

**Krzysztof KNAPIK**  
**Robert PŁOSKONKA**

*Instytut Zaopatrzenia w Wodę  
i Ochrony Środowiska  
Wydział Inżynierii Środowiska  
Politechnika Krakowska  
Kraków*

## **METODA OCENY FUNKCJONOWANIA SYSTEMÓW ZAOPATRZENIA W WODĘ PRZY UWZGLĘDNIENIU DYWERSYFIKACJI ZBIORNIKOWYCH REZERW WODY**

**THE ASSESMENT METHOD OF WATER SUPPLY SYSTEMS FUNCTIONING  
ALLOWING FOR WATER TANKS DIVERSIFICATION**

*Reliability of water distribution system strongly depends on capacity of water reservoirs and as turned out also on location of water tanks. Placement opportunities of water tanks in every system is limited mainly by topographical factors. However, proper usage of those possibilities can cause significant growth of system reliability. The paper contains description of method of technical and economical optimization of water tanks placement in water distribution system and its influence on reliability of system supported by its alternate usage on two water distribution systems.*

### **1. Wprowadzenie**

System Zaopatrzenia w Wodę (SZW) z racji swojej specyfiki jest strukturą rozległą, obejmującą znaczny obszar, na którym funkcjonuje w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych. Jego podstawowym zadaniem jest dostawa do odbiorców wody w oczekiwanej ilości, pod wymaganym ciśnieniem i o odpowiedniej jakości. Z wielu przyczyn zadanie to nie zawsze może być realizowane. Zmienność warunków oraz duża liczba elementów składowych powodują, że często dochodzi do czasowej niesprawności fragmentu systemu a w konsekwencji do obniżenia komfortu poboru wody. Spośród wielu możliwych uszkodzeń najistotniejsze są te, które w istotny sposób wpływają na warunki dostawy wody do większej grupy odbiorców. Zazwyczaj awarie tego typu dotyczą ujęć, pompowni i przepompowni oraz przewodów magistralnych, które między innymi z tego powodu są obiektami strategicznymi dla funkcjonowania całego systemu. [4], [5].

W celu minimalizacji skutków i zasięgu potencjalnej awarii stosuje się szereg zabezpieczeń i podejmuje odpowiednie kroki podnoszące niezawodność funkcjonowania SZW. Jednym z nich jest gromadzenie w zbiornikach sieciowych wymaganej ilości rezerw wody. Skutkiem takiego działania powinny być korzystniejsze warunki do jej konsumpcji, zarówno podczas normalnej eksploatacji jak i w stanach awaryjnych. Okazuje się, że oprócz istotnego warunku zwiększenia objętości rezerwowanej wody w systemie, równie istotnym jak nie istotniejszym jest warunek odpowiedniej jej lokalizacji przestrzennej [4], [5], [7].

W artykule zostanie przedstawiona metoda wielowariantowej dywersyfikacji rozmieszczenia rezerw wody gromadzonej w zbiornikach sieciowych oraz oceny niezawodności funkcjonowania tak zmodernizowanego SZW. Jest ona rozwinięciem i kontynuacją badań szerzej opisanych w [4], [5], [7] oraz [8]. Dodatkowo zostanie przedstawiona propozycja szacowania i analizy kosztów realizacji wariantów przedsięwzięcia, wskazując rozwiązanie optymalne pod względem niezawodnościowym i ekonomicznym. Zaproponowana metoda zostanie przedstawiona na przykładzie dwóch modeli złożonych sieci wodociągowych. Wyniki uzyskano dzięki wykorzystaniu symulatora funkcjonowania sieci wodociągowych pod nazwą *ISYNOW* oraz aplikacji *VLOKATOR* analizującej aspekty niezawodnościowe i ekonomiczne wyników odpowiednich symulacji [7]. Obydwa narzędzie zostały opracowane przez autorów w Instytucie Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej. Wszystkie przeprowadzone symulacje obejmowały okres pełnej doby będącej podstawowym powtarzalnym przedziałem czasu i funkcjonowania SZW.

## 2. Zarys aspektów hydraulicznych i niezawodnościowych metody – założenia, narzędzia pomiarowe.

Analiza funkcjonowania SZW jest nierozzerwalnie związana z problematyką działania systemu w stanie awaryjnym, oraz minimalizacją skutków potencjalnej awarii tak, by miały one jak najmniejszy zasięg i konsekwencje. Jednym z kierunków działania dążącym do poprawy niezawodności jego funkcjonowania jest utrzymywanie rezerwy wody w systemie za pomocą zespołu zbiorników wodociągowych. Nie podlega żadnej wątpliwości, że wzrost tych rezerw powoduje poprawę niezawodności funkcjonowania SZW, a przynajmniej nie powoduje jej pogorszenia [4]. Pojawia się natomiast pytanie czy dzięki ich odpowiedniej dyslokacji jest możliwa dalsza poprawa warunków dostawy wody do odbiorców.

Stosowana strategia wyboru miejsca lokalizacji zbiornika sieciowego opiera się na wielu kryteriach i czynnikach limitujących, z których najistotniejsze to [4], [7]:

- topograficzne – lokalizacja przestrzenna i dostępność działek budowlanych,
- wolumetryczne – definiujące skrajne dopuszczalne objętości zbiornika,
- hydrauliczne – uwzględniające przepustowość sieci.

Mają one bezpośredni wpływ na koszt i stopień oddziaływania inwestycji na system.

Autorzy opracowania pragną zaproponować nowatorską, kompleksową metodę wyboru lokalizacji zbiorników poszerzając równocześnie zbiór kryteriów o warunek minimalizacji odległości zbiorników od odbiorców [7].

## 2.1. Ogólny zarys podejmowanych działań

Przeprowadzone serie badań doświadczalnych na różnych modelach systemów wodociągowych pozwoliły wypracować pewien ogólny schemat działań, których celem jest ocena niezawodnościowa oraz ekonomiczna proponowanych wariantów modernizacyjnych i wskazanie wariantu optymalnego względem tych kryteriów [7].

Pierwszym krokiem jest zaproponowanie wariantowych rozwiązań polegających na odpowiednim rozmieszczeniu rezerw wody w systemie w ramach istniejących ograniczeń terenowych i hydraulicznych. Szczegółowo ta tematyka została opisana w [7] oraz [8] i zostanie w zarysie przedstawiona w rozdziale 2.2 opracowania.

W kolejnym etapie, każdy z wariantów należy poddać serii symulacji w warunkach niesprawności. Przeprowadzone w/w doświadczenia pozwoliły wskazać pewną grupę stanów niesprawności, które w największym stopniu ujawniają wady i zalety poszczególnych rozwiązań wariantowych [9]. Stany te dotyczą przypadków całkowitego braku zasilania ze źródeł pierwotnych. Wtedy cały ciężar dostawy wody do odbiorców biorą na siebie zbiorniki a odwrócony kierunek przepływu wody ujawnia newralgiczne fragmenty sieci, których przepustowość bywa w takich warunkach niewystarczająca. Kontrolne badania stanów systemu przy częściowej jego niesprawności (uszkodzenia newralgicznych przewodów) pozwoliły uzyskać podobne wyniki, lecz ich skala była odpowiednio mniejsza, przez co trudniej było zauważyć pewne rysujące się zależności [7].

Każdy z awaryjnych przypadków eksploatacyjnych poddano próbie symulacyjnej polegającej na wywołaniu awarii o różnym czasie jej trwania. Proponuje się analizy przedziałów 8, 16 i 24-ro godzinnej awarii zasilania, przy czym okresy te winny obejmować czas, w którym występuje największa sumaryczna konsumpcja wody. Założenie to pozwala zaobserwować potencjalnie najpoważniejsze skutki niesprawności przy narzuconym przedziale czasowym trwania awarii [4], [7]. Proponowane przedziały czasowe pozwalają na obserwację zmian w funkcjonowaniu SZW przy częściowym lub całkowitym opróżnieniu zbiorników ze zgromadzonych w nich rezerw oraz powrotu do stanu stabilnego. Całodobowa awaria pozwala zaś na analizę stanu skrajnego [7].

