

# Sztuczna sieć neuronowa jako narzędzie wspomagające w analizie awaryjności przewodów wodociągowych

Artificial neural network as a support tool in failure analysis of water pipes

MAŁGORZATA KUTYŁOWSKA, WOJCIECH CIEŻAK

DOI 10.36119/15.2023.3.7

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych jako wspomagającego narzędzia do przewidywania wskaźnika intensywności uszkodzeń, będącego jednym ze wskaźników oceny poziomu niezawodności działania przewodów wodociągowych. Coraz częściej występujące sytuacje nietypowe (stan epidemii, wojna, powódzie, susze) stwarzają konieczność nagłej reakcji na zdarzenia awaryjne mające miejsce w całym systemie zaopatrzenia w wodę. Nowoczesne narzędzia informatyczne jawią się jako obiecujące w analizie bieżącej sytuacji w przedsiębiorstwach zarządzających infrastrukturą krytyczną. Podstawą wykonanych badań były dane eksploatacyjne z jednego systemu wodociągowego w Polsce. Zbudowano w sumie 40 modeli sztucznych sieci neuronowych, dokonano analizy wrażliwości i oceny przydatności wybranych modeli do przewidywania zmiennej zależnej na podstawie wektora jakościowych i ilościowych predyktorów. Uzyskane wyniki wskazują na konieczność dalszych prac w tym zakresie, gdyż zmieniająca się sytuacja eksploatacyjna wymusza ciągle ulepszanie i dostosowywanie narzędzi matematycznych do coraz to nowych warunków pracy systemu zaopatrzenia w wodę.

*Słowa kluczowe: poziom awaryjności, przewody wodociągowe, sytuacja ekstremalna, sztuczna inteligencja*

The possibilities of using artificial neural networks as a support tool in failure rate analysis were shown. On the basis of failure rate the reliability of water pipes could be established. In unusual and very frequent situations (epidemic, war, floods, droughts) it is necessary to make a quick reaction when damages occur in water-pipe networks. Modern IT tools seem to be an alternative method in the analysis of current situation in management of critical infrastructure. On the basis of exploitation data of one water system the investigations were carried out. Totally 40 models of artificial neural networks were built. Sensitivity analysis and assessment of usefulness of chosen models for dependent variable prediction using quality and quantity predictors were performed. The obtained results point out that further investigations are necessary. The changing exploitation situation forces improvement and using mathematical tools in new conditions of water-pipe networks.

*Keywords: failure frequency, water pipes, extreme situation, artificial intelligence*

## Wprowadzenie

Jesienią 2019 roku nikt w Polsce ani na świecie nie przypuszczał, że w ciągu kilku miesięcy życie niemal wszystkich ludzi zmieni się diametralnie. Pandemia koronawirusa odcisnęła piętno na zdrowiu fizycznym i psychicznym, ale również wywołała właściwie nieodwracalne zmiany w życiu społecznym i gospodarczym. W sytuacji ekstremalnej, niespotykanej dotąd na skalę światową (globalizacja życia jeszcze nigdy w historii ludzkości nie była aż tak rozwinięta), okazało się, że prawidłowe działanie obiektów i sieci komunalnej infrastruktury krytycznej, do któ-

rej zalicza się niewątpliwie systemy zaopatrzenia w wodę [1], jest niezbędne do utrzymania odpowiednich warunków higienicznych i sanitarnych w kraju objętym epidemią. Już kilka lat temu pisano o konieczności ochrony strategicznych obiektów przed działaniami terrorystycznymi [2], a badania dotyczące ryzyka wystąpienia sytuacji kryzysowych, sposobów przeciwdziałania skutkom działań niepożądanych i reakcji społecznych na stan zagrożenia dostaw wody są również w Polsce szeroko rozwinięte [3–5]. Jednak nikt nie przypuszczał, że w niedługim czasie całkiem nowe wyzwanie stanie przed przedsiębiorstwami wodociągowymi. Tym

razem ochronie nie tyle musiały podlegać systemy zaopatrzenia w wodę (od ujęć po przyłącza do odbiorców) i systemy usuwania ścieków (od przykanalików po rzrzt ścieków oczyszczonych), ale przede wszystkim należało chronić życie i zdrowie pracowników tak, aby nie stracić ciągłości pracy z powodu choroby i kwarantanny [6]. Nadzór nad procesami technologicznymi, nad prawidłową eksploatacją i modernizacją sieci oraz nad usuwaniem skutków awarii powinien przebiegać bez zakłóceń, aby odbiorcy wody czuli się bezpieczni w tej i tak nietypowej oraz niebezpiecznej sytuacji, jaką był stan epidemii. W sierpniu 2020 r. Izba Gospodarcza

dr hab. inż. Małgorzata Kutylowska, prof. uczelni e-mail: malgorzata.kutylowska@pwr.edu.pl, (autor korespondencyjny) <https://orcid.org/0000-0001-8425-9041> – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław

dr inż. Wojciech Cieżak e-mail: wojciech.ciezak@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6210-8728> – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, Wrocław

