

Szkieletyzacja modelu numerycznego sieci wodociągowej i jej wpływ na jakość uzyskiwanych wyników obliczeń

The skeletonization of a water supply network model and its impact on the quality of simulated results

PAWEŁ SUCHORAB, DARIUSZ KOWALSKI, VIKTORIIA SNEHIROVA, MARIAN KWIETNIEWSKI

DOI 10.36119/15.2022.12.9

Wykorzystanie modeli numerycznych sieci wodociągowych stało się już powszechną praktyką nie tylko w Polsce. Wykorzystywane są różne typy tych modeli, począwszy od szkieletowych, poprzez podstawowe i szczegółowe. W procesie wspomagania decyzji eksploatacyjnych każdy z tych typów ma swoje zastosowanie. Przykładowo do obliczeń optymalizacyjnych pracy pompowni sieciowych wykorzystuje się głównie modele szkieletowe. W powszechnej praktyce modele te odzwierciedlają jedynie strukturę geometryczną i średnice przewodów magistralnych oraz niektórych rozdzielczych. Takie podejście powoduje duże problemy w procesie kalibracji. Uzyskiwane wyniki symulacji różnią się znacząco od wartości mierzonych na sieci. Biorąc to pod uwagę, w artykule zaproponowano inne podejście, a mianowicie wykorzystanie modelu zastępczego, uzyskanego po procesie szkieletyzacji skalibrowanego modelu podstawowego (odwzorowującego wszystkie przewody magistralne, rozdzielcze i niektóre przyłącza). Proces szkieletyzacji przedstawiono na bazie wybranej rzeczywistej sieci wodociągowej. Prawdźliwość wyników obliczeń symulacyjnych uzyskanych za pomocą modelu uproszczonego poddano ocenie poprzez ich porównanie z wynikami uzyskanymi z monitoringu obejmującego 65 punktów pomiaru ciśnienia oraz 47 punktów pomiaru natężenia przepływu. Ocenę zgodności wyników symulacji z wynikami pomiarów przeprowadzono z wykorzystaniem wytycznych AWWA. Przeprowadzone porównania wykazały dużą zgodność wyników obliczeń i pomiarów.

Słowa kluczowe: szkieletyzacja, model sieci wodociągowej, weryfikacja

The application of numerical models of water supply networks has become a common practice not only in Poland. The models may be characterized by several types of geometrical structure: skeletonized, basic and detailed. Each of these types has an individual application in the process of supporting operational decisions. For example, to successfully optimize and schedule the operation of pump stations, skeletonized models are highly recommended. Typically, skeletonized models reflect the geometrical structure and diameters only of transmission mains and selected distribution pipes. Such representation of the geometrical structure of the network may cause problems during the calibration process – simulated results may differ significantly from the measured values of tested parameters. Taking that into account, the paper presents a different approach for the creation of a skeletonized model: the use of a replacement model created through the simplification of a basic model. The model, representing all mains and distribution pipes and additionally most important service connections, was skeletonized to the schematic form. The skeletonization process was presented on the basis of a selected actual water supply network. The correctness of the simulation results obtained with the use of the simplified model was compared with the measured values from the monitoring system (65 pressure monitoring points and 47 flow rate measurement points). The compliance of the simulation results with the measurement results was assessed with the use of AWWA guidelines. The conducted comparison showed a high agreement of the results of calculations and measurements.

Keywords: skeletonization, water supply network model, verification

Wprowadzenie

Sieci wodociągowe należą do obiektów technicznych o wysokim stopniu złożoności pod względem struktury geometrycznej, materiałowej, zróżnicowania odbiorców wody lub rodzaju i liczby elementów współpracujących składowych, takich jak

pompownie i zbiorniki. Powoduje to liczne problemy zarówno na etapie projektowania, jak i w trakcie eksploatacji. Przy rozwiązywaniu tych problemów często okazuje się konieczne wirtualne uproszczenie tej struktury [1]. Najczęściej upraszczanie wykorzystuje się przy różnego typu działaniach wykorzystujących modele numerycz-

ne [2,3]. Początkowo wynikało to z braku możliwości wykonywania obliczeń hydraulicznych złożonych układów sieciowych, a później, wraz z rozwojem stopnia złożoności rozwiązywanych zadań, z racji konieczności ograniczania parametrów niezbędnych do uwzględnienia w procesach obliczeń numerycznych. Zadania te

mgr inż. Paweł Suchorab <https://orcid.org//0000-0001-9275-4800>, dr hab. inż. Dariusz Kowalski, prof. uczelni <https://orcid.org//0000-0001-9929-1626> – Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Lublin; mgr inż. Viktoriia Sniehirova – Walmar Sp. z o.o.; prof. dr hab. inż. Marian Kwietniewski <https://orcid.org//0000-0003-1696-6611> – Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Adres do korespondencji/Corresponding author: p.suchorab@pollub.pl

obejmują zagadnienia o charakterze koncepcyjnym, między innymi określania lokalizacji zasuw krytycznych [4,5], optymalnego projektowania lokalizacji i pojemności zbiorników sieciowych [6], określania liczby i lokalizacji ujęć wody [7], oceny krytyczności elementów systemu wodociągowego [8,9]. Bardzo często uproszczone modele sieci wodociągowej wykorzystywane są do obliczeń symulacyjnych ukierunkowanych na minimalizację zużycia energii elektrycznej niezbędnej do utrzymania pracy sieci wodociągowych [10,11].