Wyniki obliczeń symulacyjnych obejmują każdy z wariantów oraz stan istniejący modernizowanego systemu w trzech przypadkach eksploatacyjnych uwzględniających stany awarii zasilania wszystkich źródeł pierwotnych, trwające różne przedziały czasowe. Pozwalają one na przeprowadzenie szczegółowej analizy niezawodnościowej wykorzystując odpowiednie mierniki szerzej opisane w rozdziale 2.3 oraz [7] i [8]. Powiązanie informacji o skuteczności redukcji niedoboru wody (pojęcie definiowane w rozdz. 2.3) z wiedzą o kosztach realizacji przedsięwzięcia pozwala na selekcję wariantów według dwóch kryteriów: niezawodnościowego i ekonomicznego, co stanowi esencję prezentowanej metody [7].

## 2.2. Poszukiwanie optymalnego rozmieszczenia rezerw wody w systemie

Przyglądając się problematyce dywersyfikacji rezerw wody w systemie pod kątem wyłącznie teoretycznym można by zauważyć, że najlepszym sposobem uniknięcia negatywnych skutków awarii SZW jest tworzenie pewnych cząstkowych rezerw objętości wody bezpośrednio w miejscu jej konsumpcji, czyli u każdego odbiorcy. Realizacja takiego zamysłu jest oczywiście nierealna, lecz rozwinięcie samej idei prowadzi do wykreowania nowego podejścia do zagadnienia. Spojrzenie z innej perspektywy po-

zwala zauważyć, że prowadząc proces agregacji wspomnianych cząstkowych objętości wody zgodnie z zasadą, która każe umieszczać sumowaną objętość jak najbliżej punktów poboru wody, uzyskamy specyficzną lokalizację sumarycznej objętości wewnątrz SZW. Lokalizacja ta znajduje się w centrum geometrycznym punktów poboru wody, będąc w możliwie najmniejszej odległości od wszystkich odbiorców. Jest to punkt, który w oderwaniu od lokalnych warunków terenowych i możliwości przesyłowych SZW można podejrzewać o najlepsze miejsce na lokalizację zbiornika zapewniającego rezerwę wody dla całego systemu. Najczęściej, z wielu względów miejsce to nie może być wykorzystane do tego celu, lecz można je potraktować jako punkt, do którego winien zbliżyć się środek geometryczny układu pojemności zbiorników lokalizowanych w miejscach możliwych do wykorzystania. Można przypuszczać, że odpowiednia modyfikacja rozmieszczenia rezerw w SZW wpłynie korzystnie na zapewnienie dostawy wody do większości odbiorców zarówno w czasie normalnej eksploatacji jak i podczas awarii [7], [8].

Proponowana metoda zbudowana jest w oparciu o założenie, że w przypadku wystąpienia awarii zasilania SZW, woda zgromadzona w zbiornikach będzie skuteczniej dostarczana do większej liczby odbiorców, jeśli zbiorniki będą rozmieszczone tak, by ich geometryczny środek ciężkości był jak najbliżej geometrycznego środka ciężkości zapotrzebowania na wodę. Wyznaczenie środka zapotrzebowania na wodę można przeprowadzić w oparciu o wzór na średnią ważoną, gdzie wagą jest średnie dobowe zapotrzebowanie w każdym punkcie poboru wody zwanym węzłem sieci. Zarówno współrzędne lokalizacji węzłów sieci jak i wielkość dobowego zapotrzebowania są czynnikami, na które inżynier nie ma wpływu i można je traktować jako wartości ustalone, przez co lokalizację tego punktu również można przyjąć za stałą [7].

Analogicznie należy wyznaczyć środek ciężkości układu zbiorników, gdzie wagą jest pojemność obiektu. Do jego wyznaczenia niezbędne są współrzędne lokalizacji zbiorników oraz objętości gromadzonej w nich wody. Niewiadomymi są objętości wody zgromadzonej w każdym z zbiorników [7].

Dystans między wyżej wspomnianymi środkami ciężkości można wyznaczyć korzystając z dobrze znanego wzoru na odległość między dwoma punktami w płaskim układzie kartezjańskim:

$$L_{ZQ}(V) = \sqrt{(X_Z - X_Q)^2 + (Y_Z - Y_Q)^2} \quad (1)$$

przy oznaczeniach:

- $X_Q, Y_Q$  – współrzędne lokalizacji środka ciężkości zapotrzebowania na wodę,
- $X_Z, Y_Z$  – współrzędne lokalizacji środka ciężkości układu zbiorników,
- $L_{ZQ}$  – odległość między w/w środkami ciężkości.

Celowo nie wprowadzono tu trzeciego wymiaru – współrzędnej wysokościowej, gdyż jego obecność w minimalny sposób będzie wpływać na wynik końcowy. Przy odległościach między zbiornikami liczonych w kilometrach, niedokładność wynikająca z zaniedbania trzeciego wymiaru jest pomijalna.

Rozwiązaniem zadania jest taki zestaw objętości zbiorników  $V_{zi}$ , dla którego  $L_{ZQ}(V)$  przybiera wartość najmniejszą. Oczywiście, zmienne  $V_{zi}$  nie mogą przybierać dowolnych wartości, a w szczególności nie mogą być mniejsze od zera. Ze względu na szereg ograniczeń mniej lub bardziej związanych z funkcjonowaniem SZW, zmienne  $V_{zi}$  nie mogą również przekraczać pewnych wartości maksymalnych. Te dwa zestawy ograniczeń tworzą układ nierówności limitujących zakres zmienności  $V_{zi}$  definiując tym samym dziedzinę funkcji  $L_{ZQ}(V)$  [7], [8].

Do zbioru ograniczeń wprowadzono jeszcze jeden warunek limitujący: sumaryczną objętość wody w systemie. Zakłada się pewną stałą wartość sumy objętości wszystkich zbiorników, by uniknąć sytuacji, w której rozwiązanie optymalne jest równoznaczne np. z koniecznością gromadzenia znacznych rezerw wody pokrywających wielokrotność całkowitego dobowego zapotrzebowania. Zazwyczaj sumaryczna rezerwa wody mieści się w przedziale  $0,4-1,0 Q_{\text{dmax}}$ , choć z obserwacji systemów wodociągowych niektórych Polskich miast można wysnuć wniosek, że wartość ta przesuwa się w pobliże granicy 1,0 lub nawet ją przekracza [7]. Wprowadzony warunek pozwala utrzymać założoną rezerwę na wymaganym poziomie. Poszukanie minimum funkcji  $L_{ZQ}(V)$  sprowadza się więc do zadania optymalizacyjnego polegającego na znalezieniu minimum funkcji nieliniowej [7]:

$$L_{ZQ}(V) = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^{Nz} V_{zi} \cdot X_{zi}}{\sum_{i=1}^{Nz} V_{zi}} - X_Q \right)^2 + \left( \frac{\sum_{i=1}^{Nz} V_{zi} \cdot Y_{zi}}{\sum_{i=1}^{Nz} V_{zi}} - Y_Q \right)^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

przy następujących ograniczeniach w postaci serii nierówności i jednego równania:

$$\begin{cases} -V_{zi} \leq 0 \\ V_{zi \text{ min}} - V_{zi} \leq 0 \\ V_{zi} - V_{zi \text{ max}} \leq 0 \\ \sum_{i=1}^{Nz} V_{zi} - SV = 0 \end{cases} \quad (3)$$

przy oznaczeniach:

- $SV$  – stała, założona suma pojemności wszystkich zbiorników,
- $V_{zi \text{ max}}$  – maksymalna pojemność  $i$ -tego zbiornika,
- $V_{zi \text{ min}}$  – minimalna pojemność  $i$ -tego zbiornika.
- $V_{zi}$  – pojemność  $i$ -tego zbiornika.
- $X_{zi}, Y_{zi}$  – współrzędne lokalizacji  $i$ -tego zbiornika.

