

Maciej Potyralla, Jarosław Zawadzki

Możliwość zastosowania krigingu zwyczajnego w planowaniu przebiegu sieci wodociągowej – studium przypadku

W XXI wieku, po raz pierwszy w historii, połowa światowej populacji ludzi mieszka na obszarach miejskich [1]. Przewidywanie i zarządzanie zapotrzebowaniem na wodę na obszarach miejskich komplikuje ścisły związek pomiędzy społecznym i ekologicznym systemem zarządzania zasobami naturalnymi [2]. Rozproszona struktura sieci wodociągowej, zmienność parametrów pracy, przy jednoczesnej potrzebie podejmowania wielu decyzji w jednym czasie powodują, że zarządzanie taką infrastrukturą jest procesem złożonym [3]. Ten trudny proces decyzyjny może być wspierany przez systemy geoinformacyjne, które są opracowywane także z myślą o zarządzaniu systemami dystrybucji wody. Wyniki analiz prowadzonych z użyciem modeli hydraulicznych mogą być pomocne w podejmowaniu decyzji związanych z modernizacją i rozbudową systemów wodociągowych. Pozwalają także na minimalizowanie skutków zdarzeń losowych, a co za tym idzie – na zmniejszenie ryzyka i kosztów ponoszonych przez przedsiębiorstwa wodociągowe.

Model hydrauliczny systemu zaopatrzenia w wodę jest jednym z podstawowych narzędzi badawczych, wykorzystywanych do analizy właściwości i działania miejskiego systemu wodociągowego. Znaczenie takich badań i wyników estymacji przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu hydraulicznego systemu jest ściśle związane z precyzją odwzorowania wszystkich rodzajów obiektów systemu zaopatrzenia w wodę, ich parametrów hydraulicznych oraz warunków zasilania i poboru wody. O jakości modelu hydraulicznego sieci wodociągowej decydują następujące elementy [4]:

- odwzorowanie struktury systemu zaopatrzenia w wodę,
- identyfikacja elementów systemu zaopatrzenia w wodę,
- modele poboru wody i parametry zasilania sieci wodociągowej.

Zapotrzebowanie na wodę wynika z przebiegu dynamicznych i stale zmieniających się procesów na podstawie wielkoskalowych interakcji między czynnikami ludzkimi i światem przyrody. Odkrycie to doprowadziło do wzrostu zapotrzebowania na opracowywanie i wdrażanie modeli dynamicznych. Większość funkcji popytu jest konstruowana w postaci statycznej, jednakże badania wykazały, że obecne wykorzystanie wody jest silnie uzależnione od wielkości systemu wodociągowego, liczby odbiorców, rozległości sieci i innych czynników dynamicznych [2].

Systemy geoinformacyjne są podstawowym narzędziem do gromadzenia i przetwarzania informacji przestrzennych odniesionych do powierzchni Ziemi. W ogólnym rozumieniu, GIS (geographic information system) jest systemem służącym przede wszystkim do zbierania, przechowywania, analizy i wizualizacji tego typu danych [5]. Programy GIS stanowią narzędzia mające na celu realizację działań na atrybutach elementów przestrzeni, czyli odnoszą się głównie do cyfrowych map tematycznych, które mogą być w dowolny sposób przetwarzane i upubliczniane. Jednym z ważniejszych elementów infrastruktury aglomeracji miejskich są sieci wodociągowe i kanalizacyjne, które przez wymiar przestrzenny są elementem antropogenicznego środowiska i podlegają zasadom gromadzenia i analizy danych typowym w przypadku systemów geoinformacyjnych [5]. GIS i ilościowe analizy przestrzenne stają się coraz ważniejszym i wszechobecnym elementem analizy zapotrzebowania na wodę [6, 7], a także pozwalają na szacowanie wskaźników jakościowych wody w systemie wodociągowym miasta [8]. Wynika to z faktu, że każdy element sieci może być opisany przez przyjęty model danych współrzędnymi geograficznymi w postaci danych lokalizacyjnych, a atrybuty istotne z punktu widzenia działań projektowych i eksploatacyjnych w postaci danych nieprzestrzennych.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania geograficznych systemów informacyjnych podczas modelowania przebiegu sieci wodociągowych. W badaniach wykorzystano materiały zawierające pomiary ciśnienia na obszarze dzielnicy Wawer, uzyskane przy współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawie SA.

Metody badań

W pierwszym etapie badań do oceny stopnia i charakteru przestrzennej zmienności wartości ciśnienia wody w sieci użyto funkcji wariogramu. Opracowano bazy danych, zawierające dane związane z informacjami dotyczącymi kolejnych numerów pomiarów i wartościami współrzędnych X i Y, określających lokalizacje wykonania pomiarów badanej zmiennej zregionalizowanej ciśnienia, a także wartości ciśnienia w sieci wodociągowej. Funkcja semiwariogramu (semiwariancji) dana jest następującym wzorem (1) [9]:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=0}^{n_h} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (1)$$

w którym wartości $z(x_i+h)$ oraz $z(x_i)$ odpowiadają wartościom ciśnienia wody w punktach sieci x_i oraz x_i+h oddalonych od siebie o odległość h , natomiast n_h oznacza liczbę par (x_i, x_i+h) wartości ciśnienia w punktach oddalonych o dystans h , wykorzystywanych w obliczaniu funkcji semi-wariogramu $\gamma^*(h)$.