Proces upraszczania struktury sieci wodociągowej na etapie budowy ich modeli numerycznych określany jest nazwą szkieletyzacji [3]. Jest on najczęściej realizowany w sytuacjach, kiedy przedsiębiorstwo wodociągowe dysponuje już modelem numerycznym odwzorowującym wszystkie przewody magistralne i rozdzielcze (tzw. model podstawowy) oraz dodatkowo przyłącza wodociągowe (tzw. model szczegółowy). Modele takie powstają w ostatnim czasie w sposób częściowo zautomatyzowany, przy wykorzystaniu budowanych w przedsiębiorstwach baz danych GIS, stanowiących centrum tzw. zintegrowanych systemów zarządzania [12]. W powszechnej praktyce modele szkieletowe odzwierciedlają jedynie strukturę geometryczną i średnice przewodów magistralnych oraz niektórych rozdzielczych. Takie podejście powoduje duże problemy w procesie ich kalibracji. Uzyskiwane wyniki symulacji różnią się znacząco od wartości mierzonych na sieci [13,14]. Proces szkieletyzacji musi obejmować nie tylko redukcję liczby węzłów obliczeniowych i przewodów, ale także takie zmiany średnicy pozostających przewodów i takie przypisanie odbiorców do pozostałych w modelu węzłów, aby prawidłowo odwzorować np. opory ruchu i rozkład ciśnienia w analizowanej sieci wodociągowej [3,13,15]. Istnieje wiele metod realizacji szkieletyzacji modeli numerycznych sieci wodociągowych. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć [3,13,16]:

- **Data Scrubbing** – tzw. czyszczenie danych, polegające na uproszczeniu modelu w oparciu o zapytania związane z wybranymi parametrami, np. usunięcie wszystkich odcinków o średnicach i długościach mniejszych niż założona.
- **Branch Trimming** – tzw. przycinanie gałęzi, polegająca na usuwaniu końcówek sieci i odpowiadających im węzłów końcowych. Metoda ta ma charakter rekurencyjny – usunięcie jednej „gałęzi” może prowadzić do sytuacji, w której powstają nowe końcówki do utworzenia kolejnej.

- **Series Pipe Removal** – tzw. scalanie odcinków, polegające na stosowaniu przewodu zastępczego zamiast dwóch lub więcej przewodów połączonych szeregowo. Wymaga ona określenia strategii przypisania poborów wody z usuwanych węzłów pomiędzy zastępowanymi przewodami połączonymi szeregowo. Metoda ta wpisuje się też w tzw. zautomatyzowaną szkieletyzację (ang. automated skeletonization) [17].

Bardzo często w procesie szkieletyzacji wykorzystywana jest więcej niż jedna metoda, zależnie od zakładanego efektu. Każdorazowo jednak uzyskany model powinien być poddawany procesowi kalibracji [16,18].

Celem artykułu jest przedstawienie procesu szkieletyzacji istniejącej sieci wodociągowej, przy wykorzystaniu narzędzi oferowanych przez program WaterGEMS firmy Bentley. Uzyskane za pomocą dwuetapowego procesu szkieletyzacji modelu numerycznego wyniki symulacji obliczeniowych porównano z wynikami modelu podstawowego oraz jednocześnie z wynikami monitoringu sieciowego.

Obiekt badań

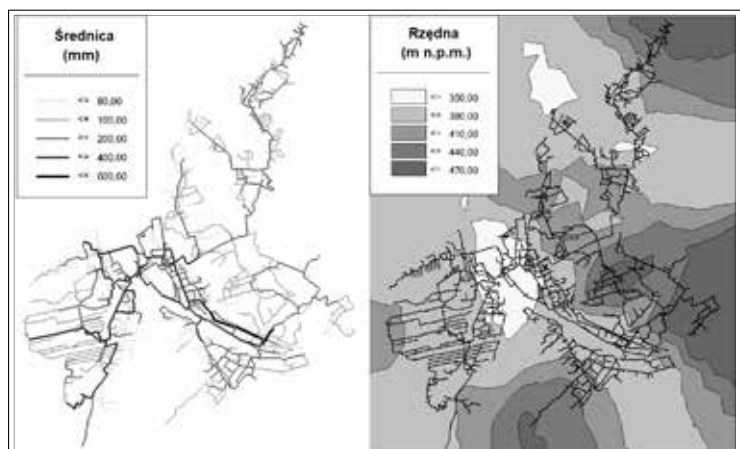
Proces szkieletyzacji struktury geometrycznej modelu numerycznego i jego wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników symulacyjnych został przedstawiony na przykładzie rzeczywistej sieci wodociągowej miasta Żywiec oraz gmin ościennych. Średnie dobowe zużycie wody w rozpatrywanym systemie wodociągowym wyniosło ok. 5000 m³/d w 2020 r. Odbiorcami wody są przede wszystkim gospodarstwa domowe w budynkach jedno i wielorodzinnych, punkty usługowe oraz kilka zakładów przemysłowych o znaczącym zapotrzebowaniu. Rozliczanie za dostarczaną wodę odbywa się przy wykorzystaniu stacjonarnego oraz mobilnego systemu zdalnego

odczytu wodomierzy. Struktura geometryczna sieci ma charakter bardzo złożony zarówno w planie, jak i pod względem wysokościowym. Sieć zbudowana jest z rur wykonanych z PEHD (62%), żeliwa szarego (20%), PVC (8%), azbestocementu (6%), stali (3%) oraz żeliwa sferoidalnego (1%). Średnice przewodów sieciowych obejmują szeroki zakres – od 40 do 600 mm. Schemat geometryczny struktury sieci, z wyróżnionymi średnicami przewodów i układem warstwic przedstawiono na rysunku 1. System wodociągowy Żywca obejmuje jedno ujęcie wody, 24 strefy ciśnienia, 7 zbiorników sieciowych, 15 pompowni strefowych i około 230 km rurociągów (bez przyłączy).

