

Propozycja obniżenia kosztów energii zużywanej do pracy pomp wodociągowych

Proposal of reducing the energy cost used to operate water pumps

Ewa Hołota *)

Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, koszty energii, WaterGEMS

Streszczenie

Zadaniem przedsiębiorstw wodociągowych jest dostarczenie wody o odpowiedniej jakości, w odpowiedniej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem wszystkim odbiorcom. Jest to proces złożony i jednocześnie kosztochłonny. Przedsiębiorstwa wodociągowe dążą do ciągłego podnoszenia efektywności działania systemów zaopatrzenia w wodę przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów eksploatacji.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwość zmniejszenia kosztów energii elektrycznej zużywanej do zasilania pomp wodociągowych w rzeczywistej sieci wodociągowej. Przeanalizowano 2 scenariusze, które opisują kolejne działania podejmowane w celu obniżenia tych kosztów. Pierwszy zakłada manualną zmianę parametrów pracy pomp i zastosowanie zaworów redukujących ciśnienie, natomiast drugi wykorzystuje oprogramowane WaterGEMS firmy Bentley do przeprowadzenia optymalizacji kosztów energii elektrycznej związanej z pracą pomp wodociągowych. Uzyskane wyniki dowodzą, że zmniejszenie ciśnienia w sieci wodociągowej i odpowiednia regulacja pomp wodociągowych przyczynia się do zmniejszenia kosztów energii elektrycznej niezbędnej do zasilania pomp.

Keywords: water supply, energy cost, WaterGEMS

Abstract

The task of water supply companies is to provide water of proper quality, in the right amount and under the right pressure, to all recipients. That is a complex and cost-intensive process. Water companies strive to constantly increase the efficiency of water supply systems while reducing operating costs.

The article presents the possibility of reducing the cost of electricity used to run water pumps in a real water network. Two scenarios describing the steps taken to reduce these costs were analyzed. The first one involves a manual change of pump parameters and use of pressure reducing valves, while the other one uses Bentley's WaterGEMS software in order to optimize the operation of water pumps. The results obtained prove that reducing the pressure in the water supply network and appropriate regulation of the water supply pumps contribute to the reduction of electricity costs necessary to power the pumps.

1. Wstęp

System dystrybucji wody składa się z wielu powiązanych ze sobą elementów. Ich prawidłowe działanie zapewnia niezawodną i efektywną pracę całego układu. Współczesne przedsiębiorstwa wodociągowe dążą do ciągłego podnoszenia efektywności działania systemów zaopatrzenia w wodę przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów eksploatacji. Spełnienie tych wymagań wiąże się z koniecznością wdrażania zintegrowanych systemów zarządzania siecią wodociągową [7, 16, 20]. Wiele przedsiębiorstw posiada mapy numeryczne zbudowane w bazach danych typu GIS, jednak są one niewystarczające z punktu widzenia zarządzania całym systemem dystrybucji wody. Konieczne jest wdrożenie przynajmniej modelu hydraulicznego, który jest pomocny zarówno na etapie projektowania i planowania struktury sieci, jak również podczas eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę. Dzięki obliczeniom symulacyjnym możliwa jest obserwacja dynamicznych procesów zachodzących w sieci wodociągowej i ich wnikliwa analiza. W rezultacie modele hydrauliczne umożliwiają racjonalizację sposobu budowy i eksploatacji sieci oraz przyczyniają się do wzrostu efektywności przy jednoczesnym ograniczaniu

nakładów finansowych [4, 22].

Transport wody zużywa duże ilości energii elektrycznej, dlatego zmniejszenie energochłonności tego procesu przyczyni się do obniżenia kosztów eksploatacji systemów dystrybucji wody. W pierwszej kolejności należy przewidzieć możliwość regulacji ciśnienia w sieci, np. poprzez zastosowanie zaworów redukujących ciśnienie. Spowoduje to zmniejszenie awaryjności sieci i w efekcie zmniejszenie strat wody [10, 11], jak również spowoduje konieczność zmiany parametrów pomp wodociągowych. Nieprawidłowo dobrana pompa stanowi źródło niepotrzebnych kosztów. Najczęstszymi przyczynami nadmiernych strat energii w układach pompowych jest ich pogorszony stan techniczny w wyniku eksploatacji oraz niedopasowanie parametrów ich pracy do aktualnych wymagań. Dodatkowo, nieprawidłowa regulacja pompy, np. poprzez dławienie zamiast zmiany regulacji prędkości obrotowej, przyczynia się do zużywania większej ilości energii elektrycznej. Jednym ze sposobów wyeliminowania tych strat jest optymalna energetycznie regulacja pomp, dzięki której, według stowarzyszenia Europump,

