

GLÓWNY INSTYTUT GÓRNICWA

PRAWA DOKTORSKA

**Nowa metoda wykorzystania wskaźnika Grahama
do oceny stanu zagrożenia pożarowego
w rejonach ścian inertyzowanych azotem**

mgr inż. Lucjan Świerczek

Promotor:

dr hab. inż. Stanisław Trenczek

Katowice 2023

Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi, Panu dr hab. inż. Stanisławowi Trenczkowi, za opiekę naukową, pomoc oraz cenne wskazówki i sugestie.

Dziękuję mojemu koledze, mgr inż. Stanisławowi Słowikowi, za liczne merytoryczne dyskusje i pomoc.

Szczególne słowa podziękowania składam mojej żonie Alicji za cierpliwość, wyrozumiałość i olbrzymie wsparcie.

Spis treści

1. Wstęp.....	1
2. Teza, cel i struktura pracy	8
3. Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama.....	11
3.1. Problem nieprawidłowych wartości wskaźnika Grahama w literaturze światowej.....	11
3.2. Analiza wzoru służącego do wyznaczania wartości wskaźnika Grahama.....	12
3.3. Próba statystyczna poddana analizie.....	14
3.4. Wyznaczenie przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama	26
3.4.1. Granica lewostronna	29
3.4.2. Granica prawostronna.....	33
4. Wpływ inertyzacji azotem na wartość wskaźnika Grahama.....	36
4.1. Charakterystyka ścian poddanych analizie	36
4.2. <i>Próba bazowa</i> dla przeprowadzenia analizy porównawczej próbek powietrza kopalnianego	37
4.3. Analiza porównawcza <i>Próby bazowej</i> z wynikami analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z rejonów rozpatrywanych ścian wydobywczych.....	40
4.4. Weryfikacja górnej granicy przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama na przykładzie próbek powietrza pobranych z rejonów ścian poddawanych inertyzacji azotem	45
5. Kryteria stosowania wskaźnika Grahama w rejonach poddawanych inertyzacji azotem.....	48
5.1. Próba statystyczna składająca się z próbek powietrza zawierających stężenie azotu mniejsze od 80% - <i>Grupa I</i>	48
5.2. Próba statystyczna składająca się z próbek powietrza zawierających stężenie azotu większe lub równe 80% - <i>Grupa II</i>	50
5.3. Wyznaczenie warunków stosowania wskaźnika Grahama w rejonach poddawanych inertyzacji azotem	51
6. Poziom zagrożenia pożarem endogenicznym wyznaczany przy pomocy sztucznej sieci neuronowej.....	58
6.1. Wstęp do uczenia maszynowego	58
6.2. Przygotowanie danych do nauki sztucznej sieci neuronowej	61
6.3. Sposób tworzenia sieci neuronowych	63
6.4. Poszukiwania optymalnej sieci neuronowej	65

6.5. Porównanie poziomu zagrożenia pożarowego wyznaczonego przy pomocy wskaźnika Grahama oraz przy pomocy sztucznej sieci neuronowej	92
7. Podsumowanie	128
8. Literatura	131

Załącznik 1. Program służący do tworzenia i szkolenia sztucznej sieci neuronowej przystosowanej do wykorzystania w Uniwersalnej metodzie oceny predykcji stanu zagrożenia pożarowego, obejmującej rejonu niepoddawane i poddawane inertyzacji azotem.

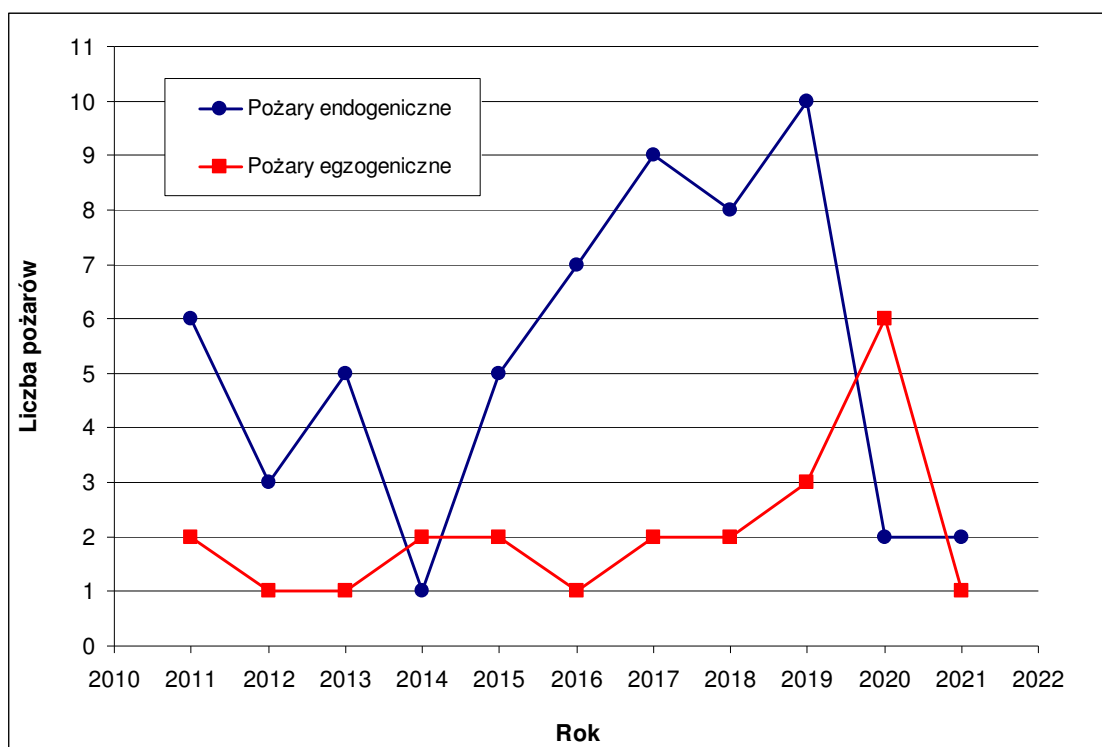
1. Wstęp

Pożary stanowią jedno z najbardziej niebezpiecznych zagrożeń, jakie mogą wystąpić w podziemnych wyrobiskach górniczych kopalń węgla kamiennego. Pojawienie się pożaru w ograniczonej kubaturze sieci wentylacyjnej kopalni może doprowadzić do szybkiego wzrostu stężeń gazów niebezpiecznych dla człowieka oraz do zadymienia dróg ucieczkowych, a odpowiednio duża depresja cieplna pożaru może wywołać zmianę kierunku powietrza płynącego w wyrobiskach. W historii światowego górnictwa węgla kamiennego można również napotkać wiele przykładów, w których pożar podziemny stał się przyczyną wybuchów metanu, często połączonych z wybuchem pyłu węglowego, co w przeważającej większości przypadków niestety kończyło się tragicznie. Dlatego monitorowanie oraz zwalczanie zagrożenia pożarowego w wyrobiskach kopalń węgla kamiennego jest objęte od wielu lat wysokim priorytetem i jest usankcjonowane przepisami.

Jeśli chodzi o polskie regulacje prawne, to Rozporządzenie Ministra Energii (2016) definiuje pożar jako występowanie w wyrobiskach podziemnych otwartego ognia i/lub żarzącej lub palącej się substancji. Dodatkowo ww. przepisy traktują jako pożar występowanie w rejonowym prądzie powietrza dymów lub tlenku węgla w ilości większej niż $25 \text{ dm}^3/\text{min}$. Jeżeli jednak w powietrzu kopalnianym pojawiają się dymy lub tlenek węgla w ilości większej niż $25 \text{ dm}^3/\text{min}$, ale powstały one w wyniku dopuszczalnych procesów technologicznych, to takie zjawisko nie jest postrzegane jako pożar podziemny.

Pożary podziemne można podzielić ze względu na przyczynę powstania na:

- endogeniczne – powstałe wskutek kumulacji ciepła generowanego podczas procesu samozagrzewania się węgla. Do tych pożarów dochodzi najczęściej w obszarach, gdzie rozkruszony węgiel ma kontakt z tlenem, co prowadzi do jego utleniania. Jeżeli ten proces zachodzi w sprzyjających kumulacji ciepła warunkach (przy dostatecznej ilości tlenu i odpowiednio małej prędkości migrującego powietrza), to następuje ciągły przyrost temperatury zagrzewającego się węgla, co może doprowadzić do wystąpienia pożaru,
- egzogeniczne – powstałe z przyczyn zewnętrznych – zazwyczaj w wyniku wadliwej pracy urządzeń, niewłaściwego wykonywania robót lub nieprzestrzegania przepisów BHP. Pożary te (w stosunku do pożarów endogenicznych) występują rzadziej – szczególnie w rejonach, gdzie prowadzi się monitoring parametrów środowiska (Trenczek, 2013). Potwierdzają to prowadzone od wielu lat statystyki, które zamieszcza się w rocznych raportach o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Zgodnie ze statystyką z lat 2011-2021 liczba pożarów endogenicznych w roku najczęściej przewyższa liczbę pożarów egzogenicznych (rys. 1.1.).



Rys. 1.1. Liczba pożarów w polskim górnictwie w latach 2011 – 2021 (Raport roczny, 2022)

Pożary endogeniczne są trudniejsze do ugaszenia i trwają znacznie dłużej niż pożary egzogeniczne – wywołane przyczynami zewnętrznymi (Budryk, 1956). Dlatego właśnie w obowiązującym Rozporządzeniu Ministra Energii (2016) poświęcono obszerny rozdział zagadnieniu wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych.

Istotnym czynnikiem, który ma wpływ na proces samozagrzewania węgla jest prędkość powietrza płynącego przez rozkruszony węgiel (Strumiński, 1996; Cygankiewicz, 2011). Jeżeli bowiem powietrze przepływa przez ognisko samozagrzania ze zbyt dużą prędkością, to dochodzi do wynoszenia wytwarzanego ciepła poza źródło samozagrzania, co przerywa jego kumulację w ognisku. Z drugiej natomiast strony, zbyt mała prędkość powietrza nie dostarcza odpowiedniej ilości tlenu dla podtrzymania tego procesu. W związku z tym obserwuje się pewien krytyczny przedział prędkości powietrza (Świerczek, 2016), który umożliwia podtrzymanie procesu samozagrzewania węgla. Według opracowania Szlązaka (2013) prędkość powietrza konieczna dla podtrzymania tego procesu mieści się w przedziale $0,0015 \text{ m/s} \div 0,015 \text{ m/s}$.

Z powyższego wynika, że krytyczny (z punktu widzenia procesu samozagrzewania węgla) przedział prędkości powietrza może wystąpić tylko w miejscach bardzo słabo przewietrzanych, gdzie mamy do czynienia z migracją powietrza – np. w zrobach ścianowych lub w popękanej caliznie węglowej. Oznacza to, że w przypadku znaczącej większości pożarów endogenicznych nie ma bezpośredniego dostępu do ogniska pożaru, czyli nie da się ich zwalczać metodami aktywnymi. Dlatego też po wystąpieniu pożaru endogenicznego stosuje się czasowe otamowanie całego rejonu, w którym ten pożar zaistniał – co oczywiście skutkuje ogromnymi stratami materialnymi, jakie ponosi kopalnia.

W związku z tym bardzo ważne jest, aby wykryć ognisko samozagrzania węgla w jak najwcześniejszym stadium jego rozwoju, w celu zastosowania odpowiednich środków prewencji pożarowej (np. inertyzacji) – zanim nastąpi konieczność izolacji całego rejonu.

W historii górnictwa węgla kamiennego wielu badaczy podejmowało próbę opracowania metod prognozowania oraz kategoryzacji tego zagrożenia. Np. w 1958 roku Olpiński wprowadził metodę kompleksowego wskaźnika PS (zagrożenia pożarami endogenicznymi pokładów i oddziałów wydobywczych). Metoda ta polega na sumowaniu wartości wskaźnika samozapalności S_z^b oraz siedmiu czynników geologiczno-górnictwowych, które mają wpływ na proces samozapalenia węgla:

$$PS = S_z^b + \sum S_{1-7} \quad (1.1)$$

Na poszczególne czynniki S składają się: S_1 – system wybierania pokładu, S_2 – czystość wybierania pokładu, S_3 – straty powietrza w zrobach, S_4 – sposób likwidacji pustek poeksploatacyjnych, S_5 – zawilgocenie węgla w pokładzie, S_6 – głębokość eksploatacji i stopień spękania pokładu, S_7 – intensywność przewietrzania wyrobisk.

W zależności od wartości wskaźnika PS oddział wydobywczy kwalifikuje się jako:

- niezagrożony pożarami, gdy $PS \leq 120$ °C/min – pod warunkiem, że w danym oddziale nie zaistniał pożar endogeniczny w ostatnich dwóch latach przed klasyfikacją,
- zagrożony pożarami, gdy $PS > 120$ °C/min,
- pole ściany pożarowe – jeżeli w rejonie ściany istnieje czynne pole pożarowe (niezależnie od wartości wskaźnika PS).

W roku 1991 Holek (1991a; 1991b) opracował kompleksowy wskaźnik zagrożenia środowisk ścian zawałowych pożarami endogenicznymi NPS , który oblicza się według wzoru:

$$NPS = \sum k_{1-8} \quad (1.2)$$

Dla kolejnych czynników dobiera się odpowiednie wartości liczbowe. Czynniki te obejmują: k_1 – grubość pokładu, k_2 – nachylenie pokładu, k_3 – długość ściany, k_4 – postęp miesięczny ściany, k_5 – wskaźnik samozapalności, k_6 – głębokość eksploatacji pokładu, k_7 – kategorię zagrożenia metanowego, k_8 – sposób przewietrzania ściany.

Kategorie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody NPS przedstawiono w tabelicy 1.1.