Rozwiązaniem tego zadania jest wektor  $V$  pojemności zbiorników, przy których niezawodność funkcjonowania SZW powinna być największa. Tezę tą należy zweryfikować za pomocą symulatora uwzględniającego skutki awarii w postaci spadku wielkości poboru wody w warunkach niewystarczającego ciśnienia zasilania. Symulatorem takim jest m.in. opracowany przez autorów program o nazwie *ISYNOW* [1], [2].

Przedstawiona tu metoda znajduje swoje zastosowanie w przypadku SZW, w którym wszyscy odbiorcy zlokalizowani są w obrębie jednej strefy zasilania. Poprzez taką strefę rozumie się separowany fragment sieci połączony aktywnie z resztą systemu przez przepompownię i reduktory oraz pasywnie przez zamknięte zasady. Każda taka strefa wymaga osobnej analizy rozmieszczenia pojemności wody w zbiornikach o ile te w niej występują oraz wymusza konieczność obciążenia węzła strefy, z której woda jest czerpana wielkością poboru wody występującego w strefie z niego zasilanej. Powoduje to przemieszczenie się środka ciężkości zapotrzebowania na wodę w niektórych strefach zasilania. Strefy te z racji jawnej separacji można łatwo wyodrębnić i w miarę potrzeb

przeprowadzić odpowiednie analizy. Zostały one szerzej opisane w [7]. Innym czynnikiem wprowadzającym pewne zaburzenia w jednorodności poszczególnych stref jest stosowane w wielu wodociągach wymuszanie przepływu wody z określonych kierunków między innymi celem poprawienia jej cyrkulacji. Wymuszenie to odbywa się dzięki zamknięciu niektórych zasuw, lecz nie powoduje to wyodrębnienia separowanego rejonu dającego się zakwalifikować jako strefa zasilania. W konsekwencji zaburzana jest jednorodność przepływu na większym obszarze sieci, co w znaczący sposób może wpłynąć na skuteczność zaproponowanego rozmieszczenia rezerw zbiornikowych. W takim przypadku jedynie weryfikacja za pomocą odpowiednich narzędzi symulacyjnych pozwoli odpowiedzieć na pytanie o słuszności proponowanego rozkładu.

### 2.3. Mierniki

Wyniki symulacji przypadków awaryjnych funkcjonowania SZW stanowią bazę do wyznaczenia oceny niezawodności dostawy wody do wszystkich odbiorców. Przeprowadzony szacunek kosztów realizacji każdego z wariantów daje możliwość porównania ich pod kątem ekonomicznym. Oba te czynniki pozwalają na przeprowadzenie selekcji poszczególnych rozwiązań, tak by wyłonić wariant najskuteczniejszy spośród realnych finansowo. Analizie niezawodnościowej poddawane są wyniki symulacji poszczególnych wariantów, równoległe dla wszystkich przewidzianych przedziałów czasowych niesprawności SZW.

W celu oceny komfortu i niezawodności realizacji podstawowej funkcji wodociągu, jaką jest dostawa wody pod wymaganym ciśnieniem i w wymaganej ilości posłużono się Wskaźnikiem Warunków Poboru Wody (*WWPW*). Wskaźnik ten definiowany jest jako stosunek rzeczywistego poboru wody do deklarowanego zapotrzebowania w analizowanym przedziale czasu. Został on szerzej opisany w [1], [2] oraz [3] i w zależności od potrzeb analiz może służyć jako znakomity indyktor miejsc i przedziałów czasowych, w których nie są spełnione wymogi w zakresie ciśnienia zasilania, czego konsekwencją jest spadek ilości pobieranej wody. Wskaźnik ten wyraża się za pomocą wzoru:

$$WWPW = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I Q_{wr_{ki}}}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I Q_{w_{ki}}} \quad (4)$$

przy oznaczeniach:

- $Q_{wr_{ki}}$  – chwilowy, rzeczywisty pobór wody,
- $Q_{w_{ki}}$  – chwilowe zapotrzebowanie,
- $i = 1..I$  – kolejny numer węzła sieci,
- $k = 1..K$  – kolejny krok czasowy w okresie symulacji.

Uśredniona wartość *WWPW* dla całego SZW określa procent realizacji wymagań technicznych dostawy do odbiorców, pozwalając w sposób wymierny ocenić skutek awarii systemu w każdym z analizowanych przypadków symulacyjnych [1], [3].

Każdy stan niepełnej sprawności SZW, związany jest z występowaniem pewnego niedoboru wody  $NV > 0$  w okresie trwania symulacji (zwykle jedna doba). Niedobór ten rozumiany jest jako objętość wody, która w konkretnych warunkach funkcjonowania systemu nie mogła być pobrana przez odbiorców. Niedobór można wyrazić jako różnicę między deklarowanym zapotrzebowaniem na wodę a rzeczywistym jej poborem i przedstawić za pomocą następującego wzoru [1]:

$$NV = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I Qw_{ki} - Qwr_{ki} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \quad (5)$$

Dysponując serią wyników symulacyjnych można określić wielkości niedoboru  $NV_i$  w  $i$ -tym wariancie symulacyjnym dla założonego czasu trwania awarii i wskazać różnicę między niedoborem uzyskanym dla awarii w stanie istniejącym ( $NV_{istn}$ ). Określając stosunek tej różnicy do niedoboru w stanie istniejącym definiujemy wskaźnik względnej redukcji niedoboru [7] sprowadzając tym samym wyniki wszystkich wariantów do jednej platformy porównawczej.

$$\Delta N_i = \frac{NV_{istn} - NV_i}{NV_{istn}} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

W celu podjęcia szacunkowej analizy ekonomicznej każdego z wariantów należy określić koszt ( $C$ ) jego realizacji. Problematyka ta szerzej została opisana w rozdziale 2.4. Dysponując danymi o kosztach każdego z rozwiązań można porównać je z maksymalnym obciążeniem finansowym ( $C_{max}$ ), jakie jest w stanie podjąć inwestor. Wartość ta jest zwykle szacowana przez inwestora, który jest świadom własnych możliwości finansowych oraz potencjalnych możliwości dofinansowania z innych źródeł. Porównanie  $C$  z  $C_{max}$  pozwala odrzucić rozwiązania nierealne finansowo nawet, jeśli są one najlepsze pod kątem niezawodnościowym.

Warianty, które nie zostały wykluczone ze względu na zbyt duży koszt ich realizacji proponuje się porównać ze sobą za pomocą wskaźnika  $\Delta NJ$  określającego wartość redukcji niedoboru ( $\Delta N_i$ ) przypadającą na jednostkę ceny modernizacji ( $C$ ) [7]:

$$\Delta NJ = \frac{\Delta N_i}{C} \left[ \frac{100\%}{\text{mln.zł}} \right] \quad (7)$$

Wskaźnik ten występując samodzielnie nie pozwala w sposób jednoznaczny ocenić wskazanego wariantu, dając jedynie możliwość porównania poziomów redukcji niedoboru sprowadzonych do tej samej wykładni cenowej. Dopiero powiązanie tej informacji z całkowitym kosztem inwestycji pozwala wskazać grupę wariantów optymalnych zarówno pod kątem redukcji niedoboru jak i powiązanej z tym kwoty przeznaczanej na inwestycję [8].

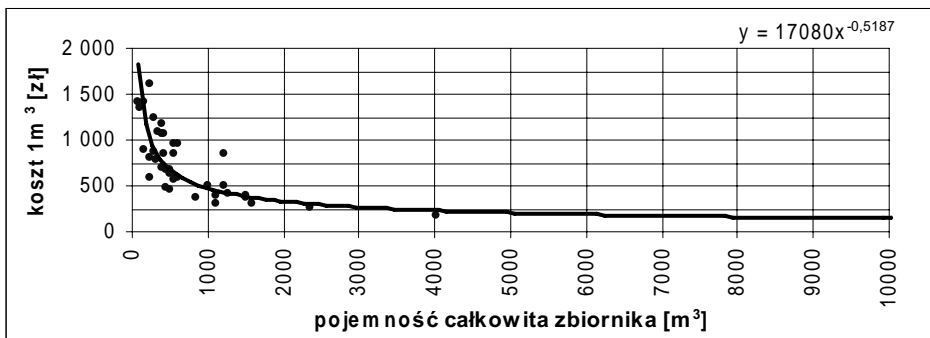
## 2.4. Aspekt ekonomiczny wariantowej modernizacji SZW

Ocena ekonomiczna każdego z wariantów modernizacji SZW związana jest z wyznaczeniem orientacyjnych kosztów inwestycji na bazie obowiązujących cenników. Należy tu, zaznaczyć, że na koszty związane z modernizacją układu wodociągowego składają się koszty dokumentacji, realizacji inwestycji, w tym koszt działki budowlanej, oraz koszty związane ze zmianą eksploatacji niektórych obiektów SZW. W miarę możliwości należy je również uwzględnić w kosztorysie szacunkowym [10].

