



## Metody sztucznej inteligencji w projektowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę

*Andrzej Czapczuk<sup>\*</sup>, Jacek Dawidowicz<sup>\*\*</sup>, Jacek Piekarski<sup>\*\*\*</sup>*

*<sup>\*</sup>Politechnika Warszawska*

*<sup>\*\*</sup>Politechnika Białostocka*

*<sup>\*\*\*</sup>Politechnika Koszalińska*

### 1. Wstęp

Metody numeryczne stosuje się powszechnie od wielu lat w projektowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę. Technika komputerowa charakteryzuje się bardzo dynamicznym postępowaniem w zakresie sprzętu, jak i oprogramowania. Specjalistyczne programy komputerowe oferują coraz więcej udogodnień, szczególnie w zakresie wprowadzania danych oraz przeglądania wyników, lecz nadal funkcjonują na podstawie z góry określonych algorytmów. Aktualnie mamy również do czynienia z burzliwym rozwojem technik sztucznej inteligencji, które torują sobie drogę do zastosowań praktycznych. Zapewne nigdy nie będzie programów obliczeniowych, które całkowicie wyręczyłyby operatora, z konieczności podejmowania kluczowych decyzji. W ostatnich latach dąży się jednak do stworzenia programów komputerowych, które będą charakteryzować się, przynajmniej niewielkim stopniem kreatywności w zakresie kontroli i oceny wyników obliczeń. W tym celu tradycyjne programy obliczeniowe uzupełniane są o metody sztucznej inteligencji, w tym sztuczne sieci neuronowe i systemy ekspertowe. Powyższą tendencję można zauważyć również w zagadnieniach związanych z zaopatrzeniem w wodę.

Celem artykułu było przedstawienie analizy literaturowej zastosowania metod sztucznej inteligencji w problematyce projektowania i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę.

## 2. Przegląd wybranych metod sztucznej inteligencji

Pojęcie inteligencji posiada wiele definicji, które akcentują różne elementy ludzkiej aktywności. Można przyjąć, że jest to ogół wiedzy i doświadczenia, zdolność do skutecznego zachowania się wobec nowych sytuacji i zadań, umiejętność rozumowania w celu efektywnego rozwiązywania problemów [51]. Pomimo, że inteligencja przypisywana jest wyłącznie człowiekowi, od czasu powstania pierwszego komputera, miało miejsce wiele prób zbudowania maszyny, która charakteryzowałaby się powyższymi cechami. Dzisiaj wiadomo, że komputery mogą wiele problemów rozwiązać szybciej i sprawniej niż człowiek, lecz dotyczy to przede wszystkim zadań o znanych algorytmach, w których występuje znaczna powtarzalność obliczeń. Coraz częściej znajdują one zastosowanie również w przypadku, gdy wymagane jest działanie twórcze. Komputer z pewnością nie może zastąpić człowieka, lecz w zastosowaniach, w których wiedza zawiera wiele faktów i trudnych do zapamiętania zależności, systemy inteligentne z pewnością mogą się przyczynić do usprawnienia realizacji różnorodnych zadań. Doprowadziło to do powstania dziedziny nauki określanej jako sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence, AI*) [55], uważanej obecnie za część informatyki. Można tu wyróżnić kilka nurtów, ale największą popularność zyskały systemy ekspertowe, sztuczne sieci oraz różnego rodzaju metaheurystyki.

### 2.1. Systemy ekspertowe

Systemy ekspertowe (ang. *expert systems*) są programami komputerowymi, które wyposażone są w bazę wiedzy i procedury wnioskowania, umożliwiające wyciąganie wniosków, generowanie nowej wiedzy, działając przy tym w sposób zbliżony do procesu rozumowania człowieka [7,51]. Charakterystyczną cechą systemów ekspertowych jest przedstawienie wiedzy w postaci symbolicznej, a najważniejszą rolę pełni w tym przypadku metoda oparta na regułach [56]. Głównym problemem występującym przy budowie systemów ekspertowych jest pozyskiwanie wiedzy (ang. *knowledge acquisition*). Przez wiele lat, podstawowym źródłem wiedzy były konsultacje ze specjalistami, literatura fachowa, ankiety. Tego typu akwizycja wiedzy jest jednak zadaniem trudnym, czasochłonnym i kosztownym. W związku z powyższym prowadzone są badania nad automatyzacją tego procesu, co ściśle związane jest z zagadnie-

niami uczenia maszynowego (uczenia się maszyn, systemów uczących się) (ang. *machine learning*) [11]. Najczęściej stosowaną metodą automatycznej akwizycji wiedzy jest tzw. wnioskowanie indukcyjne, które określane jest jako przejście „od szczegółu do ogółu”. Podstawą tej metody jest tzw. zasada indukcji, która mówi, iż możliwe jest przejście od przykładów będących jednostkowymi obserwacjami danego obiektu (procesu) do praw ogólnych, obejmujących również przykłady spoza zbioru uczącego. Najczęściej stosowanym algorytmem wnioskowania indukcyjnego jest metoda budowy drzew decyzyjnych C4.5 opracowana przez R. Quinlana [57,58]. Drzewa decyzyjne służą do wyodrębniania wiedzy z zestawu przykładów uczących oraz zapisywania jej w odpowiednio zdefiniowanym grafie, na podstawie którego mogą być utworzone reguły bazy wiedzy systemu ekspertowego.