Tablica 1.1. Kategorie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody NPS

Kategoria zagrożenia ścian pożarami endogenicznymi	Wartość wskaźnika NPS	Ocena zagrożenia pól wybierkowych ścian zawałowych pożarami endogenicznymi
I	$NPS \leq 6$	pole wybierkowe ściany o małym zagrożeniu
II	$6 > NPS \leq 11$	pole wybierkowe ściany o średnim zagrożeniu
III	$NPS > 11$	pole wybierkowe ściany o dużym zagrożeniu

Okazało się jednak, że skuteczność prognoz według wymienionych metod była niezadowalająca. Dlatego w 2001 roku Trenczek przedstawił nową metodę wskaźnikową *WPS*, którą stosuje się na etapie projektowania eksploatacji. W metodzie tej określa się 12 następujących czynników: C_1 – wskaźnik samozapalności węgla, C_2 – okres inkubacji pożaru, C_3 – temperatura pierwotna górotworu, C_4 – grubość warstwy węgla przedostająca się do zrobów, C_5 – temperatura powietrza w ścianie, C_6 – prędkość powietrza w ścianie, C_7 – okres rozruchu ściany, C_8 – postęp ściany, C_9 – okres likwidacji ściany, C_{10} – stopień migracji powietrza przez zrob, C_{11} – stosowanie profilaktyki pożarowej, C_{12} – stosowanie profilaktyki zagrożenia tapaniami. Każdemu z wymienionych czynników przypisuje się wagę: 0; 0,5; 0,8 lub 1, która określa wpływ czynnika na poziom zagrożenia. Poziom zagrożenia pożarem endogenicznym określa się przez porównanie wartości uzyskanych z ww. czynników z hierarchicznie posortowanymi ścianami będącymi wzorcem (w metodzie wyznaczono 300 ścian wzorcowych posortowanych od najmniej do najbardziej zagrożonej pożarowo). Do zbioru S (300 ścian wzorcowych) dodaje się wartość wag uzyskanych dla projektowanej ściany i wyznacza najwyższą hierarchicznie wartość liczbową L_{max} (ściany-wzorca), z którą będzie zestawiona projektowana ściana. Wskaźnik *WPS* oblicza się więc według wzoru:

$$WPS = \frac{L_{max}}{S} \quad (1.3)$$

Stopnie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody *WPS* przedstawiono w tablicy 1.2.

Tablica 1.2. Stopnie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody *WPS*

Stopnie zagrożenia ścian pożarami endogenicznymi	Wartość wskaźnika <i>WPS</i>	Ocena zagrożenia ścian pożarami endogenicznymi
I	$WPS < 0,33$	ściana niezagrożona pożarem
II	$0,33 \leq WPS < 0,66$	ściana zagrożona pożarem
III	$WPS \geq 0,66$	ściana pożarowa

Następnie – w oparciu o wskaźnik *WPS* – opracowano uproszczony wskaźnik pożarowości ścian μWPS (Trenczek, 2005), dla bieżącej oceny zagrożenia ściany będącej w ruchu. Dlatego w tej metodzie nie uwzględniono okresu rozruchu ściany (w metodzie *WPS* był to czynnik C_7) i okresu likwidacji ściany (w metodzie *WPS* był to czynnik C_9). Stopnie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody μWPS przedstawiono w tablicy 1.3.

Tablica 1.3. Stopnie zagrożenia pożarami endogenicznymi według metody μWPS

Stopnie zagrożenia ścian pożarami endogenicznymi	Wartość wskaźnika μWPS	Ocena zagrożenia ścian pożarami endogenicznymi
I	$\mu WPS < 5$	ściana niezagrożona pożarem
II	$5 \leq \mu WPS < 8$	ściana zagrożona pożarem
III	$\mu WPS \geq 8$	ściana pożarowa

W obowiązującym Rozporządzeniu Ministra Energii (2016) nie uwzględniono omówionych metod wskaźnikowych. Tym niemniej mogą one posłużyć do poprawnego prognozowania poziomu zagrożenia pożarowego – szczególnie najnowsze z wymienionych, czyli wskaźniki WPS i μWPS .

Jeśli natomiast chodzi o zapisy w obowiązujących przepisach górniczych (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016), dotyczące monitorowania stanu zagrożenia pożarowego, to wskazują one jednoznacznie, że dla wykrycia oznak pożaru endogenicznego konieczne jest pobieranie próbek powietrza do analizy chemicznej przynajmniej dwa razy w tygodniu ze stacji pomiarowych zlokalizowanych:

- w przepływowych prądach powietrza dopływających i wypływających z poszczególnych ścian,
- w prądach powietrza dopływających do wyrobisk korytarzowych oraz wypływających z tych wyrobisk,
- przy zrobach w chodniku wentylacyjnym, dla powietrza wypływającego ze zrobów lub pobieranego za pomocą rur lub węży próbobiorczych zainstalowanych w zrobach.

Natomiast próbki powietrza pobrane z tam izolacyjnych pobiera się co najmniej raz w miesiącu, a próbki gazów z rurociągu odmetanowania pobiera się nie rzadziej niż raz w tygodniu.

Następnie w pobranych próbkach powietrza oznacza się stężenia: tlenu (z dokładnością co najmniej $\pm 0,1\%$ objętości), dwutlenku węgla (z dokładnością co najmniej $\pm 0,03\%$ objętości), tlenku węgla (z dokładnością co najmniej $\pm 0,0005\%$ objętości), metanu (z dokładnością co najmniej $\pm 0,05\%$ objętości) i azotu (z dokładnością co najmniej $\pm 0,5\%$ objętości lub jako dopełnienie do 100% objętości).

Dysponując wartościami stężenia wymienionych gazów, dla stacji pomiarowych wylotowych (przepływowe prądy powietrza i prądy wypływające z wyrobisk korytarzowych, przewietrzanych za pomocą wentylacji odrębnej), wyznacza się wskaźnik przyrostu tlenku węgla (1.4) i wskaźnik ilości tlenku węgla (1.5) – według następujących wzorów:

$$\Delta CO = CO - CO^x \quad (1.4)$$

gdzie:

ΔCO – wskaźnik przyrostu tlenku węgla [%],

CO – zawartość tlenku węgla na stacji pomiarowej wylotowej [%],

CO^x – zawartość tlenku węgla na stacji pomiarowej wlotowej [%],

$$\dot{V}_{CO} = 10\dot{V} \cdot q'_{CO} \quad (1.5)$$

gdzie:

\dot{V}_{CO} – wskaźnik ilości tlenu węgla [dm^3/min],

\dot{V} – ilość powietrza na stacji pomiarowej [m^3/min],

q'_{CO} – stężenie tlenu węgla na stacji pomiarowej [%].

Ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym dla stacji pomiarowych zlokalizowanych w przepływowych prądach powietrza jest przeprowadzana według kryteriów przedstawionych w tabelicy 1.4.

Tablica 1.4. Kryteria zagrożenia pożarowego według wskaźników \dot{V}_{CO} i ΔCO

Wskaźnik ilości tlenu węgla \dot{V}_{CO} [l/min] i przyrostu tlenu węgla ΔCO [%]	Sposób postępowania
$0 < \dot{V}_{CO} \leq 10$ przy $0,0010 < \Delta CO \leq 0,0026$	Wzmoczona obserwacja w kontrolowanym rejonie, zwiększona częstotliwość pobierania prób powietrza.
$10 < \dot{V}_{CO} \leq 25$ przy $\Delta CO \leq 0,0026$	Należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie, przy czym plan tych prac opracowuje kierownik działu wentylacji, a zatwierdza kierownik ruchu zakładu górniczego.
$\Delta CO > 0,0026$ lub $\dot{V}_{CO} > 25$	Akcja przeciwpożarowa.

Natomiast dla stacji pomiarowych zlokalizowanych przy zrobach ścianowych oraz przy tamach izolacyjnych określa się wskaźnik Grahama, według następującego wzoru:

$$G = \frac{CO}{0,265N_2 - O_2} \quad (1.6)$$

gdzie:

CO – stężenie tlenu węgla [%],

N_2 – stężenie azotu [%],

O_2 – stężenie tlenu [%].

A następnie klasyfikuje się zagrożenie pożarowe według kryteriów przedstawionych w tabelicy 1.5.

Tablica 1.5. Kryteria zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama

Wskaźnik Grahama G	Sposób postępowania
$0 < G \leq 0,0025$	Sytuacja normalna — nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach.
$0,0025 < G \leq 0,0070$	Wzmoczona obserwacja atmosfery w zrobach, zwiększona częstotliwość pobierania prób powietrza.
$0,0070 < G \leq 0,0300$	Należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie, przy czym plan tych prac opracowuje kierownik działu wentylacji, a zatwierdza kierownik ruchu zakładu górniczego.
$G > 0,0300$	Akcja przeciwpożarowa

Zatem zgodnie z obowiązującymi przepisami (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016) wskaźnik Grahama jest najważniejszym wyznacznikiem stanu zagrożenia pożarem endogenicznym. Jako jedyny jest skategoryzowanym wskaźnikiem przeznaczonym do oceny stanu zagrożenia pożarowego panującego w zrobach ścianowych i za tamami izolacyjnymi.

2. Teza, cel i struktura pracy

W przypadku wzrostu zagrożenia pożarowego Rozporządzenie Ministra Energii (2016) obliguje do zwiększenia częstotliwości pobierania próbek powietrza do badań i/lub do wprowadzenia profilaktyki pożarowej, przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie – zgodnie z kryteriami oceny zagrożenia pożarowego według wskaźników V_{CO} , ΔCO (tablica 1.4.) i wskaźnika Grahama (tablica 1.5.).

W ramach profilaktyki pożarowej, w czynnych ścianach wydobywczych, najczęściej stosuje się następujące środki prewencji (Trenczek, 2011):

- inertyzację zrobów,
- przemulanie zrobów,
- regulację potencjałów aerodynamicznych,
- antypirogeny.

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną jest profilaktyka pożarowa polegająca na wprowadzaniu gazów inertnych (azotu lub/i dwutlenku węgla) do zrobów. Inercję, czyli skuteczne obniżanie zawartości tlenu w gazach zrobowych można także uzyskać przy obecności metanu w dużych stężeniach. Oczywiście, zastosowanie każdego z wymienionych gazów wymaga indywidualnego podejścia – głównie ze względu na ich zróżnicowane własności fizyczne (np. gęstość), a także z uwagi na odmienną sytuację geologiczno-górnictw oraz rozkład potencjałów aerodynamicznych w każdym rejonie wydobywczym.

Głównym powodem stosowania gazów inertnych jest idea wyparcia przez nie tlenu z obszaru samozagrzewającego się węgla, co spowalnia (przerzywa) ten proces. Z badań przeprowadzonych przez Szlązaka (2018) wynika, że jeżeli zawartość tlenu w powietrzu spadnie poniżej 2%, to proces spalania substancji stałych nie będzie zachodził. Na podstawie tych badań określono również, że bezpieczne stężenie tlenu (z punktu widzenia procesu samozapalenia węgla) nie powinno przekraczać 8%.

Zgodnie z opracowaniem Szlązaka i innych (2011) najczęściej stosowanym gazem inertnym w profilaktyce pożarowej kopalń węgla kamiennego jest azot. Według wspomnianych autorów przyczyniły się do tego następujące czynniki:

- możliwość dostarczania ciekłego azotu cysternami,
- łatwość zgazowania ciekłego azotu,
- możliwość uzyskania azotu z powietrza,
- bezpieczeństwo jego stosowania.

Biorąc pod uwagę wieloletnią praktykę górnictw oraz wnioski płynące z szeregu przeprowadzonych badań dotyczących zagrożenia pożarowego nie ulega wątpliwości, że stosowanie azotu jako gazu inertnego sprzyja przerwaniu/spowolnieniu procesu samozagrzewania węgla. Jednak pojawienie się dodatkowej ilości tego gazu w próbce powietrza pobranej do badań okazuje się być istotnym problemem podczas interpretacji stanu zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama. Jak już wspomniano wcześniej wymieniony wskaźnik – w obowiązujących przepisach (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016) – jest jedynym skategoryzowanym narzędziem do oceny stanu zagrożenia pożarowego występującego w zrobach ścian oraz za tamami izolacyjnymi.

Wskaźnik Grahama został opracowany nieco ponad 100 lat temu (Graham, 1921), kiedy w kopalniach węgla kamiennego nie stosowano jeszcze inertyzacji azotem – stąd poprawność oceny według tego wskaźnika była w tamtych czasach wystarczająca. Obecnie, kiedy inertyzacja stała się – rzecz można – elementem technologii wydobywania węgla kamiennego systemem ścianowym, często zdarza się, że wykorzystywany do inertyzacji azot zaburza w sposób zasadniczy tę ocenę.

W praktyce górniczej można napotkać sytuacje, w których otrzymana wartość wskaźnika Grahama nie odzwierciedla prawidłowo rzeczywistego stanu zagrożenia pożarowego. Zaobserwowano, że dotyczy to pewnych charakterystycznych przypadków mających wpływ na zawyżanie jak i zaniżanie tego zagrożenia. Ponadto zdarza się, że podczas wyznaczania wskaźnika Grahama można uzyskać ujemne wartości, których klasyfikacja podana w przepisach nie uwzględnia.

Możliwość pojawienia się wartości wskaźnika Grahama, na podstawie których można niepoprawnie określić stan zagrożenia pożarowego jest bardzo poważnym problemem. Może to bowiem skutkować podjęciem nieprawidłowych decyzji poprzez przeszacowanie stanu zagrożenia – co może prowadzić do zwiększenia kosztów profilaktyki pożarowej, lub poprzez niedoszacowanie stanu zagrożenia – co z kolei może wywołać bardzo poważne konsekwencje.

Uwagi przedstawione we wstępie oraz świadomość tego, jak negatywny wpływ na bezpieczeństwo w kopalniach może mieć niepewna interpretacja stanu zagrożenia pożarem endogenicznym podyktowały konieczność podjęcia badań w tym zakresie. Wyniki tych badań ujęto w niniejszej rozprawie doktorskiej zatytułowanej: „**Nowa metoda wykorzystania wskaźnika Grahama do oceny stanu zagrożenia pożarowego w rejonach ścian inertyzowanych azotem**”.

W pracy postawiono dwie następujące tezy:

- 1. Istnieje możliwość opracowania kryteriów stosowania wskaźnika Grahama dla zwiększenia wiarygodności oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym w rejonach ścianowych, w których stosuje się azot do inertyzacji.**
- 2. Możliwe jest wyznaczanie stanu zagrożenia pożarowego w oparciu o sztuczną sieć neuronową, stopniując to zagrożenie analogicznie do wskaźnika Grahama.**

Udowodnienie tych tez pozwoli zrealizować następujące cele użytkowe pracy:

- **opracowanie zasad stosowania wskaźnika Grahama dla zwiększenia wiarygodności oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym w rejonach wydobywczych kopalń węgla kamiennego,**
- **wyznaczenie kryterium oceny stanu zagrożenia pożarowego dla rejonów ścian poddawanych inertyzacji azotem, w których stan zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama wskazuje na sytuację normalną ($0 < G \leq 0,0025$),**

- opracowanie uniwersalnej metody predykcji stanu zagrożenia pożarowego, opartej na sztucznej sieci neuronowej, obejmującej rejonu ścian niepoddawane i poddawane inertyzacji azotem.