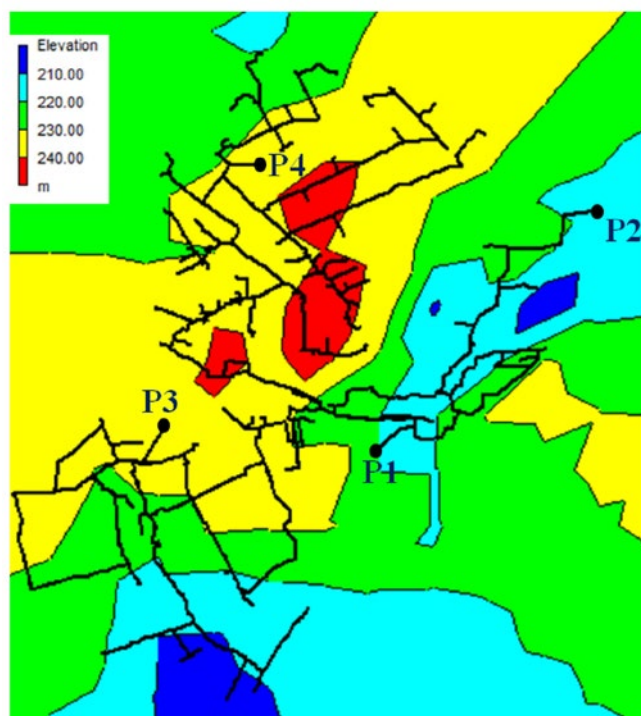
*) Ewa Hołota – dr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, e.holota@pollub.pl

można oszczędzić nawet 20% kosztów [1, 6]. Problemy związane z optymalizacją kosztów pracy pompowni dotyczą większości przedsiębiorstw wodociągowych. Badania nad możliwością ich obniżenia przedstawione są w wielu publikacjach [3, 5, 9, 13-15 17-19, 21]. Najczęściej stosowanym w nich rozwiązaniem jest zmiana prędkości obrotowej pomp dostosowana do zmieniającego się zapotrzebowania na wodę. Z uwagi na to, że proces optymalizacji jest złożony, szczególnie gdy rozpatrujemy sieć zasilaną z kilku ujęć wody, pomocne okazują się programy komputerowe. W ostatnich latach programy do modelowania numerycznego sieci wodociągowych zostały rozbudowane o dodatkowe moduły, dzięki którym możliwe jest przeprowadzanie optymalizacji wielokryterialnej usprawniającej sposób pracy pomp wodociągowych oraz umożliwiającej minimalizację wielkości zużycia energii niezbędnej do pompowania wody. Uzyskane za ich pomocą informacje wspomagają optymalny dobór parametrów pracy systemu, a co za tym idzie, efektywne wykorzystanie elementów infrastruktury, racjonalizację zużycia energii i redukcję kosztów pompowania wody oraz pomagają podejmować odpowiednie decyzje związane ze sterowaniem i nadzorowaniem pracy całego systemu wodociągowego [8].

W niniejszej pracy zaproponowano działania mające na celu obniżenie kosztów energii elektrycznej wykorzystywanej do pracy pomp wodociągowych. W pierwszej kolejności sprawdzono o ile zmniejszą się koszty w przypadku obniżenia ciśnienia w sieci przez manualną zmianę parametrów pracy pomp i zastosowanie zaworów redukujących ciśnienie (Scenariusz 1), a w drugim etapie zmieniono prędkości obrotowe wszystkich pomp (Scenariusz 2).

2. Obiekt badań i metodyka

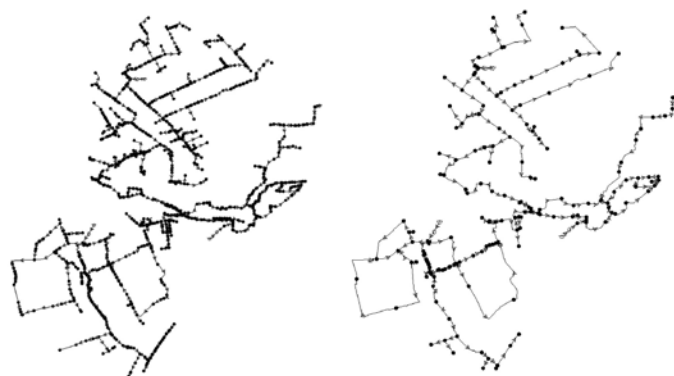
Rozpatrywana sieć wodociągowa ma długość 70 km, obejmuje swoim zasięgiem 14 miejscowości i zaopatruje w wodę około 15 000 odbiorców (rys. 1). W skład systemu wchodzi cztery ujęcia wody oraz cztery pompownie oznaczone na rysunku poniżej symbolami P1, P2, P3, P4. Obszar objęty analizą jest zróżnicowany wysokościowo, rzędne przypisane węzłom mieszczą się w granicach 200,00 ÷ 247,00 m n.p.m. Maksymalna różnica terenu wynosi 47,00 m.