Idea, która przyświecała tworzeniu mechanizmu oceny zadania pod kątem ekonomicznym zakładała między innymi możliwość szacunkowego określenia kosztów inwestycji bez konieczności tworzenia szczegółowego kosztorysu o charakterze budowlanym, oczywiście nie wykluczając takiej możliwości. W tym celu podjęto próbę stworzenia charakterystyki funkcyjnej pozwalającej oszacować jednostkowy, uśredniony wskaźnik kosztów budowy kompleksu: żelbetowy zbiornik wody pitnej wraz z komorą zasuw i wyposażeniem. Podjęta próba wiązała się ze zgromadzeniem informacji o rzeczywistych kosztach budowy takich obiektów. W efekcie zebrano dane o kosztach realizacji 39 inwestycji. Koszty związane z realizacją konkretnego zadania powiązane są w szczególności z zastosowaną technologią, maszynami, poziomem zagłębienia komór zbiornika w gruncie, rodzajem podłoża oraz wyposażeniem komór. Niestety, nie udało się uzyskać od wykonawców żadnej z tych informacji. Zastaniali się oni, ponieważ słusznie, interesem firmy związanym z zachowaniem konkurencyjnych cen na potrzeby przyszłych przetargów. Jedyną pewną cechą wszystkich analizowanych inwestycji jest to, że dotyczą one obiektów naziemnych o konstrukcji żelbetowej. Inwestycje poddane analizie realizowane były w latach 1998 – 2007. Koszt ich realizacji został urealniony do cen za II kwartał 2007 na podstawie danych o zmianie cen za towary i usługi podawanych przez GUS [6].

Zebrane dane empiryczne posłużyły do stworzenia wykresu kosztów inwestycji przypadającej na każdy  $1 \text{ m}^3$  zbiornika. Pozwoliło to wygenerować krzywą trendu w oparciu o funkcję wykładniczą. Krzywa ta stanowiła podstawę szacowania kosztów realizacji podobnych inwestycji w oparciu o metodę wskaźnikową [7]. Z powodu braku danych o kosztach realizacji zbiorników o znacznych pojemnościach przy równoczesnym zapotrzebowaniu na taką informację, dokonano prawostronnej ekstrapolacji funkcji do granicy  $10000 \text{ m}^3$ .

Autorzy są świadomi, iż zaproponowana metoda wyceny kosztów obarczona jest pewną niedokładnością wynikającą z niezbyt precyzyjnych danych wejściowych. Jej zaletą jest jednak bardzo szybka ocena kosztochłonności zadania bez konieczności tworzenia pełnego kosztorysu budowlanego czy też uproszczonego. Koszt innych robót związanych z inwestycją, np. takich jak wymiana fragmentu przewodu zasilającego należy szacować w oparciu o katalogi cenowe dostępne na rynku.



Rys. 1. Koszt  $1 \text{ m}^3$  żelbetowego zbiornika wodociągowego wraz z komorą zasuw i uzbrojeniem w funkcji całkowitej pojemności zbiornika

Fig. 1. Price of  $1 \text{ m}^3$  ferroconcrete water tank with valve chamber and equipment in relation to total tank capacity.



### 3. Obliczenia testowe

#### 3.1. System nr 1

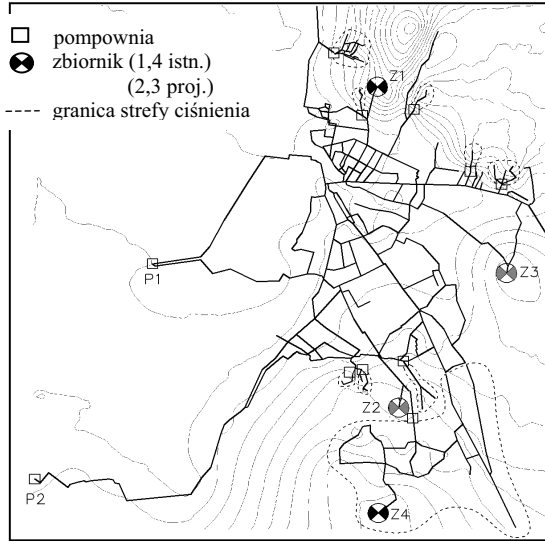
Analizowany, hipotetyczny system zaopatrzenia w wodę posiada wszystkie niezbędne cechy rzeczywistego SZW zasilającego jednostkę osadniczą o wielkości 87 tys. mieszkańców. Schemat geometrii połączeń przewodów analizowanego systemu został przedstawiony na rys. 2. W modelu uwzględniono zapotrzebowanie na wodę dla różnych grup odbiorców z uwzględnieniem charakterystycznych dla nich zmienności godzinowych poboru wody. System zasilany jest przez dwie pompownie drugiego stopnia tłoczące wodę pod ciśnieniem  $6 \div 8$  at. W północnej części miasta znajduje się zbiornik wody pitnej (Z1) o pojemności całkowitej  $2200 \text{ m}^3$ . Zbiornik ten stanowi jedyną rezerwę wody dla strefy podstawowej na wypadek przerwania zasilania z pompowni. W systemie wyodrębniono 9 stref podwyższonego ciśnienia oznaczonych na rys. 2 za pomocą linii przerywanych. W jednej ze stref znajduje się zbiornik (Z4) o całkowitej pojemności  $2500 \text{ m}^3$ . Strefa ta jest odseparowana od strefy podstawowej za pomocą przepompowni i nie będzie mieć bezpośredniego wpływu na dalsze obliczenia. Pozostałe strefy zasilane są hydroforowo i nie posiadają wyodrębnionych zbiorników górnych. Dane charakteryzujące SZW zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie wielkości charakterystycznych dla SZW

Tab. 1. List of characteristic data of water supply system

Pobór wody w dobie o średnim zapotrzebowaniu	20676 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
Pobór wody w dobie o maksymalnym zapotrzebowaniu	29826 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
Przyjęta sumaryczna pojemność wszystkich zbiorników strefy podst.	10000 [ $\text{m}^3$ ]
Pojemność zbiornika Z1	2200 [ $\text{m}^3$ ]
Wydajność pompowni P1 (dla $Q_{\text{d}\text{sr}}$ )	12390 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
Wydajność pompowni P2 (dla $Q_{\text{d}\text{sr}}$ )	8170 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]

System opisany w ten sposób należy potraktować jako istniejący, który wymaga modernizacji polegającej na jego rozbudowie o dodatkowy zbiornik lub zbiorniki w obrębie strefy podstawowej. Celem modernizacji jest znalezienie takiego rozkładu przestrzennego rezerw wody, który spowoduje największy wzrost poziomu niezawodności dostawy medium do odbiorców przy zachowaniu narzuconego reżimu finansowego w postaci maksymalnej kwoty przeznaczonej na inwestycję. Przyjęto, iż kwota ta nie powinna przekraczać 2,5 mln zł. Rozważane są dwie możliwe lokalizacje oznaczone na rys. 2 jako Z2 i Z3. Przyjmuje się, że całkowita rezerwa wody zgromadzonej w zbiornikach po rozbudowie powinna pokryć 50% całkowitego zapotrzebowania w dobie średniej (rezerwa 30% dla  $Q_{\text{d}\text{max}}$ ). Przyjęto sumaryczną objętość zbiorników strefy podstawowej równą  $10000 \text{ m}^3$ .



Rys. 2. Schemat sieci wodociągowej.