Jedną z inwestycji przeprowadzonych w Żywcu w ostatnich latach było wdrożenie Inteligentnego Systemu Zarządzania Siecią Wodociągową (ISZSW) [19], którego zakres obejmował m.in. opracowanie i wykorzystanie numerycznego modelu sieci wodociągowej. Do budowy modelu wykorzystano oprogramowanie WaterGEMS firmy Bentley. Graf sieci obejmuje około 11500 odcinków i około 10000 węzłów. Model został dostosowany do wspomaganego zadań o charakterze bieżącym – krok czasowy obliczeń zdefiniowany został jako 20 minut, a całkowita długość symulacji typu EPS (ang. *Extended Period Simulation*) wyniosła 168 godzin (7 dni). Zbudowany model poddano procesowi kalibracji. W jego ramach przeprowadzono kampanie pomiarowe obejmujące różne warunki pracy sieci w różnych porach roku. Wyniki obliczeń symulacyjnych porównywano ze wskazaniami pracujących w systemie on-line 65 punktów monitoringu ciśnienia i 47 punktów monitoringu natężenia przepływu wody.

Opracowany model numeryczny sieci wodociągowej odwzorowywał wszystkie przewody magistralne, rozdzielcze, a także wybrane przyłącza wodociągowe. Tak zbudowany model okazał się bardzo użyteczny dla celów bieżącego zarządzania

Rys. 1. Struktura geometryczna sieci wodociągowej Żywca z zaznaczonymi średnicami i warstwicami [19]



procesami eksploatacji [19]. Z drugiej strony, model okazał się mało przydatny do rozwiązywania zadań o charakterze optymalizacyjnym m.in. do minimalizacji kosztów energii elektrycznej związanej z pracą pompowni sieciowych. Wymusiło to konieczność opracowania drugiej wersji modelu o charakterze szkieletowym.

Metodyka badań

Szkieletowy model sieci wodociągowej Żywca opracowano na bazie przedstawionego powyżej modelu numerycznego. Proces uproszczenia struktury geometrycznej modelu przeprowadzono z zastosowaniem narzędzia *Skelebrator Skeletonizer* oferowanego przez oprogramowanie WaterGEMS. Proces szkieletyzacji obejmował dwa etapy:

- szkieletyzacja I-go stopnia – wykorzystująca metodę *Branch Trimming*,
- szkieletyzacja II-go stopnia – wykorzystująca metodę *Series Pipe Removal*.

Proces szkieletyzacji przeprowadzono przy założeniu, że liczba i lokalizacja odbiorców (*Customer Meters*) nie podlegały modyfikacji. Takie podejście gwarantowało możliwość przyszłego aktualizowania poborów wody o wartości bieżące według zdalnego systemu odczytu wodomierzy. Podobne założenia przyjęto w odniesieniu do charakterystycznych obiektów sieciowych, tj. zbiorników i pompowni sieciowych. Ich lokalizacja, nastawy i reguły sterowania pozostały niezmiennic. Nieco odmienne podejście zastosowano w przypadku zasuw oraz zaworów redukujących ciśnienie. Ich lokalizacja, status i nastawa pozostały niezmiennic, pod warunkiem, że przewody, na których były zlokalizowane nie zostały usunięte w procesie szkieletyzacji I-go stopnia.

Dodatkowo w procesie uproszczenia struktury geometrycznej modelu założono, że zachowane zostaną wszystkie występujące punkty monitoringu, nawet jeśli zlokalizowane były na końcówkach sieci. Założenie to stanowiło jednocześnie dolną granicę procesu szkieletyzacji. Pozwoliło ono przeprowadzić analizę wpływu szkieletyzacji na ocenę zgodności wyników prowadzonych symulacji z zarejestrowanymi wskazaniem rzeczywistymi czujników monitoringu. Jak dotychczas nie opracowano wytycznych wyznaczających oceny zgodności wyników pomiarowych i obliczeniowych [20], dlatego też ocenę tę przeprowadzono oddzielnie dla każdego punktu pomiarowego, wykorzystując wymagania zawarte w wytycznych AWWA [18] stosowanych podczas kalibracji modeli numerycznych sieci wodociągowych.

Zgodnie z wytycznymi AWWA, modele o niskim stopniu uszczegółowienia, przeznaczone do wspomaganie decyzji planistycznych, powinny odznaczać się zgodnością wskazań wartości mierzonych wysokości ciśnienia z wynikami symulacji na poziomie $\pm 3,5$ m H₂O dla wszystkich punktów pomiarowych (które powinny obejmować 10% wszystkich węzłów).

Z kolei zgodność mierzonych wartości natężenia przepływu z wynikami symulacyjnymi powinna wynosić $\pm 10\%$ Q, a liczba punktów pomiarowych powinna obejmować 1% wszystkich przewodów. W celu pokazania różnic dopasowania uzyskanych przed i po dwuetapowym procesie szkieletyzacji, wykorzystano błąd średni (wzór 1) dla wysokości ciśnienia oraz procentowy błąd średni (wzór 2) dla wartości natężenia przepływu.

$$\bar{\delta}_p = \frac{p_{obl\ \bar{s}r} - p_{zm\ \bar{s}r}}{p_{obl\ \bar{s}r}} \quad (1)$$

$$\bar{\delta}_Q = \frac{Q_{obl\ \bar{s}r} - Q_{zm\ \bar{s}r}}{Q_{obl\ \bar{s}r}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- $\bar{\delta}_p$ – średni błąd zgodności obliczonej i zmierzonej wysokości ciśnienia,
- $\bar{\delta}_Q$ – średni błąd procentowy zgodności obliczonego i zmierzonego natężenia przepływu,
- $p_{obl\ \bar{s}r}$ – średnia wysokość ciśnienia obliczona w węzle pomiarowym,
- $p_{zm\ \bar{s}r}$ – średnia wysokość ciśnienia zmierzona w węzle pomiarowym,
- $Q_{obl\ \bar{s}r}$ – średnie natężenie przepływu obliczone w odcinku pomiarowym,
- $Q_{zm\ \bar{s}r}$ – średnie natężenie przepływu w odcinku pomiarowym.