Rys. 1. Schemat sieci wodociągowej z odwzorowaniem rzędnych terenu
Fig. 1. Scheme of water supply network with mapping of elevation

W niniejszej pracy wykorzystano model hydrauliczny sieci wodociągowej zbudowany przy pomocy oprogramowania WaterGEMS V8i firmy Bentley. Program ten stanowi jedno z bardziej zaawansowanych, dostępnych obecnie na rynku narzędzi służących do modelowania systemów wodociągowych. Posiada wiele wbudowanych modułów ułatwiających budowę sieci (*Model Builder*), automatyczną kalibrację modelu (*Darwin Calibrator*) czy też optymalizację elementów systemu wodociągowego (*Darwin Scheduler*). Przydatną cechą programu jest również możliwość wykorzystania automatycznego procesu pobierania danych z systemu SCADA za pomocą modułu *SCADAConnect* oraz możliwość „uproszczenia” modelu za pomocą modułu *Skelebrator Skeletonizer*. Zaletą programu jest zdolność tworzenia scenariuszy pracy sieci i przypisywania im różnych alternatyw bez konieczności ingerencji w strukturę modelu podstawowego. Dzięki temu możliwe jest przeanalizowanie wielu wariantów pracy systemu, które mogą uwzględniać np. zmienność parametrów fizycznych sieci, czy wielkość zapotrzebowania na wodę. Opcja ta jest niezwykle przydatna przy analizie warunków pożarowych, warunków płukania sieci oraz wariantów rozbudowy systemu wodociągowego [2].

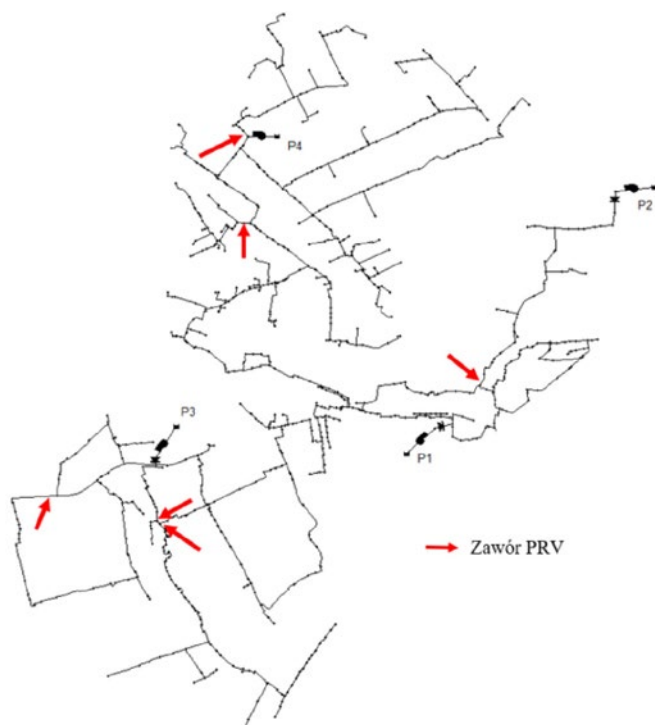
Celem pracy było obniżenie kosztów energii elektrycznej zużywanej przez pompy wodociągowe. Wiązało się to z koniecznością przeprowadzenia symulacji rozkładu ciśnienia w sieci wodociągowej. W pierwszej kolejności model sieci wodociągowej został poddany uproszczeniu (rys. 2). Do tego celu wykorzystano moduł *Skelebrator Skeletonizer*, za pomocą którego można w prosty sposób ograniczyć ilość danych i złożoność modelu sieci. Szkieletyzacja polegała na seryjnym łączeniu przewodów, dzięki czemu znacząco została ograniczona liczba węzłów i odcinków. Krótkie odcinki o podobnych parametrach podzielone węzłami zostały zastąpione odcinkami dłuższymi, które odzwierciedlają ich założenia hydrauliczne. Zwiększyło to przejrzystość badanego modelu oraz znacząco ograniczyło ilość informacji, które są przetwarzane podczas badań optymalizacyjnych. Dzięki takiemu działaniu model został uproszczony bez zmiany jakości pozyskanych informacji.