Fig. 2. Chart of water system network.

### 3.2. Badania niezawodnościowe

Poszukiwania najkorzystniejszego rozmieszczenia rezerw zbiornikowych przeprowadzono w oparciu o sześć wariantowych rozwiązań modernizacyjnych, które porównano z wariantem obrazującym stan przed modernizacją. Przyjęto numerację wariantów: wariant 0 – stan istniejący, warianty 1 do 6 – alternatywne rozmieszczenie wody w zbiornikach. Dla każdego wariantu zostały przeprowadzone obliczenia mające na celu:

- Wyznaczenie objętości poszczególnych zbiorników za pomocą procedury minimalizacji odległości między w/w środkami ciężkości,
- Wyznaczenie parametrów pracy systemu sprawnego,
- Wyznaczenie przedziału doby, w którym awaria w wszystkich źródłach zasilania spowoduje potencjalnie najdotkliwsze skutki awarii,
- Określenie wymiernego stopnia negatywnych skutków awarii dla odbiorców w przypadku równoczesnego zaniku zasilania z obu źródeł,
- Oszacowanie kosztów realizacji wariantu.

Całkowity zakres obliczeń obejmuje 18 symulacji przypadków eksploatacyjnych w obrębie sześciu wariantów modernizacyjnych oraz rozwiązania istniejącego.

Wymienione obliczenia zostały wykonane za pomocą aplikacji *VLOKATOR* stworzonej przez autorów opracowania na potrzebę jego realizacji. Aplikacja bazuje na silniku symulacyjnym opisanym w [7] i realizuje wszystkie założenia w zakresie odwzorowania skutków czasowej niesprawności SZW, w tym wpływ spadku ciśnienia poniżej wymaganego na wielkość poboru wody [1], [2]. Ocena ekonomiczna przedsięwzięcia

została zrealizowana w oparciu o ramowy kosztorys inwestycji sporządzony na bazie wskaźników jednostkowych opisanych szerzej w rozdziale 2.4 oraz [7].

W wyniku zastosowania w/w procedury minimalizacji określono rozkład pojemności zbiorników w poszczególnych wariantach przy założeniu sumarycznego rezerwowania na poziomie 10000 m<sup>3</sup>. W efekcie obliczeń wariant 6 został sprowadzony do wariantu 2 i dalej nie był analizowany. Tabela 2 zawiera zestawienie parametrów początkowych oraz wyznaczone objętości zbiorników dla każdego z wariantów. Proponowane warianty pozwalają pokryć całe spektrum możliwych rozwiązań, łącznie ze skrajnymi.

Tab. 2. Wariantowe zestawienie pojemności zbiorników

Tab. 2. Variant combination of tanks capacity

Wariant	Maksymalna pojemność założona [m <sup>3</sup> ]			Pojemność wyliczona [m <sup>3</sup> ]			Odległość między środkami ciężkości [m]
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	
0	2200	-	-	2200	-	-	3002
1	10000	-	-	10000	-	-	3002
2	10000	10000	-	5565	4435	-	622
3	2200	10000	-	2200	7800	-	2323
4	2200	10000	10000	2200	3820	3980	1897
5	2200	-	10000	2200	-	7800	2281
6 → 2	10000	10000	10000	5565	4435	0	622

Każdy z wariantów został poddany regulacji, której celem było ustalenie odpowiednich harmonogramów pracy pompowni i uzyskanie jak najlepszej współpracy zbiorników z siecią. W wariantach 4 i 5, (obecny Z3), na odcinku o długości 2,6 km zwiększono średnicę przewodu zasilającego ten obiekt z  $\phi 150$  na  $\phi 350$  ze względu na jego niewystarczającą przepustowość.

W ramach każdego z wariantów przeprowadzono serię symulacji funkcjonowania systemu w warunkach całkowitego braku zasilania z obu źródeł przez 8, 16 i 24 godziny. W efekcie uzyskano wartości *WWPW* i niedoboru (*NV*), które obrazują wielkość wpływu niesprawności na niezawodność funkcjonowania SZW, a porównanie tych wskaźników pozwala wstępnie wytypować warianty dające największy zysk niezawodnościowy w stosunku do wariantu zerowego. Wielkości te zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wariantowe zestawienie wartości wskaźników *WWPW* i *NV*

Tab. 3. Variant combination of *WWPW* and *NV* indicators

Wariant	Awaria 8 godz.				Awaria 16 godz.				Awaria 24 godz.			
	Przedz. czasu [godz]	WWPW [%]		NV [m <sup>3</sup> ]	Przedz. czasu [godz]	WWPW [%]		NV [m <sup>3</sup> ]	Przedz. czasu [godz]	WWPW [%]		NV [m <sup>3</sup> ]
		śr	min			śr	min			śr	min	
0	11 – 19	76,53	10,26	4806	06 – 22	49,31	8,10	11411	10 – 10	21,18	8,21	16200
1	10 – 18	92,24	71,25	1168	06 – 22	79,55	30,15	3783	10 – 10	54,94	9,05	8514

2	14 – 22	99,80	96,79	43	14 – 06	87,56	61,06	1652	14 – 14	73,56	22,97	5352
3	19 – 03	99,87	99,39	22	12 – 04	86,67	67,42	1555	21 – 21	76,75	24,15	4977
4	19 – 03	99,94	99,81	9	17 – 09	92,77	83,69	883	16 – 16	82,72	35,19	3254
5	10 – 18	97,47	79,60	301	06 – 22	83,22	36,81	3170	10 – 10	63,16	14,97	7147

Bazując na przedstawionym zestawieniu można wysunąć ogólny wniosek, że każda modyfikacja SZW polegająca na zwiększeniu rezerw zbiornikowych, w sposób istotny podnosi niezawodność dostawy wody w przypadku całkowitego zaniku zasilania z obu pompowni. Zmniejszenie niedoboru wynosi od około 50 do prawie 100 % niedoboru notowanego w wariancie zerowym. Najmniejszy niedobór, a tym samym największą średnią wartość *WWPW* zaobserwowano w wariancie nr 4 (trzy zbiorniki w strefie podstawowej), jednakże warianty 2 i 3 posiadają zbliżoną skuteczność przy jednym dodatkowym zbiorniku i braku konieczności wymiany ponad 2,6km przewodu zasilającego zbiornik nr 3. Te trzy warianty należy typować jako rokujące największe szanse na uzyskanie pożądanego efektu wzrostu niezawodności dostawy wody przy akceptowalnych kosztach inwestycji.

### 3.3. Kryterium ekonomiczne oraz selekcja wariantów

Przy tworzeniu kosztorysu szacunkowego kierowano się założeniem utrzymania jak największego uproszczenia mechanizmu szacowania kosztów przy zachowaniu rozsądnych granic tolerancji wyniku. Założono, że inwestor dysponuje prawem własności gruntu, w związku z czym, cena gruntu nie była brana pod uwagę w rozrachunku. Wycenie podlegała konstrukcja zbiornika wraz z komorą zasuw oraz uzbrojeniem. Wycena ta oparta została o sporządzoną funkcję wskaźnikową opisaną w rozdziale 2.4. W przypadku robót dodatkowych takich jak wymiana przewodu zasilającego posłużono się cenami wskaźnikowymi za II kwartał 2007 opracowanymi przez firmę Bistyp-Consulting. W tabeli 4 zestawiono szacunkowe koszty realizacji poszczególnych wariantów.

Tab. 4. Wariantowe zestawienie kosztów realizacji modernizacji SZW

Tab. 4. Variant combination of SZW modernization costs.

	wariant 1	wariant 2	wariant 3	wariant 4	wariant 5
<b>Koszt [mln zł]</b>	1,27	1,82	1,27	4,16	3,60

Znając ograniczenia budżetu inwestora do kwoty 2,5 mln zł, na tym etapie odrzucono zbyt drogie warianty 4 i 5. W świetle poprzednich eliminacji na drodze analiz niezawodnościowych (odrzuciono warianty 1 i 5) wskazano do dalszych rozważań warianty 2 i 3 jako te, które spełniają założone wymagania niezawodnościowe i ekonomiczne.