Wyniki badań i ich dyskusja

Wyniki procesu szkieletyzacji

Wyniki procesu szkieletyzacji przedstawiono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności zobrazowano proces przekształcania modelu bazowego w szkieletowy, na przykładzie jednej ze stref sieci Żywca (strefa XVII). W dalszej kolejności omówiono efekty szkieletyzacji w odnie-

sieniu do całej analizowanej sieci wodociągowej.

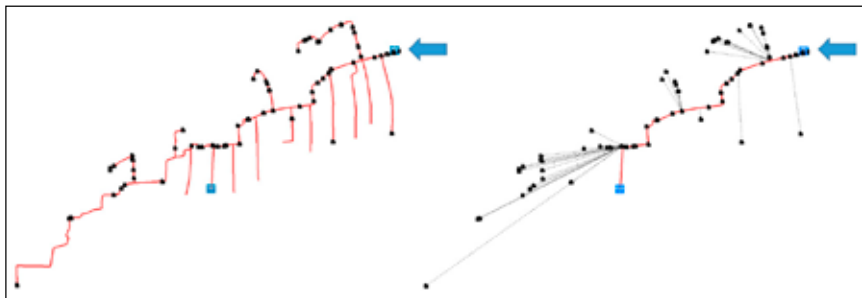
Strefa XVII, zlokalizowana w zachodniej części analizowanej sieci, w modelu bazowym składała się ze 182 odcinków o sumarycznej długości 4 299,6 m. Po przeprowadzonym I etapie procesu szkieletyzacji, struktura sieci została uproszczona i obejmowała 47 odcinków o łącznej długości 863,8 m. W kolejnym kroku, poprzez eliminację węzłów pośrednich, liczba odcinków została zmniejszona do 9, przy zachowaniu sumarycznej długości 863,8 m. Wraz ze zmniejszeniem liczby odcinków tworzących modelowe odwzorowanie strefy XVII zmalała liczba węzłów: od 164 w modelu bazowym, przez 48 w I-etapie modelu szkieletowego, do 9 w modelu szkieletowym II-go stopnia. Podobna sytuacja miała miejsce z liczbą zasuw sieciowych, która została zredukowana z 20 szt. w modelu bazowym do 6 w modelu szkieletowym II-go stopnia. Pomimo uproszczenia struktury geometrycznej sieci, zgodnie z założeniami, zmianie nie uległa liczba i lokalizacja odbiorców oraz punktów monitoringu. Zestawienie podstawowych elementów składowych modelu numerycznego przed i po procesie szkieletyzacji w strefie XVII przedstawiono w tabeli 1.

Graficzną reprezentację wyników przeprowadzonego procesu szkieletyzacji strefy XVII przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Na rysunku 2 pokazano graf modelu bazowego (po lewej) oraz graf modelu uzyskanego po pierwszym etapie szkieletyzacji (po prawej) – redukcji odcinków końcowych. Niebieską strzałką oznaczono miejsce zasilenia strefy, zaś niebieskie punkty oznaczają istniejące punkty monitoringu sieciowego. Na rysunku 2 pokazano również sposób przypisania węzłów odbiorców (czarne znaczniki) do powstałej sieci szkieletowej – lokalizacja odbiorców pozostała niezmiennic, zostali oni połączeni „wirtualnie” z węzłami tworzącymi strukturę geometryczną modelu szkieletowego.

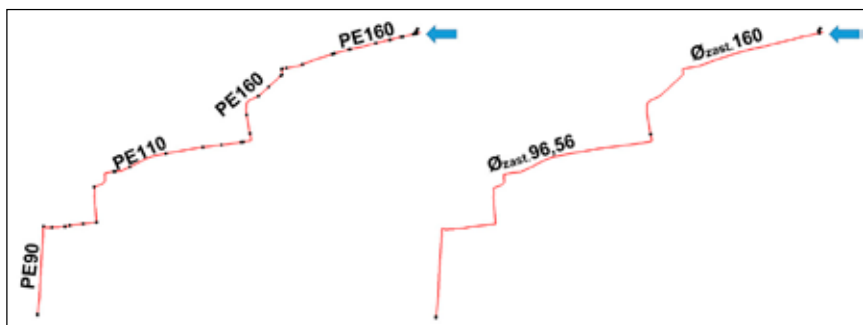
Na rysunku 3 przedstawiono powiększenie fragmentu sieci szkieletowej uzyskanej po pierwszym (po lewej) i drugim (po prawej) etapie szkieletyzacji. Porównanie zawarte na rysunku 3 wskazuje, że różnice pomiędzy pierwszym i drugim

Tab. 1. Zestawienie podstawowych elementów składowych modelu numerycznego przed i po procesie szkieletyzacji – strefa XVII

Rodzaj modelu	Liczba odcinków	Suma długości przewodów	Liczba węzłów	Liczba odbiorców	Liczba zasuw sieciowych	Liczba punktów pomiarowych SCADA
	szt.	m	szt.	szt.	szt.	szt.
bazowy	182	4 299,6	164	102	20	3
szkieletowy - I etap	47	863,8	48	102	6	3
szkieletowy - II etap	9	863,8	9	102	6	3