Wodociągi Polskie informowała, w ślad za Światową Organizacją Zdrowia, o zidentyfikowaniu wirusa odpowiedzialnego za chorobę COVID-19 w ściekach komunalnych m. in. w takich krajach, jak: Włochy, Holandia, Hiszpania, Francja, Australia [7]. Jednak w takim miejscu koronawirus nie stanowi zagrożenia dla ludzkiego zdrowia, o czym wiemy już po kilku latach borykania się ze skutkami pandemii. Natomiast inny sposób życia i spędzania czasu oraz praca zdalna w trakcie trwania epidemii spowodowały, że pojawiły się nowe (lub bardzo rzadko występujące wcześniej) problemy związane z eksploatacją systemów wodociągowych. Zwłaszcza rok 2020 był kluczowy i przełomowy, gdyż obowiązujący przez większość miesięcy lockdown mógł mieć wpływ na takie aspekty, jak:

- zmiana zapotrzebowania na wodę w rejonach typowo turystycznych oraz usługach i sklepach wielkopowierzchniowych;
- ewentualna nadwyżka w produkcji wody (pojawia się zasadne pytanie, czy nadwyżka wody była gromadzona na potrzeby obiektów strategicznych lub przetwarzana do innych miejscowości);
- ewentualny niedobór wody w przypadku nieposiadania przez szpitale własnych, wystarczająco dużych zapasów;
- jakość wody w sytuacji mniejszego zużycia (wiek wody i jej wtórne zanieczyszczenie);
- straty wody i awaryjność w przypadku mniejszego lokalnie poboru i zwiększonego ciśnienia w sieci.

W kilku krajach europejskich wprowadzono odgórne regulacje rządowe w sektorze wodociągowym [8], co miało na celu minimalizację negatywnych skutków pojawienia się sytuacji kryzysowej. Natomiast w krajach o niskim i średnim dochodzie narodowym sprawdzono, jak niedostateczna ilość oraz jakość wody na cele bytowe i do spożycia przekładała się na zachowanie ludzi w obliczu teoretycznej konieczności stosowania się do bardziej restrykcyjnych regulacji sanitarnych [9]. W Wielkiej Brytanii przeprowadzono ankietę wśród wybranych przedsiębiorstw wodociągowych, która miała na celu analizę skuteczności prawidłowej adaptacji sektora gospodarki wodnej do warunków pandemicznych [10]. Na świecie postuluje się również zmiany w modelach hydraulicznych z powodu innych wzorców zapotrzebowania na wodę w czasie lockdownu [11]. Wnioski płynące ze światowej literatury są interesujące i wymagają pogłębio-

nej analizy w warunkach polskich, co już ma miejsce, gdyż podejmowane są próby analizy nierównomierności zużycia wody z uwzględnieniem czynnika losowego, jakim była pandemia COVID-19 [12].

Na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że zagadnienia stanu technicznego i analiza awaryjności przewodów wodociągowych nie są ściśle związane z wystąpieniem sytuacji ekstremalnej i nietypowej, jak wspomniana wcześniej pandemia. Oczywiście jest, że w Polsce nieustannie prowadzone są badania mające na celu zwiększenie niezawodności działania systemów infrastruktury podziemnej z uwzględnieniem wielu czynników zewnętrznych [13–16]. Jednakże w kontekście np. uszczuplonej kadry w przedsiębiorstwach wodociągowych, m. in. w związku z przebywaniem na zwolnieniu lekarskim, może się zdarzyć, że konieczna byłaby przyspieszona reakcja w sytuacji wystąpienia wielu awarii (jednocześnie lub jedna po drugiej) na sieci wodociągowej. Jak dotąd nie zanotowano w literaturze krajowej i zagranicznej podjęcia tematu uszkodzalności systemów komunalnych z wykorzystaniem nowoczesnych metod modelowania matematycznego w kontekście konieczności wypracowania metodologii na trudne czasy. Dlatego celem niniejszego opracowania jest zwrócenie uwagi, swoiste zaznaczenie tematu i wskazanie sztucznych sieci neuronowych jako jednego z wielu narzędzi wspomagających w analizie i ocenie poziomu awaryjności przewodów wodociągowych. Oczywiście, jak wspomniano w monografii [17], obecnie stosowanych jest wiele metod opartych o sztuczną inteligencję, które mogą służyć przedsiębiorstwom wodociągowym jako instrument pomocowy. Ponadto, jak zaznaczono w pracy [18], modele hydrauliczne oraz różnego rodzaju narzędzia informatyczne pomagają w efektywnej eksploatacji w chwili wystąpienia nietypowego zdarzenia losowego. Przedstawione w pracy wyniki są kontynuacją badań, nad zastosowaniem modelowania matematycznego, prowadzonych kilka lat temu [19] i szerzej opisanych w monografii [17], w której jedynie pokrótce ukazano aplikację sieci neuronowych, natomiast głównie skupiono się na innych metodach uczenia maszyn.