Struktura pracy

W rozdziale trzecim opisano analizę wskaźnika Grahama w kontekście możliwości występowania przypadków niewiarygodnych. Wykazano, że przypadki takie wynikają z matematycznej struktury wzoru używanego do wyznaczania wartości tego wskaźnika. Wykorzystując odpowiednie narzędzia matematyczne – m.in. test t-Studenta – opracowano przedział wiarygodności wskaźnika Grahama, który na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącym co najmniej 95% pozwala twierdzić, że wskaźnik Grahama poprawnie określa stan zagrożenia pożarowego.

W rozdziale czwartym omówiono problem wpływu zwiększonych stężeń azotu na wartość wskaźnika Grahama. Wykazano, że w rejonach ścian, w których stosuje się azot jako gaz inertny może dochodzić do sytuacji, w której wartość wskaźnika Grahama jest zaniżona w stosunku do rzeczywistego stanu zagrożenia pożarem endogenicznym. Okazało się, że kryterium wiarygodności wskaźnika Grahama (opisane w rozdziale trzecim) może być niewystarczające w przypadku próbek powietrza pobranych z miejsc, gdzie stosuje się inertyzację przy użyciu azotu.

Biorąc to pod uwagę – w rozdziale piątym – przedstawiono sposób opracowania dodatkowych kryteriów dla wskaźnika Grahama, które powinny być stosowane w przypadku, gdy próbka powietrza zawiera azot w ilości większej bądź równej 80%, a według wymienionego wskaźnika stężenia gazów zawarte w tej próbce nie wskazują na występowanie zagrożenia pożarem endogenicznym.

W rozdziale szóstym zaprezentowano nowe podejście do problemu niewiarygodnych wartości wskaźnika Grahama, oparte na teorii sztucznych sieci neuronowych. Objasniono sposób tworzenia perceptronu wielowarstwowego, który przystosowano do określania stanu zagrożenia pożarem endogenicznym. Przeanalizowano rezultaty analizy dokładności dopasowania wyników pochodzących z różnych topologii opracowanych sieci neuronowych. Pod koniec tego rozdziału przedstawiono porównanie poziomów zagrożenia pożarowego wyznaczonego przy pomocy wskaźnika Grahama oraz wybranej sztucznej sieci neuronowej.

3. Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama

Na początku rozważań związanych z możliwością występowania niepoprawnej klasyfikacji zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama przedstawiono różne stanowiska badaczy z całego świata, którzy podejmowali ten temat.

Następnie dokładnie przeanalizowano wzór służący do wyznaczania wartości tego wskaźnika w celu znalezienia możliwych przyczyn, które wpływają na wiarygodność wskaźnika Grahama.

W kolejnym kroku, posługując się 2 777 elementową próbą statystyczną, wyznaczono przedział wiarygodności wskaźnika Grahama, w którym z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% można twierdzić, że wskaźnik ten poprawnie klasyfikuje stan zagrożenia pożarem endogenicznym.

3.1. Problem nieprawidłowych wartości wskaźnika Grahama w literaturze światowej

W literaturze światowej można znaleźć opracowania, w których zwraca się uwagę na występowanie bardzo niskich wartości mianownika wskaźnika Grahama, dla których generowane są nieprawidłowo wysokie stany zagrożenia pożarowego. Wielu badaczy mówi także o problemach występujących podczas stosowania tego wskaźnika, wynikających z podwyższonych stężeń azotu lub metanu w próbkach pobranych do analizy.

Na przykład MacKenzie-Wood i Strang (1990) uważają, że jeżeli ubytek tlenu (mianownik wskaźnika Grahama) jest mniejszy od 0,2 to należy zachować ostrożność podczas interpretacji takich wyników z powodu możliwości wystąpienia poważnych błędów.

Natomiast Mitchell (1996) oraz Brady (2007 i 2008) są zdania, że gdy ubytek tlenu jest mniejszy od 0,3, to wskaźnik Grahama może być zawodny.

Podobnie twierdzą Ray i inni (2003), którzy stoją na stanowisku, że wskaźnik Grahama ma wady, gdy ubytek tlenu jest mniejszy niż 0,3.

Z kolei Trenczek (2003) jest zdania, że jeżeli gazy pobrane z zagrożonego rejonu będą rozcieńczane gazem inertnym (np. azotem), to uzyskane wyniki mogą utrudniać lub nawet uniemożliwiać ocenę stanu zagrożenia pożarem endogenicznym. Według niego, jeżeli do punktu pomiarowego będą dopływać gazy inertne z pominięciem miejsca samozagrzenia węgla, to w takim przypadku ocena stanu zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama jest niewystarczająca.

Natomiast Panigrahi i Bhattacharjee (2004) rozważali w swojej pracy przydatność popularnych wskaźników pożarowych (między innymi wskaźnika Grahama) do wyznaczania stanu zagrożenia pożarowego podczas samozagrzewania się węgla w filarach węglowych. Podali oni, że wskaźniki, które w mianowniku zawierają ubytek tlenu nie są odpowiednie do stosowania w atmosferze zawierającej wysokie stężenie metanu.

Cliff (2005) zauważył, że podczas stosowania inertyzacji należy zwrócić uwagę na interpretację zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama. Według niego techniki inertyzacji mogą bowiem zaburzyć niedobór tlenu i sztucznie obniżyć ten wskaźnik.

Singh i inni (2007) podali w swojej pracy, że wskaźnik Grahama jest jednym z najskuteczniejszych wskaźników do oceny intensywności zagrzewania węgla. Jednak jedną

z niedogodności jego stosowania jest możliwość występowania zakłóceń, gdy dochodzi do rozcieńczenia produktów zgrzewania węgla przez azot lub powietrze charakteryzujące się niedoborem tlenu.

Moraru i Babut (2010) sądzą, że gdy ubytek tlenu w obliczaniu wartości wskaźnika Grahama jest mniejszy niż 0,3, to rozdzielczość stosowanych urządzeń pomiarowych odgrywa bardzo dużą rolę – ponieważ każda niewielka odchyłka od rzeczywistych stężeń tlenu i azotu może powodować problem z określeniem wartości tego wskaźnika.

Natomiast Muller i inni (2017) stoją na stanowisku, że minimalny ubytek tlenu w przypadku tego wskaźnika powinien znajdować się w przedziale od 0,1 do 0,3, gdyż odrzucenie wszystkich przypadków mniejszych od 0,3 może powodować utratę potencjalnie ważnych wyników.

Bajic i inni (2020a; 2020b) uważają, że próbki powietrza o zawartości tlenu zbliżonej do powietrza atmosferycznego mogą skutkować nieprawidłową wartością niedoboru tlenu (mianownika wskaźnika Grahama). Według nich, podobny problem występuje w przypadku próbek rozcieńczonych gazem zrobotowym.

W pracy zbiorowej zatytułowanej „Poradnik górnika” (tom III) również porusza się tematykę zbyt niskich wartości mianownika wskaźnika Grahama. Otóż autorzy poradnika uważają, że jeżeli wartość tego mianownika jest mniejsza od 1, to wskaźnik Grahama wykazuje znaczne wahania, które utrudniają interpretację wyników analiz próbek powietrza.

W związku z powyższym celowe stało się dokładne przeanalizowanie problemu nieprawidłowych wartości wskaźnika Grahama.

3.2. Analiza wzoru służącego do wyznaczania wartości wskaźnika Grahama

Przedmiotową analizę przeprowadzono dla wskaźnika Grahama wyznaczonego według następującego wzoru (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016):

$$G = \frac{\text{CO}}{0,265\text{N}_2 - \text{O}_2} \quad (3.1)$$

gdzie: CO – stężenie tlenku węgla [%],
N₂ – stężenie azotu [%],
O₂ – stężenie tlenu [%].

Dla ułatwienia przeprowadzenia analizy zamiast oznaczeń O₂, N₂, CO oraz G wprowadzono standardowe oznaczenia funkcji, czyli:

- x, y, t - jako zmienne niezależne (argumenty funkcji),
 - z - jako zmienna zależna (wartość funkcji),
- otrzymując:

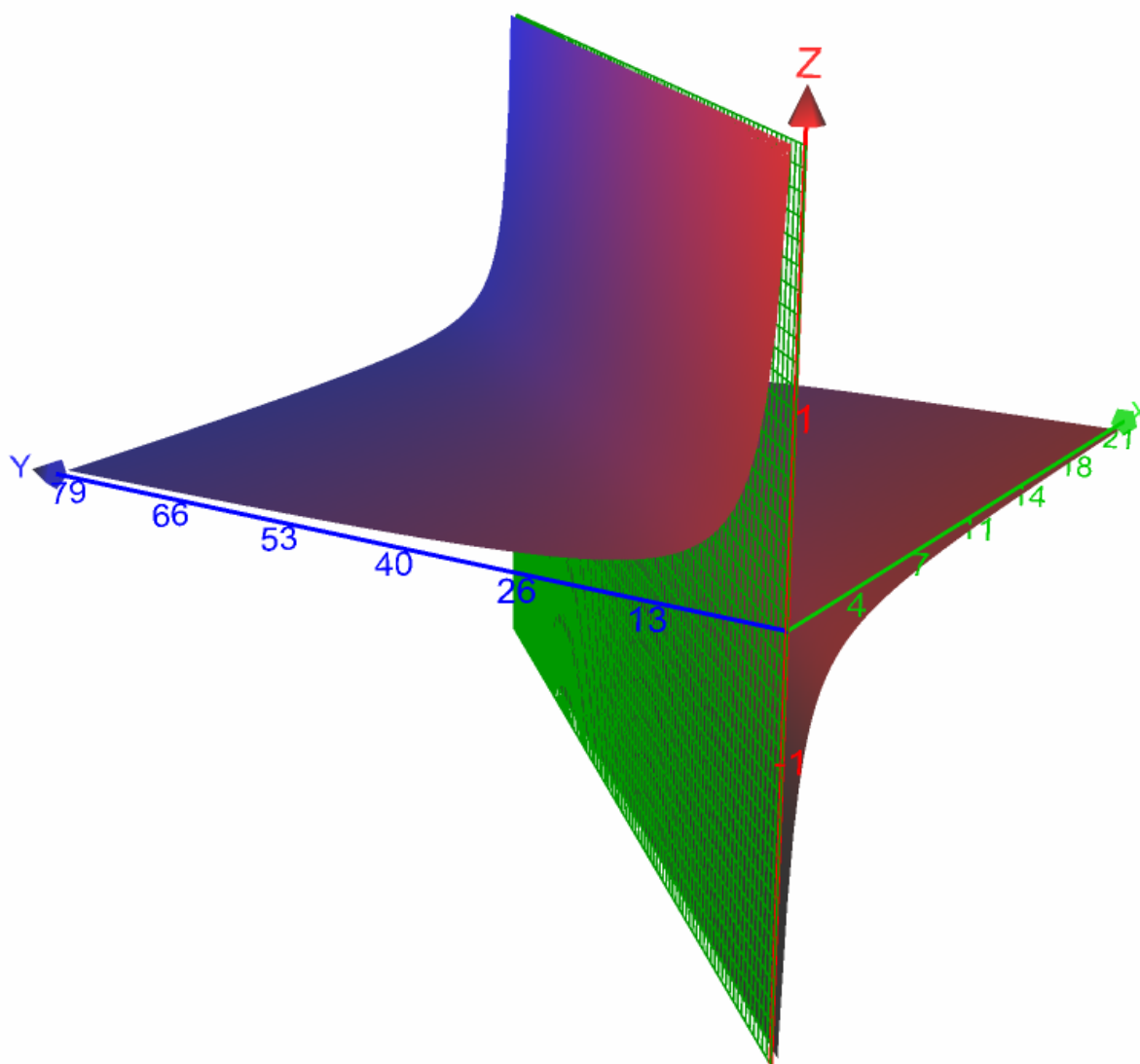
$$z = t\left(\frac{1}{0,265y - x}\right), \quad x > 0, y > 0, t > 0 \quad (3.2)$$

Zmienna t reprezentuje tlenek węgla i wpływa proporcjonalnie na wartość funkcji (3.2), natomiast o przebiegu tej funkcji decyduje zależność ujęta w nawias, czyli:

$$z = \frac{1}{0,265y - x}, \quad x > 0, y > 0, 0,265y - x > 0 \quad (3.3)$$

Dziedziną funkcji (3.3) jest zbiór wszystkich dodatnich liczb rzeczywistych, z wykluczeniem przypadków, w których dochodzi do zerowania się mianownika.

Na rysunku 3.1. przedstawiono wykres funkcji (3.3).



Rys. 3.1. Graficzne przedstawienie zależności (3.3)

Z analizy rysunku 3.1. wynika, że w rozpatrywanej funkcji (3.3) mamy do czynienia z dwoma płaszczyznami granicznymi:

1. Pierwsza płaszczyzna przechodzi przez osie x , y układu współrzędnych. W sąsiedztwie tej płaszczyzny wartości funkcji (3.3) zdążają asymptotycznie do zera, gdy x lub y dążą do nieskończoności. Ponieważ jednak zmiennym x i y odpowiadają stężenia tlenu i azotu,

dlatego w rzeczywistości nie osiągają one bardzo wysokich (nieskończonych) wartości, gdyż jak wiadomo żaden ze składników powietrza nie może przekroczyć 100%.

2. Druga płaszczyzna powstaje w wyniku zerowania się mianownika funkcji (3.3), czyli gdy $0,265y - x = 0$. W jej pobliżu wartości funkcji dążą asymptotycznie do $\pm\infty$ i to niezależnie od wartości zmiennej t , która w przypadku funkcji (3.2) reprezentuje stężenie tlenu węgla.

Należy w tym miejscu nadmienić, że w praktyce nie spotyka się przypadków wyzerowania się mianownika funkcji (3.2) i (3.3). Dzieje się tak dlatego, że stężenia tlenu i azotu są zazwyczaj oznaczane na tym samym poziomie dokładności, który wynosi 0,01%. W związku z tym przemnożenie stężenia azotu przez współczynnik 0,265 powoduje, że odjemna – w mianowniku funkcji (3.2) i (3.3) – jest innego rzędu niż odjemnik.

Z analizy wzoru służącego do wyznaczania wartości wskaźnika Grahama można wyciągnąć następujące wnioski:

- wskaźnik Grahama może osiągać bardzo wysokie wartości, gdy jego mianownik $0,265N_2 - O_2$ zbliża się do zera,
- wskaźnik Grahama może osiągać niskie wartości, gdy jego mianownik $0,265N_2 - O_2$ jest wysoki (gdy np. mamy do czynienia ze znacznym spadkiem stężenia tlenu w próbce powietrza),
- wskaźnik Grahama może przyjmować wartości ujemne, gdy $0,265N_2 < O_2$ (Słowik i Świerczek, 2014),
- wszystkie przedstawione wyżej przypadki mogą zachodzić niezależnie od stężenia tlenu węgla w próbce powietrza.