Równanie (2) oraz warunek braku obciążenia (3) tworzą układ równań, zwany układem krigingu zwyczajnego [10]:

$$\sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} + \mu = \tilde{C}_{i0}; \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3)$$

Warunkiem braku obciążenia pomiaru krigingu jest to, aby suma wag była równa jedności [11].

Minimalizację wariancji błędu modelu ($\tilde{\sigma}_R^2$) wykonuje się przez znalezienie wyrażenia na nią i przyrównanie do zera odpowiednich pochodnych cząstkowych tego wyrażenia. Całkowita wariancja błędu modelu przybiera następującą postać [12]:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} \quad (4)$$

Równanie (4) stanowi wyrażenie, w którym wariancję modelu ($\tilde{\sigma}_R^2$) i kowariancję (\tilde{C}_{ij}) można traktować jako parametry, zaś wagi (w_i) jako niewiadome. W przypadku wyznaczenia wariancji błędu należy najpierw wyznaczyć parametry wybranego modelu funkcji zmiennych losowych, a następnie znaleźć zbiór wag, w którym wariancja błędu przyjmuje wartość minimalną. Jedną z bardziej prostych metod minimalizacji funkcji wielu zmiennych z ograniczeniami, jest metoda mnożników Lagrange'a:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \quad (5)$$

Metoda ta pozwala na przekształcenie problemu minimalizacji z ograniczeniami w problem minimalizacji bez ograniczeń. Funkcja podlegająca minimalizacji zastępowana jest tzw. funkcją Lagrange'a z dodatkową niewiadomą (μ), przez którą mnoży się ograniczenie. W wyniku tego otrzymuje się postać funkcji Lagrange'a, która będzie minimalizowana.

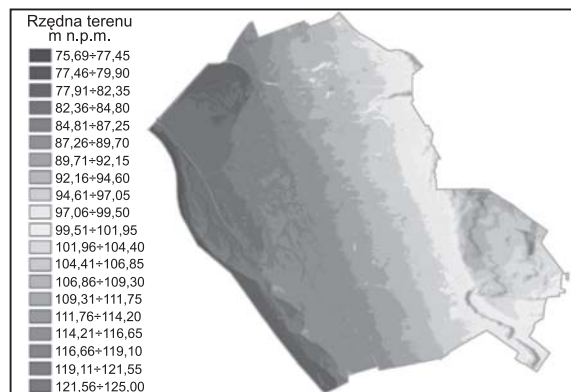
Charakterystyka badanej sieci wodociągowej

Sieć wodociągowa stanowi wielowęzłowy i wielooczkowy system (tysiące węzłów) opisany układem nieliniowych równań algebraicznych. Na model sieci składają się źródła wody, pompy zasilające, przepompownie, sieć wodociągowa o określonej topologii i określonych odcinkach rurociągów oraz odbiorcy wody, którzy określają zmienny w czasie pobór wody. Większość parametrów charakteryzujących sieć wodociągową jest ściśle określona, natomiast pobór wody z sieci wodociągowej podlega stochastycznym wahaniom dobowym, tygodniowym, a także sezonowym [13]. Układy regulacji pozwalają na utrzymanie stałego ciśnienia w punkcie zasilającym, niezależnie od poboru wody w danym czasie. Sieć rurociągów o określonej topologii i parametrach poszczególnych odcinków rurociągu łączy zakłady oczyszczania wody z odbiorcami, którzy powodują obciążenie sieci w zależności od pory dnia, tygodnia czy pory roku [14]. Pobór wody ulega stochastycznym zmianom,

a zadaniem systemu sterowania siecią wodociągową jest zapewnienie dostawy wody o określonych parametrach ciśnienia i jakości wody do każdego użytkownika [15].

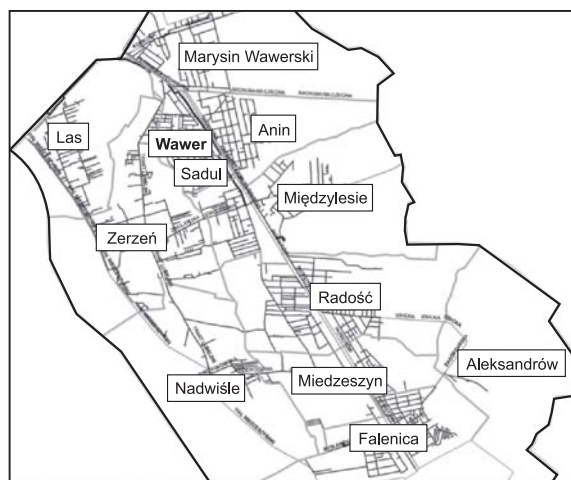
Modelowanie obciążeń ciśnienia sieci wodociągowych, a następnie ich prognozowanie jest niezbędnym elementem w podejmowaniu optymalnych decyzji w procesie planowania rozwoju i eksploatacji sieci wodociągowych [16]. Od rezultatów tego modelowania zależy dobór średnicy przewodów oraz ich rozmieszczenie na obszarze zaopatrywanym w wodę, natomiast dokładność w estymacji średnich obciążeń wpływa na sprawność, ekonomikę oraz niezawodność funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę.