## **2.2. Sztuczne sieci neuronowe**

Wśród metod sztucznej inteligencji, oprócz symbolicznej reprezentacji wiedzy występują również reprezentacje niesymboliczne. Metody tego typu opierają się na obserwacji funkcjonowania układu nerwowego lub procesów zachodzących w świecie przyrody. Do grupy tej należą m.in. sztuczne sieci neuronowe (ang. *ANN – Artificial Neural Networks*), które symulują przetwarzanie informacji w układach nerwowych zwierząt i ludzi. Wiedza zgromadzona jest w nich w strukturze połączeń między poszczególnymi neuronami oraz wartościami wag reprezentującymi siłę tych połączeń [4]. Najczęściej stosowanym rodzajem jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej jest perceptron wielowarstwowy, który składa się z neuronów ułożonych w warstwy. Neurony połączone są pomiędzy warstwami na zasadzie „każdy z każdym”, natomiast w jednej warstwie nie występują połączenia pomiędzy neuronami. Wyróżnia się trzy podstawowe typy warstw perceptronów wielowarstwowych: warstwę wejściową, warstwę ukryte oraz warstwę wyjściową.

Sieci neuronowe działają w dwóch etapach. Pierwszy to uczenie na podstawie zbioru danych opisujących rozwiązywany problem. Wykonywane jest to przy użyciu metod uczenia, które umożliwiają wyznaczenie odpowiednich wartości parametrów sieci – wag połączeń pomiędzy neuronami oraz wartości progowych. Podstawowymi metodami uczenia perceptronów wielowarstwowych są algorytm wstecznej propagacji błędów (ang. *BP – BackPropagation*) oraz algorytm Quasi-Newtona (zmiennej metryki

BFGS). Drugi etap to właściwe działanie, w którym sieć neuronowa powinna rozwiązywać nowe zadania, wykorzystując dane nie biorące wcześniej udziału w uczeniu sieci. Sztuczne sieci neuronowe pozwalają zamodelować system nieliniowy, bez konieczności podawania jakichkolwiek wstępnych założeń dotyczących kształtu modelu. Mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie pojawiają się problemy związane z predykcją, klasyfikacją, projektowaniem, kontrolą czy sterowaniem.

### 2.3. Metaheurystyki

Termin *heurystyka*, wywodzący się z greckiego *heuriskein* – znaleźć, odkryć, oznacza regułę postępowania, opartą na doświadczeniu, która pozwala uzyskać przybliżone rozwiązanie, gdy dokładna metoda algorytmiczna nie jest znana, ewentualnie skrócić lub uprościć proces rozwiązywania problemu, gdy jest ona zawiła i czasochłonna. Metody heurystyczne należą do podstawowych narzędzi sztucznej inteligencji. Ostatecznie wprowadzono pojęcie *metaheurystyki*, dodając przedrostek *meta-*, czyli *nad-* w związku z faktem, że są to metody które nie są przeznaczone do rozwiązywania konkretnych problemów, a jedynie podają sposób, który może być zastosowany w różnych dziedzinach. W ostatnich kilkudziesięciu latach opracowano wiele metod zaliczanych do grupy metaheurystyk, inspirowanych mechanizmami biologicznymi i fizycznymi. Najbardziej znane to: algorytmy ewolucyjne, w tym algorytmy genetyczne, algorytm mrówkowy, algorytm poszukiwania tabu, optymalizacja rojem cząstek.

Algorytmy ewolucyjne (ang. *EA* – *evolutionary algorithms*) obejmują metody inspirowane zasadą doboru naturalnego, w którym stosowane są mechanizmy selekcji, reprodukcji i mutacji, podobnie jak w biologicznym procesie ewolucji. Algorytmy genetyczne (ang. *GA* – *genetic algorithm*) stanowią najlepiej znaną klasę algorytmów ewolucyjnych. Algorytmy genetyczne przeszukują przestrzeń alternatywnych rozwiązań problemu w celu wyszukania rozwiązań najlepszych na podstawie modelowania mechanizmów ewolucji biologicznej [33,44].

Algorytm mrówkowy (ang. *ACO* – *Ant Colony Optimization*) jest techniką rozwiązywania problemów poprzez szukanie dobrych dróg w grafach, zainspirowany zachowaniem mrówek szukających pożywienia dla swojej kolonii. W algorytmach mrówkowych kolonia sztucznych osobników współpracuje ze sobą w trakcie poszukiwania optymalnych rozwiązań [25].

Algorytm poszukiwania tabu (ang. *TS – tabu search*) jest to metaheurystyka dążąca do minimum funkcji celu. Algorytm bazuje na poszukiwaniu losowym przestrzeni rozwiązań, jednak posiada dodatkowo „listę tabu”, czyli zakazanych rozwiązań, która pozwala na uniknięcie utknięcia w minimum lokalnym i skierowanie przeszukiwania w korzystniejsze rejony przestrzeni [32].