## Metodyka badań

Awaryjność przewodów wodociągowych (przyłącza i przewody rozdzielcze) analizowano w jednym z podgórskich miast w ciągu trzech lat eksploatacji. Układ sieci wodociągowej jest obwodowo-rozgałęźny. W analizowanym czasie łączna długość sieci wraz z przyłączami była

stała i wynosiła 127,3 km. Z czego 22,2 km stanowiły magistrale; 69,0 km przewody rozdzielcze i 36,1 km przyłącza wodociągowe. Głównymi materiałami, z jakich wykonane są przewody rozdzielcze to: stal, żeliwo szare i sferoidalne oraz azbestocement. Przyłącza wodociągowe wykonane są głównie ze stali i PE. Spotykane są jeszcze pojedyncze przewody ołowiane. W przedmiotowym mieście rurociągi o średnicy większej lub równej 300 mm są traktowane jako przewody magistralne. W rozpatrywanym czasie zakres średnic przewodów rozdzielczych wynosił 50–250 mm, a przyłączy 25–80 mm.

Warto zaznaczyć, że ze statystycznego punktu widzenia modelowanie z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w oparciu o dane z jedynie trzech lat eksploatacji może być kontrowersyjne. Jednak początkowa świadomość ograniczeń związanych z liczebnością zbiorów jest istotna i ma znaczenie podczas wyciągania wniosków. Ponadto w niniejszej pracy chodzi głównie o wskazanie na konieczność stosowania metod matematycznych w sytuacjach ekstremalnych, w których wymagana jest przyspieszona reakcja, a taka może być uzyskana przy pomocy zastosowania nowoczesnych narzędzi matematycznych.

Na wstępie wykonano tzw. dobór predyktorów, to znaczy wyznaczono ich statystyki, aby ukazać, które ze zmiennych niezależnych najlepiej nadają się do przewidywania wybranej zmiennej zależnej. Do budowy modeli wykorzystano następujące zmienne niezależne: jakościowe (pora roku – maks. 2 neurony, materiał – maks. 5 neuronów, typ przewodu – maks. 2 neurony) i ilościowe (średnica – 1 neuron). Zmienną zależną był wskaźnik intensywności uszkodzeń ( $\lambda$ ) – 1 neuron wyjściowy. Rozwiązywano zadanie regresyjne, gdyż neuron wyjściowy jest zmienną ilościową. W tabeli 1 przedstawiono zakresy zmiennych do modelowania. W programie Statistica stworzono po 20 modeli sztucznych sieci neuronowych dla każdej z dwóch konfiguracji, w których nieco inny był wektor zmiennych wejściowych do modelu (tabela 2). Dla każdej konfiguracji stworzono zbiór uczący i testowy. Cały zbiór danych eksploatacyjnych podzielono losowo na podzbiór uczący (70%) i testowy (30%). Analizowano perceptron wielowarstwowy (MLP) z liczbą neuronów ukrytych w jednej warstwie wahającą się w granicach 1–30. Przebadano modele z kilkoma funkcjami aktywacji (liniowa, logistyczna tangens hiperboliczny, wykładnicza). Redukcja wag była w przedziale od 0,0001 do 0,001.

**Tabela 1. Predyktory i zmienne zależne**  
**Table 1. Predictors and dependent variables**

Materiał	Średnica, mm	Typ przewodu	Pora roku	Wskaźnik $\lambda$ , uszk./ (km-a)
stal, ołów, żeliwo sferoidalne, żeliwo szare, PE	25-250	przewód rozdzielczy, przyłącze	zima, lato	0,19-0,66

Sprawdzono, czy przy tak zawężonym wektorze zmiennych niezależnych wyniki modelowania są akceptowalne i czy ich zbieżność z wartościami eksperymentalnymi kształtuje się na poziomie dopuszczalnym z inżynierskiego punktu widzenia.

