



Wojciech Kruszyński

EKONOMICZNE UWARUNKOWANIA KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA SYSTEMÓW DYSTRYBUCJI WODY

Wojciech Kruszyński, dr inż. – Politechnika Białostocka

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

ul. Wiejska 45 a, 15-309 Białystok

e-mail: w.kruszynski@pb.edu.pl

ECONOMIC DETERMINANTS OF COMPUTER MODELING OF THE DRINKING WATER-SUPPLY SYSTEM

SUMMARY: EU Maintaining proper water flow rate in supply networks (min. 0.5 m/s) prevents the accumulation of deposits on the walls of water pipes. This affects the water quality and operating costs of water supply systems. Too low speeds affect the deterioration of water quality and increase the risk of failure. This significantly increases the cost of water treatment and operation of water supply systems, including troubleshooting.

Dynamic model of water supply network is a powerful tool to help observe and regulate the flow and pressure of water, it allows taking reasoned decisions regarding the operation, modernization and expansion of the entire water supply system of the city or municipality.

Water distribution systems in the earlier years were designed for much greater demand for water. Fire stringent standards that have to comply built aqueducts brought together with a decrease in water demand that the current water supply system of this type are exaggerated. Analysis of the velocity distribution is made to the existing state models surveyed water supply networks showed that in most cables of its values are smaller than the velocity required.

This paper presents results of calculation of flow velocity in water networks made using computer modeling of water supply systems.

KEY WORDS: water supply, computer model of water-supply net, water, economic determinants of computer modeling

Wstęp

W pracy porównano wynik komputerowych symulacji w sześciu sieciach wodociągowych w województwie podlaskim (Łąpy, Czarna Białostocka, Choroszcz, Wasilków, Dąbrowa Białostocka, Supraśl). Do badań wybrano układy wodociągowe charakterystyczne dla małych gmin województwa podlaskiego położonych na terenach rolniczo-przemysłowych, mało zróżnicowanych pod względem rzeźby terenu i o zbliżonym zapotrzebowaniu na wodę¹.

Opracowanie danych o funkcjonowaniu sieci wymagało opracowania własnych metod przetwarzania zdobytych informacji o rzeczywistych zużyciach wody. Do odwzorowania układu sieci przewodów z dokładnymi średnicami, długościami i rzędnymi wykorzystano nowoczesne mapy cyfrowe. Symulacje komputerowe przeprowadzono za pomocą programu Epanet.

W badaniach nad modelami wykonano szereg wariantów symulujących działanie istniejących systemów dystrybucji oraz rozwiązania mające na celu regulację ciśnienia i przepływów wody. Przeprowadzono analizy wieku wody, rozprzestrzeniania się związków chloru oraz koszty pracy pomp w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Integralną częścią procesu tworzenia modeli były badania terenowe, które umożliwiły dostosowanie wartości i ich parametrów do warunków rzeczywistych.

Podstawową częścią badań terenowych było wykonanie pomiarów ciśnienia za pomocą nowoczesnych rejestratorów. Uzyskane dane pozwoliły na kalibrację wykonanych modeli.

Metodyka

W trakcie budowy modeli komputerowych wyróżniamy trzy fazy budowy modelu komputerowego sieci wodociągowej:

- 1) zbieranie i gromadzenie informacji o strukturze sieci wraz z obiektami;
- 2) budowa numerycznego modelu przepływów:
 - tworzenie modelu strukturalnego istniejącego układu,
 - wyznaczenie węzłowych poborów wody;
- 3) tarowanie modelu przepływów wraz z badaniami terenowymi².

¹ L. Dzienis, M. Lebedowski, *Water supply and water treatment systems in agricultural and industrial regions – selected problems*, "Polish Journal of Environmental Studies – Series of Monographs" 2009 t. 2.

² M. Kulbik, *Tarowanie modeli przepływów z uwzględnieniem specyfiki działania miejskich układów wodociągowych w Polsce*, Seminarium Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.

W każdej z trzech faz konstruowania modelu należy wykonać szereg zadań szczegółowych według określonej specyfikacji. Wstępne zadanie stanowi wybór określonego użytkowego programu komputerowego wraz z jego charakterystyką. Natomiast ostatnia faza pracy polega na wdrożeniu modelu do praktyki projektowej i eksploatacyjnej.