3.3. Próba statystyczna poddana analizie

Próba statystyczna poddana analizie została sporządzona z 2 777 wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza kopalnianego pobranych ze zrobów ścianowych i z za tam izolacyjnych. Statystyki opisowe dla tej próby przedstawiono w tabelicy 3.1.

Tablica 3.1. Statystyki opisowe dla 2 777 elementowej próby statystycznej

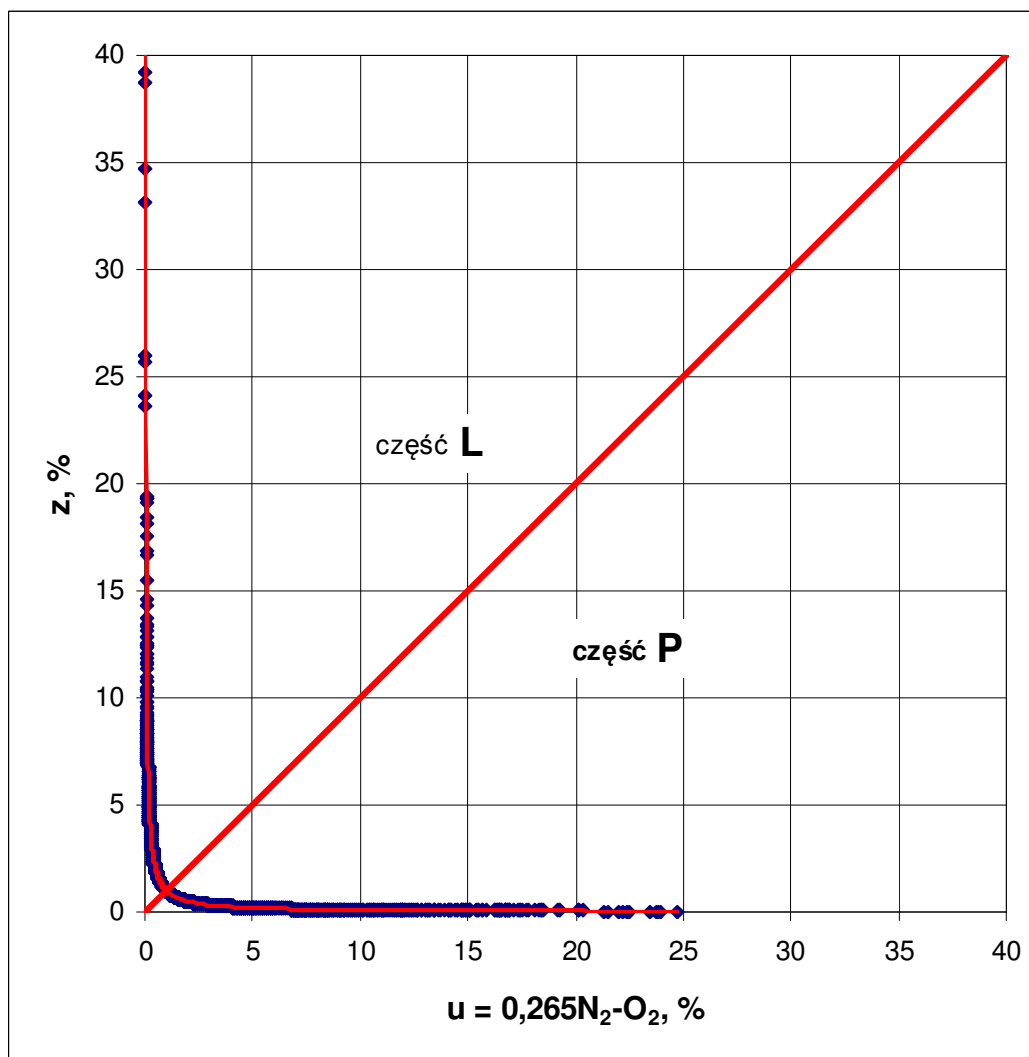
Zmienna	Ilość przypadków	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	Odch. std.
Tlen, [%]	2777	17,8	19,4	0,3	20,9	17,1	20,3	4,1
Azot, [%]	2777	77,0	79,1	1,4	97,5	77,4	79,7	9,6
Metan, [%]	2777	4,3	0,4	0,0	97,2	0,0	2,9	12,0
Tlenek węgla, [%]	2777	0,0034	0,0011	0,0001	0,0437	0,0003	0,0034	0,0060
Wskaźnik Grahama	2777	0,0018	0,0010	0,000004	0,1143	0,0005	0,0022	0,0043

Wyniki analiz chromatograficznych, składających się na przygotowaną próbę statystyczną, obejmowały wszystkie stany zagrożenia pożarowego, czyli: sytuację normalną (brak zagrożenia pożarowego), podwyższony poziom zagrożenia i pożar. Największa ilość przypadków była oczywiście reprezentowana przez sytuację normalną, natomiast dwa pozostałe stany zagrożenia miały proporcjonalnie mniejszą ilość przypadków – adekwatnie do rzeczywistych warunków panujących w kopalniach.

W związku z tym, że za problem z niewiarygodnymi wartościami wskaźnika Grahama odpowiada jego mianownik, w dalszej części pracy przyjęto, że w zależności (3.3) mianownik zostanie zastąpiony zmienną u . Wtedy otrzymamy wzór na hiperbolę:

$$z = \frac{1}{u}, \quad u > 0 \quad (3.4)$$

Na rysunku 3.2. przedstawiono hiperbolę (3.4) opracowaną dla analizowanej próby statystycznej, przy czym dla większej przejrzystości rysunku ograniczono skalę do $z \leq 40$ i $u \leq 40$.



Rys. 3.2. Rozkład punktowy zależności $z = 1/(0,265N_2 - O_2)$ dla przygotowanej próby statystycznej

Analizowaną próbę statystyczną podzielono na dwie symetryczne podpróby wykorzystując w tym celu oś symetrii wyznaczoną dla hiperboli $z = 1/(0,265N_2 - O_2)$ – rysunek 3.2.:

- pierwsza podpróba obejmowała przedział z lewej strony osi symetrii $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1$ i została oznaczona jako L. W skład tej podpróby weszło 1 166 elementów;
- druga podpróba została oznaczona jako P, ponieważ objęła przedział $1 < 0,265N_2 - O_2$ (odcinek hiperboli po prawej stronie osi symetrii). W skład podpróby P weszło 1 611 elementów.

Podstawowe statystyki opisowe dla podprób L i P przedstawiono w tablicy 3.2.

Tablica 3.2. Statystyki opisowe podprób L i P

Zmienna	Ilość przypadków	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny kwartył	Górny kwartył	Odch. std.
Podpróba L								
Tlen, [%]	1166	19,9	20,4	0,3	20,9	20,1	20,7	2,7
Azot, [%]	1166	76,7	79,0	1,4	79,7	78,4	79,2	10,0
Metan, [%]	1166	3,1	0,2	0,0	97,2	0,0	1,1	12,5
Tlenek węgla, [%]	1166	0,0007	0,0004	0,0001	0,0054	0,0001	0,0009	0,0009
Wskaźnik Grahama	1166	0,0023	0,0010	0,0001	0,1143	0,0005	0,0020	0,0064
Podpróba P								
Tlen, [%]	1611	16,2	17,9	0,3	20,1	15,0	19,3	4,3
Azot, [%]	1611	77,1	79,5	5,7	97,5	76,8	80,3	9,4
Metan, [%]	1611	5,2	0,9	0,0	92,8	0,0	4,5	11,5
Tlenek węgla, [%]	1611	0,0054	0,0024	0,0001	0,0437	0,0010	0,0066	0,0072
Wskaźnik Grahama	1611	0,0015	0,0011	0,000004	0,0124	0,0004	0,0023	0,0015

Z przedstawionych statystyk opisowych podprób L i P wynika, że:

- wartość środkowa wskaźnika Grahama dla obydwu podprób jest prawie taka sama,
- wartości dolnego i górnego kwartyła wskaźnika Grahama dla tych podprób znajdują się na porównywalnym poziomie,
- analizowane podpróby wykazują wyraźne zróżnicowanie wskaźnika Grahama w zakresie wartości maksymalnych i minimalnych – podpróba L cechuje się wartościami wyższymi niż podpróba P,
- tlenek węgla w podpróbach wykazuje wyraźne zróżnicowanie stężeń średnich, środkowych, dolnego i górnego kwartyła. W podpróbie L występują wyraźnie niższe stężenia tlenu węgla, co jest odwrotnie proporcjonalne do wartości wskaźnika Grahama.

W dalszej części rozprawy przeprowadzono szczegółową analizę opracowanej próby statystycznej. Celem tej analizy było rozpoznanie rozkładu i kształtowania się mianownika wskaźnika Grahama oraz określenie zakresów, w których występują nietypowe wartości tego wskaźnika. Próbę statystyczną podzielono więc na mniejsze przedziały o rozpiętości wynoszącej 0,1. Taka dokładność jest wystarczająca dla znalezienia odstających wartości. A poza tym wymieniona dokładność jest też wspomniana w omówionej wcześniej analizie literatury światowej.

Uzyskano więc przedziały, które opisano symetrycznie wzdłuż prostej $0,265N_2 - O_2 = 1$ (czyli wzdłuż osi symetrii przedstawionej na rysunku 3.2.). Dla przykładu: symetrycznym odpowiednikiem przedziału L10 ($0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$) podpróby L był przedział P10 ($1/1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,9$) w podpróbie P, zaś przedziałowi L9 ($0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,9$) odpowiadał przedział P9 ($1/0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,8$) itd.

Tablica 3.3. przedstawia odpowiadające sobie symetryczne przedziały dla obu podprób.

Tablica 3.3. Symetryczne przedziały wyznaczone dla podprób L i P

Przedziały dla podpróby L:	Przedziały dla podpróby P:
L1: $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$	P1: $1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$
L2: $0,1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,2$	P2: $1/0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$
L3: $0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,3$	P3: $1/0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,2$
L4: $0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,4$	P4: $1/0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,3$
L5: $0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,5$	P5: $1/0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,4$
L6: $0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,6$	P6: $1/0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,5$
L7: $0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,7$	P7: $1/0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,6$
L8: $0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,8$	P8: $1/0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,7$
L9: $0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,9$	P9: $1/0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,8$
L10: $0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$	P10: $1,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,9$

W dalszej części pracy przedstawiono statystyki podstawowe dla przedziałów podanych tablicy 3.3.

Tablica 3.4. Statystyki podstawowe obu ramion hiperboli z rozbiem na przedziały o rozpiętości 0,1

Zmienna	Ilość przypadków	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	Odch. std.
przedział L1: $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$								
Tlen, [%]	66	19,4	20,8	0,3	20,9	20,1	20,9	4,8
Azot, [%]	66	73,4	78,8	1,4	79,1	76,1	79,0	18,1
Metan, [%]	66	7,0	0,2	0,0	97,2	0,0	3,6	22,7
Tlenek węgla, [%]	66	0,0004	0,0002	0,0001	0,0020	0,0001	0,0006	0,0004
Wskaźnik Grahama	66	0,0153	0,0071	0,0010	0,1143	0,0027	0,0150	0,0225
przedział L2: $0,1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,2$								
Tlen, [%]	156	20,0	20,8	0,5	20,8	20,7	20,8	3,6
Azot, [%]	156	75,9	79,0	2,4	79,2	78,7	79,1	13,7
Metan, [%]	156	4,0	0,1	0,0	96,1	0,0	0,4	17,1
Tlenek węgla, [%]	156	0,0003	0,0002	0,0001	0,0016	0,0001	0,0003	0,0003
Wskaźnik Grahama	156	0,0019	0,0011	0,0005	0,0112	0,0006	0,0021	0,0020
przedział L3: $0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,3$								
Tlen, [%]	175	20,3	20,7	1,0	20,8	20,6	20,7	2,1
Azot, [%]	175	77,5	79,0	4,6	79,2	78,7	79,1	7,9
Metan, [%]	175	2,0	0,1	0,0	93,5	0,0	0,6	9,9
Tlenek węgla, [%]	175	0,0004	0,0002	0,0001	0,0031	0,0001	0,0004	0,0005
Wskaźnik Grahama	175	0,0015	0,0008	0,0003	0,0110	0,0004	0,0017	0,0019
przedział L4: $0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,4$								
Tlen, [%]	128	20,3	20,6	4,3	20,7	20,5	20,6	1,5
Azot, [%]	128	77,9	79,0	17,6	79,3	78,6	79,2	5,8
Metan, [%]	128	1,6	0,2	0,0	76,8	0,1	0,8	7,2
Tlenek węgla, [%]	128	0,0004	0,0002	0,0001	0,0026	0,0001	0,0004	0,0004
Wskaźnik Grahama	128	0,0011	0,0007	0,0003	0,0082	0,0003	0,0013	0,0013
przedział L5: $0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,5$								
Tlen, [%]	149	19,9	20,5	1,1	20,6	20,4	20,6	2,6