Dzielnica Wawer jest usytuowana w północno-wschodniej Warszawie. Charakteryzuje się największą powierzchnią ($79,7 \text{ km}^2$), której znaczną część stanowią tzw. tereny zielone. Dzielnicę charakteryzuje również niska zabudowa, głównie willowa (Anin) oraz brak dużych blokowisk i skupisk osiedli. W analizie wykorzystano mapę numerycznych danych wysokościowych z uwzględnieniem współrzędnych geograficznych (rys. 1). Mapa prezentuje granice administracyjne analizowanego obszaru. Najwyższe wartości odnotowano we wschodniej części badanego obszaru. Ciemnym kolorem zdefiniowano obszary o najniższej wysokości rzędnej terenu graniczące od zachodu z Wisłą.



Rys 1. Mapa wysokościowa dzielnicy Wawer
Fig. 1. The elevation map for Wawer district

Na kolejnej mapie (rys 2) przedstawiono podział administracyjny dzielnicy Wawer z wyodrębnionymi obszarami poszczególnych osiedli, wraz z infrastrukturą wodociągową w postaci przewodów magistralnych i rozdzielczych.

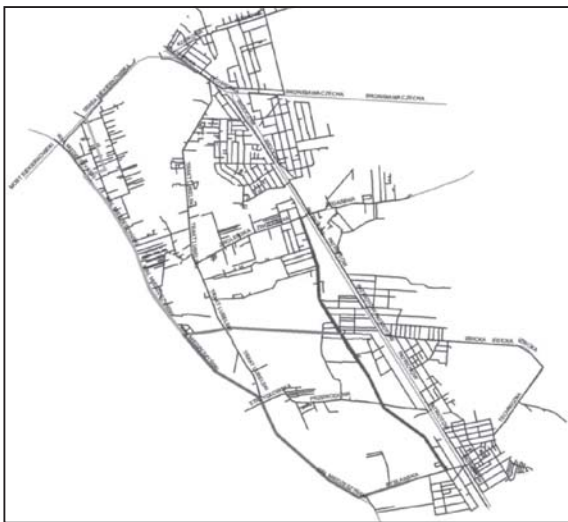


Rys 2. Mapa administracyjna dzielnicy Wawer wraz z siecią wodociągową
Fig. 2. The administrative map for Wawer district with the water supply network

Warianty inwestycyjne sieci wodociągowej

Otrzymane wyniki, dotyczące możliwości zastosowania metod geostatystycznych do analizy zjawisk infrastruktury wodociągowej, zobrazowano na warstwie wektorowej obejmującej teren dzielnicy Wawer. Na kolejnych mapach przedstawiono rozkład przestrzenny obszarów charakteryzujących się różnymi wartościami zmiennej zregionalizowanej. Część sieci wodociągowej na terenie dzielnicy Wawer jest obecnie wydzielona zamkniętymi zasuwanami i zasilana z lokalnych stacji uzdatniania wody „Radość” i „Falenica”. Taka sytuacja została odwzorowana w modelach matematycznych. Ponadto w modelu uwzględniono oznaczony w systemie GIS jako „projektowany” przewód wodociągowy DN150 w ulicach Izbińskiej i Zagórzańskiej. Inwestycja ta została zakończona we wrześniu 2015 r.

W związku z przestrzennym rozwojem miasta oraz zwiększającą się liczbą mieszkańców dzielnicy, zaproponowano budowę następujących inwestycji (rys. 3):

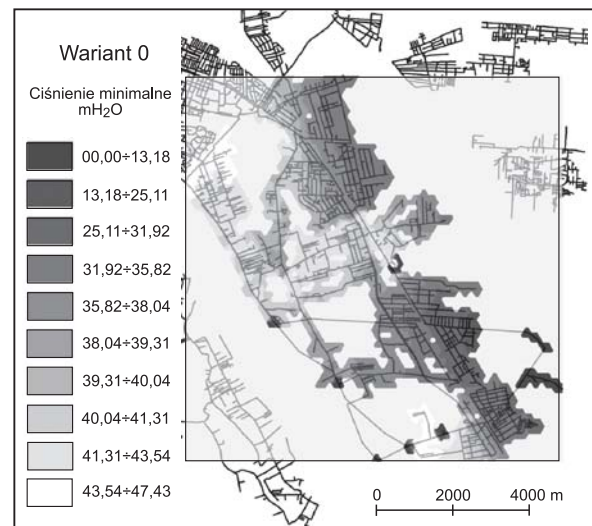


Rys. 3. Planowane inwestycje wodociągowe na terenie dzielnicy Wawer

Fig. 3. Planned water supply investments in the area of Wawer district

- przewód wodociągowy DN400 w ul. Mrówczej i Mozaikowej, na odcinku Zwoleńska–Byśławska (etap I),
- przewód wodociągowy DN600 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Bora Komorowskiego–Skalnicowa (etap II),
- przewód wodociągowy DN400 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Skalnicowa–Byśławska (etap II),
- przewód wodociągowy DN400 w ul. Skalnicowej i projektowanej ul. Panny Wodnej, na odcinku Wał Miedzeszyński–Mozaikowa (II etap).