Stopień rozpoznania konkretnego systemu wodociągowego powinien być szczegółowy, aby spowodować merytoryczną jedność rzeczywistego obiektu z jego modelem. Szczególnie dotyczy to etapu tarowania modelu. Prawidłowa jego realizacja jest niezmiernie ważna dla późniejszej jego przydatności³.

Gromadzenie danych do modelowania

Najczęściej zbieranie danych wiąże się z koniecznością pozyskania następujących materiałów⁴:

- planów sytuacyjno-wysokościowych terenu z wytrasowaną siecią przewodów i lokalizacją obiektów w postaci mapy tradycyjnej lub numerycznej;
- planów ogólnych i miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego danego terenu;
- powykonawczej dokumentacji technicznej, którą zazwyczaj cechuje niekompletność;
- sprawozdania rocznego z działalności przedsiębiorstwa;
- danych o odbiorcach wody i ilości jej sprzedaży;
- raportu dobowego z eksploatacji obiektów;
- spisu środków trwałych w przedsiębiorstwie;
- dokumentacji o awaryjności sieci.

Budowa modelu strukturalnego podsystemu wodociągowego

Budowa podmodelu strukturalnego polega na odwzorowaniu geometrii sieci w połączeniu z lokalizacją obiektów w danym systemie wodociągowym. Na podstawie materiałów źródłowych dąży się do przedstawienia rzeczywistej struktury sieci przewodów (gałęzi) i ich połączeń (węzłów) w formie graficznej w postaci schematu. W analogiczny sposób tworzy się także schematy rozmieszczenia urządzeń we wszystkich obiektach zgodnie z usytuowaniem ich w ciągach technologicznych. W rezultacie powstaje obraz systemu wodociągowego, na którym oznacza się wszystkie węzły (n) i gałęzie (m) dowolnymi numerami identyfikacyjnymi. Założmy, że podzbiór $N = \{n_i\}$ jest zbiorem wszystkich węzłów sieci. Natomiast podzbiór $M = \{m_j\}$ jest zbiorem wszystkich gałęzi. Jednoznaczny

³ S. Denczew, *Podstawy modelowania systemów eksploatacji wodociągów i kanalizacji: teoria i praktyka*, Warszawa 2006.

⁴ K. Knapik, *Czasoprzestrzenna symulacja działania systemu dystrybucji wody*, Kraków 1989.

opis sieci przedstawia się umownie jako graf $G = \{N, M\}$ określony dwoma zdefiniowanymi podzbiorami.

Jednym z najistotniejszych zadań w procesie budowy modelu komputerowego danego systemu wodociągowego jest ustalenie wartości węzłowych wydatków (poboru wody) oraz jego przestrzennego i czasowego rozkładu. Parametr ten powinien być określony w modelu układu wodociągowego z siecią przewymiarowaną. Dokładność oszacowania wartości i zmienności czasowo-przestrzennej tego parametru wpływa na poprawność odwzorowania rzeczywistego rozkładu przepływów w sieci. W sieciach przewymiarowanych chwilowy przyrost prędkości w przewodach spowodowany wzrostem poboru wody, decyduje w znacznie większym stopniu o wzroście spadku naporu hydraulicznego aniżeli zmiana chropowatości rurociągów. Wynika to z faktu, że spadek hydrauliczny jest zależnością kwadratową w relacji do wzrostu prędkości, a liniową w stosunku do zmiany chropowatości.⁵

W modelu, w celu określenia wartości średniego dobowego zapotrzebowania na wodę i jej godzinowego rozkładu zazwyczaj, wykorzystuje się normatywne wskaźniki zużycia wody i współczynniki nierównomierności jej poboru. Tylko w nielicznych przypadkach wskaźniki normatywne podlegają uaktualnianiu metodą prób i błędów na etapie weryfikacji modelu na podstawie pomiarów eksploatacyjnych. Znaczna rozbieżność pomiędzy wartościami normatywnymi wskaźników a ich wielkościami rzeczywistego poboru wody, sprawia, iż w praktyce przydatność ich jest ograniczona⁶.