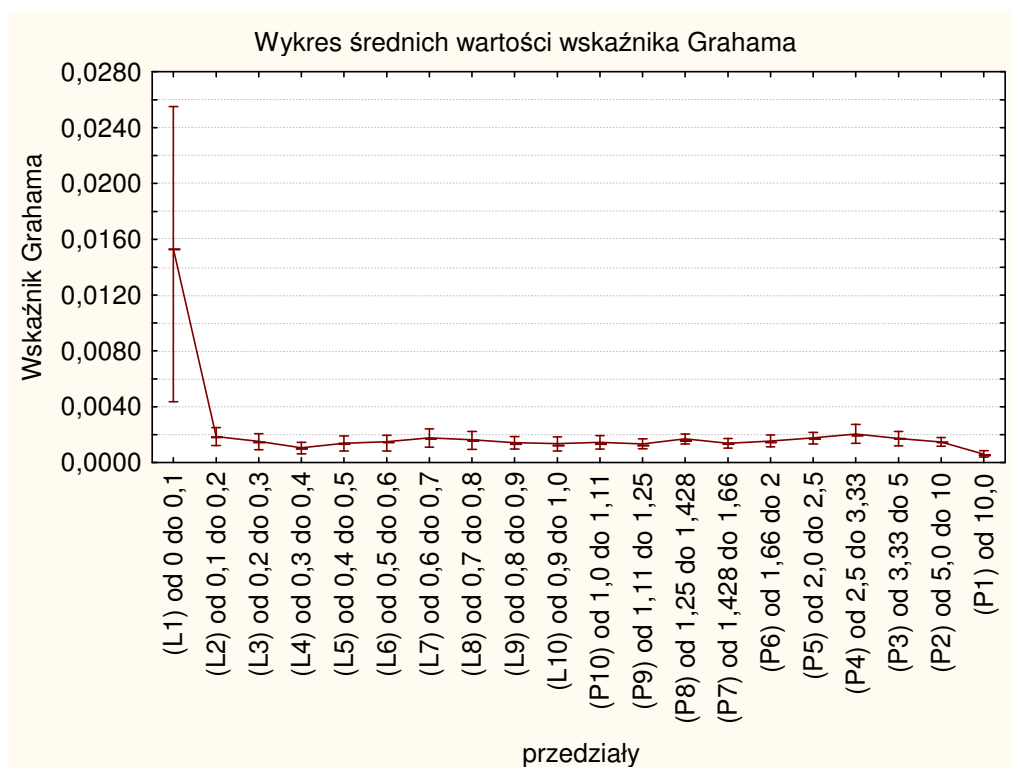
Azot, [%]	149	76,6	79,0	5,7	79,4	78,4	79,3	9,7
Metan, [%]	149	3,3	0,3	0,0	92,1	0,0	1,0	12,1
Tlenek węgla, [%]	149	0,0006	0,0003	0,0001	0,0041	0,0001	0,0007	0,0008
Wskaźnik Grahama	149	0,0014	0,0007	0,0002	0,0091	0,0003	0,0016	0,0017
przedział L6: $0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,6$								
Tlen, [%]	110	19,7	20,4	0,3	20,5	20,2	20,5	2,8
Azot, [%]	110	76,3	79,1	3,1	79,5	78,4	79,3	10,6
Metan, [%]	110	3,7	0,3	0,0	95,4	0,0	1,2	13,2
Tlenek węgla, [%]	110	0,0008	0,0005	0,0001	0,0047	0,0002	0,0011	0,0010
Wskaźnik Grahama	110	0,0015	0,0009	0,0002	0,0085	0,0004	0,0020	0,0018
przedział L7: $0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,7$								
Tlen, [%]	113	19,7	20,3	0,6	20,5	19,7	20,4	2,3
Azot, [%]	113	76,8	79,0	4,9	79,5	76,9	79,4	8,5
Metan, [%]	113	3,2	0,4	0,0	93,3	0,0	3,2	10,6
Tlenek węgla, [%]	113	0,0011	0,0007	0,0001	0,0048	0,0003	0,0015	0,0012
Wskaźnik Grahama	113	0,0018	0,0011	0,0001	0,0075	0,0005	0,0022	0,0018
przedział L8: $0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,8$								
Tlen, [%]	92	19,5	20,2	0,6	20,4	19,8	20,3	2,5
Azot, [%]	92	76,4	79,0	4,9	79,6	77,5	79,4	9,3
Metan, [%]	92	3,8	0,5	0,0	93,3	0,0	2,5	11,7
Tlenek węgla, [%]	92	0,0012	0,0008	0,0001	0,0054	0,0004	0,0015	0,0013
Wskaźnik Grahama	92	0,0016	0,0010	0,0001	0,0070	0,0005	0,0020	0,0017
przedział L9: $0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,9$								
Tlen, [%]	94	19,7	20,1	10,8	20,3	19,7	20,2	1,2
Azot, [%]	94	77,5	79,1	44,0	79,6	77,5	79,5	4,7
Metan, [%]	94	2,1	0,5	0,0	44,7	0,0	2,5	5,1
Tlenek węgla, [%]	94	0,0012	0,0010	0,0001	0,0046	0,0006	0,0015	0,0009
Wskaźnik Grahama	94	0,0014	0,0011	0,0001	0,0056	0,0007	0,0018	0,0011

przedział L10: $0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$								
Tlen, [%]	83	19,6	20,0	0,8	20,2	19,7	20,1	2,2
Azot, [%]	83	77,5	79,2	6,7	79,7	78,1	79,5	8,1
Metan, [%]	83	2,6	0,3	0,0	91,2	0,0	2,0	10,2
Tlenek węgla, [%]	83	0,0013	0,0008	0,0001	0,0048	0,0005	0,0019	0,0011
Wskaźnik Grahama	83	0,0014	0,0008	0,0001	0,0052	0,0005	0,0019	0,0012
przedział P10: $1,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,9$								
Tlen, [%]	93	19,4	19,9	1,1	20,1	19,6	20,0	2,2
Azot, [%]	93	77,1	79,1	8,0	79,8	77,8	79,5	8,2
Metan, [%]	93	3,2	0,5	0,0	89,7	0,0	2,3	10,2
Tlenek węgla, [%]	93	0,0015	0,0012	0,0001	0,0062	0,0007	0,0018	0,0013
Wskaźnik Grahama	93	0,0015	0,0011	0,0001	0,0060	0,0007	0,0018	0,0012
przedział P9: $1/0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,8$								
Tlen, [%]	115	19,1	19,8	0,3	20,0	19,3	19,9	2,7
Azot, [%]	115	76,5	79,3	5,7	79,9	77,4	79,6	10,3
Metan, [%]	115	3,9	0,5	0,0	92,8	0,0	2,9	13,0
Tlenek węgla, [%]	115	0,0016	0,0013	0,0001	0,0063	0,0009	0,0020	0,0012
Wskaźnik Grahama	115	0,0013	0,0011	0,0001	0,0054	0,0008	0,0017	0,0010
przedział P8: $1/0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,7$								
Tlen, [%]	136	19,1	19,7	6,8	19,9	19,1	19,8	1,9
Azot, [%]	136	77,2	79,3	30,3	80,1	77,1	79,7	7,1
Metan, [%]	136	2,9	0,5	0,0	62,0	0,0	3,5	8,0
Tlenek węgla, [%]	136	0,0023	0,0017	0,0001	0,0076	0,0011	0,0032	0,0016
Wskaźnik Grahama	136	0,0017	0,0013	0,0001	0,0056	0,0009	0,0024	0,0012
przedział P7: $1/0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,6$								
Tlen, [%]	134	18,4	19,5	0,8	19,8	18,7	19,6	3,6
Azot, [%]	134	75,1	79,3	9,0	80,2	76,6	79,9	13,4
Metan, [%]	134	5,9	0,6	0,0	88,9	0,0	4,2	16,8
Tlenek węgla, [%]	134	0,0021	0,0017	0,0001	0,0068	0,0010	0,0031	0,0016

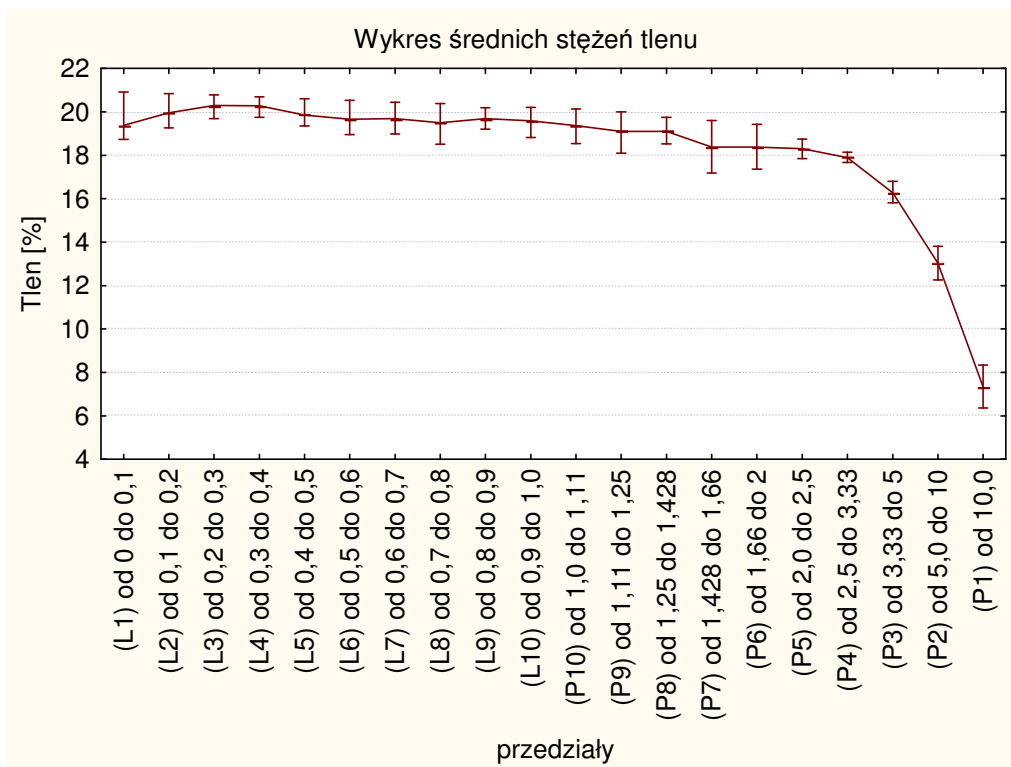
Wskaźnik Grahama	134	0,0014	0,0011	0,0001	0,0043	0,0007	0,0020	0,0010
przedział P6 $1/0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,5$								
Tlen, [%]	136	18,4	19,2	1,3	19,6	18,8	19,4	3,1
Azot, [%]	136	76,2	79,6	11,2	80,5	78,0	79,9	11,6
Metan, [%]	136	4,7	0,3	0,0	86,3	0,0	2,6	14,4
Tlenek węgla, [%]	136	0,0028	0,0023	0,0001	0,0183	0,0014	0,0039	0,0025
Wskaźnik Grahama	136	0,0015	0,0012	0,0001	0,0096	0,0008	0,0021	0,0013
przedział P5: $1/0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,4$								
Tlen, [%]	151	18,3	18,8	9,6	19,3	18,2	19,0	1,4
Azot, [%]	151	77,5	79,2	44,7	80,9	77,1	80,1	5,3
Metan, [%]	151	3,3	0,7	0,0	44,9	0,0	2,8	6,8
Tlenek węgla, [%]	151	0,0039	0,0035	0,0001	0,0117	0,0015	0,0058	0,0029
Wskaźnik Grahama	151	0,0018	0,0015	0,0000	0,0050	0,0007	0,0025	0,0013
przedział P4: $1/0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,3$								
Tlen, [%]	170	17,9	18,1	14,4	18,9	17,6	18,4	0,8
Azot, [%]	170	78,6	79,6	65,7	81,5	77,3	80,4	3,0
Metan, [%]	170	2,3	0,9	0,0	18,7	0,0	2,8	3,7
Tlenek węgla, [%]	170	0,0060	0,0038	0,0001	0,0352	0,0012	0,0092	0,0068
Wskaźnik Grahama	170	0,0021	0,0013	0,0000	0,0124	0,0004	0,0033	0,0023
przedział P3: $1/0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,2$								
Tlen, [%]	242	16,3	16,8	1,8	18,2	16,2	17,5	2,0
Azot, [%]	242	77,1	79,7	21,0	82,7	77,1	80,6	7,4
Metan, [%]	242	4,9	1,1	0,0	74,6	0,0	4,6	9,6
Tlenek węgla, [%]	242	0,0071	0,0038	0,0001	0,0437	0,0011	0,0115	0,0084
Wskaźnik Grahama	242	0,0017	0,0009	0,0000	0,0106	0,0003	0,0029	0,0020
przedział P2: $1/0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$								
Tlen, [%]	289	13,0	14,0	2,4	16,9	11,8	15,5	3,3
Azot, [%]	289	74,9	79,8	29,6	85,5	71,3	82,3	11,1
Metan, [%]	289	9,7	2,3	0,0	66,0	0,0	14,9	14,4

Tlenek węgla, [%]	289	0,0101	0,0071	0,0001	0,0402	0,0011	0,0166	0,0097
Wskaźnik Grahama	289	0,0015	0,0011	0,0000	0,0064	0,0002	0,0025	0,0014
przedział P1: $1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$								
Tlen, [%]	145	7,3	7,6	0,9	12,6	5,3	9,9	3,1
Azot, [%]	145	83,0	85,5	43,9	97,5	77,3	89,0	9,1
Metan, [%]	145	6,1	2,4	0,0	51,7	0,0	10,1	8,5
Tlenek węgla, [%]	145	0,0076	0,0028	0,0001	0,0383	0,0004	0,0106	0,0100
Wskaźnik Grahama	145	0,0006	0,0002	0,0000	0,0037	0,0000	0,0010	0,0008

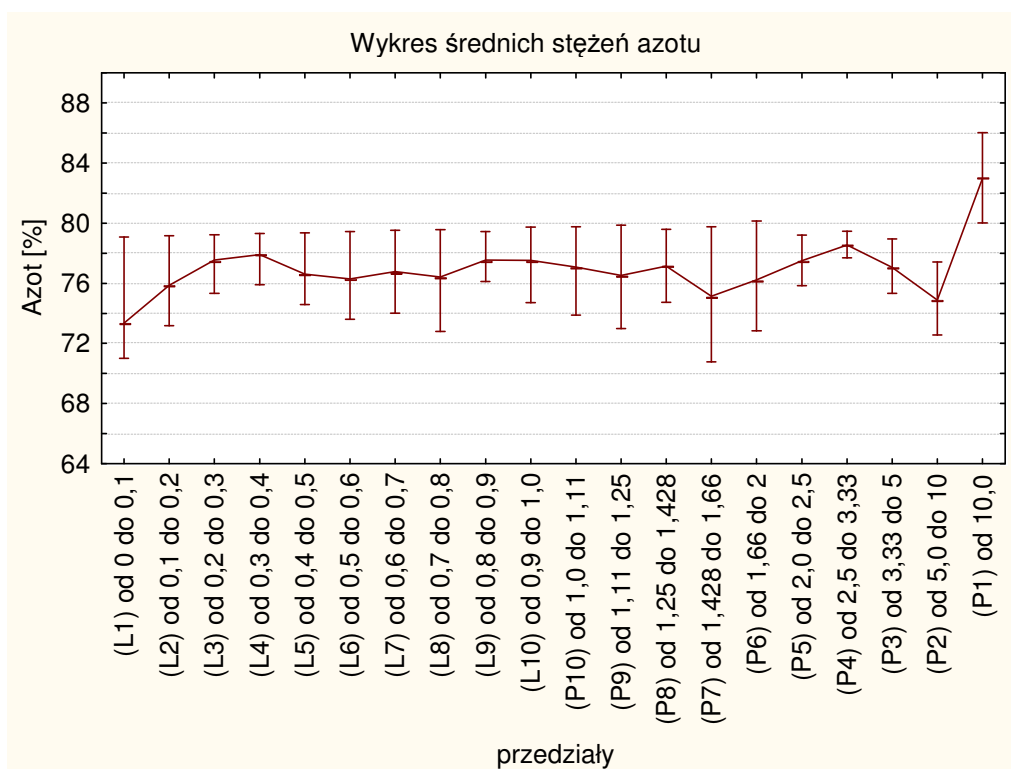
W dalszej części rozprawy przedstawiono wykresy średnich wartości wskaźnika Grahama oraz średnich stężeń tlenu, azotu, tlenku węgla, etylenu, propylenu i wodoru dla poszczególnych przedziałów podprób L oraz P. Przedstawione wykresy (rys. 3.3-3.9) pomogły wytypować przedział z wartościami wskaźnika Grahama, który wyraźnie odstaje od pozostałych.