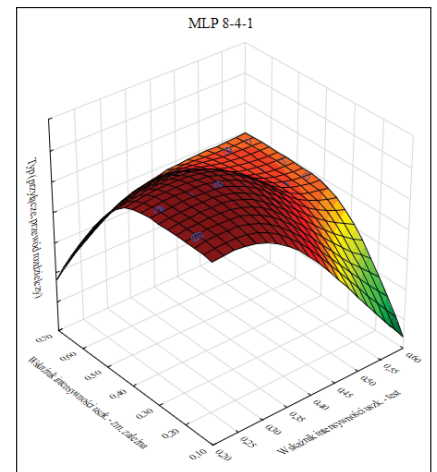
W tabeli 2 zestawiono, które ze zmiennych niezależnych tworzyły wektor predyktorów w zależności od konfiguracji. Warto zaznaczyć, że konfiguracji mogłoby być więcej w sytuacji dysponowania większą liczbą zmiennych eksploatacyjnych opisujących przewody wodociągowe (np. głębokość ułożenia, ciśnienie w rurociągu, rodzaj uszkodzenia, koszt i rodzaj naprawy, rodzaj gruntu). Jednak w tym opracowaniu celem nie jest modelowanie samo w sobie i badanie jakości dopasowania modelu do zmiennych eksperymentalnych, ale ukazanie możliwości zastosowania narzędzia, jakim są sieci neuronowe w przypadku konieczności dokonywania szybkich analiz poziomu awaryjności w przypadku wystąpienia globalnie sytuacji nietypowej. Po dokonaniu losowego podziału na zbiór uczący (70% wszystkich przypadków) i testowy (30% wszystkich przypadków) otrzymano odpowiednio 78 i 32 przypadków. Nie istnieją w literaturze przedmiotu sztywne reguły przyjmowania liczebności zbiorów uczących i testowych. W niniejszej pracy przyjęto najczęściej stosowany w modelowaniu udział procentowy poszczególnych podzbiorów. Modele sieci neuronowych powstały przy zastosowaniu zbioru uczącego, natomiast walidacji dokonano na zbiorze testowym.

**Tabela 2. Zmienne niezależne w zadaniu regresyjnym**  
**Table 2. Independent variables in regression task**

Zmienna	Konfiguracje	
	I	II
Średnica	+	+
Typ przewodu	+	+
Materiał	+	+
Pora roku	-	+

### Wyniki i dyskusja

Ocena jakości modelowania odbywa się na podstawie wyników ze zbioru testowego m. in. poprzez analizę współczynnika korelacji oraz zgodności wartości przewidywanych z wartościami eksploatacyjnymi. W tabeli 3 zestawiono główne parametry wszystkich modeli sieci neuronowych dla dwóch konfiguracji. Natomiast na rysunku 1 ukazano przykładowe wyniki zależności zmiennej zależnej, wartości przewidywanych i typu przewodu dla konfiguracji 1. W modelowaniu matematycznym istotna jest nie tylko jakość dopasowania zmiennych przewidywanych do wartości eksploatacyjnych, ale również prostota modelu; zwłaszcza gdy istnieje konieczność zastosowania modelowania w sytuacji wystąpienia szeregu nagłych zdarzeń, które wymuszają na eksploatatorach podjęcia decyzji bez zbędnej zwłoki czasowej. Dlatego też w przypadku konfiguracji 1 model nr 19 został wybrany jako optymalny, gdyż nie tylko współczynniki korelacji dla zbioru uczącego i testowego były wysokie, odpowiednio 0,90 i 0,88, ale także nie-

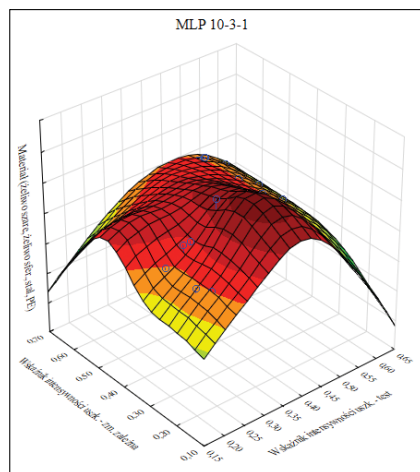


**Rys. 1. Zależność wskaźnika  $\lambda$  od typu przewodu (konfiguracja 1, model nr 19, zbiór testowy)**  
**Fig. 1. Failure rate  $\lambda$  vs. kind of water pipe (configuration 1, model No. 19, testing data set)**