Optymalizacja rojem cząstek (ang. *PSO – Particle Swarm Optimization*), nazywana również inteligencją roju (stada) lub inteligencją rozproszoną jest probabilistyczną techniką optymalizacji zainspirowaną zachowaniem stada zwierząt (owadów, ptaków, ryb). Inteligencja roju (stada) jest pojęciem oznaczającym tworzenie się współpracy pomiędzy wieloma uczestnikami naturalnymi (np. stado gęsi) lub sztucznymi (np. grupa robotów) bez uprzednio zdefiniowanego planu i bez jednostki dowodzącej. Zjawisko to polega na kolektywnej samoorganizacji i jest podstawą omawianej metaheurystyki [26].

### **3. Aktualny stan zastosowania wybranych metod sztucznej inteligencji w problematyce zaopatrzenia w wodę**

Ogólne omówienie i postulat stosowania metod sztucznej inteligencji w monitoringu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód zamieszczono w pracy [77].

#### **3.1. Systemy ekspertowe**

Przykładem systemu ekspertowego zastosowanego w praktyce jest EXPLORE [37]. Został on zaprojektowany do zarządzania siecią wodociągową w Sewilli. System ekspertowy EXPLORE redukuje koszty pompowania wody, prognozując zapotrzebowanie na wodę, a następnie ustalając optymalny, dzienny harmonogram pracy pomp. System umożliwił 25% redukcji kosztów pompowania. W Nowej Zelandii w New Plymouth wdrożono system ekspertowy do optymalizacji dostawy wody ze stacji uzdatniania do pięciu zbiorników sieciowych [9]. Otrzymuje on bieżące dane z systemu nadzorującego SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) i na tej podstawie reguluje wydajność stacji uzdatniania oraz napełnienia zbiorników. W artykule [13] przedstawiono zastosowanie systemu ekspertowego do kontroli ciśnienia w sieci wodociągowej, wykorzystując informacje z hydraulicznych symulacji dyna-

micznych oraz bieżących danych pomiarowych. W pracy [10] porównano nowy system ekspertowy w odniesieniu do znanych modeli optymalizacyjnych, przeznaczonych do analizy rozmieszczenia czujników monitorujących zanieczyszczenia w sieci wodociągowej. Oba narzędzia współpracują z programem EPANET. Porównanie między systemem ekspertowym i istniejącymi modelami optymalizacji potwierdziło, że proponowany system ekspertem może konkurować z większością modeli optymalizacyjnych. W [63,64] zaprezentowano inteligentny system wspomagania decyzji przeznaczony do sterowania siecią wodociągową. W artykułach [21,23] opisano proces generowania reguł decyzyjnych do systemów ekspertowych za pomocą indukcji drzewa decyzyjnego do oceny układu systemu dystrybucji wody oraz rozkładu ciśnienia. System ekspertowy wykrywa problem wynikający z nieprawidłowej wysokości ciśnienia i proponuje odpowiednie rozwiązanie. Praca [17] podejmuje problem oceny wyników obliczeń systemów dystrybucji wody z punktu widzenia strat ciśnienia i natężenia przepływu na odcinkach obliczeniowych. W tym celu zostają skonstruowane dwa drzewa decyzyjne, pozwalające wykryć błąd i wskazać jego przyczynę. W dostępnej literaturze, pojawiają się również propozycje systemów ekspertowych mających na celu wspomaganie eksploatacji urządzeń stacji uzdatniania wody [88,91].

### 3.2. Sztuczne sieci neuronowe

Szeroki zakres zastosowań znajdują również sztuczne sieci neuronowe. Wiele przykładów wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę znajduje się w raporcie sporządzonym przez *American Society of Civil Engineers* [42]. W pracach [41,67] opisano sztuczne sieci neuronowe mające na celu usprawnienie procesu tarowania modelu numerycznego systemu dystrybucji wody. Obliczenia hydrauliczne za pomocą wzoru Darcy-Weisbacha wymagają ustalenia, najczęściej metodą iteracyjną, współczynnika oporów liniowych. W artykułach [22,71] zaprezentowano metody obliczania tego współczynnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych, które pozwalają skrócić czas obliczeń. Moduły obliczeniowe oparte o sztuczne sieci neuronowe wprowadzono również do metod symulacyjnych, wykorzystywanych w sterowaniu sieciami wodociągowymi w czasie rzeczywistym. Zadaniem obliczeń neuronowych jest w tym przypadku uproszczenie modelu obliczeniowego i przyspieszenie obliczeń [2,18,78,84]. Pro-