W wyniku przeprowadzonej symulacji, z uwzględnieniem danych o dodatkowym zapotrzebowaniu na wodę na podstawie oszacowania przyszłej liczby mieszkańców, przeprowadzono próby ciśnieniowe na badanym obszarze. Na rysunku 4 przedstawiono „Wariant 0”, odpowiadający obecnej infrastrukturze wodociągowej. Kolorem jasnoszarym oznaczono obszary o wysokim ciśnieniu ($39,31 \div 47,43 \text{ mH}_2\text{O}$), znajdujące się w środkowej i zachodniej części dzielnicy, kolorem szarym oznaczono tereny o średniej wysokości ciśnienia ($31,92 \div 35,81 \text{ mH}_2\text{O}$), natomiast ciemnoszarym – tereny o niskim ciśnieniu ($0 \div 13,18 \text{ mH}_2\text{O}$). Po uwzględnieniu wartości zapotrzebowania na wodę, obliczonej na podstawie danych o liczbie



Rys. 4. Prawdopodobny rozkład wartości ciśnienia w sieci wodociągowej przy dodatkowym zapotrzebowaniu na wodę według „Wariantu 0”

Fig. 4. Probable pressure distribution in the network with additional water demand according to 'Variant 0'

mieszkańców, minimalne ciśnienie w południowej części Wawra gwałtownie się obniży, przy czym w okolicy ul. Izbińskiej wyniesie poniżej $25 \text{ mH}_2\text{O}$ (prawdopodobny jest także całkowity brak wody).

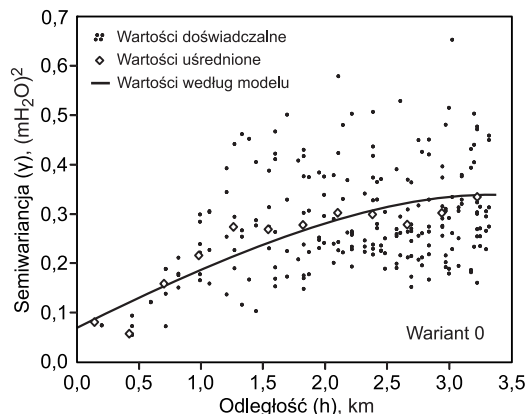
Następnie przeprowadza się badanie przestrzennej struktury danych z wykorzystaniem funkcji wariogramu. Polega ono na obliczeniu i analizie wariogramu empirycznego obrazującego przestrzenną korelację danych. Wariogram należy interpretować jako funkcję pokazującą różnicowanie wartości w dwóch punktach, w odniesieniu do ich odległości i azymutu prostej przechodzącej przez te punkty [12]. Wraz ze wzrostem odległości wartości funkcji wariogramu rosną, co wynika z malejącego podobieństwa wartości zmiennej losowej. Powyżej pewnej odległości (zwanej zasięgiem oddziaływania) obserwacje zdają się być niezależne – wariancja nie wzrasta i osiąga wartość zwaną progamiem. Ponieważ wariogram jest funkcją obliczaną na określonym kierunku, jego przebieg może wskazywać na istnienie anizotropii w przestrzennym zróżnicowaniu danych. Jeśli wariogramy obliczane w tym samym punkcie w dwóch różnych kierunkach będą się różnić co do charakteru funkcji aproksymującej, zasięgu lub progę, to można wnioskować o kierunkowym zróżnicowaniu analizowanych danych.

W przypadku badanego terenu wykreślono wariogram empiryczny (eksperymentalny), który przedstawiał zależność między wariancją a odległością pomiędzy punktami próbkowania [17]. Uzyskany wariogram eksperymentalny odznaczał się dość regularnym przebiegiem, co wynikało zapewne z liczby badanych punktów pomiarowych. Na jego podstawie wyznaczono model teoretyczny, jednakże przed wyborem modelu wariogramu przeanalizowano, który z modeli teoretycznych nadaje się do odwzorowania przebiegu wariogramu empirycznego [18]. W analizowanym przykładzie stwierdzono liniowe zachowanie wariogramu w pobliżu początku układu współrzędnych, co sugerowało zastosowanie modelu sferycznego. To, który model został wybrany zależało od tego, w którym momencie poprowadzona styczna (w początku układu współrzędnych) do wykresu osiągnęła wartość progową. Z uwagi na to, że przecięcie nastąpiło w odległości równej $2/3$ zakresu

oddziaływania, wybrano model sferyczny. Po osiągnięciu progu wariogram nasycą się [19].

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie modelowania wariogramu, które polegało na dopasowaniu matematycznego modelu teoretycznego do utworzonego wcześniej wariogramu eksperymentalnego. W celu sprawdzenia adekwatności wybranych wcześniej modeli teoretycznych wariogramów (mając na względzie niezależną próbę punktów opróbowania) wykonano walidację krzyżową (kross-walidacja) wybranej metody szacowania [20, 21]. Wśród znanych tego typu metod estymacyjnych, na uwagę zasługują m.in. triangulacja, metoda wielokątów Thiessena, minimalnej krzywizny, odwrotnych odległości, interpolacja wielomianowa lub Lagrange'a [18, 22]. W konsekwencji zastosowano metodę kręgingu zwyczajnego, który związany jest z estymowaniem wartości danego parametru w konkretnym punkcie, uwzględniając w szacowaniu wartości w punktach sąsiadujących [20]. Kręging nazywany jest często estymatorem BLUE (best linear unbiased estimator), ponieważ minimalizuje wariancję błędów w porównaniu do pozostałych metod szacowania, które tego nie czynią [23].