wielka liczba neuronów ukrytych (4) oraz proste funkcje aktywacji (f. liniowa) sprawiają, że model ten posiada cechy świadczące o jego prostocie i łatwości aplikacji. Dla konfiguracji 2 wybrano model nr 14 (korelacja na zbiorze uczącym i testowym wynosiła odpowiednio 0,90 i 0,86) z trzema neuronami ukrytymi aktywowanymi przez funkcję liniową (rys. 2). Inne funkcje aktywacji lub większa liczba neuronów ukrytych komplikowałyby postać modelu. Model zawsze może być douczony na danych z kolejnych lat, co zwiększa jego zdolności predykcyjne. Jednak należy pamiętać, aby nie zatracić zdolności generalizacyjnych, gdyż zbyt dokładne dopasowanie na etapie uczenia modelu może prowadzić do błędnych wyników przewidywania na zbiorze testowym, właśnie ze względu na przeuczenie sieci i utratę możliwości uogólniania wyników modelowania. Oczywiście jest, że przedstawione

**Tabela 3. Główne dane i parametry sieci neuronowych**  
**Table 3. The main data and parameters of neural networks**

	Modele i konfiguracje																			
	Konfiguracja I																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Liczba neuronów wejściowych	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Liczba neuronów ukrytych	8	9	12	2	20	20	8	8	18	12	16	17	3	9	17	4	12	20	4	3
Funkcja aktywacji - warstwa ukryta	logistyczna	logistyczna	liniowa	logistyczna	logistyczna	tangens hiperboliczny	wykładnicza	liniowa	logistyczna	wykładnicza	logistyczna	wykładnicza	logistyczna	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	logistyczna	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	liniowa	wykładnicza
Funkcja aktywacji - warstwa wyjściowa	logistyczna	logistyczna	logistyczna	wykładnicza	liniowa	logistyczna	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	wykładnicza	liniowa	tangens hiperboliczny	liniowa	logistyczna	tangens hiperboliczny	wykładnicza	logistyczna	tangens hiperboliczny	wykładnicza	liniowa	liniowa
Współczynnik korelacji - uczenie	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,90	0,89	0,90	0,90	0,89	0,90	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Współczynnik korelacji - test	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,88	0,85	0,86	0,88	0,87	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,86
	Konfiguracja II																			
	Liczba neuronów wejściowych	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Liczba neuronów ukrytych	11	28	7	2	27	30	3	3	14	22	24	27	4	3	7	3	27	25	19
Funkcja aktywacji - warstwa ukryta	logistyczna	liniowa	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	logistyczna	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	liniowa	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	liniowa	wykładnicza	liniowa	liniowa	tangens hiperboliczny	wykładnicza	wykładnicza	logistyczna	wykładnicza	logistyczna
Funkcja aktywacji - warstwa wyjściowa	logistyczna	wykładnicza	logistyczna	liniowa	logistyczna	tangens hiperboliczny	logistyczna	logistyczna	logistyczna	tangens hiperboliczny	tangens hiperboliczny	wykładnicza	wykładnicza	liniowa	logistyczna	logistyczna	liniowa	liniowa	logistyczna	tangens hiperboliczny
Współczynnik korelacji - uczenie	0,89	0,90	0,90	0,90	0,88	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Współczynnik korelacji - test	0,87	0,86	0,84	0,86	0,81	0,85	0,84	0,86	0,86	0,84	0,87	0,85	0,86	0,86	0,85	0,86	0,84	0,86	0,86	0,87



**Rys. 2.**  
Zależność wskaźnika  $\lambda$  od materiału (konfiguracja 2, model nr 14, zbiór testowy)  
**Fig. 2.** Failure rate  $\lambda$  vs. material (configuration 2, model No. 14, testing data set)

modele sztucznych sieci neuronowych zostały zbudowane przy wykorzystaniu konkretnych danych eksploatacyjnych z wybranego systemu zaopatrzenia w wodę, a zatem nie są to modele uniwersalne, a jedynie dotyczą danej sieci wodociągowej. Brak możliwości zastosowania uniwersalnego modelu w innych systemach wodociągowych, które różnią się przecież pod wieloma względami (topologia, stosowane średnice i materiały, rodzaj gruntu, sposób eksploatacji, itd.) nie zamyka przecież drogi, gdyż w obecnym mocno z informatyzowanym świecie niemal każde przedsiębiorstwo wodociągowe może sobie pozwolić na posiadanie narzędzi matematycznych i przeszkolonej kadry, która jest

w stanie reagować na zmieniającą się sytuację i może uczestniczyć w obsłudze adekwatnych metod przewidywania wybranych zmiennych eksploatacyjnych.