Podstawą analiz w systemie wodociągowym są wyniki eksploatacyjnych pomiarów kontrolnych w roku poprzedzającym utworzenie modelu, to jest zbiór odczytów wodomierzowych wszystkich odbiorców wody (zużycie) oraz rejestr wielkości jej produkcji. Metoda ta różni się zdecydowanie w porównaniu z dotychczas stosowanymi, ponieważ określa się indywidualne wielkości faktycznego poboru wody dla każdego odbiorcy z jednoczesnym uwzględnieniem ich rzeczywistego czasowo-przestrzennego rozkładu w obszarze zasilania. Reprezentatywność zgromadzonego zbioru danych pomiarowych wynika z ich ukształtowania przez specyficzne warunki zasilania i poboru wody w konkretnym systemie wodociągowym⁷.

Proces tarowania modelu

W wyniku właściwie przeprowadzonego procesu tarowania modelu można osiągnąć następujące efekty:

- niezbędne uwiarygodnienie modelu;
- ujawnienie i usunięcie błędów w danych wejściowych;

⁵ E. W. Mielcarzewicz, *Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę*, Warszawa 2000.

⁶ M. Kulbik, *Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych*, „Monografie” 49, Gdańsk 2004.

⁷ M. Kulbik, *Wdrożeniowe przykłady zastosowania modeli symulacyjnych w branży wodociągowej*, Informacja INSTAL 1998, t. 178, nr 12.

Rysunek 1

Rejestrator pomiarów ciśnienia wody Biatel Cellbox HN, zamontowany w hydrancie nadziemnym



Źródło: opracowanie własne.

- pogłębienie wiedzy o działaniu czynnego systemu i jego hydraulicznej sprawności.

Uwiarygodnienie modelu jest podstawowym warunkiem jego wdrożenia do praktyki projektowej i eksploatacyjnej. Oczekiwany stan zgodności modelu z jego obiektem rzeczywistym uzyskuje się przez określenie stopnia dokładności odwzorowania systemu wskutek przetestowania danych wejściowych i oszacowania jego parametrów. W trakcie prowadzonych prac, często konieczna jest korekta niektórych połączeń przewodów, a także zmiana niepoprawnie ustalonych średnic, długości lub/i rodzaju materiału użytych przewodów.

W wyniku tarowania modelu pozyskiwana jest rzeczywista wiedza o budowie systemu, jego działaniu oraz sprawności hydraulicznej sieci. Znajomość ta jest efektem wykonanych badań terenowych, testowania modelu oraz przeprowadzenia weryfikacji danych. Zdobyta wiedza i doświadczenie podczas budowy modelu pozwala ocenić stosowane dotychczas techniki operacyjne w eksploatacji systemu, a także zaproponować bardziej racjonalne rozwiązania strukturalne, które następnie można zweryfikować za pomocą utworzonego modelu przepływów⁸.

W celu zweryfikowania budowanego modelu sieci wodociągowej w wybranych punktach montuje się rejestratory ciśnienia i przepływów. Zebrane w ten sposób pomiary posłużą do porównania i kalibracji w danych punktach sieci uzyskiwanych za pomocą modelu oraz za pomocą rzeczywistych wartości z rejestratorów.

Na podstawie weryfikacji wartości uzyskanych z modelowania ze zmierzonymi w wybranych punktach sieci za pomocą rejestratorów ciśnienia i przepływu (rysunek 1, rysunek 2), wykonuje się kalibrację sieci wodociągowych warunkującą prawidłową ocenę hydraulicznych warunków jej pracy⁹.

⁸ M. Kulbik, *Tarowanie modeli ...*, op. cit.

⁹ K. Knapik, op. cit.

Rysunek 2
Przenośny przepływomierz ultradźwiękowy do tymczasowych pomiarów przepływu cieczy z zewnątrz rurociągu Proline Prosonic Flow 93T



Źródło: opracowanie własne.

Statystyczna ocena porównawcza wyników pomiarów i symulacji

W celu oceny wiarygodności utworzonych modeli ze stanem rzeczywistym przeprowadza się statystyczną ocenę porównawczą wyników pomiarów i symulacji.

Statystyki dla każdego punktu (węzła) zawierają średnią obserwowaną wartość, średnią symulowaną wartość, średni błąd bezwzględny pomiędzy wszystkimi parami wartości (obserwowaną i symulowaną). Te same statystyki obliczone zostały dla sieci jako całości. Oblicza się współczynnik korelacji między średnią wartością obserwowaną a średnią wartością symulowaną w każdym porównywanym punkcie.