Rys. 2. Model sieci wodociągowej przed (z lewej) i po szkieletyzacji (z prawej) w module *Skelebrator Skeletonizer*

Fig. 2. Water supply network model before (left) and after skeletonization (right) in the *Skelebrator Skeletonizer* module

Najważniejszym zadaniem jakie miała spełnić sieć, było utrzymanie ciśnienia na odpowiednim poziomie, przy jak najmniejszych kosztach energii zużywanej do pracy pomp. W tym celu prace związane z podejmowanymi działaniami podzielono na dwa etapy, które opisano za pomocą scenariuszy. W pierwszym scenariuszu zaproponowano obniżenie ciśnienia w sieci poprzez manualną zmianę parametrów pracy pomp (wydajność i wysokość podnoszenia) oraz zastosowanie zaworów redukujących ciśnienie. Na podstawie analizy rozkładu ciśnienia w badanej sieci wodociągowej wytypowano 6 miejsc, w których zainstalowano zawory PRV (*Pressure Reduction Valve*) wraz z zadaniem im odpowiedniej wartości ciśnienia ograniczającego (Rys. 3).

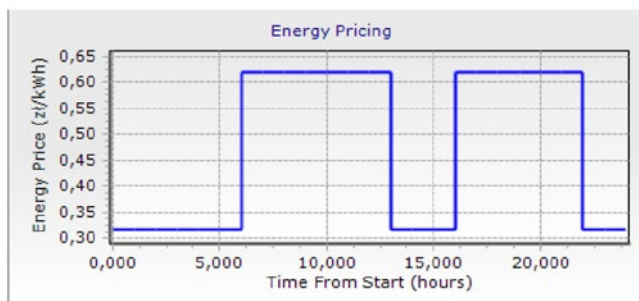


Rys. 3. Lokalizacja zaworów PRV
Fig. 3. Location of the PRV valves

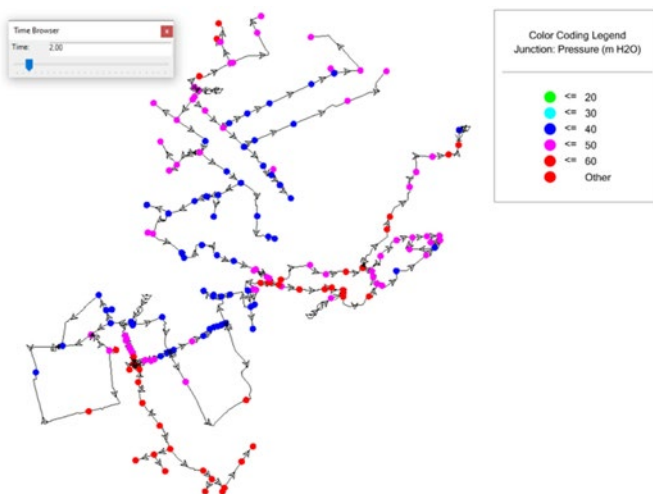
Drugi scenariusz zakładał optymalizację kosztów energii elektrycznej zasilającej pompy wodociągowe przeprowadzoną w programie WaterGEMS firmy Bentley. W tym celu dla modelu sieci wodociągowej ze Scenariusza 1, przy użyciu modułu Darwin Scheduler, przeprowadzono optymalizację wszystkich pomp. Moduł ten oparty jest na algorytmie genetycznym, dzięki któremu możliwe jest, po zadaniu odpowiednich warunków ograniczających i funkcji celu, automatyczne wyszukanie optymalnego sposobu pracy pomp wodociągowych. Funkcją celu może być zminimalizowanie kosztów energii lub jej zużycia, natomiast ograniczenia mogą dotyczyć utrzymania odpowiedniego ciśnienia w sieci, prędkości przepływu wody lub poziomu wody w zbiornikach.

Optymalizacja kosztów energii polegała na dostosowaniu prędkości obrotowej pomp w taki sposób, aby mogły one ze sobą współpracować przy utrzymaniu odpowiedniego ciśnienia w sieci. Minimalna wartość prędkości obrotowej została ustalona na poziomie 0,8, natomiast w celu zwiększenia dokładności obliczeń przyrost prędkości obrotowej wyznaczono na 0,01 (Rys. 4).

