

Teresa Łozowicka Stupnicka\*, Monika Talarczyk\*\*

## Zastosowanie modeli sieci neuronowych w ocenie i prognozowaniu jakości powietrza

### 1. Wstęp

Działalność człowieka – podejmowana w celu realizacji jego potrzeb – oprócz niewątpliwych korzyści gospodarczych, społecznych i ekonomicznych powoduje również skutki niepożądane. Procesy realizacji potrzeb człowieka nie są w pełni bezpieczne; stwarzają zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi, wywołują nieodwracalne zmiany biosfery i ekosystemów, zakłócają ich naturalną dynamikę i stabilność, stwarzają ryzyko katastrof, wypadków, pożarów, powodować mogą poważne szkody społeczne, przyrodnicze i materialne. Ubocznym skutkiem procesów realizacji potrzeb jest m.in. emisja do środowiska wielkich ilości różnego rodzaju zanieczyszczeń i niebezpiecznych odpadów.

W wyniku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, ich przemian bio-fizyko-chemicznych, kumulacji w ekosystemach i organizmach, występowania opóźnionych reakcji biologicznych – zagrożenia nabierają charakteru globalnego, długookresowego, powstają poważne zagrożenia odległoterminowe, dalekosiężne, wzrasta ryzyko katastrof ekologicznych. Szczególnie trudno przewidywalne są skutki ekspozycji człowieka i środowiska na równoczesne oddziaływania wielu różnych czynników szkodliwych; mają one charakter nieliniowy, występują zjawiska interakcji, synergizmu, antagonizmu działań.

Ocena stanu środowiska łączy monitorowanie z jego diagnozowaniem; obejmuje ona [10]:

- określenie rodzajów zanieczyszczeń i zakłóceń środowiska oraz ich poziomów;
- identyfikację źródeł zanieczyszczeń i zakłóceń;
- określenie związków przyczynowo-skutkowych między poziomami zanieczyszczeń i zakłóceniami a zmianami w środowisku;

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

\*\* Absolwentka studiów doktoranckich, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska

- prognozowanie procesów przenoszenia, rozprzestrzeniania i kumulacji zanieczyszczeń w środowisku z uwzględnieniem przebiegu procesów przyrodniczych;
- ocenę konsekwencji narażenia człowieka, środowiska, obiektów biologicznych i technicznych na działanie czynników szkodliwych;
- ocenę zagrożeń, ryzyka i bezpieczeństwa;
- przewidywanie i ogłaszanie stanów zagrożenia, stanów ostrzegawczych, alarmowych dla uaktywnienia działań zapobiegawczych.

Celem oceny jakości powietrza jest uzyskanie informacji niezbędnych dla ochrony zdrowia człowieka, przyrody, zabytków kulturowych i innych obiektów środowiska. Podstawą oceny są dane uzyskiwane z sieci monitoringu powietrza: dane o poziomie zanieczyszczeń oraz dane meteorologiczne. Opracowana ocena – oprócz określenia ryzyka i zagrożeń spowodowanych podwyższonym poziomem zanieczyszczeń – służy formułowaniu prognoz zmian jakości powietrza. Kryteria ogłaszania stanów zagrożenia, stanów ostrzegawczych i alarmowych określone są w Dzienniku Ustaw [4]; opracowane są one na podstawie dyrektyw Unii Europejskiej [2, 3]. Kryteria te uwzględniają jedynie oddziaływania odrębnie traktowanych substancji szkodliwych, nie biorą pod uwagę tego, że substancje te występując równocześnie, mogą wykazywać inne i dodatkowe działania łączne. Brak zadowalających wyników badań naukowych powoduje, że w uregulowaniach prawnych oddziaływania takie nie są uwzględniane. Ponadto dobór uwzględnianych substancji (w Krakowie są to: dwutlenek siarki, dwutlenek azotu, tlenek węgla, pył zawieszony PM10) uwarunkowany jest dysponowaniem odpowiednią aparaturą pomiarową, podczas gdy lista substancji zanieczyszczających, dla których ustalone zostały dopuszczalne wartości stężeń dla różnych okresów ich oddziaływania, obejmuje blisko 200 pozycji ([6] oraz rozporządzenie Ministra Środowiska [4]).

## 2. Wskaźnikowa ocena jakości powietrza

Narzędziem wspomagającym ocenę stanu powietrza i decyzję o ogłoszeniu stanu zagrożenia może być syntetyczny wskaźnik jakości powietrza. Wskaźnik taki powinien uwzględniać, obok wartości stężeń poszczególnych substancji szkodliwych obecnych w powietrzu, także narażenie obiektów biologicznych na równoczesne działanie tych substancji w określonych przedziałach czasowych (np. 30 minut, doba, rok). Ocena taka postulowana była już wcześniej, jednak niedostateczne podstawy teoretyczne i brak danych spowodował, że w proponowanym modelu przyjmowano założenia o liniowym charakterze skutków oddziaływań łącznych.