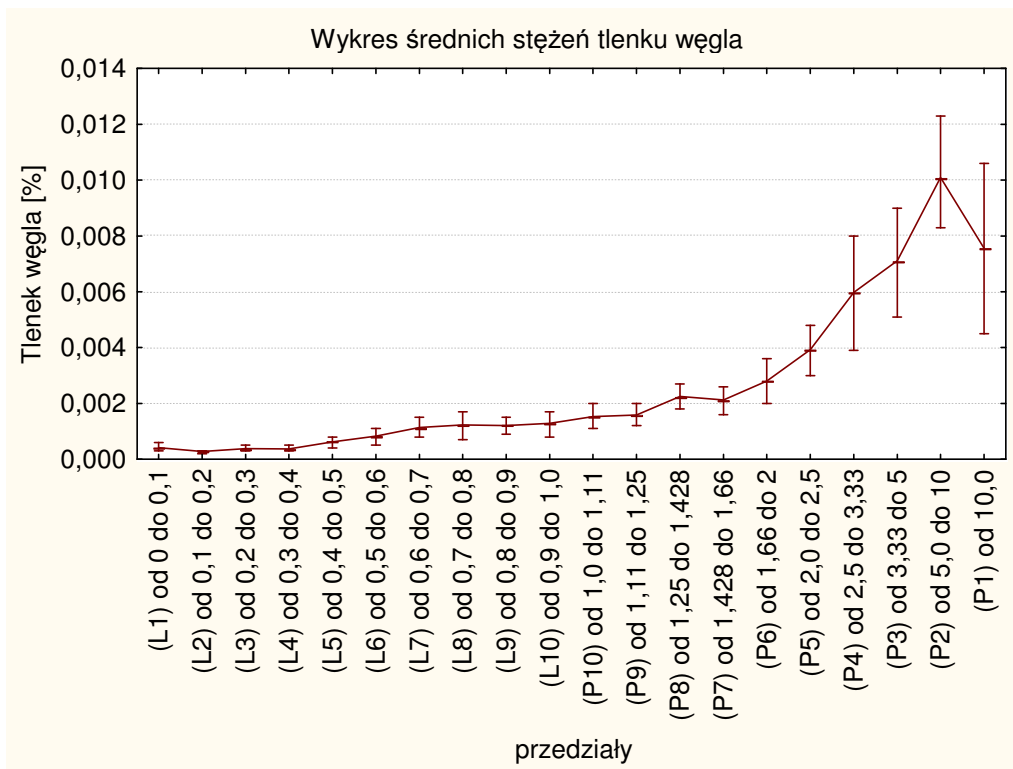
Rys. 3.3. Średnie wartości wskaźnika Grahama dla poszczególnych przedziałów



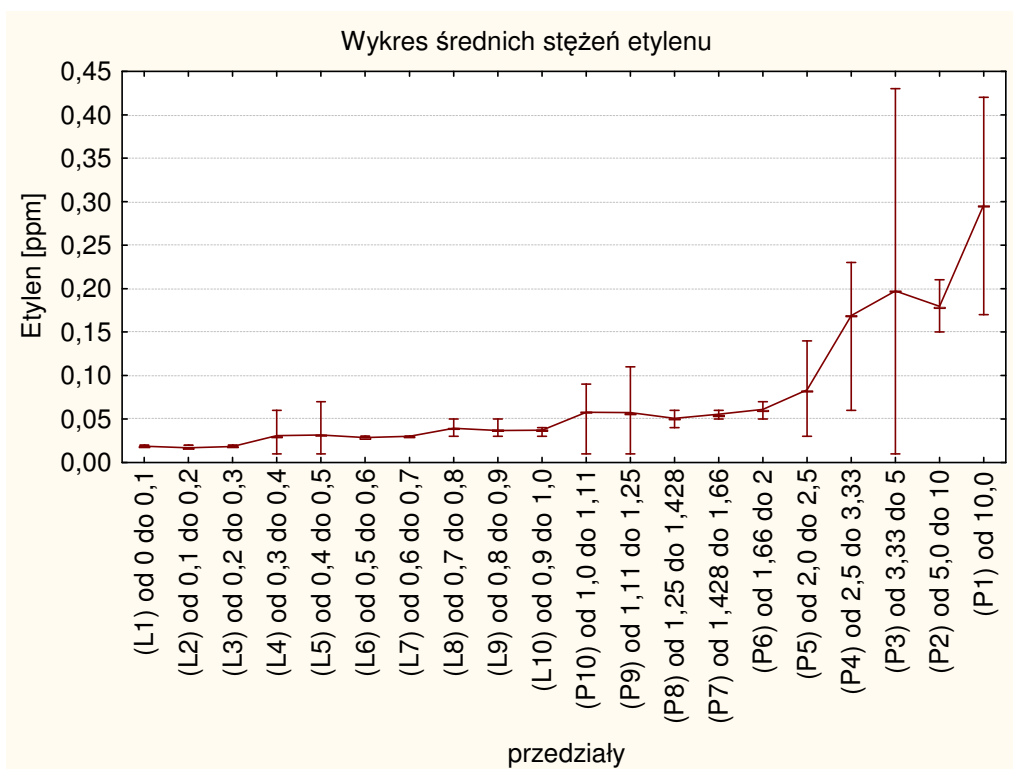
Rys. 3.4. Średnie stężenia tlenu dla poszczególnych przedziałów



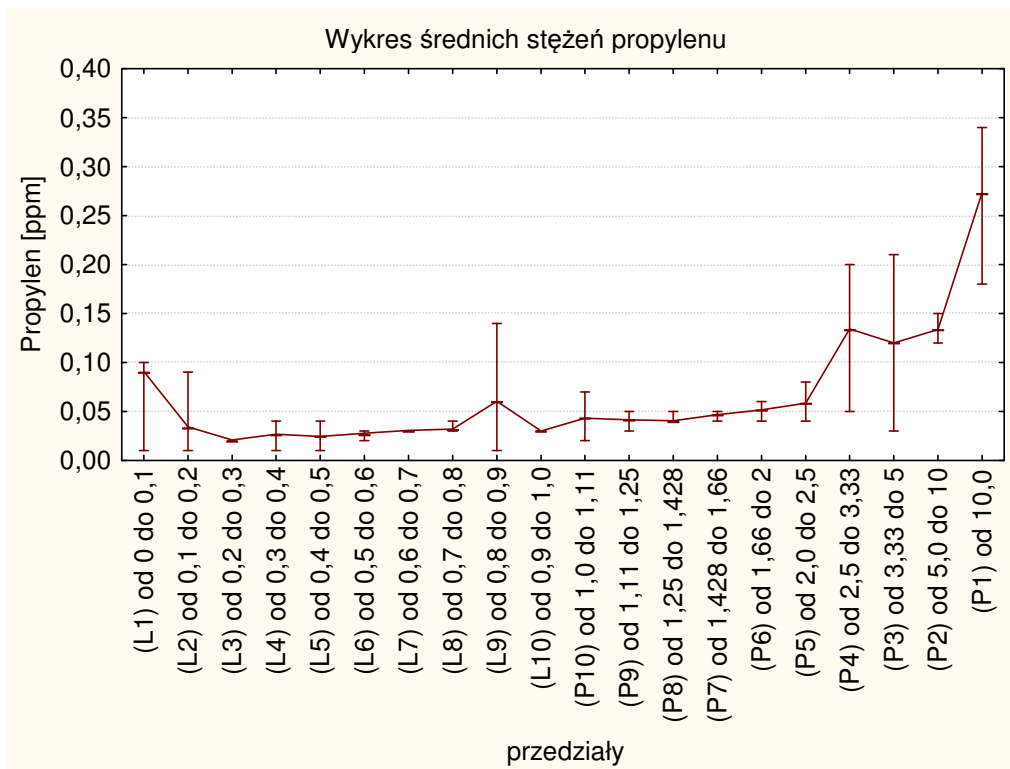
Rys. 3.5. Średnie stężenia azotu dla poszczególnych przedziałów



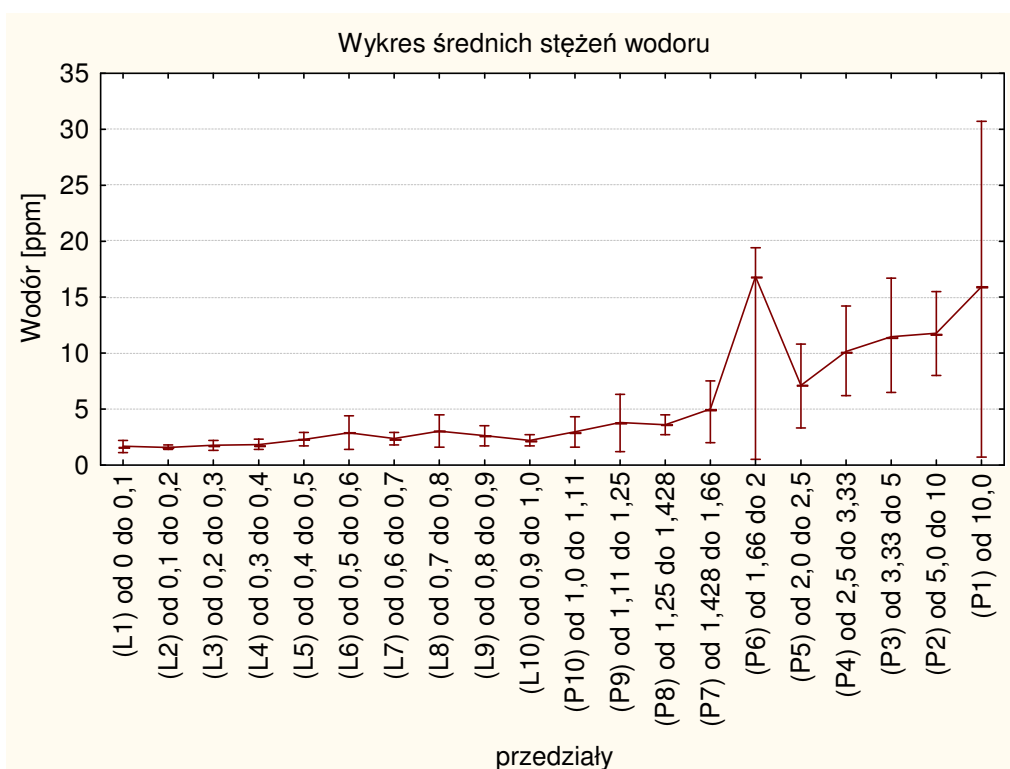
Rys. 3.6. Średnie stężenia tlenu węgla dla poszczególnych przedziałów



Rys. 3.7. Średnie stężenia etylenu dla poszczególnych przedziałów



Rys. 3.8. Średnie stężenia propylenu dla poszczególnych przedziałów



Rys. 3.9. Średnie stężenia wodoru dla poszczególnych przedziałów

W tablicy 3.4., która zawiera min. statystyki opisowe dla podpróby L, wyróżnia się przedział L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$). Wartość średnia wskaźnika Grahama jest w tym przedziale o rząd wielkości większa niż w pozostałych przypadkach. Wynika z tego, że przedział L1 powinien reprezentować najwyższy stan zagrożenia pożarowego. Jednak średnie stężenie tlenku węgla, które w tym przedziale wynosi 4 ppm, w żaden sposób nie potwierdza takiej sytuacji. Tak małe stężenie CO związane jest z niskim stanem zagrożenia pożarowego. Również średnie stężenia etylenu, propylenu i wodoru (rys. 3.7., 3.8. i 3.9.) w tym przedziale są niskie i odpowiadają sytuacji normalnej, w której nie występuje zagrożenie pożarowe (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010).

Wynika z tego, że w przedziale wartości mianownika wskaźnika Grahama ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) mogą występować przypadki, w których wskaźnik Grahama nieprawidłowo ocenia stan zagrożenia pożarowego, znacznie go zawyżając.

Z odwrotną sytuacją mamy do czynienia w zakresie podpróby P. W tej podpróbie najbardziej wyróżnia się przedział P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$). W przedziale tym wartość średnia wskaźnika Grahama jest kilkukrotnie niższa niż w przedziałach L2 – L10 oraz P10 – P2. Wynika z tego, że w przedziale P1 powinniśmy mieć do czynienia z najniższym stanem zagrożenia pożarowego. Jednak podwyższone stężenia tlenku węgla, etylenu, propylenu i wodoru (tablica 3.4. oraz rysunki 3.6., 3.7., 3.8. i 3.9.) – jakie występują w tym przedziale – świadczą o podwyższonej temperaturze węgla, co powinno zostać ocenione jako wyższy stan zagrożenia pożarem endogenicznym (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010).

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować wniosek, że w skrajnych przedziałach hiperboli, przedstawionej na rysunku 3.2., możemy mieć do czynienia z niewiarygodnymi wartościami wskaźnika Grahama. Dzieje się tak, gdy wartość mianownika wskaźnika Grahama zaczyna zbytnio zbliżać się do jednej z osi układu współrzędnych. W przypadku przedziału L1 dochodzi do zawyżania stanu zagrożenia pożarowego, natomiast w przedziale P1 dochodzi do jego zaniżania. Jest to sytuacja bardzo niepożądana, ponieważ może skutkować podejmowaniem nieprawidłowych decyzji związanych z prewencją zagrożenia pożarem endogenicznym.

Konieczne okazało się więc dokładne określenie zakresu mianownika wskaźnika Grahama, w którym z dużym prawdopodobieństwem będzie można twierdzić, że wskaźnik Grahama poprawnie ocenia stan zagrożenia pożarowego. W dalszej części rozprawy zakres ten będzie nazywany „przedziałem wiarygodności wskaźnika Grahama”.

3.4. Wyznaczenie przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama

Z przedstawionych wcześniej wyników analiz można wyciągnąć wniosek, że podstawą do wyznaczenia przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama powinny być skrajne zakresy przygotowanej próby statystycznej, w których występują wartości tego wskaźnika wyraźnie odstające od pozostałych zakresów.