Jako warunki brzegowe optymalizacji ustalono minimalną wysokość ciśnienia – 20 mH₂O oraz maksymalną wysokość ciśnienia – 60 mH₂O. Funkcją celu była minimalizacja kosztów energii związana z pracą pomp, w związku z czym konieczne było uwzględnienie kosztów energii elektrycznej. W tym celu, w zakładce Objective Elements wprowadzono wzorzec zmian ceny energii elektrycznej ustalony na



Rys. 5. Wzorce zmian ceny energii elektrycznej
Fig. 5. Patterns of electricity price changes



Rys. 6. Model podstawowy – rozkład ciśnienia w godzinie minimalnego (2:00) poboru wody

Fig. 6. Base model – pressure in the hour of minimum water demand (2:00)

podstawie umowy zawartej przez przedsiębiorstwo z dostawcą prądu (rys. 5). Do obliczeń przyjęto taryfę ze strefą szczytową od godziny 6:00 do 13:00 i od godziny 16:00 do 22:00 oraz strefą pozaszczytową od godziny 13:00 do 16:00 i od godziny 22:00 do 6:00. Stawka za kWh w strefie szczytowej wynosiła 0,62 zł a w strefie pozaszczytowej 0,31 zł.

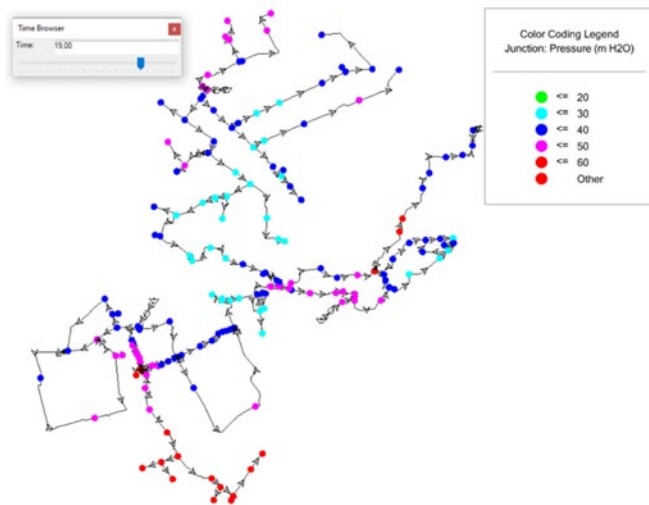
3. Wyniki

Dla modelu podstawowego i obu scenariuszy przeprowadzono symulację warunków hydraulicznych pracy sieci. Symulacja trwała 24h. Przeanalizowano wysokość ciśnienia w godzinie minimalnego (2:00) i maksymalnego (19:00) poboru wody. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 6÷11 oraz w tab.1.

Pump Stations to Optimize		Pumps to Optimize		Objective Elements		Options		Notes	
	Pump	Include in Optimization?	Decision Type	Speed (Minimum)	Speed (Maximum)	Speed (Increment)	Allow Off Setting?	Time from Start (hours)	Duration (hours)
1	6035: P2	<input checked="" type="checkbox"/>	Variable Speed	0,800	1,000	0,010	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000	24,000
2	6036: P4	<input checked="" type="checkbox"/>	Variable Speed	0,800	1,000	0,010	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000	24,000
3	6037: P1	<input checked="" type="checkbox"/>	Variable Speed	0,800	1,000	0,010	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000	24,000
4	6038: P3	<input checked="" type="checkbox"/>	Variable Speed	0,800	1,000	0,010	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000	24,000

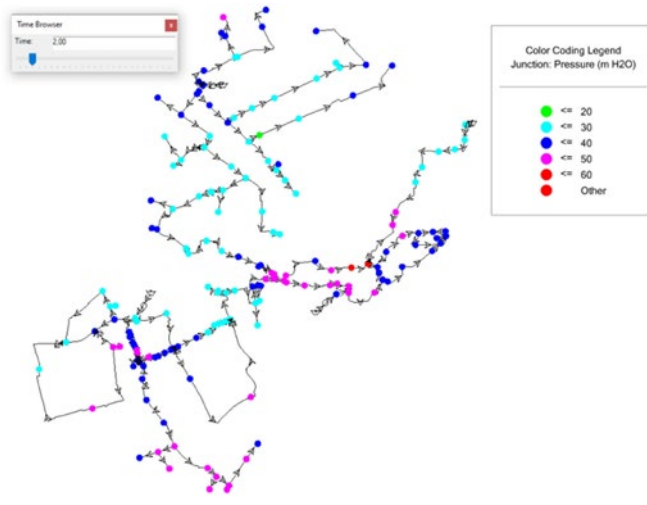
Rys. 4. Zrzut ekranu okna wyboru "Pumps to optimize" w module Darwin Scheduler