Łączne oddziaływania wielu czynników i ich konsekwencje mogą być przedstawione jako suma oddziaływań, konsekwencji cząstkowych oraz oddziaływań, konsekwencji interakcyjnych [9, 8]

$$\Xi \begin{bmatrix} \text{oddziaływania} \\ \text{konsekwencje} \\ \text{łączne} \end{bmatrix} = \Sigma \begin{bmatrix} \text{oddziaływania} \\ \text{konsekwencje} \\ \text{łączne} \end{bmatrix} \pm Int \begin{bmatrix} \text{oddziaływania} \\ \text{konsekwencje} \\ \text{łączne} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

- $\Xi$  - łączne oddziaływania wielu czynników, ich konsekwencje,
- $\Sigma$  - addytywne oddziaływania wielu czynników, ich konsekwencje,
- $Int$  - interakcyjne oddziaływania, konsekwencje czynników:
  - + w przypadkach działań synergistycznych,
  - w przypadkach działań antagonistycznych.

Ze względu na dużą złożoność wieloczynnikowych ocen narażenia ludzkiego zdrowia, wielką liczbę możliwych kombinacji różnych czynników, interakcje zachodzące pomiędzy nimi, zbyt małą ilość wyników badań doświadczalnych, zwłaszcza dotyczących skutków długoterminowych, zastosowano pewne uproszczenia.

Założono addytywność działań substancji szkodliwych, przyjmując postać wskaźnika jakości powietrza spotykaną w literaturze [1, 5, 9, 11, 12]

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{DS_i} \quad (2)$$

gdzie:

- $c_i$  - zmierzone stężenie danego zanieczyszczenia powietrza,
- $DS_i$  - dopuszczalne stężenie dla zanieczyszczenia  $c_i$ ,
- $n$  - liczba uwzględnionych czynników (zanieczyszczeń).

W sytuacjach charakterystycznych dla sezonu zimowego substancjami kryterialnymi są zanieczyszczenia szczególnie silnie wpływające na jakość powietrza w okresie zimowym:  $SO_2$ ,  $NO_2$ , pył zawieszony o średnicy mniejszej od  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ) i  $CO$ . Stężenia tych zanieczyszczeń zwykle mierzone są w systemach monitoringu.

Dla przyjętych zanieczyszczeń kryterialnych wskaźnik  $W$  przyjmuje postać

$$W = \frac{C_{SO_2}}{DS_{SO_2}} + \frac{C_{PM_{10}}}{DS_{PM_{10}}} + \frac{C_{NO_2}}{DS_{NO_2}} + \frac{C_{CO}}{DS_{CO}} \quad (3)$$

W celu uzyskania wskaźnika uwzględniającego substancje znajdujące się w miejskim powietrzu w okresie zimowym, negatywnie oddziałujące na ludzkie zdrowie, uzasadnione byłoby także uwzględnienie takich zanieczyszczeń, jak węglowodory, dioksyny i inne. Częstotliwość pomiarów stężeń tych zanieczyszczeń, jeżeli są w ogóle wykonywane, jest zbyt mała, aby uzyskane wyniki można było wykorzystać.

Analizę jakości powietrza wykonano na podstawie wyników pomiarów stężeń  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{CO}$  zarejestrowanych w stacji automatycznego monitoringu w Krakowie, w Rynku Głównym, w sezonach zimowych 1998/1999, 1999/2000 i 2000/2001. W pracy przyjęto koncepcję określania stanu jakości powietrza z wykorzystaniem wartości stężeń średniodobowych. Według wytycznych Światowej Organizacji Zdrowia [28], najwyższymi dopuszczalnymi wartościami stężeń średniodobowych są:

$$DS_{\text{SO}_2} = 125 \mu\text{g}/\text{m}^3, \quad DS_{\text{PM}_{10}} = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3,$$

$$DS_{\text{NO}_2} = 150 \mu\text{g}/\text{m}^3, \quad DS_{\text{CO}} = 5 \text{mg}/\text{m}^3.$$

Ocena jakości powietrza z wykorzystaniem wskaźnika  $W$  wykonana została na tle sytuacji meteorologicznej. Wartości parametrów meteorologicznych warunkujących wzrost koncentracji zanieczyszczeń w atmosferze uzyskano z Centralnej Stacji Obserwacyjnej w sieci monitoringu Krakowa. Są to: prędkość i kierunek wiatru, temperatura i wilgotność powietrza, wysokość ciśnienia atmosferycznego oraz występowanie dolnej warstwy inwersyjnej.