W każdym z trzech przedziałów czasowych niesprawności wyznaczono wielkość niedoboru. Wykorzystując zależność (6) określono poziom redukcji niedoboru  $\Delta N$  poprzez porównanie z niedoborem pojawiającym się w systemie przed modyfikacją. Wyniki zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wielkość redukcji niedoboru w funkcji czasu trwania niesprawności

Table 5. Reduction of deficiency size in relation to system malfunction duration.

	wariant 1	wariant 2	wariant 3	wariant 4	wariant 5
$\Delta N_8$ [%]	75,70	99,11	99,54	99,81	93,74
$\Delta N_{16}$ [%]	66,85	85,52	86,37	92,26	72,22
$\Delta N_{24}$ [%]	47,44	66,96	69,28	79,91	55,88

Największy poziom redukcji niedoboru wody ( $\Delta N$ ) zaobserwowano w każdym przypadku dla wariantu 4. Nieznacznie niższą redukcję można uzyskać przy rozwiązaniu 2 oraz 3. Wykorzystując zależność (7) określającą wielkość redukcji przypadającą na jednostkę kosztów inwestycji (1 mln zł), w tabeli 6 zestawiono wartości  $\Delta NJ$ .

Tab. 6. Redukcja niedoboru na każdy mln zł w funkcji czasu niesprawności

Tab. 6. Reduction of deficiency upon 1 mln zł in relation to malfunction duration

	wariant 1	wariant 2	wariant 3	wariant 4	wariant 5
$\Delta NJ_8$ [%]	59,55	54,38	78,30	23,99	26,01
$\Delta NJ_{16}$ [%]	52,58	46,92	67,94	22,17	20,04
$\Delta NJ_{24}$ [%]	37,32	36,74	54,49	19,20	15,50

Powyższe zestawienie obrazuje jednostkową „skuteczność” rozwiązania. Wariant 4, który we wszystkich poprzednich zestawieniach był rozwiązaniem zapewniającym największy wzrost niezawodności, w zestawieniu uwzględniającym również jednostkową kosztocłonność inwestycji okazuje się być najmniej korzystnym.

Bazując na serii wariantowych obliczeń symulacyjnych stworzono ciąg zestawień porównawczych wg dwóch kryteriów: niezawodnościowego i ekonomicznego. Kryteria te pozwoliły wyodrębnić warianty spełniające wymogi inwestora w zakresie kosztów realizacji oraz wzrostu niezawodności dostawy wody do odbiorców. Stopniowa selekcja wyłoniła wariant 3 jako najkorzystniejszy. W tym miejscu rola projektanta-analityka dobiega końca. Ostateczną decyzję o podjęciu działań zmierzających do realizacji jednego ze wskazanych rozwiązań zawsze podejmuje inwestor, który może się podprzeć wykonaną w ten sposób ekspertyzą. Decyzja ta jest już poza obszarem wpływu zespołu inżynierskiego podejmującego się oceny wariantów i często uwarunkowana jest czynnikami społecznymi, politycznymi bądź innymi, które nie wchodzą w zakres niniejszego opracowania.

### 3.4. System nr 2

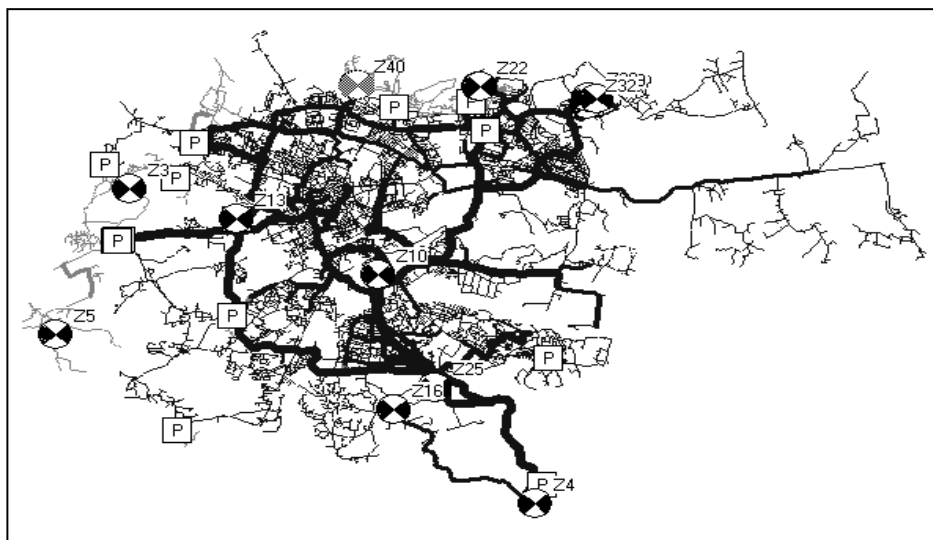
Prezentowana tu analiza ma na celu wskazanie alternatywnego wykorzystania proponowanej metody minimalizacji odległości między w/w środkami ciężkości. Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają wysnuć wnioski w zakresie stosowalności oraz skuteczności

metody dla bardzo złożonego systemu, w którym w obrębie strefy zasilania występuje podział na rejony oddziaływania poszczególnych źródeł wody.

Model analizowanego systemu jest numerycznym odwzorowaniem sieci wodociągowej miasta Krakowa, dostarczającej wodę do około 747 tys. odbiorców. Wszystkie obliczenia symulacyjne zostały wykonane dla warunków maksymalnego dobowego zapotrzebowania na wodę ( $Q_{\text{dmax}} = 212$  tys.  $\text{m}^3$ ). Zauważono, iż przy takim obciążeniu, w systemie występuje stały niedobór wynoszący około  $400 \text{ m}^3$ , co odpowiada  $0,2\%$   $Q_{\text{dmax}}$ . Wartość ta może być związana z charakterystycznym dla tego stanu spadkiem ciśnienia w niektórych rejonach sieci.

Sieć zasilana jest z sześciu źródeł, z których największym jest ZUW Dobczyce dostarczający około 70% wody konsumowanej przez odbiorców. Woda z tego ZUW transportowana jest za pomocą dwóch przewodów tranzytowych do zbiorników przepływowych w Gorzkowie a następnie w Sierczy (Z4). Sumaryczna rezerwa wody w obu kompleksach zbiorników może wynosić  $181000 \text{ m}^3$ , co pozwala pokryć ponad 100 % średniego dobowego zapotrzebowania na wodę. Z Sierczy woda grawitacyjnie s pływa w kierunku miasta, gdzie w nastawni Piaski Wielkie, za pomocą układu regulatorów ciśnienia rozdzielana jest na poszczególne obszary miasta. Obecność tych regulatorów w sposób pośredni wyklucza ze strefy podstawowej zbiorniki w Sierczy, które znajdują się znacznie powyżej pozostałych zbiorników. W systemie znajdują się dodatkowe kompleksy zbiorników rozmieszczone w północno-wschodniej, południowo-zachodniej i centralnej części miasta.

System w ramach strefy podstawowej podzielony jest na mniejsze rejony, które są wydzielone poprzez zamknięcie niektórych kluczowych przewodów. Skutkuje to wymuszeniem przepływu wody z konkretnych, oczekiwanych kierunków. Rejony te, posiadające płynny i zmieniający się w czasie zasięg, nie zostały uwzględnione w sposób bezpośredni wprowadzonych analizach. Ich obecność ujawnia się pośrednio poprzez oddziaływanie na zbiorniki w trakcie awarii. Dotyczy to w szczególności sytuacji zróżnicowanego wypływu wody z dwóch sąsiadujących zbiorników zasilających przyległe, lecz miejscowo separowane rejony sieci. Na rys. 3 przedstawiono schemat sieci wraz z zaznaczonymi zbiornikami, pompowniami i przepompowniami.



Rys.3. Schemat sieci wodociągowej Krakowa

Fig. 3. Chart of water system network in Cracow.