blem sterowania nastawami zaworów regulacyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych poruszono w artykułach [34,81]. W pracy [20] przyjęto, że obliczenia hydrauliczne systemów dystrybucji wody są wieloetapowym procesem wymagającym oceny wyników, odpowiedniej korekty danych i kolejnych obliczeń. W związku z powyższym zastosowano metodykę diagnostyki procesów do oceny wyników obliczeń. Wprowadzono metody diagnostyczne do wykrywania nieprawidłowości obliczeniowych, wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe. Efektywne sterowanie systemem dystrybucji wody wymaga dokładnych informacji o bieżących parametrach stanu sieci. Ze względów ekonomicznych część parametrów należy obliczać na podstawie dostępnych informacji. W grupie metod estymacji parametrów, pojawiają się estymatory oparte o sztuczne sieci neuronowe [29,30]. System komputerowy kontroli pracy układów pompowych przy użyciu algorytmów genetycznych i sztucznych sieci neuronowych opisano w artykule [40]. Wiele prac poświęcono zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych w metodach wykrywania i lokalizacji uszkodzeń rurociągów [1,49,50,72,82,83]. Wyniki badań nad możliwością zastosowania sztucznych sieci neuronowych do modelowania jakości wody w sieciach wodociągowych zamieszczono w pracy [74]. Próbę kalibracji modelu jakości wody w sieci wodociągowej z pomocą sieci neuronowej typu *RBF* opisano w pracy [39]. Problemowi modelowania przy użyciu sztucznych sieci neuronowych odpowiedniej dawki chloru w wodzie poświęcone są prace [31,61,62]. W pracy [6] zaprezentowano sieć neuronową realizującą regresję uogólnioną GRNN zastosowaną do prognozowania stężenia chloru pozostałego w wybranych punktach sieci z 72 godzinnym wyprzedzeniem. Opracowano również sieci neuronowe do oceny ilości chloru pozostałego w zbiornikach zapasowo-wyrównawczych na sieciach wodociągowych [69]. W pracy [65] zajęto się problemem przewidywania za pomocą sztucznych sieci neuronowych częstotliwości awarii przewodów żeliwnych na sieci wodociągowej. W artykule [35] przedstawiono zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania awaryjności i oszacowania na tej podstawie optymalnego czasu wymiany przewodów wodociągowych. Podobne zagadnienie polegające na opracowywaniu harmonogramów renowacji rurociągów na podstawie przewidywania awaryjności opisano w referacie [8]. Można przytoczyć wiele propozycji wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na wodę w systemach dystrybucji wody

[5,12,16,36,38,52,54,75]. Wiele prac poświęconych jest zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych do optymalizacji i sterowania procesem uzdatniania wody, a w szczególności procesu koagulacji [14,24,27,46, 53,79,80]. Na podstawie danych historycznych określone są dawki koagulantów. Badano również zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do automatyzacji sterowania procesem flotacji ciśnieniowej [89]. Tematyka optymalizacji procesów uzdatniania wody przy użyciu metod sztucznej inteligencji została szeroko omówiona w pracy [3]. W pracy [60] przedstawiono eksperymenty zastosowania sztucznych sieci neuronowych do przewidywania stężenia *THM* (trihalometanów) w procesie dezynfekcji wody. Metody sztucznej inteligencji wykorzystano do realizacji komputerowego systemu uczenia i trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczalni ścieków (OPTRAIN), który pozwala indywidualnie sterować procesem nauki operatora bez nadzoru osoby uczącej [76].

### 3.3. Metaheurystyki w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę

Metody metaheurystyczne przez wiele lat nie znajdowały uznania w obliczeniach technicznych. Obecnie jednak, wykorzystywane są w problemach trudnych obliczeniowo, które nie posiadają ścisłych algorytmów. Najczęściej są to zagadnienia optymalizacyjne. Można przytoczyć przykłady zastosowania algorytmów genetycznych do optymalizacji doboru średnic przewodów wodociągowych [19,68,70,73,90]. W pracy [66] omówiono problem optymalizacji pracy pompowni za pomocą algorytmów genetycznych, dążąc do minimalizacji zużycia energii elektrycznej. W artykule algorytmy genetyczne zastosowano do rozwiązania problemu optymalnego położenia zaworów sterujących oraz ich nastaw w celu ograniczenia wycieków z sieci wodociągowej [15]. Algorytm genetyczny mający na celu wielokryterialną optymalizację podczas projektowania systemu dystrybucji wody z uwzględnieniem warunków ekonomicznych i niezawodnościowych omówiono w pracy [45].

Pojawiają się również propozycje zastosowania algorytmów mrówkowych w obliczeniach systemów dystrybucji wody [43,86,87], algorytmu poszukiwania tabu [28,59] oraz metody optymalizacji rojem cząstek [47,48,85].



## 4. Podsumowanie i wnioski

Metody obliczeniowe oparte na klasycznych algorytmach numerycznych, w znacznym stopniu wyczerpały już możliwości rozwoju. Przyspieszenie obliczeń poprzez zastosowanie komputerów nowszej generacji nie zawsze przynosi lepsze rezultaty. Dopiero zastosowanie nowych metod obliczeniowych może w znaczny sposób poprawić jakość uzyskiwanych rozwiązań i wyników obliczeń. Coraz częściej przy rozwiązywaniu wielu problemów, sięga się po metody z dziedziny nazywanej sztuczną inteligencją. Znajdują one zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień, które do tej pory, ze względu na swoją złożoność nie posiadały klasycznych algorytmów obliczeniowych lub znaczna ilość wymaganych danych i ograniczeń, powodowała, że ich użycie było nieuzasadnione.