Rys. 2. Struktura geometryczna modelu wybranego fragmentu wodociągu – przed (po lewej) oraz po pierwszym etapie procesu szkieletyzacji (po prawej)



Rys. 3. Porównanie grafu sieci z rysunku 2 po przeprowadzeniu pierwszego (po lewej) i drugiego (po prawej) etapu szkieletyzacji

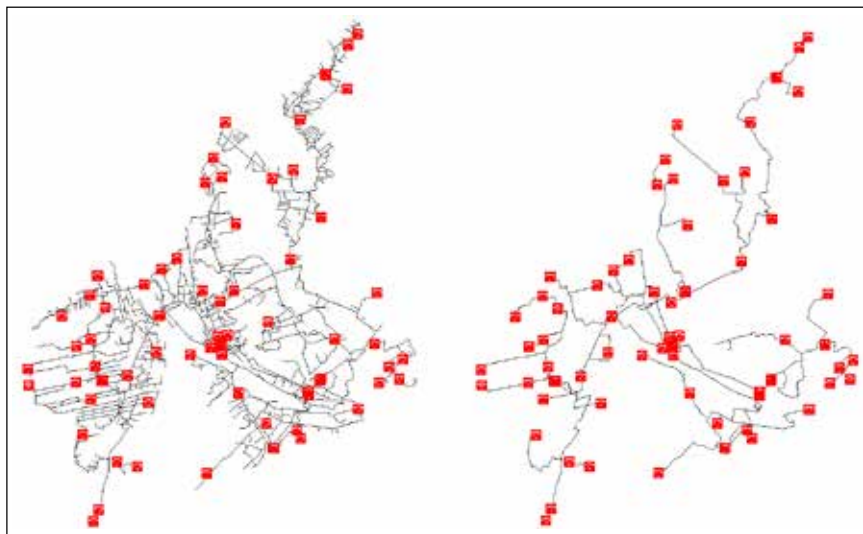
etapem szkieletyzacji polegają na zmniejszeniu liczby węzłów zawartych w modelu oraz na zmianie średnic DN/OD. Układ geometryczny przewodów szkieletowych jest w obu uzyskanych modelach taki sam.

Wykorzystując przedstawioną powyżej metodykę, dokonano następnie procesu

szkieletyzacji całej sieci. Na rys. 4 przedstawiono graf sieci bazowej oraz po przeprowadzeniu procesu szkieletyzacji. Dodatkowo na rys. 4 przedstawiono lokalizację punktów monitoringu sieciowego. Zgodnie z przyjętymi założeniami, lokalizacja i liczba punktów monitoringu nie uległy zmianie.

Tab. 2. Zestawienie podstawowych elementów składowych modelu numerycznego sieci wodociągowej przed i po procesie szkieletyzacji

Rodzaj modelu	Liczba odcinków	Suma długości przewodów	Liczba węzłów	Liczba zaworów redukcyjnych	Liczba zasuw sieciowych	Liczba zamkniętych zasuw sieciowych
	szt.	m	szt.	szt.	szt.	szt.
bazowy	11 452	231 076	10 080	14	2 553	57
szkieletowy - I etap	3 037	79 099	2 971	12	492	16
szkieletowy - II etap	374	79 099	308	12	492	16



Rys. 4. Graf modelu sieci wodociągowej Żywca – przed (po lewej) oraz po procesie szkieletyzacji (po prawej). Czerwone znaczniki reprezentują lokalizację punktów monitoringu sieciowego

Przeprowadzenie procesu szkieletyzacji doprowadziło do znacznego ograniczenia liczby węzłów, liczby i długości odcinków, liczby zasuw sieciowych ogółem oraz liczby zamkniętych zasuw sieciowych. Zestawienie prezentujące powyższe zmiany zawarto w tabeli 2. Zgodnie z przyjętym założeniem liczba punktów monitoringu odwzorowanych w modelu szkieletowym nie zmieniła się w stosunku do modelu bazowego. Pomiedzy modelem szkieletowym I-go i II-go stopnia dostrzegalne różnice dotyczą liczby odcinków i węzłów, natomiast suma długości przewodów wodociągowych pozostała jednakowa.

Zgodność obliczonej i zmierzonej wysokości ciśnienia

Zestawienie uzyskanych wartości wskaźników obrazujących zgodność wyników obliczeń symulacyjnych z pomiarami wysokości ciśnienia przedstawiono w tabeli 3. W modelu bazowym, zgodność ta była stosunkowo wysoka. Wymagania AWWA (dokładność $\pm 3,5$ m H₂O) spełniało 61 z 65 punktów pomiaru wysokości ciśnienia (93,85%). Warto zauważyć, że z wspomnianych 61 punktów tylko w 1. błęd przekraczał $\pm 1,5$ m H₂O, a aż 13 punktów wykazało dokładność $\pm 0,1$ m H₂O. Po przeprowadzeniu procesu szkieletyzacji (I-go i II-go stopnia) liczba węzłów spełniających wymagania AWWA wyniosła 62 z 65 analizowanych punktów monitoringu wysokości ciśnienia (95,38%). Pomimo sumarycznie większego udziału punktów spełniających stawiane wymagania, zauważalny jest spadek dokładności modelu. Liczba punktów monitoringu o dokładności $\pm 1,5$ m H₂O zmalała, natomiast do 5 wzrosła liczba punktów o dokładności od $\pm 1,5$ m H₂O do $\pm 3,5$ m H₂O.