### 3.5. Cel badań

Zaprezentowany SZW posłużył do przeprowadzenia serii eksperymentalnych obliczeń o charakterze czysto teoretycznym, których celem jest wskazanie takiego rozmieszczenia rezerw wody w systemie, które poprawi aktualny poziom niezawodności funkcjonowania SZW. Do tego celu wykorzystano omawianą metodę dyslokacji rezerw zbiornikowych. Dodatkowo zakłada się rozbudowę systemu o zbiornik Z40 lokowany na północy miasta. Należy określić pojemność tego zbiornika. Przewiduje się docelowy wzrost rezerw gromadzonych we wszystkich zbiornikach o  $20000 \text{ m}^3$  do poziomu  $296020 \text{ m}^3$ . Lokalizacja wspomnianych  $20000 \text{ m}^3$  nie jest związana wyłącznie ze zbiornikiem Z40 i może zostać rozmieszczona również w innych obiektach.

W ramach eksperymentu założono pełną dowolność modyfikacji pojemności zbiorników w celu wykazania skuteczności prezentowanej metody. Założona dowolność pozwala również na redukcję pojemności, co rzutuje na nieskuteczność analiz ekonomicznych. W związku z tym założeniem, w niniejszym przykładzie obliczeniowym ograniczono się wyłącznie do poszukiwań rozwiązań o charakterze niezawodnościowym i hydraulicznym, pomijając aspekt ekonomiczny, szczegółowo omówiony na poprzednim przykładzie modernizacji SZW oraz w [7].

### 3.6. Badania niezawodnościowe

Poszukiwania rozmieszczenia rezerw wody w istniejących zbiornikach oraz niezbędnej pojemności zbiornika Z40 przeprowadzono za pomocą serii następujących po sobie wariantowych symulacji funkcjonowania systemu. W wariacie 1 całą dodatkową pojemność ulokowano w Z40. Poczynając od wariantu 2, kolejne były tworzone na podstawie wyników symulacji wariantów poprzednich. Do rozwiązania optymalnego dochodzono na drodze kolejnych przybliżeń, poprzez modyfikację pojemności zbiorników, które współpracują z siecią w sposób niewłaściwy – w szczególności, zbyt szybko się opróżniają w czasie trwania awarii. Skuteczne działanie polegało na blokowaniu pojemności wskazanego zbiornika na minimalnym oczekiwanym poziomie. Zbiornik taki brał udział w poszukiwaniach minimum odległości, lecz zmiana jego pojemności była ograniczana od dołu.

Z powodu istnienia rezerwy wody znacznie przekraczającej  $Q_{dmax}$  (130%), zrezygnowano z symulacji awarii trwających krócej niż jedna doba. Prowadzone symulacje stanów awaryjnych uwzględniały równoczesny zanik zasilania ze wszystkich źródeł pierwotnych zasilających strefę podstawową. Z powodu niewielkich różnic w wynikach, zdecydowano się przeprowadzić również symulację stanu awaryjnego uwzględniającego dodatkowo zanik zasilania z kompleksu zbiorników Siercza.

Wariant 0 dotyczy stanu istniejącego natomiast pozostałe warianty opisują kolejne kroki poszukiwania lepszego rozkładu pojemności zbiorników, w tym w szczególności zbiornika Z40. Dla każdego wariantu zostały przeprowadzone obliczenia mające na celu:

- Wyznaczenie pojemności poszczególnych zbiorników,
- Wyznaczenie parametrów pracy systemu w stanie sprawności,
- Określenie negatywnych skutków całodobowej awarii dla odbiorców w przypadku równoczesnego zaniku zasilania z wszystkich źródeł strefy podstawowej,
- Jak wyżej, lecz z uwzględnieniem awarii na przesyle ze zbiorników Siercza.

Zestawione w tabeli 7 wariantowe dyslokacje rezerw zbiornikowych wskazują podjęty kierunek działań w celu realizacji wyżej wspomnianego założenia.

Dla każdego z wariantów wielkości niedoboru podczas bezawaryjnej pracy systemu były stabilne i wynosiły około  $400 \text{ m}^3$ , co może być związane z lokalnym spadkiem wartości ciśnienia w niektórych punktach sieci, w czasie maksymalnego zapotrzebowania. Początek awarii dla przypadku zaniku zasilania z pompowni przy pracującym przesyle z Sierczy, dla każdego wariantu został ustalony na godzinę 6:00 rano. W przypadku dodatkowej awarii przesylu z Sierczy ustalono początek awarii na godzinę 18:00. W tabeli 8 zamieszczono zestawienie wyników dla wszystkich wariantów z podziałem na poszczególne przypadki eksploatacyjne.



Tab. 7. Zestawienie wariantowych pojemności zbiorników strefy podstawowej.

Tab. 7. Comparison of variant capacities of water tank in primary zone.

Zbiornik \ Wariant	0	1	2	3	4	5
4 – Siercza+Gorzków	181000	181000	181000	181000	181000	181000
10 – Krzemionki	20400	20400	18019	13480	6612	6612
13 – Kościuszko	25000	25000	1846	28470	22705	22705
16 – Rajsko	1000	1000	8756	1000	3943	3943
19 – Mistrzejowice	10000	10000	14955	8330	5600	5600
22 – Mistrzejowice	6000	6000	16654	8476	6000	6000
25 – Kosocice	14500	14500	4829	11046	14500	16035
29 – Krzesławice Grn	4040	4040	4514	8166	4040	3200
30 – Krzesławice Grn	6080	6080	5128	7572	3495	2800
32 – Krzesławice Dln	8000	8000	5188	11473	18745	18745
40 – Górka Narodowa	-	20000	18509	17007	29380	29380
<b>Sumaryczna rezerwa</b>	<b>276020</b>	<b>296020</b>	<b>296020</b>	<b>296020</b>	<b>296020</b>	<b>296020</b>
odl. między środk. [m]	1416	678	12	5	29	139

Tab. 8. Wyniki wariantowych symulacji funkcjonowania SZW.

Tab. 8. Results of variant simulations of SZW function.

Przypadek eksploatacyjny↓	Wariant →	0	1	2	3	4	5
System sprawny	WWPWśr	99,78	99,79	99,79	99,79	99,79	99,79
	WWPWmin	99,53	99,56	99,57	99,57	99,57	99,57
	NV [m <sup>3</sup> ]	417	400	401	400	398	398
Niesprawność źródeł pierwotnych	WWPWśr	98,45	99,46	99,42	99,49	99,43	99,40
	WWPWmin	93,02	99,01	98,96	99,03	99,00	98,99
	NV [m <sup>3</sup> ]	4374	1455	1538	1412	1461	1492
J.w., oraz niesprawność przesyłu z Sierczy	WWPWśr	65,49	72,20	71,17	71,00	72,26	72,90
	WWPWmin	28,49	32,06	30,46	28,11	37,72	37,03
	NV [m <sup>3</sup> ]	75177	59509	64461	63734	57413	56270

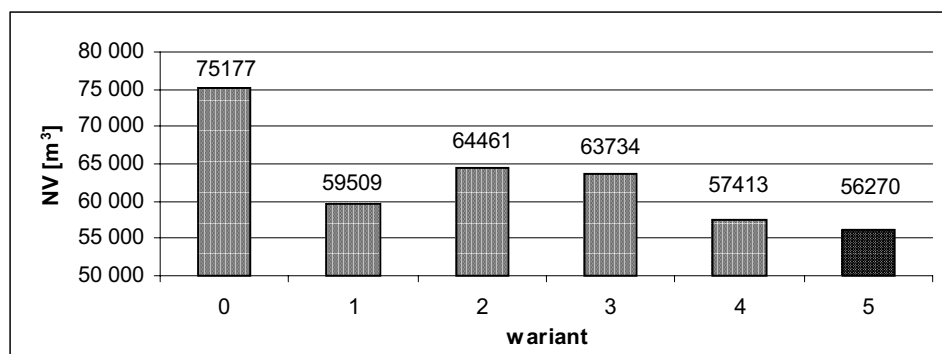
Porównanie wyników symulacji pozwala zauważyć, że przy aktualnym, znacznym stopniu rezerwowania wody w zbiornikach jak i przy jego wzroście, praktycznie nie zauważono zmian w funkcjonowaniu systemu w warunkach całkowitej sprawności (stały niedobór na poziomie 400m<sup>3</sup>). Dopiero symulacja całodobowej niesprawności kluczowych obiektów pozwala zauważyć różnice między stanem istniejącym a wariantami pochodnymi. W pierwszym przypadku awaryjnym, niedobór dla wariantu 0

wynoszący około 4400 m<sup>3</sup> został zredukowany do stałego poziomu około 1450 m<sup>3</sup> dzięki obecności dodatkowego zbiornika Z40.