Przedstawiony przegląd propozycji zastosowania wybranych metod sztucznej inteligencji w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę wskazuje, że są to rozwiązania, które torują sobie drogę do realizacji w praktyce. Szeroka gama metod sztucznej inteligencji wymaga dokładnej analizy, które metody mogą znaleźć zastosowanie w poszczególnych problemach projektowych lub eksploatacyjnych. Konieczna też jest dokładna znajomość aktualnie prowadzonych prac w powyższym zakresie.

## Literatura

1. **Arsene C., Al-Dabass D., Hartley J.:** *Decision Support System for Water Distribution Systems Based on Neural Networks and Graphs*. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Modelling and Simulation, 315–323, Cambridge, UK, 2012.
2. **Bargiela A.:** *High performance neural optimization for real time pressure control*. Proceedings of High Performance Computing Conference HPC Asia'95, Chap. AL34, 1–8, Taipei, 1995.
3. **Baxter Ch.W., Tupas R-R.T, Zhang Q., Shariff R., Stanley S., Coffey B.M., Graff K.G.:** *Artificial Intelligence Systems for Water Treatment Plant Optimization*. AWWA, 2001.
4. **Bishop C. M.:** *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, 1996.
5. **Bougadis J., Adamowski K., Diduch R.:** *Short-term municipal water demand forecasting*. Hydrological Processes, 19, 1, 137–148, 2005.

6. **Bowden G.J., Nixon J.B., Dandy G.C., Maier, H. R., Holmes, M.:** *Forecasting chlorine residuals in a water distribution system using a general regression neural network*. Mathematical and Computer Modelling, 44, 5–6, 469–484, 2006.
7. **Bubnicki Z., Grzech A.:** *Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
8. **Bubtiena A.M., Elshafie A.H., Jafaar O.:** *Application of Artificial Neural Networks Modeling Water Networks*. Proceedings of the 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, IEEE, 2011.
9. **Bunn S., Helms S.:** *Application of an Expert System to Control Treated Water Distribution*. Proceedings of the 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference (WRPMD'99), 1–7, 1999.
10. **Changa N.B., Pongsanonea N.P., Ernestb A.:** *Comparisons between a rule-based expert system and optimization models for sensor deployment in a small drinking water network*. Expert Systems with Applications, 38, 8, 10685–10695 (2011).
11. **Cichosz P.:** *Systemy uczące się*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
12. **Cieźak W., Malinowski P., Siwoń Z.:** *Metodologia budowy neuronowego modelu prognostycznego godzinowego rozbioru wody*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, Nr 9, 9–12 (2005).
13. **Coulbeck B., Ulanicki B. Rance J.P., Deviatkov, V.V., Kosov, S., Glukhovskiy, I.:** *Pressure control of a Moscow water supply system using expert system technology*, Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, 4, 4498–4499 (1996).
14. **Coulin J., Peel C., Montague G.A.:** *The application of hybrid neural network models to water treatment*. Proceedings of the IASTED International Conference. Artificial Intelligence, Expert Systems and Neural Networks, 346–349 (1996).
15. **Creaco, E., Pezzinga, G.:** *Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks*. Environmental Modelling & Software, 2014.
16. **Cubero R.G.:** *Neural Networks for water demand time-series forecasting*. Lecture Notes in Computer Science, 540, 453–460, Springer-Verlag 1991.
17. **Czapczuk A.:** *System ekspertowy do oceny przepływów i strat ciśnienia w układzie dystrybucji wody*. Dysertacja, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013.

18. **Damas M., Salmerón M., Ortega J.:** *ANNs and GAs for predictive controlling of water supply networks*. Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks, 4, 365–372, Como, Italy 2000.
19. **Dandy, G.C., Simpson, A.R., Murphy, L.J.:** *An improved genetic algorithm for pipe network optimisation*. Water Resources Research, 32, 2, 449–58 (1996).
20. **Dawidowicz J.:** *Diagnostyka procesu obliczeń systemu dystrybucji wody z zastosowaniem modelowania neuronowego*. Rozprawy Naukowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2015.
21. **Dawidowicz J.:** *Indukcja drzewa decyzyjnego przeznaczonego do oceny przebiegu linii ciśnienia w sieci wodociągowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Inżynieria Środowiska, 17, 91–102, Białystok 2006.
22. **Dawidowicz J.:** *Obliczanie współczynnika strat liniowych  $\lambda$  za pomocą sztucznych sieci neuronowych*. Ekonomia i Środowisko, 4, 177–186 (2013).
23. **Dawidowicz J.:** *System ekspertowy do oceny układu systemu dystrybucji wody sporządzony za pomocą wnioskowania indukcyjnego*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 14, 650–659 (2012).
24. **Deveughele S., Do-Quang Z.:** *Neural networks: An efficient approach to predict on-line the optimal coagulant dose*. Water Science and Technology: Water Supply, 4, 5–6, 87–94, IWA Publishing, London 2004.
25. **Dorigo M., Stützle T.:** *Ant Colony Optimization*. Bradford Company, Scituate, USA 2004.
26. **Eberhart R.C., Shi Y., Kennedy J.:** *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.
27. **Evans J., Enoch C., Johnson M., Williams P.:** *Intelligent based auto-coagulation control applied to a water treatment works*. Proceedings of the UKACC International Conference on Control' 98, 1, 141–145 (1998).
28. **Fanni A., Liberatore S., Sechi G. M., Soro M., Zuddas P.:** *Optimization of Water Distribution Systems by a Tabu Search Metaheuristic*. Proceedings of the 7th IFORMS Computing Society Conference, Cancun, Mexico 2000.
29. **Gabrys B. Bargiela A.:** *An integrated neural based system for state estimation and confidence limit analysis in water networks*. Proceedings of ESS 96. 8th European Simulation Symposium. Simulation in Industry, 2, 398–402 (1996).