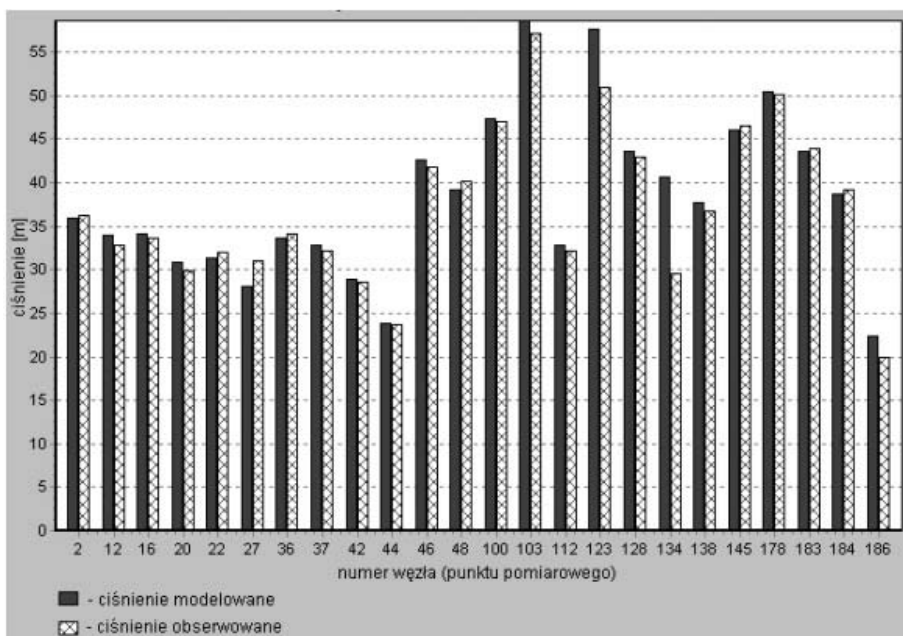
Na wykresie korelacji kreśli się rozrzut obserwowanych i modelowanych wartości dla pomiarów w każdym rozważanym punkcie (węzle). Każdy punkt jest przedstawiony innym kolorem. Im bardziej punkty te skupiają się wokół prostej o nachyleniu 45°, tym lepiej pasują do siebie wyniki pomiarów i modelowania¹⁰.

Przykładowe porównanie średnich wartości obserwowanych i modelowanych przedstawiono na rysunku 3.

¹⁰ W. Kruszyński, *Modelowanie ciśnienia i przepływów w sieci wodociągowej przy zmniejszającym się zapotrzebowaniu na wodę*, Białystok 2011.

Rysunek 3

Średnie wartości ciśnienia modelowane i obserwowane w punktach (węzłach) pomiarowych pomiaru w sieci wodociągowej gminy Czarna Białostocka



Źródło: opracowanie własne.

Wyniki badań

Zebrane dane oraz wyniki pomiarów posłużyły do stworzenia komputerowych modeli sieci wodociągowych dla badanych miejscowości i gmin w województwie podlaskim – Łapy, Czarna Białostocka, Choroszcz, Wasilków, Dąbrowa Białostocka oraz w Supraśl. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy model sieci wodociągowej odwzorowany w programie Epanet.

Do programu EPANET zostały wprowadzone dane charakteryzujące poszczególne węzły i przewody wodociągowe, w celu przeprowadzenia analiz modelowanej sieci. Dla węzłów uzupełnione zostały takie dane jak rzędna terenu, rozbiór wody, natomiast w przypadku przewodów wodociągowych: długość, średnice i chropowatość. W oparciu o te dane wyliczono dla węzłów ciśnienie, a dla przewodów wodociągowych przepływ, prędkość oraz współczynnik strat jednostkowych. Przeprowadzono analizy rozkładu ciśnienia, prędkości, przepływów wody oraz wykonano analizy fizykochemiczne oraz ekonomiczne. Wyniki tych obliczeń zaprezentowano w postaci tabel oraz wykresów. Na podstawie wygenerowanego przez program pełnego raportu zawierającego rezultaty obliczeń opracowano wyniki dla wszystkich węzłów oraz przewodów wodociągowych.