Szczegółowe zestawienie 4 węzłów, w których stwierdzono pogorszenie zgodności uzyskanych wyników symulacyjnych z wartościami zmierzonymi przedstawiono w tabeli 4. Węzły te w modelu bazowym wykazywały zgodność do $\pm 1,5$ m H₂O, podczas gdy po procesie szkieletyzacji spadła ona do poziomu $\pm 3,5$ m H₂O. Jednakże, warto zauważyć, że wszystkie z przedstawionych punktów monitoringu ciągle spełniają wymagania AWWA stawiane modelom do zastosowań planistycznych o niskim stopniu uszczegółowienia.

Przykładowe graficzne zobrazowanie dopasowania wyników symulacyjnych do pomiarów dla punktu monitoringu nr 21 przedstawiono na rysunku 5. Na wykresie pokazano 4-dniowy okres pomiarowy ze zmierzonymi wysokościami ciśnienia,

Tab. 3. Zgodność wyników symulacyjnych z pomiarami – wysokość ciśnienia

δ_p	Model					
	bazowy		szkieletowy I etap		szkieletowy II etap	
m H ₂ O	liczba	%	liczba	%	liczba	%
poniżej $\pm 0,1$	13	20,00	15	23,08	17	26,15
od $\pm 0,1$ do $\pm 0,5$	20	30,77	16	24,62	15	23,08
od $\pm 0,5$ do $\pm 1,0$	15	23,08	14	21,54	12	18,46
od $\pm 1,0$ do $\pm 1,5$	12	18,46	12	18,46	13	20,00
od $\pm 1,5$ do $\pm 3,5$	1	1,54	5	7,69	5	7,69
powyżej $\pm 3,5$	4	6,15	3	4,62	3	4,62

Tab. 4. Szczegółowe zestawienie zgodności wyników symulacyjnych z pomiarami dla 4. węzłów – wysokość ciśnienia

Punkt pomiarowy	δ_p		
	model bazowy	model szkieletowy I etap	model szkieletowy II etap
	m H ₂ O	m H ₂ O	m H ₂ O
nr 21	1,30	3,29	3,18
nr 45	1,06	2,57	2,49
nr 53	1,49	3,23	3,17
nr 60	0,31	1,90	1,86

Tab. 5. Zgodność wyników symulacyjnych z pomiarami – natężenie przepływu

δ_Q	Model					
	bazowy		szkieletowy I etap		szkieletowy II etap	
% Q	Liczba	%	Liczba	%	Liczba	%
poniżej ± 1	2	4,26	1	2,13	1	2,13
od ± 1 do ± 5	6	12,77	9	19,15	5	10,64
od ± 5 do ± 10	12	25,53	9	19,15	13	27,66
od ± 10 do ± 25	5	10,64	7	14,89	7	14,89
od ± 25 do ± 50	9	19,15	4	8,51	5	10,64
powyżej $\pm 50\%$	13	27,66	17	36,17	16	34,04

które oznaczono za pomocą niebieskich znaczników. Zieloną linią zaznaczono wyniki symulacyjne wysokości ciśnienia uzyskane z modelu bazowego. W zależności od dnia pomiarów, rozbieżność wskazań modelu bazowego wynosiła maksymalnie ± 2 m H₂O, przy średniej zgodności wyników równej $\pm 1,30$ m H₂O. Rozbieżność ta wzrasta przy porównaniu wskazań modelu szkieletowego I-go i II-go etapu (linia czerwona oraz fioletowa na rysunku 5). Poza pogorszoną zgodnością uśrednioną (odpowiednio $\pm 3,29$ i $\pm 3,18$ mH₂O dla modelu szkieletowego I-go i II-go stopnia), zauważalny jest także mniej zróżnicowany rozkład ciśnienia w sieci w porównaniu do modelu bazowego. Uproszczenie struktury geometrycznej spowodowało wypłaszczenie wykresu wysokości ciśnienia i brak zauważalnych wahań występujących w rzeczywistości w modelu bazowym. Cyklicznie powtarzające się obniżenia ciśnienia odpowiadają okresom napełniania zbiornika, czyli w czasie zwiększonego przepływu. Po procesie szkieletyzacji, różnice między wskazaniami modelu, a pomiarami w tym czasie osiągają wartości nawet około ± 6 m H₂O (linia czerwona). Model szkieletowy II-go stopnia wykazuje w tym samym czasie nieznacznie lepsze odwo-

rowanie danych rzeczywistych, co znajduje potwierdzenie w uśrednionej zgodności wyników ($\pm 3,18$ m H₂O).

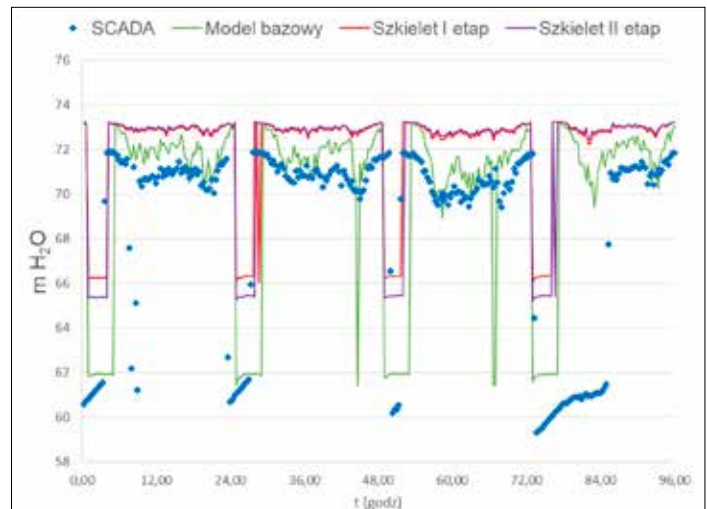
Zgodność obliczonego i zmierzonego natężenia przepływu