30. **Gabrys B., Bargiela A.:** *Neural simulation of water systems for efficient state estimation.* Proceedings of European Simulation Multiconference “Modelling and Simulation”, 775–779 (1995).
31. **Gibbs M.S., Morgan N., Maier H.R., Dandy G.C., Nixon J.B., Holmes M.:** *Investigation into the relationship between chlorine decay and water distribution parameters using data driven methods.* Mathematical and Computer Modelling, 44, 5–6, 485–498 (2006).
32. **Glover F.:** *Tabu Search and Adaptive Memory Programming – Advances, Applications and Challenges.* Operations Research/Computer Science Interfaces Series, 7, 1–75 (1997).
33. **Goldberg D.E.:** *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania.* WNT, Warszawa 2003.
34. **Haytham A., Kwamura A., Jinno K.:** *Applications of artificial neural networks for optimal pressure regulation in supervisory water distribution networks.* Memoirs of the Faculty of Engineering, 65, 29–51, Kyushu University, Fukuoka, Japan 2005.
35. **Jafar R., Shahrou I., Juran I.:** *Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains.* Mathematical and Computer Modelling, 51, 1170–1180 (2010).
36. **Jain D.A., Ormsbee L.E.:** *Short-term water demand forecast modeling techniques – Conventional methods versus AI.* Journal American Water Works Association, 94, 7, 64–72 (2002).
37. **Leon C., Martin S., Luque J., Vazquez M.:** *EXPLORE: expert system for water networks management.* Proceedings IEEE of 9th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON '98), 1, 197–201 (1998).
38. **Licznar P., Łomotowski J.:** *Prognozowanie dobowych rozbiórów wody przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych.* Materiały VI Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”, PZiTS Oddział Wielkopolski, 1751–1783, Poznań 2004.
39. **Lihui M., Kunlun X., Suiqing L.:** *Using Radial Basis Function Neural Networks to Calibrate Water Quality Model.* International Journal of Intelligent Systems and Technologies (IJIST), 3, 2, 90–98 (2008).
40. **Lingireddy S., Ormsbee L.E.:** *Optimal control of water supply pumping systems using genetic algorithms and artificial neural networks.* Proceedings of The International Federation for Automatic Control Symposium on Large Scale Systems '95, London, UK 1995.
41. **Lingireddy S., Ormsbee L.E.:** *Neural Networks in Optimal Calibration of Water Distribution Systems.* In Artificial Neural Networks for Civil Engineers: Advanced Features and Applications, Edited by Flood I., Kartam N., ASCE, 53–76 (1998).

42. **Lingireddy S., Brion G.M.:** *Artificial neural networks in water supply engineering*. In Lingireddy S., Brion G.M. (Eds.), *Artificial Neural Networks in Water Supply Engineering*, ASCE, 1–9 (2005).
43. **Maier H., Simpson A., Zecchin A., Foong W., Phang K., Seah H., Tan, C.:** *Ant colony optimization for design of water distribution systems*. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129, 3, 200–209 (2003).
44. **Michalewicz Z.:** *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. WNT, Warszawa 2003.
45. **Mingming Li, Shuming Liu, Ling Zhang, Huanhuan Wang, Fanlin Meng, Lu Bai:** *Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-Based on Multi-objective Optimization Model in the Water Distribution System*. *Procedia Engineering*, 37, 309 – 313 (2012).
46. **Mirsepasi A., Cathers B., Dharmappa H.B.:** *Application of artificial neural networks to the real time operation of water treatment plants*. *Proceedings of International Conference on Neural networks (ICNN'95)*, IEEE, 1, 516–521 (1995).
47. **Montalvo I., Izquierdo J., Pérez R., Tung M.M.:** *Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems*. *Computers & Mathematics with Applications*, 56, 3, 769–776 (2008).
48. **Montalvo I., Izquierdo J., Schwarze S., Pérez-García R.:** *Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction*. *Computers & Mathematics with Applications*, 52 (7–8), 1219–1227 (2010).
49. **Monuce S.R., Day A.J., Wood A.S., Khan A., Widdop P.D., Machell J.:** *A neural network approach to burst detection*. *Water Science & Technology*, 45, 4/5, 237–246 (2002).
50. **Monuce S.R., Machell J.:** *Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks*. *Urban Water Journal*, 3, 1, 21–31 (2006).
51. **Mulawka J.J.:** *Systemy ekspertowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
52. **Muszyński K., Knapik K.:** *Metoda sztucznych sieci neuronowych w bieżącym prognozowaniu zapotrzebowania na wodę*. *Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”*, INSTAL, 6, 67–71, Szczyrk 2007.
53. **Chun M.G., Kwak K.C., Ryu J.W.:** *Application of ANFIS for coagulant dosing process in a water purification plant*. *Proceedings FUZZ-IEEE'99 International Fuzzy Systems Conference*, 3, 1743–1748 (1999).