Fig. 4. Screen capture of a selected window "Pumps to optimize" from Darwin Scheduler module



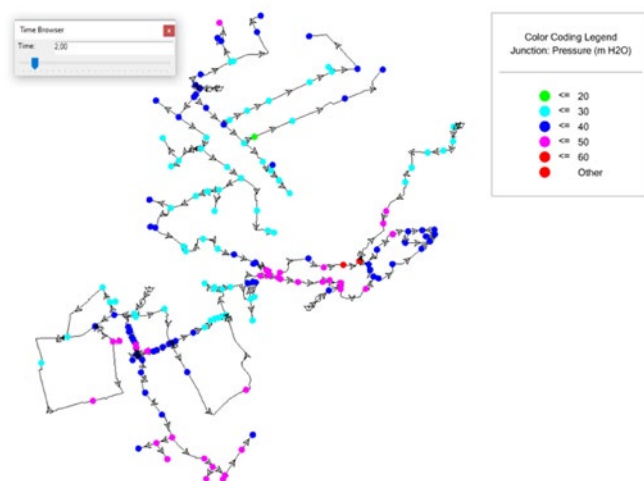
Rys. 7. Model podstawowy – rozkład ciśnienia w godzinie maksymalnego(19:00) poboru wody

Fig. 7. Base model – pressure in the hour of maximum water demand (19:00)



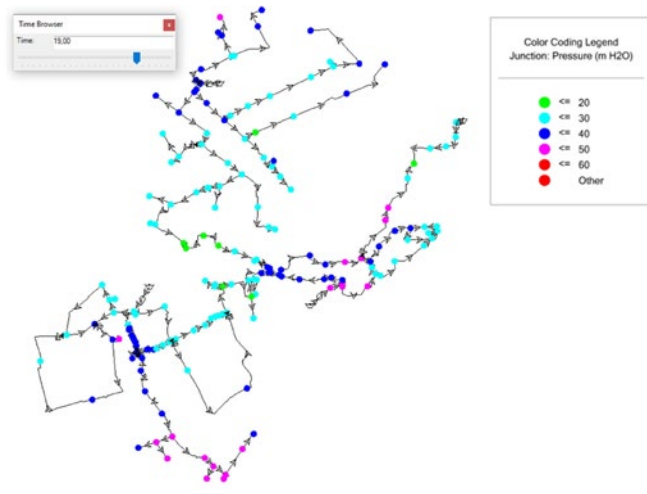
Rys. 10. Scenariusz 2 – rozkład ciśnienia w godzinie minimalnego (2:00) poboru wody

Fig. 10. Scenario 2 – pressure in the hour of minimum water demand (2:00)



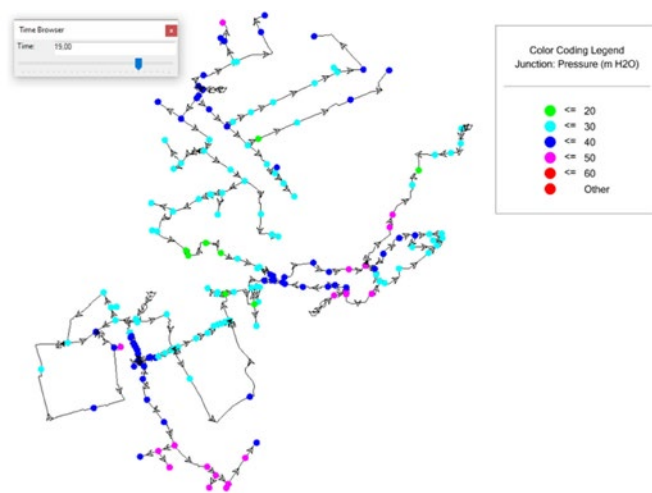
Rys. 8. Scenariusz 1 – rozkład ciśnienia w godzinie minimalnego (2:00) poboru wody

Fig. 8. Scenario 1 – pressure in the hour of minimum water demand (2:00)



Rys. 11. Scenariusz 2 – rozkład ciśnienia w godzinie maksymalnego(19:00) poboru wody

Fig. 11. Scenario 2 – pressure in the hour of maximum water demand (19:00)



Rys. 9. Scenariusz 1 – rozkład ciśnienia w godzinie maksymalnego(19:00) poboru wody

Fig. 9. Scenario 1 – pressure in the hour of maximum water demand (19:00)