W celu identyfikacji przedziałów wartości wskaźnika  $W$ , które mogłyby być podstawą klasyfikacji stanu jakości powietrza, przeprowadzono szereg analiz i dokonano ustaleń, m.in.:

- oszacowano wpływ wybranych zanieczyszczeń powietrza na zdrowie człowieka;
- przyjęto, że wartości stężeń we wzorze na wskaźnik  $W$  ustalane są na poziomie najniższych wartości wywołujących negatywne efekty zdrowotne z uwzględnieniem współczynników bezpieczeństwa i niepewności, mając na uwadze ochronę osób szczególnie wrażliwych, odległe skutki zdrowotne oraz możliwość wystąpienia nieprzewidzianych okoliczności negatywnie wpływających na zdrowie człowieka;
- przyjęto na podstawie ustaleń toksykologicznych [9, 12 i in.], że wartość wskaźnika  $W$  wynosząca 1 jest granicą dobrej oceny jakości powietrza, wartości wyższe oznaczają jakość gorszą;
- analizie poddano przypadki, w których wartość wskaźnika  $W$  istotnie przekroczyła 1;
- w analizie uwzględniono częstość przekraczania dopuszczalnych stężeń średniodobowych poszczególnych zanieczyszczeń kryterialnych, mając na uwadze ograniczenia czasów trwania tych przekroczeń.

W celu informowania ludności o jakości powietrza w sposób prosty i zrozumiały każdemu przedziałowi wartości wskaźnika  $W$  przyporządkowano słowne określenie stopnia zanieczyszczenia powietrza. Określenie jakości powietrza wraz z informacjami, jakie powinny być przekazywane społeczeństwu, przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Informacje przekazywane społeczeństwu dla poszczególnych poziomów jakości powietrza

Przedział $W$	Stan jakości powietrza	Informacje przekazywane społeczeństwu	
(0, 1]	dobry	Rzeczywista i prognozowana wartość $W$ oraz słowne określenie jakości powietrza	Ograniczenia dopuszczalnych czasów trwania przekroczeń dopuszczalnych stężeń średniodobowych
(1, 2]	średni		
(2, 3]	dostateczny (zależnie od czasu trwania)		
(3, 4]	niezadawalający (zależnie od czasu trwania)		
> 4	zły		

Zaproponowany wskaźnik jakości powietrza nie oddaje w pełni negatywnego wpływu zanieczyszczeń obecnych w powietrzu na zdrowie człowieka. Uwzględnia on oddziaływanie jedynie kilku wybranych zanieczyszczeń i zakłada ich addytywność. W związku z tym w skali lingwistycznych ocen stanu jakości powietrza pominięto określenie „bardzo dobry”.

### 3. Model sieci neuronowej i jego przydatność w ocenie i prognozie jakości powietrza

Sztuczne sieci neuronowe powstały dzięki wykorzystaniu wiedzy dotyczącej zjawisk zachodzących w mózgu istot żywych. Podobnie do swoich biologicznych pierwowzorów posiadają zdolność automatycznej adaptacji elementów swojej struktury w celu poszukiwania rozwiązań złożonych zależności pomiędzy sygnałami wejściowymi a oczekiwanymi sygnałami wyjściowymi modelu. Sieci o odpowiednio dobranej strukturze pozwalają rozwiązywać problemy nieliniowe, wielowymiarowe, często niemożliwe do rozwiązania w sposób konwencjonalny [9].

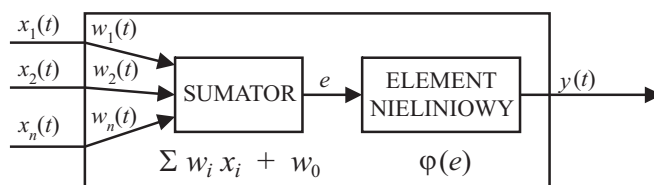
Modele sieci neuronowych mają duże możliwości odwzorowywania złożonych zależności przyczynowo-skutkowych w diagnozowaniu narażenia ludzi (oraz innych obiektów biologicznych) na równoczesne działanie wielu szkodliwych czynników, mogą być wykorzystane w rozpatrywanym problemie oceny i prognozy jakości powietrza. Pozwalają na uwzględnienie łącznego oddziaływania zanieczyszczeń z uwzględnieniem konkretnych warunków meteorologicznych.