54. **Narate L., Chan Ch.W., Mason R., Tontiwachwuthikul P.:** *A toolset for construction of hybrid intelligent forecasting systems: application for water demand prediction.* Artificial Intelligence in Engineering, 13, 1, 21–42 (1999).
55. **Negnevitsky M.:** *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems.* Addison-Wesley, 2004.
56. **Niederliński A.:** *Regulowe systemy ekspertowe.* Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2000.
57. **Quinlan J.R.:** *C 4.5 Program for Machine Learning.* Morgan Kaufmann, San Mateo, CA 1993.
58. **Quinlan J.R.:** *Induction of decision trees.* Machine Learning, 1, 81–106 (1986).
59. **Ribeiro L., da Conceicao Cunha M.:** *Tabu search algorithms for water network optimization.* European Journal of Operational Research, 157, 746–758 (2004).
60. **Rodriguez M.J., Milot J., Sérodes J.B.:** *Predicting trihalomethane formation in chlorinated waters using multivariate regression and neural networks.* Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua, 52, 3, 199–215 (2003).
61. **Rodriguez M.J., Sérodes J.B., Cote P.A.:** *Advanced chlorination control in drinking water systems using artificial neural networks.* Proceedings of the IWSA International Specialized Conference on New Developments in Modelling, Monitoring and Control of Water Supply Systems, Water Supply, 15, 2, 159–168 (1997).
62. **Rodriguez M.J., West J.R., Powell J., Sérodes J.B.:** *Application of two approaches to model chlorine residuals in Severn Trent Water distribution systems.* Water Sciences and Technology, 36, 5, 317–324 (1997).
63. **Rojek I.:** *Classifier Models in Intelligent Support System for Water Network Management.* Polish Journal of Environmental Studies, 17, 4C, 62–66 (2008).
64. **Rojek I.:** *Projektowanie systemu informatycznego zarządzania miejską siecią wodociągową.* Monografia, Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk, seria Badania Systemowe – Inżynieria Środowiska, 57, Warszawa 2007.
65. **Sacluti F. R.:** *Modeling Water Distribution Pipe Failures Using Artificial Neural Networks.* University of Alberta 1999.
66. **Sadatiyan Abkenar S.M., et al.:** *Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems.* Sustain. Comput.: Inform. Syst., 2014.

67. **Saldarriaga J., Gómez R., Salas D.:** *Artificial intelligence methods applicability on water distribution networks calibration.* Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management, 1–11 (2004).
68. **Savic D., Walters G.:** *Genetic Algorithms for least-cost design of water distribution networks.* Journal of water resource planning and management, ASCE, 123, 2, 66–77 (1997).
69. **Sérodès J.B., Rodriguez M.J.:** *Predicting residual chlorine evolution in storage tanks within distribution systems: Application of a neural network approach.* Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA, 45, 2, 57–66 (1996).
70. **Shanshan W., Ying H., Cheng L.:** *Research on Water Supply Network Optimization Using Advanced GA.* Second International Conference on Information and Computing Science, icic, 1, 243–246 (2009).
71. **Shayya W.H., Sablani S.S.:** *An artificial neural network for non-iterative calculation of the friction factor in pipeline flow.* Computers and Electronics in Agriculture, 21, 3, 219–228 (1998).
72. **Shirzad A., Tabesh M., Farmani R.:** *A comparison between performance of support vector regression and artificial neural network in prediction of pipe burst rate in water distribution networks.* KSCE Journal of Civil Engineering, 18, 4, 941–948 (2013).
73. **Simpson A. R., Goldberg D. E.:** *Pipeline optimization via genetic algorithms: From theory to practice.* Proceedings 2nd International Conference on Water Pipeline Systems, Mechanical Engineering Publications, Ltd., London, 309–320 (1994).
74. **Skipworth P.J., Saul A.J., Machell J.:** *Predicting water quality in distribution systems using artificial neural networks.* Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 136, 1, 1–8 (1999).
75. **Słonimski T., Duzinkiewicz K.:** *Analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na wodę w miejskich sieciach wodociągowych.* Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia i automatyzacja systemów wodociągowych i kanalizacyjnych TiASWIK’99”, Politechnika Gdańska, 235–242, Gdańsk-Stawiska 1999.
76. **Sroczan E.M., Urbaniak A.:** *Komputerowy system trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczania ścieków bazujący na sztucznej inteligencji.* Materiały V Międzynarodowej Konferencji Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi, PZiTS, 1003–1014, Poznań-Gdańsk 2002.