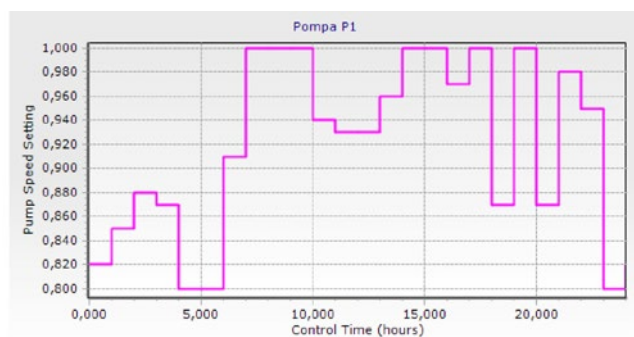
Tabela 1. Wyniki symulacji wysokości ciśnienia badanej sieci dla poszczególnych scenariuszy

Table 1. Simulation results of pressure of analyzed network for individual scenarios

		Model podstawowy	Scenariusz 1	Scenariusz 2
2:00	pmin [mH2O]	31	25	20
	pmax [mH2O]	67	60	56
19:00	pmin [mH2O]	22	16	16
	pmax [mH2O]	64	49	49

Analizując przeprowadzone symulacje można zauważyć, że w modelu podstawowym maksymalne ciśnienie przekracza wartości dopuszczalne, wymagane Rozporządzeniem [12], w związku z tym konieczna była zmiana parametrów pracy pomp i zastosowanie zaworów redukcyjnych (Scenariusz 1). Po wprowadzeniu tych zmian zauważono, że zmniejszenie ciśnienia w sieci wodociągowej do wymaganych 60 mH₂O spowodowało, że minimalne ciśnienie w godzinie maksymalnego poboru wody spadło poniżej 20 mH₂O. Spadki te występują w węzłach zlokalizowanych w najwyższych punktach sieci tylko o godzinie 19:00. W wyniku przeprowadzonej

optymalizacji w programie WaterGEMS (Scenariusz 2) możemy zauważyć, że w wyniku zmian prędkości obrotowych pomp nastąpiło dalsze obniżenie ciśnienia w sieci, głównie w godzinach mniejszego poboru wody. Przykładowy wykres zmian prędkości obrotowej pompy przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Wzorzec zmian prędkości obrotowej przykładowej pompy (P1)

Fig. 12. Variable speed pattern for exemplary pump (P1)

Dzięki manualnej zmianie parametrów pracy pomp i zastosowaniu zaworów redukujących ciśnienie (Scenariusz 1) koszt energii niezbędnej do pracy pomp wodociągowych zmniejszył się o 3,7% w stosunku do kosztów ponoszonych obecnie (model podstawowy). Przeprowadzenie optymalizacji w programie WaterGEMS (Scenariusz 2) spowodowało dalszy spadek dziennego kosztu energii elektrycznej zasilającej wszystkie pompy o kolejne 4,1% w stosunku do Scenariusza 1 (tab. 2).

Tabela 2. Koszt pracy poszczególnych pomp przed i po optymalizacji w module Darwin Scheduler

Table 2. Cost of individual pumps operation before and after optimization in the Darwin Scheduler module

	Pompa	Model podstawowy	Scenariusz 1	Scenariusz 2
koszt energii [zł/dzień]	P1	13,02	17,59	18,84
	P2	1,72	12,46	10,65
	P3	27,86	23,46	23,46
	P4	62,41	47,58	43,87
	suma	105,01	101,09	96,82
	% kosztów w porównaniu do modelu podstawowego	100	96,3	92,2

4. Wnioski

Niniejsza praca stanowi propozycję działań, które należy podjąć w celu obniżenia kosztów energii elektrycznej zużywanej przez pompy wodociągowe. W wyniku przeprowadzonych zmian na sieci wodociągowej koszty związane z pracą pomp zmniejszyły się i rozdzieliły bardziej równomiernie na wszystkie pompy. Całkowity koszt energii elektrycznej po uwzględnieniu obu scenariuszy zmniejszył się o 7,8% w porównaniu z kosztami w modelu podstawowym. Zastosowanie zaworów redukujących ciśnienie znacząco przyczyniło się do obniżenia kosztów, jednak połączenie tych działań z regulacją pracy pomp dało jeszcze lepsze wyniki. Należy zauważyć, że dzięki zmianie prędkości obrotowych pomp maksymalne ciśnienie w sieci również uległo zmniejszeniu. Podobne wyniki uzyskała w swojej pracy Świtnicka [19].

Kolejnym etapem obniżania kosztów energii i zwiększania wydajności pracy systemu wodociągowego może być wprowadzenie automatycznego sterowania pompami wodociągowymi. Połączenie pomp z czujnikami przepływu działającymi on-line, zamontowanymi na sieci wodociągowej, przyczyni się do optymalnego zarządzania ciśnieniem w pompowniach.