Możliwości sieci pozwolą w przyszłości zrezygnować z przyjętych w modelu uproszczeń, takich jak addytywność oddziaływań poszczególnych czynników. Wprowadzenie wyznaczonych w drodze badań zależności nieliniowych umożliwi uściślenie postaci wskaźnika jakości powietrza.

Przykłady zastosowania sieci neuronowych w ocenie jakości powietrza publikowane bywają w literaturze polskiej i zagranicznej [15, 16, 18 i in.]. Oceny te opierają się na analizie przeprowadzanej odrębnie dla każdego z zanieczyszczeń: dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, pyłu zawieszzonego i in. W Krakowie do celów prognozowania stężeń zanieczyszczeń powietrza wykorzystywano w latach 1993–2002 statystyczny model prognoz ARMAX [26].

W celu oceny i prognozowania jakości powietrza wykorzystano w pracy sieć jednokierunkową, wielowarstwową, o neuronach mogących realizować nieliniowe funkcje typu sigmoidalnego; sieć taka, zwana perceptronem wielowarstwowym, jest jedną z najczęściej stosowanych.

Ocenę i prognozowanie jakości powietrza za pomocą sztucznej sieci neuronowej zrealizowano z wykorzystaniem programu STATISTICA Neural Networks. Sieć posiada warstwę wejściową, dwie warstwy ukryte i warstwę wyjściową. Schemat pojedynczego neuronu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat neuronu nieliniowego [19]

Odpowiedź neuronu na sygnał nieliniowy można zapisać [19, 20]:

$$y = \varphi(e) \quad (4)$$

$$e = \sum_{i=1}^n x_i w_i + w_0 \quad (5)$$

gdzie:

- $y$  – sygnał wyjściowy,
- $e$  – łączne pobudzenie neuronu,
- $x_i$  – sygnały wejściowe,
- $w_i$  – wagi sygnałów,
- $w_0$  – wartość progowa,
- $\varphi$  – funkcja nieliniowa (funkcja aktywacji),
- $i$  – numer składowej wejścia ( $i = 1, \dots, n$ ).

Wstępnie przyjęto, iż zmiennymi wejściowymi do modelu będą:

- stężenia zanieczyszczeń powietrza, wartości średniodobowe z dnia poprzedzającego prognozę: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM10 w µg/m<sup>3</sup> oraz CO w mg/m<sup>3</sup>;
- parametry meteorologiczne, wartości średniodobowe z dnia, dla którego tworzona jest prognoza:
  - prędkość i kierunek wiatru (rzut poziomy wektora prędkości wiatru), m/s;
  - temperatura powietrza, °C;
  - wilgotność względna powietrza, %;
  - ciśnienie atmosferyczne, hPa.

Powyższe sygnały wejściowe mnożone są przez współczynniki określające wagi poszczególnych wielkości wejściowych.

Funkcją aktywacji  $\varphi$  jest funkcja sigmoidalna

$$\varphi(e) = \frac{1}{1 + \exp(-e)} \quad (6)$$

Zmienną wyjściową jest prognozowana na następną dobę wartość wskaźnika jakości powietrza  $W$ .

Dopasowanie elementów modelu sieci neuronowej następuje w wyniku procesu zwanego uczeniem sieci. Polega on na doborze zmiennych parametrów tego modelu tak, aby zależność wejście - wyjście była poprawna. Zmiennymi parametrami w procesie uczenia są wagi  $w_i$ .

Proces uczenia sieci jest uczeniem nadzorowanym. Polega na podawaniu przez twórcę sieci przykładów poprawnego działania, które sieć powinna naśladować w czasie egzaminu. Zbiór przykładów zawierających zestawienie sygnałów wejściowych i wymaganych dla nich odpowiedzi podawany jest sieci w postaci ciągu uczącego

$$U = \left\{ \langle X^{(1)}, Z^{(1)} \rangle \dots \langle X^{(N)}, Z^{(N)} \rangle \right\} \quad (7)$$

gdzie:

- $X^{(j)}$  -  $n$ -wymiarowy wektor wielkości wejściowych w kroku  $j$  ( $j = 1, \dots, N$ ),
- $Z^{(j)}$  -  $k$ -wymiarowy wektor prawidłowych odpowiedzi sieci w kroku  $j$ .

Uczenie się pojedynczego neuronu w sieci polega na korekcie jego wag na podstawie oceny wielkości błędu dla zadanych wartości wejściowych i wartości wyjściowej.