Statystyczna istotność zmiennych jest podstawą analizy otrzymanych wyników i stosowana jest w różnych dziedzinach szeroko pojętej inżynierii sanitarnej [20]. W niniejszym opracowaniu dokonano analizy wrażliwości (tabela 4), aby ocenić istotność wybranych predyktorów w przewidywaniu wybranej zmiennej zależnej, co jest narzędziem ważnym z punktu widzenia szybkiego tworzenia modeli sieci neuronowej w przypadku wystąpienia nieprzewidzianej sytuacji eksploatacyjnej. Innymi słowy analiza wrażliwości może być podstawą oceny ważności poszczególnych zmiennych wejściowych do sieci. Dokonuje się sprawdzenia, jak zmienia się błąd sieci, gdy zmieniają się wartości zmiennych niezależnych. Wartości poszczególnych zmiennych wejściowych są zamieniane na wartości średnie ze zbioru uczącego. W ten sposób zmienna nie wnosi już żadnej informacji do modelu sieci. Następnie obliczany jest błąd predykcji, który może drastycznie wzrosnąć, co będzie oznaczało, że sieć jest wrażliwa na zmianę wartości neuronów wejściowych. Jeśli iloraz wskazujący na przyrost błędów (tab. 4) jest równy lub mniejszy od 1, oznacza to, że model sieci może z powodzeniem działać poprawnie bez danej zmiennej wejściowej, co powoduje możliwość zmniejszenia rozmiaru wektora neuronów wejściowych oraz upraszcza strukturę sieci, a w związku z tym umożliwia tworzenie modelu na mniejszej liczbie

neuronów. A to z kolei jest przydatne, gdy zadaniem jest budowa modelu w ekstremalnej sytuacji eksploatacyjnej, gdy nie ma czasu na zbieranie wielu informacji o przewodach wodociągowych, a liczy się szybkość reakcji na wytworzone okoliczności awaryjne przy np. zmniejszonej liczbie kadrze z powodu zwolnień lekarskich (o czym była mowa na początku artykułu).

Wyniki zamieszczone w tabeli 4 wskazują, że w obu konfiguracjach średnica oraz dodatkowo pora roku dla konfiguracji 2 są zmiennymi niezależnymi, których istotność statystyczna jest pomijalna w przypadku analizowania zbudowanych modeli sieci neuronowych do przewidywania wskaźnika intensywności uszkodzeń.

Należy pamiętać, że analiza wrażliwości powinna być dokonywana każdorazowo podczas uczenia sieci w przypadku różnych systemów wodociągowych. Zatem nie można odgórnie stwierdzić, że zawsze jest możliwe usunięcie z wektora zmiennych wejściowych np. średnicy przewodu. Jednak uzyskane wyniki są obiecujące, gdyż pokazują, że zmniejszenie liczby zmiennych niezależnych (w tym konkretnym przypadku) nie wpłynie negatywnie na jakość dopasowania, a usprawni sam proces modelowania, gdyż jedynie dwie zmienne jakościowe (materiał i typ przewodu) są istotne statystycznie w sytuacji przewidywania wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń. Jest to niezwykle ważne w momencie, gdy chodzi o łatwość budowy i aplikacji modelu sieci neuronowej w przypadku konieczności przyspieszonej reakcji na zapobieganie skutkom awarii w globalnej sytuacji ekstremalnej (stan epidemii, wojna, itp.). W związku z tym nie jest konieczne dysponowanie dokładną inwentaryzacją systemu wodociągowego, a takie informacje eksploatacyjne, jak materiał i typ przewodu są obecnie ogólnie dostępne i mogą być podstawą w miarę szybkiej analizy matematycznej w ocenie stanu technicznego i poziomu awaryjności.

## Podsumowanie

Po wielu miesiącach walki z opanowaniem pandemii jesteśmy bogatsi o sporo doświadczeń, które można przekuć na realne działania w sektorze wodociągów i kanalizacji. Mimo tego, że nie wiemy, czym nas jeszcze zaskoczy świat ludzi i świat natury, to jak najbardziej uzasadnione jest przeciwdziałanie skutkom wystąpienia zdarzeń niepożądanych poprzez odpowiednią do wytworzonej sytuacji reakcję z wykorzystaniem różnego rodzaju

**Tabela 4.** Wyniki analizy wrażliwości dla modeli sieci neuronowych  
**Table 4.** The results of sensitivity analysis for neural network models