Rysunek 4

Model sieci wodociągowej miasta Supraśl utworzonej za pomocą programu EPANET



Źródło: opracowanie własne.

W analizowanych systemach dystrybucji wody prędkość przepływu jest bardzo niska, mieszcząca się w zakresie 0,001 – 0,15 m/s (tabela 1, rysunek 5). Zjawisko to jest bardzo niekorzystne dla prawidłowego funkcjonowania systemu wodociągowego. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, zaleca się aby prędkość wody mieściła się w przedziale 0,5 – 1,3 m/s¹¹.

Analiza wieku wody w Łapach pokazała obszary gdzie stojąca woda starzeje się, nie mając ujścia i nie ustępując miejsca świeżej. Stagnacja wody szczególnie odznacza się w północno-zachodniej części. Przy analizie trwającej 240 godzin (10 dni), woda w tym rejonie ma wiek ponad 8 dni, co ma wpływ na jej jakość (rysunek 6). Jest to potencjalne miejsce pojawienia się wtórnego skażenia. Wodę w tym rejonie należy częściej monitorować pod względem fizykochemicznym i bakteriologicznym oraz regularnie płukać rurociągi.

Program Epanet oblicza zużyta energię elektryczną do zasilania pomp. Dzięki temu każdą modyfikację sieci można porównać pod kątem oszczędności energii, co udokumentuje zasadność podjętych działań. Do obliczeń zużycia energii przyjęto średnią cenę energii na poziomie 63 groszy za 1 kWh i otrzymano wyniki jak w tabeli 2.

Dzienny koszt energii zużytej do tłoczenia wody wynosi 143,45 zł.

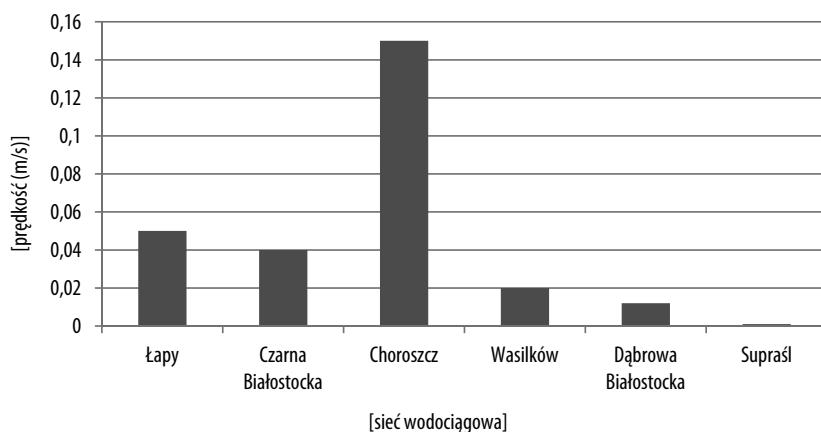
¹¹ Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 56, poz. 461 z 2009 r.), rozdział 1, nr 114.

Tabela 1
Średnia prędkość wody w przewodach wodociągowych badanych obiektów

Sieć wodociągowa (miejscowość/gmina)	Liczba mieszkańców	Zużycie wody [m ³ /d]	Średnia prędkość wody [m/s]
Łąpy	23000	1383	0,05
Czarna Białostocka	11775	800	0,04
Choroszcz	12703	1830	0,15
Wasilków	7300	953	0,02
Dąbrowa Białostocka	12916	532	0,012
Supraśl	4500	335	0,001

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5
Wykres średniej prędkości wody w przewodach wodociągowych badanych obiektów



Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2
Raport zużycia energii w sieci wodociągowej w Łapach

Pompa	Zużycie [%]	Średnia sprawność [%]	kWh/m ³	Średnia	Szczytowa	Koszt /dzień zł
				kW	kW	
P	100	63.55	0.19	2.96	4.07	46.14
S	100	68.39	0.16	3.07	4.89	47.86
D	100	69.28	0.16	3.17	5.02	49.44
Koszt całkowity						143.45

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6
Wiek wody w wodociągu w Łapach w czasie symulacji trwającej 240 godzin



Źródło: opracowanie własne.

Celem określenia opłacalności wykonywanych zmian wystarczy wygenerować nowy raport i porównać z wyjściowym.