Kolejne warianty powstawały w oparciu o charakterystyki zmian napełnienia zbiorników w wariantcie poprzednim, w przypadkach awaryjnych. Pozwalało to wskazać obiekty, które szybciej się opróżniają a więc takie, które winny posiadać większą pojemność, oraz obiekty, które są w mniejszym stopniu wrażliwe na awarie. Zróżnicowanie to wynika z podziału systemu na rejon oddziaływania poszczególnych źródeł wody. Za pomocą szeregu zamkniętych zasuw na kluczowych przewodach został wydzielony rejon zasilania ze zbiorników w Mistrzejowicach i Krzesławicach Górnych. Zbiorniki te w wyraźnie mniejszy sposób reagowały na brak dostawy wody i spadek ciśnienia w centralnej części miasta. Wyniki symulacji wskazują, że mimo znacznych ilości zgromadzonej tam wody istnieje poważny problem z jej wykorzystaniem podczas awarii.

Badania dla przypadku uwzględniającego brak zasilania ze wszystkich źródeł pierwotnych oraz tranzytu z Sierczy wskazują na konieczność zwiększenia rezerwowania wody w zbiornikach Kosocice i Rajsko. Oba zbiorniki, bez względu na ich pojemność, w przeciągu kilku godzin całkowicie się opróżniają doprowadzając do znacznych spadków ciśnienia na południu miasta. Zbiorniki te stanowią zasilanie dla wyodrębnionego rejonu południowej, wyżej wzniesionej części miasta. Dopływ wody do tego obszaru sieci jest praktycznie realizowany wyłącznie od strony Sierczy.

Zbudowanie dużego zespołu zbiorników na drodze zasilania od strony Sierczy należy uznać za rozwiązanie właściwe przy założeniu dobrze funkcjonujących przerzutów wody w obrębie miasta. W przypadku ich awarii zgromadzone bardzo duże objętości wody mogą okazać się rezerwą wyłącznie teoretyczną, z wyjątkiem lepszej sytuacji w zasilaniu zbiorników Kosocice i Rajsko.



Rys. 4. Niedobór przy braku zasilania z Sierczy i wszystkich źródeł pierwotnych.

Fig. 4. Deficiency when all primary sources and Siercza tanks are out of order.

Obserwując przedstawioną na rys. 4 zmianę wartości niedoboru w kolejnych wariantach można zauważyć, że wielkość ta poprawiała się z każdym kolejnym przybliżeniem, poczynając od wariantu 2. Rozmieszczenie rezerw w wariantcie 5 pozwala uzyskać lepszy efekt niezawodnościowy niż ten, który wynika z lokalizacji całej dodatkowej pojemności w zbiorniku Z40 (wariant 1). Podsumowując wyniki uzyskane w tym

przykładzie można zauważyć, że rekurencyjne stosowanie przytaczanej metody minimalizacji odległości między środkami ciężkości pozwoliło na wskazanie takiego rozmieszczenia rezerw wody, które poprawia warunki jej dostawy do odbiorców a tym samym podnosi niezawodność działania SZW, co było celem obliczeń.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Opracowanie przedstawionej metody analizy funkcjonowania systemów wodociągowych stało się możliwe dzięki rozwojowi teorii niezawodności w tej dziedzinie nauki oraz możliwości wykorzystania do badań niezawodnościowych numerycznych modeli systemów zaopatrzenia w wodę. Można stwierdzić, że obecnie numeryczne modele SZW są podstawowym i nieodzownym narzędziem w procesie analizy skutków wystąpienia czasowej niesprawności systemu, gromadzenia oraz przetwarzania uzyskanych tą drogą wyników. Opisana metoda jest rozwinięciem prac związanych z zastosowaniem teorii niezawodności oraz numerycznego modelowania SZW prowadzonych przez Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej.

Wnioski, które pojawiają się po przeprowadzeniu przykładowych analiz modernizacji SZW pozwalają przyjąć za słuszną tezę, że przy wykorzystaniu istniejących metod badania warunków hydraulicznego funkcjonowania SZW, oceny niezawodności jego funkcjonowania oraz analizy ekonomicznej, jest możliwe wskazanie takiego przestrzennego rozmieszczenia rezerw zbiornikowych, by skutki potencjalnej niesprawności miały jak najmniejszy rozmiar a towarzyszący modernizacji koszt inwestycji był na poziomie akceptowalnym przez inwestora.

Zastosowanie proponowanej metody może znaleźć praktyczne zastosowanie w przypadku analizy dowolnych systemów wodociągowych o stosunkowo równomiernym zróżnicowaniu wysokościowym. W przypadku systemów, w których istnieje wyraźne przesunięcie ciężkości zasilania w kierunku terenów położonych wyżej, należy rozważyć zastosowanie wspomnianej metody poprzez wykorzystanie kolejnych przybliżeń przy równoczesnym wyodrębnieniu tych zbiorników i źródeł zasilania, które wyraźnie przechylają szalę ciężkości systemu na jedną stronę.

Proponowana metoda wymaga dodatkowej weryfikacji w oparciu o analizy funkcjonowania większej liczby rzeczywistych systemów wodociągowych a uzyskane wyniki wskazują na potrzebę dalszego doskonalenia opracowanej metody w kierunku możliwości uwzględnienia większego zróżnicowania wysokościowego usytuowania odbiorców wody przy nieostrych granicach podziału na strefy ciśnienia. Niniejsze opracowanie porusza zaledwie część zagadnień związanych z optymalizacją dyslokacji rezerw zbiornikowych równocześnie sygnalizując konieczność rozwinięcia zagadnienia, dlatego należy je traktować jako zapowiedź kontynuacji badań.

## Bibliografia

- [1] Knapik K. (1993): *Zastosowanie techniki komputerowej w obliczaniu systemów zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków*. Politechnika Krakowska, Kraków
- [2] Knapik, K. (2000): *Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociagowych*. Monografia 279. Politechnika Krakowska, Kraków
- [3] Knapik, K., Wierzbicki, R., Płoskonka, R. (2003): *Zastosowanie technik komputerowych w analizie funkcjonowania istniejących i projektowanych systemów zaopatrzenia w wodę*, Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo – Technicznej, Szczyrk
- [4] Knapik, K. (2004): *Lokalizacja zbiornikowych rezerw awaryjnych w systemie dystrybucji wody*, Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, Kraków
- [5] Knapik K., Płoskonka R. (2004): *Wpływ rozmieszczenia zbiornikowych rezerw awaryjnych na niezawodność systemu dystrybucji wody*, Materiały XVIII Krajowej, VI Międzynarodowej Konferencji Naukowo – Technicznej „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, Poznań, Tom II
- [6] Mały rocznik statystyczny Polski (pozycje za lata 2000 - 2007), Zakład Wydawnictw Statystycznych
- [7] Płoskonka R. (2008): *Metoda optymalnej lokalizacji rezerw zbiornikowych w systemie dystrybucji wody*. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska
- [8] Płoskonka R., Knapik K. (2008): *Metodyka, algorytmy i badania modelowe wpływu lokalizacji zbiornikowych rezerw wody na niezawodność funkcjonowania systemów zaopatrzenia w wodę*. Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, Kraków
- [9] Wierzbicki, R. (1996): *Metoda wyznaczania niezawodności dostawy wody dla użytkowników sieci wodociagowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków
- [10] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 maja 2004r. *W sprawie określenia metod i podstaw sporządzania kosztorysu inwestorskiego, obliczania planowanych kosztów prac projektowych oraz planowanych kosztów robót budowlanych określonych w programie funkcjonalno-użytkowym*.