W celu wykonania rozkładu przestrzennego wartości ciśnienia wodociągowego konieczne było zbadanie zmienności przestrzennej i wykonanie modelu wariogramu w przypadku „Wariantu 0” (rys. 5). W pierwszym etapie badania korelacji przestrzennych zostały wykonane na podstawie przeanalizowania 3503 odczytów ciśnienia w sieci wodociągowej. Wariogram został wymodelowany przy wykorzystaniu modelu sferycznego. Układ punktów pomiarowych, wynikający z układu czujników, miał wpływ na wyznaczenie wariogramu eksperymentalnego. Wygląd semiwariogramu był bardzo charakterystyczny, wartości $\gamma(h)$ rosły wraz ze wzrostem odległości (h), osiągając wartość progową. Odległość, przy której wykres semiwariogramu zaczyna się stabilizować (osiąga próg równy 2,716), nazywa się zakresem lub zasięgiem oddziaływania. Przy odległościach (h) większych niż zakres wynoszący 3,185 km, autokorelacja przestrzenna nie występuje lub jest znikoma. Efekt samorodków wynoszący $0,689 \text{ (mH}_2\text{O)}^2$ miał stosunkowo dużą wartość, w porównaniu do całkowitej wariancji progowej równej $2,716 \text{ (mH}_2\text{O)}^2$. Pomimo nietypowego układu punktów pomiarowych widać było wyraźnie, że zasięg korelacji wariogramu wartości ciśnienia wynosił 3,185 km, co oznacza, że pomiary wykazywały zależność przestrzenną na tak długim odcinku.



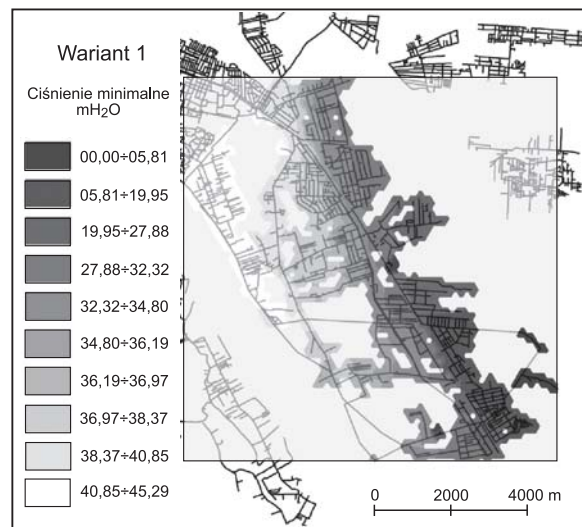
Rys. 5. Semiwariogram empiryczny wartości ciśnienia w sieci z dopasowanym modelem teoretycznym w przypadku „Wariantu 0”

Fig. 5. Empirical semivariogram of pressure in the network with the adjusted theoretical model for 'Variant 0'

Prawdopodobny rozkład ciśnień, przy dodatkowym zapotrzebowaniu na wodę obliczonym na podstawie oszacowanej liczby mieszkańców, określono w „Wariacie 1”, w ramach którego przeanalizowano wyłączenie stacji uzdatniania wody „Radość” oraz „Falenica”. Obszar dzielnicy będzie wówczas zasilany z Wodociągów Układu Centralnego oraz zostaną wykonane następujące inwestycje:

- przewód wodociągowy DN400 w ul. Mrówczej i Mozaikowej, na odcinku Zwoleńska–Bysławska (etap I),
- przewód wodociągowy DN600 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Bora Komorowskiego–Skalnicowa (etap II),
- przewód wodociągowy DN400 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Skalnicowa–Bysławska (etap II),
- przewód wodociągowy DN400 w ul. Skalnicowej i w projektowanej ul. Panny Wodnej, na odcinku Wał Miedzeszyński–Mozaikowa (etap II).

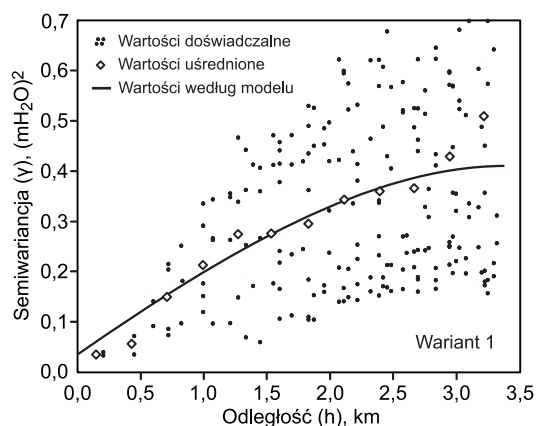
W wyniku przeprowadzonej estymacji otrzymano wyniki zobrazowane na rysunku 6. Kolorem jasnoszarym oznaczono obszary o wysokim ciśnieniu ($36,19 \div 45,29 \text{ mH}_2\text{O}$) znajdujące się w środkowej oraz zachodniej części dzielnicy, kolorem szarym oznaczono tereny o średniej wysokości ciśnienia ($19,95 \div 32,32 \text{ mH}_2\text{O}$), natomiast ciemnoszarym – tereny o niskim ciśnieniu ($0 \div 5,81 \text{ mH}_2\text{O}$). W przypadku wyłączenia lokalnych stacji uzdatniania wody i zasilania terenu Wawra od strony Trasy Siekierkowskiej, mimo uwzględnienia magistrali DN400 w ul. Mrówczej i Mozaikowej, ciśnienie na znaczącym obszarze spadnie poniżej $25 \text{ mH}_2\text{O}$, aż do całkowitego braku wody.