Nowe wartości wag określane są na podstawie zależności

$$w_i^{(j+1)} = w_i^{(j)} + \eta_1 \delta^{(j)} y^{(j)} (1 - y^{(j)}) x_i + \eta_2 (w_i^{(j)} - w_i^{(j-1)}) \quad (8)$$

gdzie:

- $\eta_1, \eta_2$  – parametry uczenia,
- $\delta^{(j)}$  – błąd w iteracji  $j$ ,
- $y^{(j)}$  – wartość wyjściowa w iteracji  $j$ ,
- $i$  – numer składowej wejścia  $i = 1, \dots, n$ ,
- $j$  – numer iteracji.

Do uczenia sieci użyto algorytmu wstecznej propagacji błędu oraz algorytmu Levenberga–Marquardta.

Wyboru sieci dokonano na podstawie rzeczywistych wartości stężeń wybranych zanieczyszczeń i parametrów meteorologicznych wykorzystanych w analizie jakości powietrza (wskaźnik  $W$ ). Wszystkie wartości wejściowe zostały znormalizowane do przedziału  $[0,1]$ . Otrzymane w ten sposób zestawy danych formowane były w zbiory zawierające dane wejściowe oraz wymagane dla nich odpowiedzi sieci. Utworzone zostały w ten sposób: zbiór uczący, zbiór walidacyjny (sprawdzający poprawność przebiegu procesu uczenia) oraz zbiór testujący.

W wyniku przeprowadzenia szeregu eksperymentów dokonano wyboru sieci charakteryzującej się najmniejszymi wartościami błędu RMS (*Root Mean Squared* – pierwiastek z błędu średniokwadratowego) dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego [17]

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2}{n}} \quad (9)$$

gdzie:

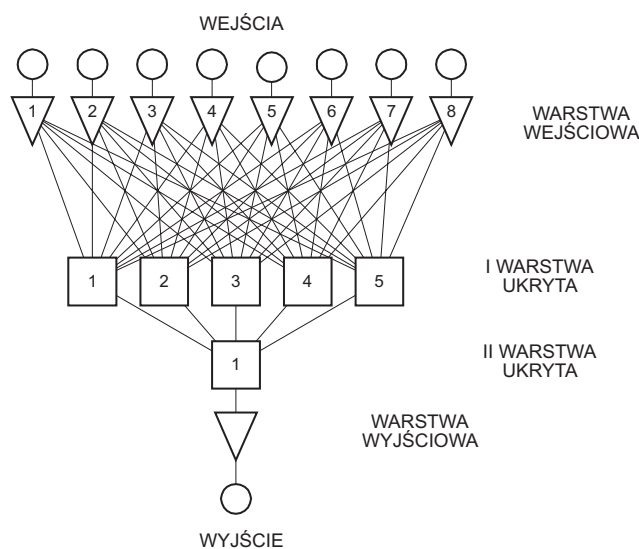
- $y_i$  – wartość prognozowana zmiennej wyjściowej  $i$ ,
- $z_i$  – wartość zadana zmiennej wyjściowej  $i$ ,
- $n$  – liczebność zbioru danych (odpowiednio dla zbioru uczącego, walidacyjnego, testowego).

Testowanie sieci przeprowadzono na rzeczywistych danych meteorologicznych oraz na danych otrzymanych z prognostycznego modelu ALADIN [26]. Miało to na celu ostateczną weryfikację modelu oraz sprawdzenie, jak błąd prognozy danych meteorologicznych może wpłynąć na otrzymane wartości wyjściowe z sieci. Szczególną uwagę poświęcono przypadkom ekstremalnych wartości wskaźnika  $W$ . Rozpatrywano sytuacje, dla których wskaźnik jakości był większy od 4, oraz czas ich trwania.



#### 4. Omówienie wyników badań

W badaniach posłużono się siecią: perceptronem czterowarstwowym z 8 neuronami wejściowymi, 5 neuronami w pierwszej warstwie ukrytej i 1 neuronem w drugiej oraz z 1 neuronem wyjściowym. Schemat sieci (8:8-5-1-1:1) przedstawiono na rysunku 2.