Nr modelu	Model	Konfiguracja I			Model	Konfiguracja II			
		Typ	Materiał	Średnica		Typ	Materiał	Średnica	Pora roku
1	MLP 8-8-1	12,8	1,2	1,0	MLP 10-11-1	12,0	1,2	1,0	1,0
2	MLP 8-9-1	17,4	1,6	1,0	MLP 10-28-1	31,6	22,8	1,0	1,0
3	MLP 8-12-1	16,7	1,5	1,0	MLP 10-7-1	15,9	1,6	1,1	1,0
4	MLP 8-2-1	8,8	1,1	1,0	MLP 10-2-1	16,4	1,6	1,0	1,0
5	MLP 8-20-1	11,1	1,2	1,0	MLP 10-27-1	1,4	1,1	1,0	1,0
6	MLP 8-20-1	14,4	3,2	1,0	MLP 10-30-1	19,3	1,8	1,0	1,0
7	MLP 8-8-1	20,0	1,6	1,0	MLP 10-3-1	16,9	1,6	1,2	1,0
8	MLP 8-8-1	15,8	1,3	1,0	MLP 10-3-1	18,0	1,6	1,0	1,0
9	MLP 8-16-1	13,0	1,3	1,1	MLP 10-14-1	18,1	1,6	1,0	1,0
10	MLP 8-12-1	21,5	2,0	1,0	MLP 10-22-1	18,2	2,0	1,0	1,0
11	MLP 8-16-1	14,4	1,7	1,0	MLP 10-24-1	15,8	1,5	1,0	1,0
12	MLP 8-17-1	22,8	2,3	1,0	MLP 10-27-1	33,2	9,7	1,0	1,0
13	MLP 8-3-1	9,4	1,2	1,1	MLP 10-4-1	30,4	18,7	1,0	1,0
14	MLP 8-9-1	19,9	1,8	1,1	MLP 10-3-1	17,5	1,6	1,0	1,0
15	MLP 8-17-1	26,8	17,3	1,0	MLP 10-7-1	20,4	1,8	1,0	1,0
16	MLP 8-4-1	15,6	1,2	1,0	MLP 10-3-1	17,2	1,5	1,0	1,0
17	MLP 8-12-1	18,8	1,7	1,0	MLP 10-27-1	21,1	2,1	1,0	1,0
18	MLP 8-20-1	34,4	25,4	1,0	MLP 10-25-1	16,8	1,5	1,0	1,0
19	MLP 8-4-1	19,1	1,6	1,0	MLP 10-19-1	19,3	1,6	1,0	1,0
20	MLP 8-3-1	22,3	4,4	1,0	MLP 10-30-1	17,9	1,4	1,0	1,0

metod modelowania. Jednym z podstawowych zaleceń wydaje się wypracowanie (jeśli nie są jeszcze stworzone w danym przedsiębiorstwie komunalnym) i w razie konieczności szybkie wdrożenie reguł pracy w sytuacji ekstremalnej. Chodzi głównie o pracę zmianową, aby w każdym czasie zapewnić fachową obsługę bez konieczności zastępowania danej osoby pracownikiem z innego stanowiska, który nie jest wdrożony w konkretny zakres obowiązków. Również istotne jest, aby znajomość oprogramowania komputerowego, służącego szybkiej reakcji na sytuację nietypową, była powszechna wśród pracowników przedsiębiorstw wodociągowych, gdyż pozwoli to zmniejszyć negatywne skutki wystąpienia sytuacji awaryjnej i nieprzewidzianej. Ponadto ochrona zdrowia pracowników powinna zawierać w sobie rozwiązania globalne, a nie tylko doraźne, co zwiększy poziom niezawodności działania infrastruktury krytycznej. Zapropozowane w tej pracy podejście z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych do sprawnie przeprowadzonego przewidywania wskaźnika intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych jawi się jako obiecujące wspomagające narzędzie matematyczne w zarządzaniu infrastrukturą krytyczną oraz przy podejmowaniu decyzji np. o kolejności napraw oraz zmniejsza ryzyko zbyt długiej analizy wyników poziomu awaryjności w sytuacji, gdy czas działa na niekorzyść, gdy konieczna jest sprawna i przyspieszona naprawa rurociągów, aby nie zakłócić dostaw wody zwłaszcza do odbiorców strategicznych (szpitale, obiekty przemysłowe i wojskowe).

Wyniki zawarte w tym opracowaniu są przykładowe i dotyczą jednego wybranego systemu zaopatrzenia w wodę, lecz celem było, aby taki relatywnie prosty

przykład stał się przyczynkiem do dalszych analiz możliwości aplikacji różnych narzędzi matematycznych w przedsiębiorstwach komunalnych narażonych na ewentualny brak wykwalifikowanej kadry w przypadku wystąpienia globalnej sytuacji nietypowej. Dalsze badania w tym zakresie powinny być prowadzone z uwzględnieniem nie tylko samych przewodów wodociągowych, ale również innych obiektów sieciowych (np. ujęcia wody, pompownie, zbiorniki wody czystej).