Rys. 6. Prawdopodobny rozkład wartości ciśnienia w sieci przy dodatkowym zapotrzebowaniu na wodę według „Wariantu 1” (na podstawie liczby mieszkańców oszacowanej przez MPWiK)

Fig. 6. Probable pressure distribution in the network with additional water demand according to 'Variant 1' (based on the number of inhabitants estimated by MPWiK)

Dodatkowo zbadano zmienność przestrzenną w przypadku inwestycji określonej jako „Wariant 1” (rys. 7). Model wariogramu charakteryzował się efektem samorodków równym $0,439 \text{ (mH}_2\text{O)}^2$. Z jego wartości można wnioskować, że błąd (uwzględniający błędy pomiarowe oraz błędy wynikające z rozmieszczenia punktów pomiarowych) wynosił $0,66 \text{ mH}_2\text{O}$ (pierwiastek z efektu samorodków). Nasylenie wariogramu wynosiło $4,3 \text{ (mH}_2\text{O)}^2$. Mały stosunek efektu samorodków do wartości nasycenia wariogramu świadczył o tym, że błędy te nie wpływały w znacznym stopniu na otrzymany rozkład przestrzenny.



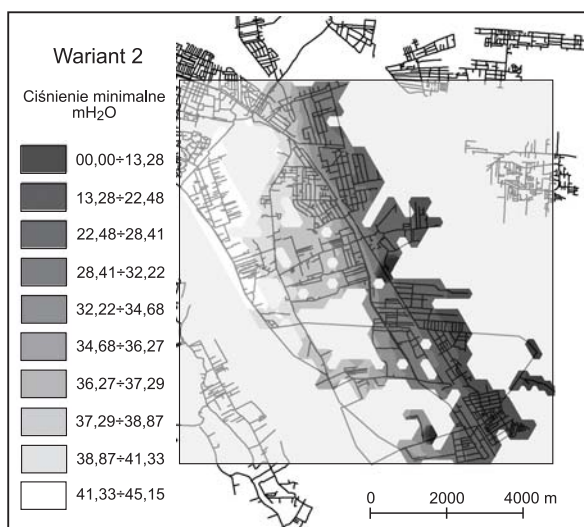
Rys. 7. Semiwariogram empiryczny wartości ciśnienia w sieci z dopasowanym modelem teoretycznym w przypadku „Wariantu 1”

Fig. 7. Empirical semivariogram of pressure in the network with the adjusted theoretical model for 'Variant 1'

Układ punktów pomiarowych, wynikający z układu sieci, miał pewien wpływ na wyznaczanie wariogramu eksperymentalnego. Pomimo nietypowego układu punktów pomiarowych widać było wyraźnie, że zasięg korelacji wariogramu wynosił około 2,9 km, co oznaczało, że pomiary wartości ciśnienia wykazywały zależność przestrzenną na tak długim odcinku.

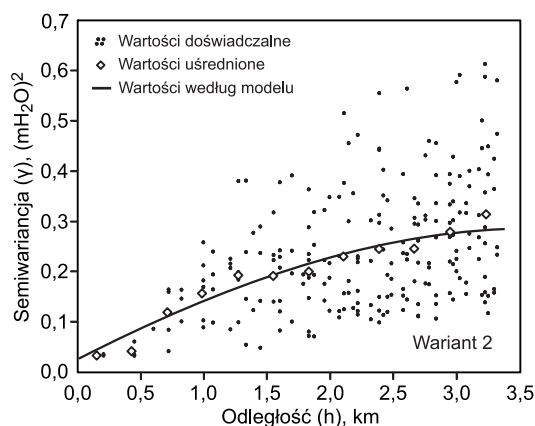
„Wariant 2” planowanej inwestycji uwzględniał dane o zapotrzebowaniu na wodę w perspektywie lat 2018–2025, przygotowane na podstawie raportu „Progniza rozwoju zasobów mieszkaniowych w Warszawie”, opracowanego przez firmę REAS. W ramach analizowanego planu nastąpi wyłączenie stacji uzdatniania wody „Radość” oraz „Falenica”, a obszar dzielnicy będzie zasilany z Wodociągów Układu Centralnego oraz zostaną wykonane następujące inwestycje:

- przewód wodociągowy DN400 w ul. Mrówczej i Mozaikowej, na odcinku Zwoleńska–Bysławska (etap I),
- przewód wodociągowy DN600 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Bora Komorowskiego–Skalnicowa (etap II),
- przewód wodociągowy DN400 w ul. Wał Miedzeszyński, na odcinku Skalnicowa–Bysławska (etap II),



Rys. 8. Prawdopodobny rozkład wartości ciśnienia w sieci przy dodatkowym zapotrzebowaniu na wodę według „Wariantu 2”

Fig. 8. Probable pressure distribution in the network with additional water demand according to 'Variant 2'



Rys. 9. Semiwariogram empiryczny wartości ciśnienia w sieci z dopasowanym modelem teoretycznym w przypadku „Wariantu 2”

Fig. 9. Empirical semivariogram of pressure in the network with the adjusted theoretical model for 'Variant 2'

– przewód wodociągowy DN400 w ul. Skalnicowej i w projektowanej ul. Panny Wodnej, na odcinku Wał Miedzeszyński–Mozaikowa (II etap).

Wyniki przeprowadzonej estymacji zobrazowano na rysunku 8. Kolorem jasnoszarym oznaczono obszary o wysokim ciśnieniu $36,27 \div 45,15 \text{ mH}_2\text{O}$ znajdujące się w środkowej oraz zachodniej części dzielnicy. Kolorem szarym oznaczono tereny o średnim ciśnieniu ($22,48 \div 32,22 \text{ mH}_2\text{O}$), natomiast ciemnoszarym tereny o niskim ciśnieniu ($0 \div 13,28 \text{ mH}_2\text{O}$). W wariancie tym, pomimo uwzględnienia budowy magistral w etapach I i II inwestycji, ciśnienie minimalne w rejonie ul. Izbickiej wynosiło w najniższym punkcie około $15,5 \text{ mH}_2\text{O}$.

