0,27553	0,002	0,263
Rura 97	0,15268	0,19493	0,15175	0,001	0,043
Rura 98	0,00227	0,14324	0,00214	0,000	0,141
Rura 99	0,00509	0,32048	0,00711	0,002	0,313
Rura 100	0,00735	0,33740	0,00941	0,002	0,328
Rura 101	0,01410	0,09608	0,01528	0,001	0,081
Rura 102	0,08871	0,11180	0,08794	0,001	0,024

Tabela Z2.6.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 103	0,38455	0,45358	0,38728	0,003	0,066
Rura 104	0,20126	0,01733	0,20331	0,002	0,186
Rura 105	0,02941	0,22230	0,03120	0,002	0,191
Rura 106	0,18436	0,11587	0,18509	0,001	0,069
Rura 107	0,18945	0,43635	0,19220	0,003	0,244
Rura 108	0,17506	0,43805	0,17594	0,001	0,262
Rura 109	0,18241	0,10065	0,18535	0,003	0,085
Rura 110	0,16831	0,00457	0,17007	0,002	0,165
Rura 111	0,10381	0,08321	0,10426	0,000	0,021
Rura 112	0,01439	0,00170	0,01626	0,002	0,015
Rura 113	0,07961	0,10723	0,08213	0,003	0,025
Rura 114	0,10659	0,10873	0,10689	0,000	0,002
Rura 115	0,03577	0,07322	0,03641	0,001	0,037
Rura 116	0,10381	0,08321	0,10426	0,000	0,021
Rura 117	0,21178	0,15116	0,21546	0,004	0,064
Rura 118	0,20316	0,01818	0,20430	0,001	0,186
Rura 119	0,36953	0,20688	0,37097	0,001	0,164
Rura 120	0,36953	0,32752	0,07708	0,292	0,250
Rura 121	0,00416	0,01525	0,00694	0,003	0,008
Rura 122	0,00130	0,11682	0,00002	0,001	0,117
Rura 123	0,03069	0,04697	0,03361	0,003	0,013
Rura 124	0,00988	0,07852	0,01067	0,001	0,068
Rura 125	0,00350	0,11103	0,00450	0,001	0,107
Rura 126	0,16637	0,18870	0,16667	0,000	0,022
Rura 127	0,01831	0,05207	0,02102	0,003	0,031
Rura 128	0,08913	0,12988	0,09150	0,002	0,038
Rura 129	0,05822	0,16673	0,05511	0,003	0,112
Rura 130	0,05276	0,03466	0,04815	0,005	0,013
Rura 131	0,07357	0,09083	0,07109	0,002	0,020
Rura 132	0,10066	0,36796	0,09811	0,003	0,270
Rura 133	0,03110	0,33384	0,03203	0,001	0,302
Rura 134	0,03091	0,29661	0,03639	0,005	0,260
Rura 135	0,02710	0,45879	0,02702	0,000	0,432
Rura 136	0,03110	0,33384	0,03203	0,001	0,302
Rura 137	0,03418	0,07711	0,03728	0,003	0,040
Rura 138	0,04316	0,08957	0,04422	0,001	0,045
Rura 139	0,02758	0,03762	0,02937	0,002	0,008
Rura 140	0,00786	0,18627	0,00209	0,006	0,184
Rura 141	0,03877	0,11034	0,03848	0,000	0,072
Rura 142	0,03197	0,08328	0,03087	0,001	0,052

Tabela Z2.6.cd

1	2	3	4	5	6
Rura 143	0,00487	0,37551	0,00385	0,001	0,372
Rura 144	0,00698	0,22051	0,00888	0,002	0,212
Rura 145	0,00697	0,20961	0,00987	0,003	0,200
Rura 146	0,02421	0,05462	0,02640	0,002	0,028
Rura 147	0,01523	0,04217	0,01946	0,004	0,023
Rura 148	0,01000	0,02415	0,01316	0,003	0,011
Rura 149	0,01954	0,02665	0,02079	0,001	0,006
Rura 150	0,03926	0,25054	0,04807	0,009	0,202
Rura 151	0,01135	0,03668	0,00912	0,002	0,028
Rura 152	0,01815	0,15693	0,01673	0,001	0,140
Rura 153	0,00657	0,00128	0,00897	0,002	0,008
Rura 154	0,00446	0,15372	0,00394	0,001	0,150
Rura 155	0,00246	0,03180	0,00279	0,000	0,029
Rura 156	0,00247	0,04270	0,00180	0,001	0,041
Rura 157	0,00285	0,06057	0,00333	0,000	0,057
Rura 158	0,00523	0,01802	0,00630	0,001	0,012
Rura 159	0,00604	0,04945	0,00722	0,001	0,042
Rura 160	0,01158	0,15821	0,00776	0,004	0,150
Rura 161	0,00136	0,00108	0,00093	0,000	0,000
Rura 162	0,00331	0,01586	0,00443	0,001	0,011
Rura 163	0,00523	0,02797	0,00640	0,001	0,022
Rura 164	0,01127	0,07742	0,01362	0,002	0,064
Rura 165	0,01127	0,00542	0,02362	0,012	0,018
Rura 166	0,03918	0,28180	0,06257	0,023	0,219
Rura 167	0,00240	0,01854	0,00509	0,003	0,013
Rura 168	0,00440	0,10338	0,00624	0,002	0,097
Rura 169	0,00402	0,08551	0,00471	0,001	0,081
Rura 170	0,00056	0,00108	0,00094	0,000	0,000
Rura 171	0,00192	0,01211	0,00197	0,000	0,010
Rura 172	0,04837	0,45855	0,06524	0,017	0,393
Rura 173	1,58187	1,40710	1,73772	0,156	0,331
Rura 174	1,45289	0,52417	1,53430	0,081	1,010
Rura 175	3,00000	2,65660	3,04172	0,042	0,385
Rura 176	0,38172	0,34520	0,38474	0,003	0,040
Rura 177	0,14335	0,20398	0,15834	0,015	0,046