Jest to też oczywiste z punktu widzenia analizy matematycznej wzoru, służącego do wyznaczania wartości wskaźnika Grahama. Jeżeli bowiem wartość mianownika tego wskaźnika zbliża się do zera, to wartość całej funkcji zdąży do nieskończoności. Zaś, gdy

wartość mianownika zbliża się do nieskończoności, to wartość funkcji dąży do zera (rys. 3.1.).

Dlatego też w przedziale skrajnym L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) można się będzie spodziewać zawyżania stanu zagrożenia pożarowego, zaś w przedziale P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$), zaniżania stanu zagrożenia – w stosunku do rzeczywistości panującej sytuacji pożarowej.

Poszukiwanie granic wiarygodności mianownika wskaźnika Grahama zrealizowano przez porównywanie dwóch sąsiednich grup – grupy obejmującej przypadki odstające z grupą sąsiednią, gdzie dochodzi do zanikania takich przypadków. Dla zrealizowania tego celu wykorzystano oprogramowanie „Statistica” (np. Luszniwicz i Słaby, 2008) oraz test t-Studenta (np. Jaworski, 1965; Zieliński, 1990; Bobkowski, 2004) dla prób niezależnych.

Test ten wykorzystuje się do sprawdzenia, czy istnieją istotne różnice pomiędzy dwoma grupami niezależnymi. Korzystając z wymienionego testu można, na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącym co najmniej 95%, określić czy istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej, która mówi o braku różnic pomiędzy wartościami średnimi w dwóch porównywanych grupach.

Ponieważ jest to test parametryczny, dlatego, aby go zastosować, musi być spełnione między innymi założenie o normalności rozkładu badanych cech. W rozpatrywanym przypadku próba statystyczna cechowała się dużą liczebnością, co pozwoliło na zastosowanie *Centralnego Twierdzenia Granicznego* (np. Dudley, 1978; Łuczak, 1993; Krysicki i inni, 1999). Zgodnie z tym twierdzeniem, wraz ze wzrostem liczebności próby rozkład wartości średnich badanych wielkości jest coraz bardziej zbliżony do rozkładu normalnego. Większość badaczy zajmujących się statystyką uważa, że jeżeli liczebność próby jest większa od 30, to można stosując *Centralne Twierdzenie Graniczne* założyć, że badana zmienna ma w przybliżeniu rozkład normalny (np. Hogg i inni, 2015).

Przed zastosowaniem testu t-Studenta należy również skontrolować, czy spełnione jest założenie o jednorodności wariancji testowanych grup. Jeżeli wymienione założenie jest spełnione, to do sprawdzenia równości wartości średnich w dwóch grupach stosuje się test t-Studenta dla wariancji jednorodnych. W innym przypadku należy zastosować test Cochran-Coxa (np. Wątroba i Harańczyk, 2007). Należy w tym miejscu wspomnieć, że program „Statistica” sam dobiera odpowiednie testy t-Studenta w zależności od liczebności badanych grup oraz wyników testów na jednorodność wariancji w analizowanych grupach.

W pierwszej kolejności sprawdzono zatem, czy istnieje równość wartości średnich w obu głównych podgrupach L i P. Wyniki testu t-Studenta dla tych podgrup przedstawiono w tabelicy 3.5.

Tablica 3.5. Wyniku testu t-Studenta dla wartości wskaźnika Grahama w obu podgrupach (lewego i prawego ramienia hiperboli)

Zmienna	Testy t							
	Grupa 1: od L1 do L10				Grupa 2: od P1 do P10			
	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorod. wariacji	df	p dla jednorod. wariacji	t dla niejedn. wariacji	df	p dla niejedn. wariacji
Wskaźnik Grahama	0,00229	0,00152	4,598	2775	0,000	3,981	1260,890	0,000

Ponieważ wartość prawdopodobieństwa w tym teście nie przekroczyła progu istotności wynoszącego 0,05, to należy odrzucić hipotezę zerową (o braku różnic pomiędzy wartościami średnimi w badanych grupach) na rzecz hipotezy alternatywnej, która mówi, że istnieją istotne różnice w wartościach średnich dla obu grup.

W następnym kroku odrzucono wartości najbardziej odstające, czyli te występujące w przedziałach L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) oraz P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) i ponownie przeprowadzono test t-Studenta porównując wartości wskaźnika Grahama grupy L2 ÷ L10 z jej symetrycznym odpowiednikiem, tj. grupą P2 ÷ P10. (tablica 3.6.).

Tablica 3.6. Wyniku testu t-Studenta dla wartości wskaźnika Grahama – podgrupa lewego i prawego ramienia hiperboli, po odrzuceniu przedziałów skrajnych L1 i P1

Zmienna	Testy t							
	Grupa 1: od L2 do L10				Grupa 2: od P2 do P10			
	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorod. wariacji	df	p dla jednorod. wariacji	t dla niejedn. wariacji	df	p dla niejedn. wariacji
Wskaźnik Grahama	0,00151	0,00162	-1,701	2564	0,089	-1,679	2240,613	0,093

Z analizy wyników przeprowadzonego testu (tablica 3.6.) wynika, że tym razem nie można odrzucić hipotezy zerowej, która mówi o równości średnich wartości wskaźnika Grahama w obu grupach.

Po raz kolejny okazało się więc, że z najbardziej odstającymi wartościami wskaźnika Grahama mamy do czynienia w przedziałach, w których wartości mianownika tego wskaźnika zaczynają asymptotycznie zbliżać się do osi układu współrzędnych. Tym razem jednak zostało to potwierdzone testami statystycznymi, dla których poziom pewności wynosi przynajmniej 95%. Dlatego właśnie dalsze poszukiwania granicznej wartości mianownika wskaźnika Grahama przeprowadzono wykorzystując przedziały L1 i P1.

3.4.1. Granica lewostronna

Jak wynika z przeprowadzonych analiz największa rozbieżność pomiędzy stanem zagrożenia pożarowego wyznaczonego przez wskaźnik Grahama, a rzeczywistym stanem zagrożenia na lewym ramieniu hiperboli występuje w przedziale L1 (rys. 3.3.). Dlatego granicę lewostronną wartości mianownika tego wskaźnika wyznaczono w ten sposób, że przedział L1 przesuвано sukcesywnie w kierunku coraz większych wartości, ze stałym krokiem (z zachowaniem rozpiętości przedziału L1 wynoszącej 0,1). Następnie, dla każdego kroku, sprawdzano przy pomocy testu t-Studenta czy zachodzi równość średnich wartości wskaźnika Grahama w porównywanych grupach. Gdy wyniki testu t-Studenta wykazały brak różnic pomiędzy analizowanymi grupami, wtedy ostatnia górna wartość przedziału, dla której wynik testu był negatywny, została przyjęta jako graniczna wartość przedziału mianownika wskaźnika Grahama.

W przypadku rozpatrywania granicy lewostronnej wartości wskaźnika Grahama z przedziału L1 były porównywane z następującymi trzema grupami:

- $L2 \div L10 + P2 \div P10$ (pozostały przedział wartości mianownika wskaźnika Grahama – bez wyraźnie odstającego przedziału P1);
- $L2 \div L10$ (pozostała część podgrupy L – lewego ramienia hiperboli);
- L2 (przedział sąsiadujący).

1) Wyznaczenie granicy lewostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału L1 z przedziałem $L2 \div L10 + P2 \div P10$.

Skrajny przedział L1 przesuвано z krokiem wynoszącym 0,001 i zachowywano jego rozpiętość, jednocześnie odpowiednio skracając grupę ($L2 \div L10 + P2 \div P10$). Dla przykładu pierwsza analiza została wykonana przez porównanie przedziałów: L1 ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,100$) i $L2 \div L10 + P2 \div P10$ ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). Jak należało się spodziewać test t-Studenta nie wykazał równości średnich wartości wskaźnika Grahama w badanych grupach. Dlatego granica była przesuwana o 0,001 z zachowaniem rozpiętości grupy L1. A więc następna analiza polegała na porównaniu następujących grup: L1 ($0,001 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,101$) i $L2 \div L10 + P2 \div P10$ ($0,101 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). W taki sposób postępowano aż do momentu uzyskania równości badanych wartości średnich w porównywanych grupach. W tabelicy 3.7. przedstawiono wyniki uzyskane dla pierwszej i dwóch ostatnich analiz.

Tablica 3.7. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w przedziałach L1 i $(L2 \div L10 + P2 \div P10)$

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariancji	df	p dla jednorodn. wariancji
Grupa 1, (L1): $(0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,10)$ Grupa 2, $(L2 \div L10 + P2 \div P10)$: $(0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1)$							
Wskaźnik Grahama	66	2566	0,01532	0,00157	28,425	2630	0,000
Grupa 1, (L1): $(0,111 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,211)$ Grupa 2, $(L2 \div L10 + P2 \div P10)$: $(0,211 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1)$							
Wskaźnik Grahama	166	2392	0,00181	0,00155	1,988	2556	0,047
Grupa 1, (L1): $(0,112 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,212)$ Grupa 2, $(L2 \div L10 + P2 \div P10)$: $(0,212 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1)$							
Wskaźnik Grahama	166	2389	0,00170	0,00155	1,899	2553	0,058

Wyniki przedstawione w tablicy 3.7. wskazują na to, że nie można odrzucić hipotezy zerowej, która mówi o braku różnic pomiędzy średnimi wartościami wskaźnika Grahama, w przypadku porównania grup $(0,112 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,212)$ i $(0,212 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1)$ – ostatni wiersz tabeli. W tym porównaniu wartość prawdopodobieństwa testu t-Studenta dla wariancji jednorodnych przekracza próg istotności wynoszący 0,05. Biorąc to pod uwagę można przyjąć, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością jeżeli wartość jego mianownika znajduje się w przedziale powyżej lewostronnej wartości granicznej równej 0,211 (tablica 3.7.).

2) Wyznaczenie granicy lewostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału L1 z przedziałem $(L2 \div L10)$.

W tym przypadku również przesuwano skrajny przedział L1 o krok 0,001, przy czym odpowiednio skracano grupę $(L2 \div L10)$. Pierwsza analiza została wykonana porównując przedziały: L1 $(0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,100)$ i $L2 \div L10$ $(0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1)$. W tablicy 3.8. przedstawiono wyniki uzyskane dla pierwszej i dwóch ostatnich tak przeprowadzonych analiz.

Tablica 3.8. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w przedziałach L1 i (L2 ÷ L10)

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariancji	df	p dla jednorodn. wariancji
Grupa 1, (L1): (0,0 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 0,10) Grupa 2, (L2 ÷ L10): (0,10 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 1,0)							
Wskaźnik Grahama	66	1100	0,01532	0,00151	19,580	1164	0,000
Grupa 1, (L1): (0,116 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 0,216) Grupa 2, (L2 ÷ L10): (0,216 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 1,0)							
Wskaźnik Grahama	163	920	0,00179	0,00145	2,352	1081	0,019
Grupa 1, (L1): (0,117 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 0,217) Grupa 2, (L2 ÷ L10): (0,217 < 0,265N ₂ - O ₂ ≤ 1,0)							
Wskaźnik Grahama	164	918	0,00173	0,00145	1,954	1080	0,051

Z analizy tablicy 3.8. wynika, że równość średnich wartości wskaźnika Grahama, na odpowiednim poziomie istotności, została osiągnięta podczas porównania grupy (0,117 < 0,265N₂ - O₂ ≤ 0,217) z grupą (0,217 < 0,265N₂ - O₂ ≤ 1,0). Dlatego przyjęto, że w tym przypadku wskaźnik Grahama jest wiarygodny w przedziale mianownika powyżej lewostronnej wartości granicznej równej 0,216 (tablica 3.8.).

3) Wyznaczenie granicy lewostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału L1 z sąsiednim przedziałem L2.

W tej analizie postępowano podobnie jak w poprzednich przypadkach, przy czym pierwsze porównanie przeprowadzono pomiędzy grupą L1 (0,0 < 0,265N₂ - O₂ ≤ 0,100) i L2 (0,100 < 0,265N₂ - O₂ ≤ 0,200). W kolejnych krokach obie grupy były przesuwane z zachowaniem stałej rozpiętości wynoszącej 0,1. Wyniki dla pierwszej analizy i dwóch ostatnich przedstawiono w tablicy 3.9.

Tablica 3.9. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w sąsiadujących przedziałach L1 i L2

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariancji	df	p dla jednorodn. wariancji
Grupa 1, (L1): $0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,10$ Grupa 2, (L2): $(0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,20)$							
Wskaźnik Grahama	66	156	0,01532	0,00187	7,419	220	0,000
Grupa 1, (L1): $0,093 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,193$ Grupa 2, (L2): $(0,193 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,293)$							
Wskaźnik Grahama	157	172	0,00202	0,00153	2,096	327	0,037
Grupa 1, (L1): $0,094 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,194$ Grupa 2, (L2): $(0,194 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,294)$							
Wskaźnik Grahama	157	173	0,00198	0,00153	1,949	328	0,052

Z analizy tablicy 3.9. wynika, że równość badanych wartości średnich została osiągnięta podczas porównywania grup $(0,094 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,194)$ i $(0,194 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,294)$. Przyjęto więc, że wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością w przedziale mianownika powyżej lewostronnej wartości granicznej równej 0,193 (tablica 3.9.).

W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano trzy wartości graniczne dla lewostronnego przedziału wartości mianownika wskaźnika Grahama. Wartości te, pomimo zastosowania różnych metod ich wyznaczania, są zbliżone i wynoszą: 0,193; 0,211 oraz 0,216 – dla których średnia wynosi 0,207. W analizowanej wcześniej literaturze światowej funkcjonują kryteria, w których ubytek tlenu określony został z dokładnością do jednego miejsca po przecinku. Przyjmując tą nomenklaturę zaokrąglono uzyskaną wartość średnią otrzymując warunek graniczny równy 0,2.

Należy w tym miejscu wspomnieć, że min. MacKenzie-Wood i Strang (1990) również zauważyli, że jeżeli wartość mianownika wskaźnika Grahama jest niższa od 0,2, to należy zachować ostrożność podczas interpretacji wartości wskaźnika Grahama, z powodu możliwości występowania poważnych błędów. Wartość podana przez wymienionych badaczy jest więc identyczna (biorąc pod uwagę liczbę miejsc dziesiętnych) z wyznaczoną wyżej średnią wartością graniczną, dlatego liczba 0,2 – przyjęta jako granica lewostronna przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama – ma dodatkowe potwierdzenie w niezależnych badaniach.

3.4.2. Granica prawostronna

Granice prawostronną przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama poszukiwano, podobnie jak w przypadku granicy lewostronnej, czyli przez obliczanie testów t-Studenta – tym razem jednak wartości wskaźnika Grahama z wyraźnie odstającego przedziału P1 porównywano ze wskaźnikami należącymi do grup:

- $L2 \div L10 + P2 \div P10$ (pozostały przedział wartości mianownika wskaźnika Grahama – bez wyraźnie odstającego przedziału L1),
- grupy obejmującej przedziały $P2 \div P10$ (pozostała części podgrupy P – prawego ramienia hiperboli),
- P2 (przedział sąsiadujący).