#### LITERATURA

- [1] J. Rak, „Reguły określania przynależności do infrastruktury krytycznej”, *Technologia Wody*, pp. 16-19, 1 2020.
- [2] A. Kuliczkowski i J. Mazur, „Cyberterrorizm realnym zagrożeniem dla systemów zarządzania infrastrukturą wodociągową”, *Instal*, pp. 50-56, 1 2016.
- [3] J. Rak i K. Pietrucha-Urbanik, „Survey research associated with lack of water supply in crisis situations”, pp. 54-58, *Instal*, 2 2016.
- [4] K. Pietrucha-Urbanik i J. Rak, „Consumers’ perceptions of the supply of tap water in crisis situations”, *Energies*, pp. 3617-3638, 13 2020. DOI:10.3390/en13143617
- [5] K. Boryczko, I. Piegdoń, D. Szpak i D. Żywiec, „Risk assessment of lack of water supply using the hydraulic model of the water supply”, *Resources*, pp. 43-57, 10 2021. <https://doi.org/10.3390/resources10050043>
- [6] I. Zimoch i B. Mulik, „Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne a epidemia koronawirusa”, *Technologia Wody*, pp. 54-57, 2 2020.
- [7] <https://www.igwp.org.pl/who-o-monitoringu-sciekow> – dostęp 3.01.2022.
- [8] S.H. Antwi, D. Getty, S. Linnane i A. Rolston, „COVID-19 water sector responses in Europe: A scoping review of preliminary governmental interventions”, *Science of the Total Environment*, pp. 143068, 762 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143068>
- [9] J. Stoler, J.D. Miller, A. Brewis, M.C. Freeman, L.M. Harris, W. Jepson, A.L. Pearson, A.Y. Rosinger, S.H. Shah, C. Staddon, C. Workman, A. Wutich i S.L. Youn, “Household water insecurity will complicate the ongoing COVID-19 response: Evidence from 29 sites in 23 low-

- and middle-income countries”, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, pp. 113715, 234 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113715>
- [10] S. Renukappa, A. Kamunda i S. Suresh, “Impact of COVID-19 on water sector projects and practices”, *Utilities Policy*, pp.101194, 70 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101194>
  - [11] J.E. Pesantez, F. Alghamdi, S. Sabu, G. Mahinthakumar i E.Z. Berglund, “Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic”, *Sustainable Cities and Society*, pp. 103520, 77 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103520>
  - [12] P. Dżimińska, J. Stańczyk, S. Drzewiecki i P. Licznar, „Wykorzystanie systemu rejestracji danych z dużą częstotliwością do analizy nierównomierności zużycia wody”, *Instal*, pp.24-30, 1 2022. DOI: 10.36119/15.2022.1.3
  - [13] D. Kowalski i P. Suchorab, „The impact assessment of water supply DMA formation on the monitoring system sensitivity”, *Applied Sciences*, pp. 1554, 13 2023. <https://doi.org/10.3390/app13031554>.
  - [14] M. Iwanek, “Set of suffosion holes occurring after a water supply failure as a structure with fractal features”, *Journal of Ecological Engineering*, pp. 164-171, 23(6) 2022. <https://doi.org/10.12911/22998993/147808>.
  - [15] T. Cichoń i J. Królikowska, Obecne uwarunkowania w zakresie gospodarki wodno-energetycznej”, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, pp. 6-9, 9 2020. DOI: 10.15199/17.2020.9.2
  - [16] K. Miszta-Kruk, M. Kwietniewski i A. Mika, „Awarie przewodów kanalizacyjnych nie zależą tylko od wieku” *Wodociągi-Kanalizacja*, pp. 40-43, 9 2020.
  - [17] M. Kutyłowska, „Metody regresyjne i klasyfikacyjne w analizie i ocenie poziomu awaryjności przewodów wodociągowych”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2019.
  - [18] K. Boryczko, „Ocena skutków wyłączenia strategicznej magistrali wodociągowej”, *Instal*, pp. 45-47, 3 2020. DOI: 10.36119/15.2020.3.6
  - [19] M. Kutyłowska, „Przewidywanie wskaźnika awaryjności z wykorzystaniem sztucznych sieci”, *Instal*, pp. 44-46, 1 2016.
  - [20] K. Banaszekiewicz, I. Pasiecznik, W. Cieżak i E. den Boer, „Household e-waste management: a case study of Wrocław, Poland” *2022, Sustainability*, pp. 11753, 14(18) 2022. <https://doi.org/10.3390/su141811753>