77. **Sroczan E.M., Urbaniak A.:** *Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w monitorowaniu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód.* Materiały VI Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”, PZiTS Oddział Wielkopolski, 695–704, Poznań 2004.
78. **Świercz M.:** *Using neural networks to simplify mathematical models of water distribution networks. A case study.* Proceedings of the First International Symposium on Mathematical Models in Automation and Robotics, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 72–77 (1994).
79. **Han T.H., Nahm E.S., Woo K.B., Kim C.J., Ryu J.W.:** *Optimization of coagulant dosing process in water purification system.* Proceedings of the 36th SICE Annual Conference SICE'97, 1105–1109 (1997).
80. **Valentin N., Denoeux T., Fotoohi F.:** *An hybrid neural network based system for optimization of coagulant dosing in a water treatment plant.* Proceedings of the IJCNN'99 International Joint Conference on Neural Networks, 5, 3380–3385 (1999).
81. **Van den Boogaard H.F., Kruisbrink A.C.H.:** *Hybrid modeling by integrating neural networks and numerical models hydraulic engineering.* Proceedings of the Second International Conference on Hydroinformatics, 2, 471–477 (1996).
82. **Wyczółkowski R.:** *System monitorowania i wykrywania awarii sieci wodociągowych.* [w:] Korbicz J., Patan K., Kowal M., Diagnostyka Procesów i Systemów, Tom.1, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 307–314, Warszawa 2007.
83. **Wysogład B.:** *Zastosowanie klasyfikatora neuronowego do identyfikacji niesprawności sieci wodociągowej.* [w:] Korbicz J., Patan K., Kowal M., Diagnostyka Procesów i Systemów, Tom.1, Akad. Oficyna Wydawnicza EXIT, 315–321, Warszawa 2007.
84. **Xu C., Bouchart F., Goulter I.C.:** *Neural networks for hydraulic analysis of water distribution systems.* Proceedings of the Innovation in Computer Methods for Civil and Structural Engineering, Civl-Comp Press, 129–136, Cambridge 1997.
85. **Yang K., Zhai J.:** *Particle Swarm Optimization Algorithms for Optimal Scheduling of Water Supply Systems.* Second International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID '09, 2, 509 – 512 (2009).
86. **Zecchin A., Maier H., Simpson A., Leonard M., Nixon J.:** *Ant Colony Optimization Applied to Water Distribution System Design: Comparative Study of Five Algorithms.* Water Resources Planning and Management, ASCE, 133, 1, 87–92 (2007).



87. **Zecchin A. C., Maier H.R., Simpson A.R., Leonard M., Roberts A.J., Berrisford M.J.:** *Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimisation.* Mathematical and Computer Modelling, 44, 451–468 (2006).
88. **Zhang H., Luo D.:** *Application of an expert system using neural network to control the coagulant dosing in water treatment plant.* Journal of Control Theory and Applications, 2, 89–92 (2004).
89. **Zhang Q.J., Shariff R., Smith D.W., Cudrak A., Stanley S.J.:** *Artificial intelligence Real-time process control system for the DAF process.* Materiały VI Międzynarodowej Konferencji „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”, PZiTS Oddział Wielkopolski, 223–242, Poznań 2004.
90. **Zhu J.Y. Gong, Zheng H.:** *Application of Genetic Algorithm to Water Distribution System Design Optimization.* Geomatics and Information Science of Wuhan University, 28, 3, 363–367 (2003).
91. **Zhu X., Simpson A.R.:** *An Expert System for Turbidity Control Advice in Water Treatment Plant Operations.* Department of Civil Engineering, The University of Adelaide 1991.

## **Artificial Intelligence Methods in the Design and Operation of Water Supply Systems**

### **Abstract**

Numerical methods are widely used for many years in the design and operation of water supply systems. Computer technology is characterized by very dynamic progress in the field of hardware and software. Specialized computer programs offer more and more features, especially in the field of data entry and viewing the results, but still operate on the basis of pre-defined algorithms. Currently we are dealing with a turbulent development of artificial intelligence techniques. Probably will never computational programs that completely will replace the operator of the need to make key decisions, but in recent years the aim is to develop computer programs that will be characterized by at least a small degree of creativity. For this purpose, the traditional calculation programs are supplemented by artificial intelligence methods, including artificial neural networks, expert systems, heuristic methods. The above trend can also be observed in issues related to water supply in the problems of design and operational. The literature proposals for the use of artificial intelligence at the stage of water treatment, disinfection, pumping, hydraulic design and simulation of water distribution systems and other components. Have taken a lot of optimization problems that are very difficult to solve by conventional methods.

In this paper, some examples of the use of artificial intelligence methods in problems of water supply, indicating that these are the solutions that pave the way for the implementation in practice of design and operation. A wide range of artificial intelligence methods requires careful analysis that the method can be applied to individual problems. Also require a thorough knowledge of ongoing work in this regard.

**Słowa kluczowe:**

systemy zaopatrzenia w wodę, sztuczna inteligencja, systemy ekspertowe, sztuczne sieci neuronowe, metody heurystyczne

**Keywords:**

water supply systems, artificial intelligence, expert systems, artificial neural networks, heuristic methods