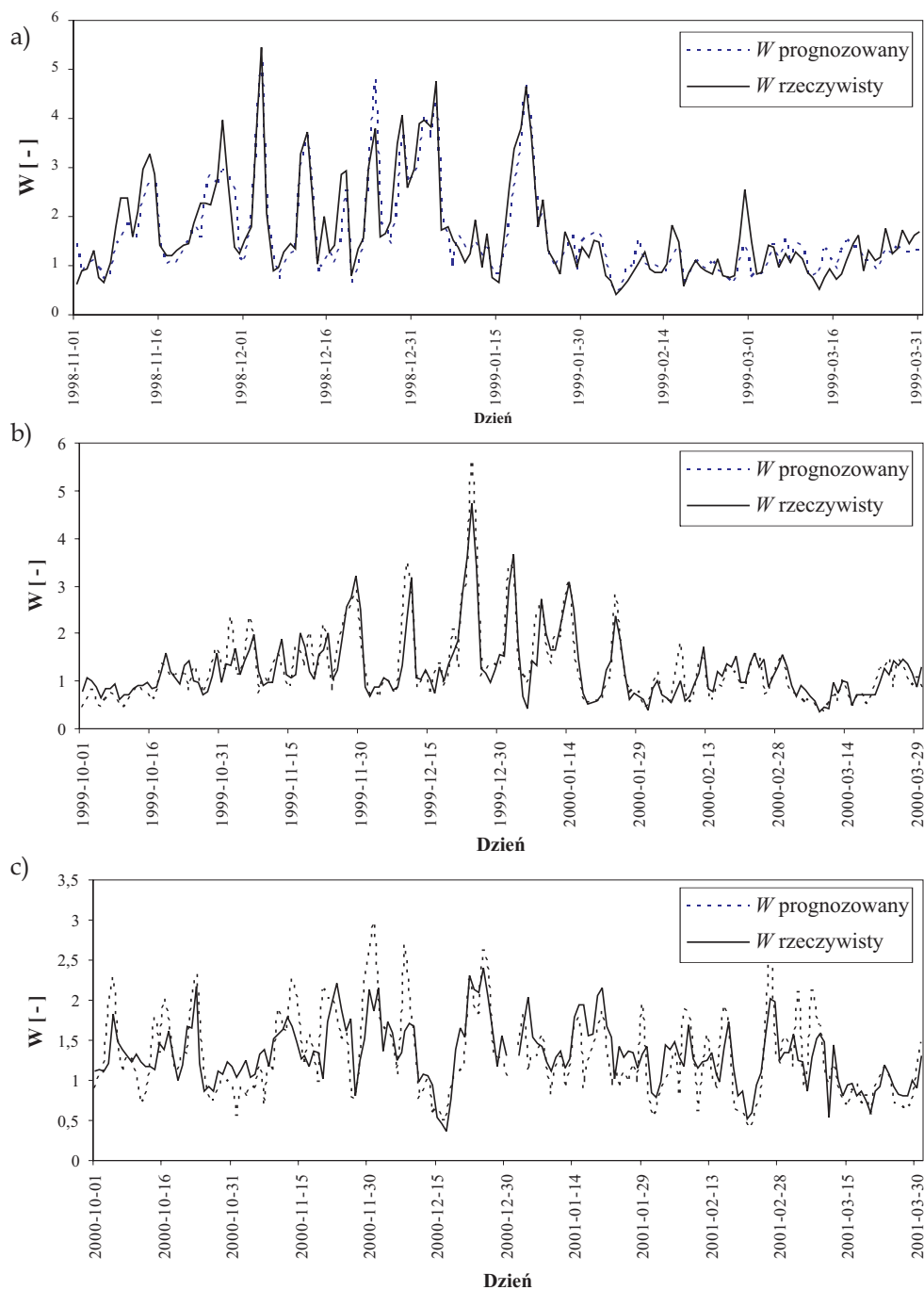


Rys. 2. Schemat sieci neuronowej o architekturze 8:8-5-1-1:1

Na podstawie wyników kolejnych eksperymentów, w których sprawdzana była istotność rozpatrywanych zmiennych wejściowych w prognozowaniu wskaźnika  $W$ , stwierdzono, że zmiany ciśnienia atmosferycznego (wartości średniodobowe) mają mały wpływ na zmienną wyjściową. W związku z tym w dalszych eksperymentach pominięto wejście, które wprowadzało do sieci wartości ciśnienia.

Otrzymane wyniki eksperymentów zobrazowano na wykresie (rys. 3) i dla przykładowego okresu (zima 2000/2001) zestawiono w tabeli 2.

Wyniki przeprowadzonych analiz przypadków ze zbioru testowego (z wybranych sezonów zimowych) pozwalają wnioskować, że przyjęty model sieci popęła najmniejsze błędy predykcji, gdy rzeczywisty wskaźnik  $W$  mieści się w przedziale (0,1] oraz w przedziale (1,2]; przedziały te charakteryzują, odpowiednio, dobry oraz średni stan jakości powietrza. Dla tych zakresów wartości  $W$  średni błąd bezwzględny wynosił około 0,2. Wraz ze wzrostem wartości rzeczywistego wskaźnika  $W$  sieć popęła większe błędy. Gdy w zbiorach: uczącym i walidacyjnym, wartość rzeczywistego wskaźnika  $W$  była większa od 4, sieć popęła błąd bezwzględny wynoszący średnio 0,4; jednak dla zbioru testowego ze stycznia oraz lutego 1998 roku średni błąd bezwzględny wynosił aż 1,7.