Ostatni z wariogramów (rys. 9) został wykonany z uwzględnieniem wartości pomiaru ciśnienia w „Wariantcie 2”. Model wariogramu charakteryzował efekt samorodków wynoszący $0,279 (\text{mH}_2\text{O})^2$, z czego wynika, że błąd wynosił $0,53 \text{ mH}_2\text{O}$. Nasylenie wariogramu wynosiło $2,8 (\text{mH}_2\text{O})^2$. Podobny, jak poprzednio, mały stosunek efektu samorodków do wartości nasycenia wariogramu również świadczył o tym, że błędy te nie wpływały istotnie na rozkład przestrzenny. Również układ punktów pomiarowych miał pewien wpływ na wyznaczanie wariogramu eksperymentalnego. Widać było też wyraźnie, że zasięg korelacji wariogramu wynosił około 2,95 km, czyli pomiary wartości ciśnienia wykazywały zależność przestrzenną na tym odcinku.

Na podstawie dostępnych danych i opierając się na wartości zapotrzebowania na wodę, obliczonej z uwzględnieniem szacowanej liczby mieszkańców można stwierdzić, że przedsiębiorstwo wodociągowe prawdopodobnie nie będzie mogło zapewnić zaopatrzenia w wodę o gwarantowanym ciśnieniu zgodnym z „Regulaminem dostarczania wody i odprowadzania ścieków na terenie m.st. Warszawy”, wynoszącym $25 \text{ mH}_2\text{O}$, na terenie całej dzielnicy Wawer. We wszystkich analizowanych wariantach obszarem najbardziej zagrożonym spadkiem ciśnienia poniżej wartości $25 \text{ mH}_2\text{O}$ był rejon ul. Izbickiej – ze względu na ukształtowanie terenu (różnica rzędnej pomiędzy początkiem przewodu w ul. Izbickiej a jego najwyższym punktem wynosi ok. 8 m), ciśnienie będzie tam zawsze niższe. Ponadto cały obszar Aleksandrowa (na wschód od ul. Izbickiej) znajduje się na wzniesieniu, co należy uwzględnić podczas planowania dalszej rozbudowy sieci wodociągowej w tym rejonie.

W przypadku wyłączenia lokalnych stacji uzdatniania wody i zasilania całej dzielnicy Wawer od strony Wodociągów Układu Centralnego, przy uwzględnieniu szacunków Działu Rozwoju i budowy tylko magistrali DN 400 w ul. Mrówczej i Mozaikowej, ciśnienie na znacznym obszarze dzielnicy spadnie poniżej wymaganej wartości. Zagrożone spadkiem ciśnienia poniżej 25 mH₂O będą rejon Aleksandrowa, Falenicy, Miedzeszyna, Radości, Nadwiśla, Międzyzlesia, Zerzenia i Anina. Uwzględnienie magistral przewidzianych w II etapie poprawi sytuację, jednakże na terenie osiedli Falenica, Aleksandrów, Miedzeszyn, Radość i Międzyzlesia prawdopodobnie nie będzie można zagwarantować prawidłowej dostawy wody. W celu porównawczym wykonano analogiczną analizę na podstawie danych o liczbie mieszkańców w perspektywie lat 2018–2025 z raportu pt. „Prognoza rozwoju zasobów mieszkaniowych w Warszawie”, przygotowanego przez firmę REAS. Mimo znacznych różnic w oszacowanym zapotrzebowaniu na wodę w całej dzielnicy Wawer (Dział Rozwoju Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawie SA założył ponad 27 tys. dodatkowych mieszkańców, natomiast firma REAS – ok. 16,5 tys.), uwzględniając I i II etap budowy magistral, nadal zagrożony spadkiem ciśnienia poniżej 25 mH₂O będzie rejon Aleksandrowa, gdzie ciśnienie minimalne prawdopodobnie będzie wynosić około 15 mH₂O.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy działania sieci wodociągowej z zastosowaniem modelowania komputerowego umożliwiły oszacowanie skuteczności każdego z przyjętych wariantów inwestycyjnych. Wykorzystanie poprawnie wykonanego i skalibrowanego modelu pozwoliło na przetestowanie różnych rozwiązań, a także porównanie skutków każdego z nich, co przyczyniło się do wyeliminowania niewłaściwych inwestycji oraz uzyskania oszczędności.

Metoda kriginu wykorzystywana jest do interpretacji danych na powierzchniach ciągłych. Sieć wodociągowa jest ciągłym obiektem liniowym i z tego względu powstające obrazy wizualizują obszary wartości ciśnienia wody w sieci. Obraz ten dobrze oddaje zmienność rozkładu wartości ciśnienia wody, a wiarygodność uzyskanych wyników estymacji wzrasta w miarę zwiększania liczby punktów kontrolnych. Metoda kriginu zwyczajnego pozwala również wyznaczyć – a w rezultacie określić – obszary, w których następuje obniżenie ciśnienia wody w przewodzie. W związku z tym jest przydatna zarówno w ustalaniu przyczyn spadku wartości ciśnienia w sieci, jak i w rozbudowie i eksploatacji systemów wodociągowych. Konieczność ograniczania kosztów eksploatacyjnych systemów wodociągowych, zwiększania sprawności zarządzania przedsiębiorstwem oraz wspomagania procesu inwestycyjnego, potwierdzają zasadność wykorzystania tej metody geostatystycznej.