Przeprowadzone badania dowiodły, że obniżenie kosztów energii jest zagadnieniem ważnym i wymaga przeprowadzenia wielu symu-

lacji i analiz. Niezbędne jest wykorzystywanie programów komputerowych, za pomocą których można odwzorować model hydrauliczny rzeczywistej sieci wodociągowej. Zastosowany w niniejszej pracy program WaterGEMS firmy Bentley sprawdza się jako narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji, a dzięki modułowi Darwin Scheduler, opartemu na algorytmach genetycznych, znalezienie optymalnego rozwiązania jest szybsze. Zaletą tego programu jest również możliwość jednoczesnego analizowania wielu scenariuszy, co wpływa na przejrzystość prezentowanych rozwiązań.

LITERATURA

- [1] Barbarulo R. 2006. „Inicjatywy Europump i Amerykańskiego Instytutu Hydrauliki”. XII Forum Użytkowników Pomp, Ustroń, mater. konfer., 13–25.
- [2] Bentley WaterGEMS specyfikacja produktu <https://www.bentley.com/pl/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watgears>
- [3] Brodziak R., Bylka J., Urbaniak A., Zakrzewski P. 2016. „Sterowanie pracą pomp w sieciach wodociągowych zasilanych z wielu źródeł”. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. Wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Poznań: 787-798.
- [4] Brodziak R., Urbaniak A., 2019. „Zarządzanie i monitoring systemu zaopatrzenia w wodę w inteligentnym mieście”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr (5): 165-171.
- [5] Jędral W. 2001. „Optymalna energetycznie lub kosztowo eksploatacja pompowni komunalnych”. *Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej*, nr (88): 71-87.
- [6] Jędral W. 2007. *Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych*. Wyd. Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A. Warszawa.
- [7] Kasino W., Suchorab P., Kowalski D. 2021. „Inteligentny System Zarządzania Siecią Wodociagową w Żywcu” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr (10): 16-19.
- [8] Knapik K. 2000. „Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych”. Monografia 279, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków.
- [9] Luna T., Ribau J., Figueiredo D., Alves R. 2019. „Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 213: 342-356.
- [10] Piechurski F.G. 2014. „Przykład efektów wdrożenia systemu monitoringu i sterowania ciśnieniem w systemie dystrybucji wody”. Nowe technologie w sieciach i instancjach wodociągach i kanalizacyjnych. Gliwice: 279-295.
- [11] Piechurski F.G. 2016. „Wpływ wprowadzenia regulacji ciśnienia na straty wody w sieci jej dystrybucji”. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. Wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Poznań: 493-508.
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002.75.690 z późn. zm.).
- [13] Sarbu I. Borza I. 1998. „Energetic optimization of water pumping in distribution systems”. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.* Vol. 42 (2): 141-152.
- [14] Siarkiewicz A., Maciolek A., Bakker M., Karolczak P., Rajewicz T. 2014. „Optymalizacja sterowania systemem zaopatrzenia w wodę na przykładzie Stacji Uzdatniania Wody Gruszczyń – Aquanet Poznań. Część I.” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr (2): 53-56.
- [15] Siarkiewicz A., Maciolek A., Bakker M., Karolczak P., Rajewicz T. 2014. „Optymalizacja sterowania systemem zaopatrzenia w wodę na przykładzie Stacji Uzdatniania Wody Gruszczyń – Aquanet Poznań. Część II.” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr (3): 89-93.
- [16] Studziński J. 2010. „Narzędzia informatyzacji miejskich sieci wodociągowych”. *Wodociągi – Kanalizacja*, nr (75): 34-37.
- [17] Sung-Pil H., Taegyeon K., Subin L. 2019. „A precision pump schedule optimization for the water supply networks with small buffers”. *Omega*, Vol. 82: 24-37.
- [18] Świętochowska M., Bartkowska I. 2022. „Optimization of Energy Consumption in the Pumping Station Supplying Two Zones of the Water Supply System”. *Energies*, (15): 310.
- [19] Świtnicka K., Suchorab P., Kowalska B. 2017. „The optimisation of a water distribution system using Bentley WaterGEMS software”. ITM Web of Conferences 15.
- [20] Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D. 2014. „Zarządzanie miejską infrastrukturą wodociagową”. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA*, t. XXXI, z. 61 (1/14): 343-355.
- [21] Yu G., Powell R.S., Sterling M.J.H. 1994. „Optimized pump scheduling in water distribution systems”. *J Optim Theory Appl*, nr (83): 463-488.