Zestawienie uzyskanych wartości wskaźników obrazujących zgodność wyników obliczeń symulacyjnych z wartościami zmierzonymi natężenia przepływu wody przedstawiono w tabeli 5. Inaczej niż w przypadku wysokości ciśnienia, model bazowy odznaczał się niższą zgod-

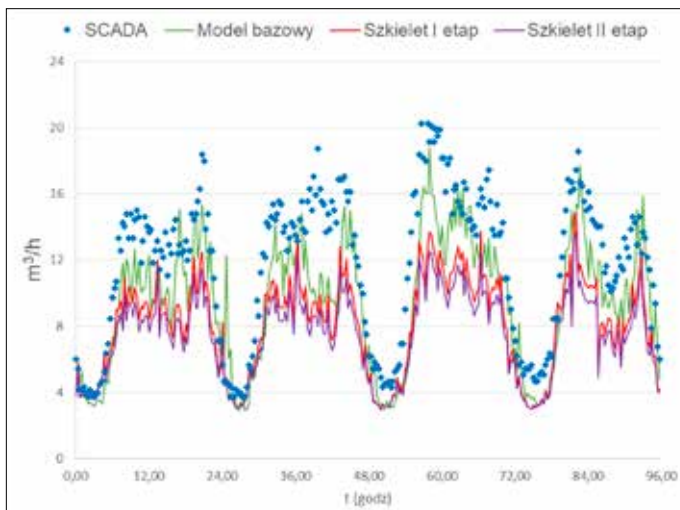
nością początkową wartości obliczonych natężenia przepływu z wartościami zmierzonymi. Wymagania AWWA dotyczące dopuszczalnej odchyłki $\pm 10\%$ spełniało 20 z 47 analizowanych punktów monitoringu (42,56% wszystkich). Po przeprowadzeniu procesu szkieletyzacji, liczba ta zmalała do 19 punktów (40,43%). Niższa zgodność obliczeń symulacyjnych i pomiarów natężenia przepływu wynikała z szeregu czynników [21]. Wśród nich istotne znaczenie miały: nie w pełni zautomatyzowany proces napełniania zbiorników, niewielki zakres przepływów w wielu punktach pomiarowych (błąd rzędu od jednego do kilku m³/h przekraczał 50% wartości zmierzonej) oraz brak szczegółowego rozpoznania lokalizacji istniejących wycieków.

Wpływ procesu szkieletyzacji na zgodność wyników symulacyjnych z rzeczywistymi omówiono na przykładzie punktu monitoringu nr 11. Jest to punkt, w którym zarejestrowano pogorszenie zgodności dopasowania wyników uzyskanych po procesie szkieletyzacji. W modelu bazowym, w punkcie tym odnotowano uśrednioną zgodność na poziomie $\pm 4,09\%$ Q, spełniającą zalecenia wytycznych AWWA. Można to zaobserwować na rys. 6. Zielona linia (wyniki z modelu bazowego) zarówno kształtem, jak i zakresem w wysokim stopniu pokrywa się z zarejestrowanymi wartościami rzeczywistymi (punkty pomiarowe SCADA – niebieskie znaczniki). Po przeprowadzeniu szkieletyzacji I-go stopnia zgodność wyników uległa pogorszeniu do poziomu $\pm 8,95\%$ Q, zaś końcowa zgodność wyników (po procesie szkieletyzacji II-go stopnia) wyniosła $\pm 17,47\%$ Q, co oznacza, że zalecenia wytycznych AWWA nie zostały spełnione. Analizując wykres dopasowania wyników obliczeniowych po procesie szkieletyzacji (kolor

Rys. 5. Dopasowanie wyników obliczeniowych wysokości ciśnienia z pomiarami dla punktu nr 21



Rys. 6.
Dopasowanie
wyników oblicze-
niowych natężenia
przepływu
z pomiarami dla
punktu nr 11



czzerwony i fioletowy rys. 6) zauważyć można, podobnie jak w przypadku wykresu wysokości ciśnienia, wyplaszczanie kształtu krzywej symulacyjnej. Wartości obliczeniowe w modelach szkieletowych wykazują mniejsze zróżnicowanie, przez co w gorszym stopniu pokrywają się z wartościami zmierzonymi.

Podsumowanie

Prawidłowa realizacja procesu szkieletyzacji stanowi zagadnienie wymagające doświadczenia w pracy z modelami numerycznymi sieci wodociągowych. Proces ten to nie tylko rekurencyjne usuwanie tzw. końcówek sieci, ale także zmiana przypisywania odbiorców wody do pozostających w modelu węzłów lub zmiana średnic przewodów zastępujących istniejące w rzeczywistej sieci. Zadanie staje się jeszcze trudniejsze w przypadku przyjęcia założenia o pozostawieniu w modelu szkieletowym węzłów, w których realizowane są pomiary monitoringu sieciowego. Dużą pomocą w realizacji procesu szkieletyzacji są specjalizowane narzędzia zawarte w komercyjnym oprogramowaniu do modelowania numerycznego sieci wodociągowych.

Należy zwrócić uwagę, że proces szkieletyzacji jest „jednokierunkowy” – po zbudowaniu modelu szkieletowego, brak możliwości odtworzenia struktury bazowej. Przy współpracy modelu numerycznego z bazą GIS zintegrowanego systemu zarządzania siecią wodociągową, po procesie szkieletyzacji II-go stopnia – traci się możliwość automatycznej aktualizacji modelu – powstają odcinki zastępcze, które nie posiadają odpowiedniego odwzorowania w bazie GIS.