Rys. 3. Porównanie rzeczywistych oraz prognozowanych wartości wskaźnika  $W$ : a) sezon zimowy 1998/1999; b) sezon zimowy 1999/2000; c) sezon zimowy 2000/2001

**Tabela 2.** Porównanie rzeczywistych i prognozowanych wartości wskaźnika  $W$  dla przykładowego okresu

Data	$W_{progn}$	$W_{rz}$	Błąd		Data	$W_{progn}$	$W_{rz}$	Błąd	
			$W$	RMS				$W$	RMS
98.11.21	1,5	1,5	0,000	0,000	98.12.06	1,2	0,9	0,291	0,055
98.11.22	1,8	1,9	-0,032	0,006	98.12.07	0,7	1,0	-0,220	0,042
98.11.23	1,6	2,3	-0,672	0,127	98.12.08	1,0	1,3	-0,240	0,045
98.11.24	2,5	2,3	0,181	0,034	98.12.09	1,2	1,5	-0,213	0,040
98.11.25	2,9	2,2	0,605	0,114	98.12.10	1,3	1,4	-0,062	0,012
98.11.26	2,6	2,8	-0,137	0,026	98.12.11	3,0	3,3	-0,328	0,062
98.11.27	2,9	4,0	-0,040	0,196	98.12.12	3,7	3,7	-0,067	0,013
98.11.28	2,9	2,7	0,146	0,028	98.12.13	2,3	2,4	-0,056	0,011
98.11.29	2,5	1,4	1,117	0,211	98.12.14	0,9	1,0	-0,157	0,030
98.11.30	1,1	1,3	-0,123	0,023	98.12.15	1,0	2,0	-0,949	0,179
98.12.01	1,1	1,5	-0,422	0,080	98.12.16	1,3	1,3	0,050	0,009
98.12.02	1,9	1,8	0,080	0,015	98.12.17	1,1	1,4	-0,369	0,070
98.12.03	3,5	3,8	-0,357	0,067	98.12.18	1,5	2,9	-1,409	0,266
98.12.04	5,2	5,4	-0,251	0,047	98.12.19	2,6	2,9	-0,369	0,072
98.12.05	2,0	2,1	-0,073	0,014	98.12.20	0,6	0,8	-0,211	0,040

Różnice błędów predykcji spowodowane są także znacznymi różnicami liczby przypadków, dla których wartość  $W$  należała do przedziału  $(0,2]$  (duża liczba danych) i powyżej 2, a zwłaszcza powyżej 4. Najwyższe błędy otrzymywane były dla najwyższych obserwowanych wartości. Ponieważ w zbiorze uczącym liczba przypadków, dla których  $W > 4$ , była mała, można wnioskować, że sieć nie nauczyła się takich przypadków dobrze prognozować.

Podsumowując, stwierdzić można, iż prognozowane wskaźniki wyznaczone przez wybrany model sieci neuronowej są zawyżane w przypadku wartości najniższych i zaniżane dla wartości najwyższych; jest to wynikiem aproksymacyjnego sposobu działania modelu.

## 5. Wnioski

Zaproponowany syntetyczny wskaźnik oceny jakości powietrza stwarza możliwość uwzględnienia skutków łącznych oddziaływań różnych zanieczyszczeń szkodliwych. Zastosowanie do jego wyznaczania sztucznej sieci neuronowej umożliwia uwzględnienie bardzo złożonego charakteru wzajemnych oddziaływań i sporządzanie ocen jakości powietrza i prognoz o dobrej zgodności z obserwowanymi w rzeczywistości. Uzyskane wyniki z obliczeń przeprowadzonych dla wy-

branych okresów charakteryzujących się szczególnie niekorzystnymi stanami jakości powietrza są zadowalające i skłaniają do dalszych badań.

Elastyczność struktury sieci neuronowej pozwala na uwzględnienie dodatkowych parametrów mogących mieć wpływ na ocenę jakości powietrza i zmniejszenie błędu predykcji; możliwe będzie także uwzględnienie współczynników określających względną toksyczność zanieczyszczeń oraz zastąpienie wartości dopuszczalnych stężeń (DS) wartościami najniższych obserwowanych poziomów działania szkodliwego LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*).

Wykorzystanie modeli sieci neuronowych w kompleksowej ocenie i prognozie jakości powietrza może skutecznie wspomagać decyzje podejmowane w celu zapobiegania negatywnym skutkom zanieczyszczeń powietrza. Uzyskane oceny mogą być podstawą codziennych informacji o stanie powietrza, a także wczesnego ostrzegania i alarmowania o sytuacjach mogących powodować zagrożenia dla zdrowia i środowiska.