Zaprezentowane modele mogą znaleźć zastosowanie we wstępnym etapie projektowania sieci wodociągowej, a ich wykorzystanie może znacząco ułatwić proces projektowania, przyczyniając się tym samym do ograniczenia występowania stanów zagrożenia normalnej pracy systemu wodociągowego oraz zapewnienia poprawy sprawności jego funkcjonowania.

Badania zostały sfinansowane przez Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawie SA.

LITERATURA

1. State of the World Population 2007: Unleashing the Potential of Urban Growth. United Nations Population Fund, New York 2007.
2. L.A. HOUSE-PETERS, H. CHANG: Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles. *Water Resources Research* 2011, Vol. 47, W05401, pp. 1–15.
3. S.-J. LEE, R.A. WENTZ: Applying Bayesian Maximum Entropy to extrapolating local-scale water consumption in Maricopa County, Arizona. *Water Resources Research* 2008, Vol. 44, W01401.
4. M. GRZENDA: Pozyskanie i przetwarzanie danych na potrzeby modelowania pracy sieci. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2009, nr 6, ss. 16–19.
5. K. MISZTA-KRUK, M. KWIETNIEWSKI: Zakres wdrożenia GIS w przedsiębiorstwach wodociągów i kanalizacji w Polsce. Mat. konf. „GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi”, PZITS, Warszawa 2007.
6. V. SHANDAS G.H. PARANDVASH: Integrating urban form and demographics in water-demand management: An empirical case study of Portland, Oregon. *Environment and Planning B* 2010, Vol. 37, pp. 112–128.
7. J. FRANCZYK, H. CHANG: Spatial analysis of water use in Oregon, USA, 1985–2005. *Water Resources Management* 2009, Vol. 23, pp. 755–774.
8. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: Geostatistical studies of space-temporal variation in selected quality parameters in Klodzko water supply system (SW part of Poland). *Journal of Geological Resource and Engineering* 2015, Vol. 3, No. 2, pp. 57–81.
9. H. WACKERNAGLE: Principal Component Analysis for Autocorrelated Data: A Geostatistical Perspective. Technical Report N-22/98/G, Centre de Geostatistique – Ecole de Mines de Paris, Paris 1998.
10. E. SVELIEVA: Using ordinary kriging to model radioactive contamination data. *Applied GIS* 2005, Vol. 1, No. 2, pp. 10-01–10-10.
11. P. GOOVAERTS: Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York 1997.
12. E.H. ISAAKS, R.M. SRIVASTAVA: An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York 1989.
13. H.M. CORBELLA, D.S. PUJOL: What lies behind domestic water use? A review essay on the drivers of domestic water consumption. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles* 2009, Vol. 50, pp. 297–314.
14. E.G. IRWIN, C. JAYAPRAKASH, D.K. MUNROE: Towards a comprehensive framework for modeling urban spatial dynamics. *Landscape Ecology* 2009, Vol. 24, pp. 1223–1236.
15. S.L. ZHOU, T.A. McMAHON, A. WALTON, J. LEWIS: Forecasting daily urban water demand: A case study of Melbourne. *Journal of Hydrology* 2000, Vol. 236, pp. 153–164.
16. M.W. JENKINS, J.R. LUND: Integrating yield and shortage management under multiple uncertainties. *Journal Water Resources Planning Management* 2000, Vol. 126, No. 5, pp. 288–297.
17. T.S. NARANY, M.F. RAMLI, A.Z. ARIS, W.N.A. SULAIMAN, K. FAKHARIAN: Spatial assessment of groundwater quality monitoring wells using indicator kriging and risk mapping, Amol-Babol Plain, Iran. *Water* 2014, Vol. 6, pp. 68–85.
18. J. DAVIS: Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore 2002.
19. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, A. WILCZYŃSKI: Application of geostatistical methods to spatial analysis of electrical load variation over area of Poland. *Annals of Geomatics* 2005, Vol. 3, No. 2, pp. 125–138.
20. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: Geostatystyka. Teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.

21. H. WACKERNAGEL: *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications*. Third, completely revised edition, Springer-Verlag, Heidelberg 2003.
22. J. ZAWADZKI: *Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
23. R. ZARYCHTA, A. ZARYCHTA: Application of ordinary kriging to reconstruct and visualise the relief in the location of an open pit sand mine. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, Special Issue: Measurement Technologies in Surveying* 2013, pp. 133–146.

Potyrala, M., Zawadzki, J. Possibility of Ordinary Kriging Application for Route Planning of Water Supply Network – A Case Study. *Ochrona Srodowiska* 2016, Vol. 38, No. 2, pp. 37–43.

Abstract: Operational analysis of water supply network using geographic information system (GIS) modeling enables estimation of effectiveness of various investment variants. Water supply network in Warsaw served as a source of data for the model, while different variants of the network expansion were compared to current operating data and water demand forecasts for the period of 2018–2025. It was demonstrated that the ordinary kriging method allowed for generation of a picture well

illustrating variability in the network pressure distribution and credibility of the estimates was enhanced with an increase in the number of control points. Also, the kriging method enables location of regions of pressure drop in the network. Thus, not only is the method suitable for pressure decreases root cause identification but also for expansion and operation of water supply systems. The models presented may be applied in the initial stage of network design, substantially facilitating it and in the same time limiting the number of emergencies and ensuring improvement in the overall performance.

Keywords: Geographic information system, ordinary kriging, variogram, modeling, water network.