Podsumowanie

Komputerowe modelowanie sieci wodociągowych jest wydajnym narzędziem do znajdowania przyczyn zwiększonych kosztów eksploatacji systemu dystrybucji wody pitnej. Symulacje prowadzone w programach modelujących umożliwiają szybkie znalezienie optymalnego wariantu rozwiązania problemu z eksploatacją bądź też efektywny ekonomicznie kierunek modernizacji sieci wodociągowej.

W trakcie modelowania badanych sieci wodociągowych wykazano, że systemy dystrybucji wody projektowane były na dużo większe zapotrzebowania na wodę. Surowe normy przeciwpożarowe, które musiały spełniać budowane dawniej wodociągi, spowodowały wraz ze spadkiem zapotrzebowania na wodę, że obecnie wodociągi tego typu są przewymiarowane. Analiza rozkładu prędkości wykonana na modelach stanu istniejącego badanych sieci wodociągowych wykazała, iż w większości przewodów jej wartości są mniejsze od zalecanego poziomu 0,5 m/s. Prędkość płynięcia wody w przewodach ma znaczenie dla samooczyszczania rur oraz czystości biologicznej wody. Zbyt mała prędkość wody w rurach

powoduje odkładanie osadów na dnie rurociągów. Z czasem dochodzi do zmniejszenia drożności przewodu, co powoduje wzrost ciśnienia i prędkości przepływu wody w danym odcinku. W pewnym momencie wzrost prędkości przepływu powoduje porwanie osadu nagromadzonego i wypływ zanieczyszczonej wody u odbiorcy końcowego. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne. Przy dłuższych odcinkach i małych prędkościach płynięcia dochodzi jeszcze zjawisko zalegania wody w przewodach, co może skutkować groźbą wtórnego namnożenia się bakterii. Stąd zalecenia, aby prędkość wody mieściła się w przedziale 0,5-1,3 m/s¹².

Za pomocą oprogramowania do modelowania można także modelować zmiany w wieku wody w całym systemie dystrybucji. Świeża woda wpływa do sieci ze zbiorników lub źródła. Wiek wody w rurach jest parametrem określającym świeżość wody. Epanet uwzględnia czas, w jakim woda przebywa w danym odcinku od momentu wpłynięcia z ujęcia i wymieszania ze znajdującą się już wodą w sieci.

Dzięki komputerowym symulacjom parametrów fizycznych, fizykochemicznych oraz biologicznych można określić czynniki zwiększające koszty eksploatacji sieci wodociągowych dostawcy wody oraz jej odbiorcy. Wykazano że do najważniejszych problemów eksploatacyjnych, podnoszących koszt wody należą:

- dodatkowe płukania sieci;
- większe koszty monitoringu wody pod względem bakteriologicznym i fizykochemicznym,;
- wyższe nakłady na uzdatnienie wody;
- usuwanie kosztownych awarii przewodów i urządzeń wodociągowych;
- pogorszenie jakości wody u odbiorcy, wymuszające na nim ponoszenie większych nakładów na filtry do wody, dokupowanie wody pitnej poza siecią dystrybucji.

Komputerowe modelowanie sieci wodociągowych determinuje ekonomiczne i technologiczne korzyści:

- oszczędności wynikające z zaniechania niewłaściwych inwestycji – sprawdzenie ich zasadności symulacjami w programie;
- planowanie „wyłączeń” na sieci wiążących się z płukaniem, remontami lub inwestycjami w taki sposób, aby nie pogarszać standardów zaopatrzenia mieszkańców w wodę w czasie ich trwania;
- ograniczenie kosztów eksploatacyjnych oraz strat na sieci przez zmniejszenie wydajności źródeł w okresie najmniejszych rozbiorów;
- ograniczenie kosztów eksploatacyjnych przez sterowanie pracą pompowni (sprawdzoną symulacjami w modelu) w taki sposób, aby ograniczyć zużycie energii, a jednocześnie utrzymać standardy zaopatrzenia mieszkańców w wodę;
- pełna wiedza w czasie rzeczywistym o parametrach, czyli między innymi ilości i jakości dostarczanej wody w dowolnym miejscu sieci wodociągowej.

¹² Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 56, poz. 461 z 2009 r.), rozdział 1, nr 114.