## Literatura

- [1] Calow P.: *Handbook of Ecotoxicology*. London, Oxford Backwell Scientific Publications 1994
- [2] Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. EU, Official Journal L 163, 29/06/1999
- [3] Directive 2000/69/EC of the European Parliament and of the Council of 16 November 2000 relating to limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air. EU, Official Journal L 313, 13/12/2000
- [4] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2002 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów niektórych substancji w powietrzu, alarmowych poziomów niektórych substancji w powietrzu oraz marginesów tolerancji dla dopuszczalnych poziomów niektórych substancji. Dz.U. Nr 87, poz. 796
- [5] Godzik S., Hławiczka S., Poborski P.: *Smog – Przyczyny – Skutki – Przeciwdziałania*. Warszawa, PIOŚ, Bibl. Monitoringu Środowiska 1995
- [6] Juda-Rezler K.: *Oddziaływanie zanieczyszczeń na środowisko*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2000
- [7] Kamiński W., Skrzypski J.: *Sztuczne sieci neuronowe monitorują środowisko*. Ekopartner, nr 6, 1998
- [8] Łozowicka Stupnicka T.: *Modele i wrażliwość obiektów biologicznych w diagnozowaniu wieloczynnikowych zagrożeń środowiska*. XII Międzynarodowe Sympozjum „Zastosowania Teorii Systemów”, Zakopane 1997, Półrocznik AGH Automatyka, t. 1, z. 1, 1997

- [9] Łozowicka Stupnicka T.: *Ocena ryzyka i zagrożeń w złożonych systemach człowiek – obiekt techniczny – środowisko*. Monografia 270, Politechnika Krakowska 2000
- [10] Łozowicka Stupnicka T.: *Metody i narzędzia w diagnostyce środowiska*. V Krajowa Konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Komitet Budowy Maszyn PAN, Ustroń 2003
- [11] Manahan S.E.: *Environmental Chemistry*. Chelsea, Lewis Publishers 1991
- [12] Markiewicz J.: *Podstawowe pojęcia w toksykologii*. [w:] Szczepaniec E., Cięciak P., Kościelniak P. (red.), *Chemia środowiska*, Kraków, Wyd. UJ 1999
- [13] Mazur M.: *Systemy ochrony powietrza*. Kraków, UWND AGH 2004
- [14] Osowski S.: *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2000
- [15] Ośródką K., Ośródką L., Wojtylak M.: *Zastosowanie metody sztucznych sieci neuronowych do prognozy zanieczyszczeń powietrza w aglomeracji miejsko-przemysłowej*. Warszawa, *Wiad. IMGW*, t. 18, z. 3–4, 1995
- [16] Recknagel F.: *Ecological informatics*. Berlin, Springer Verlag 2002
- [17] *Sieci neuronowe*. Seria: Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna, t. 6. Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R. (red.), Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2000
- [18] Straszko J., Paprota S.: *Prognozowanie immisji metodami sieci neuronowych*. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, vol. 35, nr 4, 2000, 131–137
- [19] Tadeusiewicz R.: *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza 1998
- [20] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza 1993
- [21] Tadeusiewicz R., Rutkowski L., Chojcan J. (Eds.): *Proceedings of the Third Conference Neural Networks and their Applications*. Częstochowa, 1997
- [22] Talarczyk M.: *Nowe możliwości prognozowania stanów smogowych*. Materiały III Konferencji „Środowisko, Rozwój, Inżynieria”, Politechnika Krakowska, Kraków 2001
- [23] Talarczyk M.: *Ocena i prognoza jakości powietrza z wykorzystaniem modeli sieci neuronowych*. Kraków, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska 2003 (rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. n. dr hab. inż. T. Łozowickiej Stupnickiej)
- [24] Brandys J. (red.): *Toksykologia*. Kraków, Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego 1999
- [25] Seńczuk W. (red.): *Toksykologia*. Warszawa, Wyd. PZWL 1994

- 
- [26] Walczewski J. i in.: *Wykorzystanie danych meteorologicznych w monitoringu jakości powietrza*. Warszawa, Inspekcja Ochrony Środowiska 2000
- [27] Walczewski J.: *Operation of the air pollution warning system in Cracow during pollution episodes*. [In:] *Air Quality Management; Computational Mechanics Publs.*, Southampton 2000
- [29] *WHO: Air quality guidelines for Europe*. Regional Publications, European Series, No. 91, Copenhagen 1999