Przeprowadzone porównanie rezultatów obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów monitoringu sieciowego wyka-

zało, że powstałe modele szkieletowe mają podobną dokładność jak model bazowy w zakresie wartości średnich wysokości ciśnienia i natężenia przepływu. Dokładność ta spada w przypadku porównywania rezultatów obliczeń i pomiarów w poszczególnych krokach czasowych. Potwierdzają to zalecenia AWWA, w sprawie stosowania modeli szkieletowych głównie do obliczeń o charakterze koncepcyjnym. W rozpatrywanym przypadku nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy rezultatami obliczeń realizowanych przy użyciu modelu szkieletowego I-go i II-go stopnia.

Niniejszy artykuł został sfinansowany z indywidualnego grantu wewnętrznego (FD-20/IS-6/034) Politechniki Lubelskiej.

LITERATURA:

- [1] Boryczko K., Wybrane metody wspomagania pracy operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę, Instal 4(439), 2022, 36-41. DOI 10.36119/15.2022.4.4
- [2] Diao K., Fu G., Farmani R., Guidolin M. Butler D., Twin-Hierarchy Decomposition for Optimal Design of Water Distribution Systems, Journal of Water Resources Planning and Management, 142(5), 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000597
- [3] Duzinkiewicz K., Ciminski A., Drinking water distribution system modelling - an approach to skeletonization, IFAC Proceedings Volumes 39(14), 2006, 244-249. <https://doi.org/10.3182/20060830-2-SF-4903.00043>
- [4] Giustolisi O., Savic D., Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks, Urban Water Journal, 7(1), 2010, 1-15. <https://doi.org/10.1080/15730620903287530>
- [5] Giustolisi O., Water Distribution Network Reliability Assessment and Isolation Valve System, Journal of Water Resources Planning and Management, 146(1), 2020, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001128)
- [6] Batchabani E., Fuamba M., Optimal Tank Design in Water Distribution Networks: Review of Literature and Perspectives, Journal of Water Resources Planning and Management, 140(2), 2014, 136-145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000256](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000256)
- [7] Blinco L.J., Lambert M.F., Simpson, A.R., Marchi A., Framework for the optimization of operation and design of systems with different alternative water sources. Earth Perspectives 4(3), 2017. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0038-2>
- [8] Abdel-Mottaleb N., Ghasemi Saghand P., Charkghard H., Zhang Q., An Exact Multiobjective Optimization Approach for Evaluating Water Distribution Infrastructure Criticality and Geospatial Interdependence, Water Resources Research, 55, 2019, 5255-5276. <https://doi.org/10.1029/2018WR024063>
- [9] Urbaniak A., Antonowicz A., Analiza krytyczności elementów na podstawie symulacji hydraulicznych sieci wodociągowej z wykorzystaniem biblioteki WNTR, Instal, 441(6), 2022, 43-48. DOI 10.36119/15.2022.6.6
- [10] Chang Y., Choi G., Kim J., Byeon S., Energy Cost Optimization for Water Distribution Networks Using Demand Pattern and Storage Facilities, Sustainability, 10(4), 2018, 1118. <https://doi.org/10.3390/su10041118>
- [11] Salomons E., Housh M., Practical real-time optimization for energy efficient water distribution systems operation, Journal of Cleaner Production, 275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124148>
- [12] Kwietniewski M., Chudzicki J., Miszta-Kruk K., Kowalska B., Kowalski D., Musz A., Mierzwa A., Zintegrowany System Zarządzania Infrastrukturą Techniczną na przykładzie Wodociągów Puławskich. Inżynieria Bezwykopowa, 6, 2012, 78-80.
- [13] Martínez-Solano J.F., Iglesias-Rey P.L., Mora-Meliab D., Fuertes-Miquel V.S., Exact Skeletonization Method in Water Distribution Systems for Hydraulic and Quality Models, Procedia Engineering, 186, 2017, 286-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.246>
- [14] Arena C., Cannarozzo M., Fortunato A., Sclaro I., Mazzola M.R., Sensitivity of regional water supply systems models to the level of skeletonization - a case study from Apulia, Italy. Procedia Engineering, 119, 535-544, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.905>
- [15] Bahadur R., Johnson J., Janke R., Samuels W.B., Impact of Model Skeletonization on Water Distribution Model Parameters as Related to Water Quality and Contaminant Consequence Assessment, Eighth Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA), Cincinnati, Ohio, August 27-30 2006. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)64](https://doi.org/10.1061/40941(247)64)
- [16] Bentley Systems, Walski T.W., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W., Beckwith S., Koelle E., Advanced distribution modeling and management. Bentley Institute Press, Exton, Pennsylvania, 2007.
- [17] <https://www.waterworld.com/drinking-water/distribution/article/16204281/skelebrator-from-haestad-methods-reduces-water-distribution-network-modelbuilding-time> (data dostępu: 2005.08.22)
- [18] ECAC. "Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling." Proceedings, AWWA IntTech Conference, New Orleans, LA. April 18-21, 1999.
- [19] Kasino W., Suchorab P., Kowalski D., Inteligentny System Zarządzania Siecią Wodociągową w Żywcu, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 10, 2021, 16-19. DOI: 10.15199/17.2021.10.3
- [20] Walski, T., Why global standards for calibration of water distribution models won't work, Journal American Water Works Association, 111(5), 2019, 31-34. <https://doi.org/10.1002/awwa.1287>
- [21] Kowalski D., Kowalska B., Suchorab P., Smart water supply system: A quasi intelligent diagnostic method for a distribution network, Applied Water Science, 12(6), 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01656-w>