1) Wyznaczenie granicy prawostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału P1 z przedziałem ($L2 \div L10 + P2 \div P10$).

Pierwszą analizę wykonano porównując grupę P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) z grupą $L2 \div L10 + P2 \div P10$ ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). Test t-Studenta wykazał, że należy odrzucić hipotezę zerową na rzecz hipotezy alternatywnej, która mówi o braku równości średnich wartości wskaźnika Grahama pomiędzy badanymi grupami. Następnie grupę P1 przesuwano z zachowaniem jej rozpiętości, a grupę $L2 \div L10 + P2 \div P10$ odpowiednio skracano. Wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tabelicy 3.10.

Tablica 3.10. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w przedziałach P1 i ($L2 \div L10 + P2 \div P10$)

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariacji	df	p dla jednorodn. wariacji
Grupa 1, ($L2 \div L10 + P2 \div P10$): ($0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10$) Grupa 2, (P1): ($1/0,10 < 0,265N_2 - O_2$)							
Wskaźnik Grahama	2566	145	0,00157	0,00060	7,129	2709	0,000
Grupa 1, ($L2 \div L10 + P2 \div P10$): ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,172$) Grupa 2, (P1): ($1/0,172 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,072$)							
Wskaźnik Grahama	2364	270	0,00158	0,00137	1,984	2632	0,047
Grupa 1, ($L2 \div L10 + P2 \div P10$): ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,175$) Grupa 2, (P1): ($1/0,175 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,075$)							
Wskaźnik Grahama	2354	274	0,00157	0,00140	1,665	2626	0,096

W oparciu o wyniki testów przedstawione w tabelicy 3.10. przyjęto, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% wskaźnik Grahama cechuje się

dużą wiarygodnością poniżej prawostronnej wartości granicznej mianownika równej $1/0,172 = 5,81$.

2) Wyznaczenie granicy prawostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału P1 z przedziałem ($P2 \div P10$).

Postępowano podobnie jak w poprzednich przypadkach. Czyli, pierwszą analizę wykonano porównując grupę P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) z grupą $P2 \div P10$ ($1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10$). Jak należało się spodziewać, test t-Studenta nie wykazał równości badanych wartości średnich w porównywanych grupach. Następnie grupę P1 przesuwano z zachowaniem jej rozpiętości, a grupę $P2 \div P10$ odpowiednio skracano. Wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tabelicy 3.11.

Tablica 3.11. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w przedziałach P1 i ($P2 \div P10$)

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariancji	df	p dla jednorodn. wariancji
Grupa 1, ($P2 \div P10$): ($1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10$) Grupa 2, (P1): ($1/0,10 < 0,265N_2 - O_2$)							
Wskaźnik Grahama	1466	145	0,00162	0,00060	7,755	1609	0,000
Grupa 1, ($P2 \div P10$): ($1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,179$) Grupa 2, (P1): ($1/0,179 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,079$)							
Wskaźnik Grahama	1243	277	0,00164	0,00143	2,042	1518	0,041
Grupa 1, ($P2 \div P10$): ($1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,181$) Grupa 2, (P1): ($1/0,181 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,081$)							
Wskaźnik Grahama	1235	275	0,00164	0,00144	1,905	1508	0,057

W oparciu o wyniki testów przedstawione w tabelicy 3.11. przyjęto, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością poniżej prawostronnej wartości mianownika wynoszącej $1/0,179 = 5,59$.

3) Wyznaczenie granicy prawostronnej wartości wskaźnika Grahama na podstawie porównania przedziału P1 z sąsiednim przedziałem P2.

Pierwszą analizę wykonano porównując grupę P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) z grupą P2 ($1/0,20 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10$) – test t-Studenta wykazał brak równości średnich wartości wskaźnika Grahama w badanych grupach. W kolejnych krokach obie grupy przesuwano z zachowaniem stałej rozpiętości wynoszącej 0,1. Wyniki dla pierwszej analizy i dwóch ostatnich przedstawiono w tabelicy 3.12.

Tablica 3.12. Wyniki testów t-Studenta na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźnika Grahama w sąsiadujących przedziałach P1 i P2

Zmienna	Testy t						
	Ilość przypadków Grupa 1	Ilość przypadków Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t dla jednorodn. wariancji	df	p dla jednorodn. wariancji
Grupa 1, (P2): $(1/0,20 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,10 < 0,265N_2 - O_2)$							
Wskaźnik Grahama	289	145	0,00147	0,00060	6,955	432	0,000
Grupa 1, (P2): $(1/0,272 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,172)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,172 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,072)$							
Wskaźnik Grahama	275	270	0,00166	0,00137	2,106	543	0,036
Grupa 1, P2 ÷ (P10): $(1/0,275 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,175)$ Grupa 2, (P10): $(1/0,175 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,075)$							
Wskaźnik Grahama	271	274	0,00163	0,00140	1,685	543	0,092

W oparciu o wyniki testów przedstawione w tablicy 3.12. przyjęto, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością poniżej prawostronnej wartości mianownika wynoszącej $1/0,172 = 5,81$.

W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano trzy wartości graniczne dla prawostronnego przedziału wartości mianownika wskaźnika Grahama. Są one bardzo zbliżone do siebie i wynoszą: 5,81; 5,59 oraz 5,81 – średnio 5,737. Przyjmując tą samą nomenklaturę jak w przypadku granicy lewostronnej, zaokrąglono otrzymaną średnią do jednego miejsca pop przecinku, uzyskując wartość 5,7.

Analizy przedstawione w rozdziale 3. niniejszej rozprawy potwierdziły, że bezpośredni wpływ na to, czy wskaźnik Grahama jest wiarygodny ma wartość jego mianownika. Pozwoliło to na opracowanie kryterium przedziału dla wiarygodności wskaźnika Grahama.

Przeprowadzone testy t-Studenta wykazały, że jeżeli wartość mianownika wskaźnika Grahama zawiera się w przedziale $0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$, to wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością. Można przyjąć, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% wskaźnik ten ocenia wtedy prawidłowo stan zagrożenia pożarowego (Słowik i Świerczek, 2015).

4. Wpływ inertyzacji azotem na wartość wskaźnika Grahama

Jak już wspomniano we wstępie niniejszej rozprawy, wskaźnik Grahama został opracowany nieco ponad 100 lat temu. W tamtym okresie, w kopalniach węgla kamiennego, nie stosowano inertyzacji azotem, dlatego poprawność oceny według tego wskaźnika była wystarczająca. Obecnie inertyzacja jest szeroko stosowana w profilaktyce pożarowej, i często zdarza się, że dodatkowa zawartość azotu w próbkach powietrza zaburza ocenę stanu zagrożenia pożarowego przy pomocy tego wskaźnika.

W tym rozdziale przedstawiono analizę wpływu zwiększonych stężeń azotu na wartość wskaźnika Grahama. Jego wiarygodność poddano weryfikacji w oparciu o wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z rejonów ścian wydobywczych, w których stosowano azot jako gaz inertyny.

4.1. Charakterystyka ścian poddanych analizie

W celu zbadania wpływu zwiększonych stężeń azotu na wartość wskaźnika Grahama z kopalń węgla kamiennego pozyskano wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z rejonów ścian, w których stosowano azot jako gaz inertyny. Otrzymane dane dotyczyły czterech ścian prowadzonych w pokładach grupy:

- 200 – zwana dalej ścianą nr I,
- 400 (w warstwie rudzkiej górnej) – zwana dalej ścianą nr II,
- 400 (w warstwie rudzkiej dolnej) – zwana dalej ścianą nr III,
- 500 – zwana dalej ścianą nr IV.

Ściana I

Ściana I była prowadzona z zawałem stropu od granic pola eksploatacyjnego. Przewietrzano ją najpierw sposobem na „U” z doprowadzeniem i odprowadzeniem powietrza wzdłuż calizny węglowej, a następnie na „Y” z odprowadzeniem powietrza w dwóch kierunkach. Miąższość eksploatowanego pokładu w parceli tej ściany wynosiła średnio 2,95 m. W zrobach wyrobiska ścianowego pozostawiano węgiel o średniej grubości 0,33 m w stropie oraz 0,25 m w spodku.

Wydatek powietrza przewietrzającego ścianę zmieniał się, na różnych etapach eksploatacji, w zakresie od około 180 m³/min do 480 m³/min. Do zrobów ściany I podawano azot, początkowo w ilości 300 m³/godz. (5 m³/min), a następnie zwiększono intensywność inertyzacji do 600 m³/godz. (10 m³/min).

Ściana II

Ściana II była prowadzona z zawałem stropu do granic pola eksploatacyjnego, z chodnikami przyścianowymi wykonanymi przed rozpoczęciem biegu ściany. Przewietrzano ją sposobem na „U” z doprowadzeniem i odprowadzeniem powietrza wzdłuż calizny węglowej. Miąższość węgla w eksploatowanym pokładzie wynosiła od 3,8 m do 6,3 m (z przerostami łupków i łupków z węglem).

Wydatek powietrza przewietrzającego ścianę wahał się w przedziale od 800 m³/min do 950 m³/min. Do zrobów ściany II podawano azot w ilości od 700 m³/godz. (11,7 m³/min) do około 1400 m³/godz. (23,3 m³/min).

Ściana III

Ściana III była prowadzona z zawałem stropu od granic pola eksploatacyjnego i była przewietrzana sposobem na „U” z doprowadzeniem oraz odprowadzeniem powietrza wzdłuż calizny węglowej. Średnia miąższość eksploatowanego pokładu w parceli ściany III wynosiła 2,65 m (z przerostami łupków ilastych i łupków z węglem). Mniej więcej w połowie planowanego wybiegu ściany pozostawiano w spągu węgiel o grubości od 0,2 m do 0,5 m.

Wydatek powietrza przewietrzającego ścianę zmieniał się od około 2000 m³/min do 480 m³/min. Do zrobów ściany III, na różnych etapach eksploatacji, podawano azot w ilościach od 600 m³/godz. (10 m³/min) do 1000 m³/godz. (16,7 m³/min).

Ściana IV

Ściana IV była prowadzona z zawałem stropu od granic pola eksploatacyjnego i przewietrzana sposobem na „U” z doprowadzeniem i odprowadzeniem powietrza wzdłuż calizny węglowej. Miąższość węgla w parceli tej ściany wynosiła od 4,5 m do około 6 m. W spągu wyrobiska ścianowego pozostawiano węgiel o grubości od 0,9 m do 1,2 m.

Ilość powietrza płynącego przez ścianę wynosiła około 700 m³/min. Do zrobów ściany IV podawano azot w ilości od 700 m³/godz. (11,7 m³/min) do około 1350 m³/godz. (22,5 m³/min).

W rejonach wszystkich wymienionych ścian, na różnych etapach eksploatacji, występował podwyższony stan zagrożenia pożarowego. Wartości wskaźnika Grahama, obliczone na podstawie stężeń gazów zawartych w próbkach powietrza pobranych ze zrobów rozpatrywanych ścian oraz zza tam izolacyjnych, które miały kontakt z tymi zrobami, w wielu wypadkach przekraczały pierwszą wartość progową 0,0025. Stwierdzono także przekroczenia kolejnych progowych wartości tego wskaźnika.

Do zwalczania zagrożenia pożarowego występującego w zrobach tych ścian stosowano między innymi inertyzację przy użyciu azotu. Celem takiego działania było obniżenie stężenia tlenu w rejonie ogniska samozagrzewania węgla. Według Szlązaka i Piergiesa (2018) stężenie tlenu niższe od 8% jest już bezpieczne z punktu widzenia samozapalenia się węgla.

W związku z powyższym próbki powietrza pochodzące z opisanych rejonów były doskonałym materiałem do zbadania wpływu podwyższonych stężeń azotu na wiarygodność oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym według wskaźnika Grahama.

4.2. Próba bazowa dla przeprowadzenia analizy porównawczej próbek powietrza kopalnianego

Błędne określenie niskiego stanu zagrożenia pożarowego przy pomocy wskaźnika Grahama, w przypadku gdy w rzeczywistości stan zagrożenia jest na wyższym poziomie, jest sytuacją wysoce niepożądaną. Dlatego w dalszej analizie tego problemu rozpatrzono tylko te przypadki, które według wskaźnika Grahama – zgodnie z warunkami podanymi w Załączniku nr 3 Rozporządzenia Ministra Energii (2016) – zakwalifikowano do pierwszego kryterium zagrożenia, tj. do sytuacji normalnej, w której nie występuje zagrożenie pożarowe. Wyselekcjonowane w ten sposób próbki powietrza (według omawianego wskaźnika) wskazywały na brak zagrożenia pożarem endogenicznym.

Na potrzeby dalszej analizy przyjęto następujące założenie – jeżeli wskaźnik Grahama sygnalizuje brak występowania zagrożenia pożarowego (sytuację normalną), to stężenia gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (takich jak: etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla, czy wodór) – zarówno w przypadku próbek pobranych z rejonów nie poddawanych inertyzacji azotem, jak i próbek pochodzących z rejonów, gdzie stosuje się azot – powinny kształtować się na podobnym, niskim poziomie.

Opierając się na tym założeniu porównane zostały wyniki analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z inertyzowanych azotem rejonów ścian I, II, III i IV z wynikami pochodzącymi z próbek powietrza pobranych z rejonów nie poddawanych inertyzacji.

W tym celu, w pierwszym kroku, przygotowano bazową próbę statystyczną, która składała się z wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i z za tam izolacyjnych, w których nie stosowano azotu jako gazu inertnego. Z bardzo obszernej bazy danych zawierającej wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza kopalnianego – przy pomocy odpowiednich kwerend utworzonych w języku SQL (ang. *structured query language*) (np. Dobre i inni, 1970; Kroenke, 1977; Jewtuszenko i inni, 2018) wyselekcjonowano 36 239 przypadków, według następujących kryteriów:

- próbki powietrza musiały być pobrane ze zrobów ścianowych lub z za tam izolacyjnych – co jest zgodne z zapisami obowiązujących przepisów odnośnie wskaźnika Grahama (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016);
- stężenie azotu powinno być mniejsze od 80% – co pozwala wyeliminować próbki powietrza z podwyższoną zawartością azotu, którą obserwuje się już w początkowej fazie inertyzacji;
- wartość wskaźnika Grahama wyznaczona na podstawie stężeń gazów zawartych w próbkach powietrza musiała mieścić się w przedziale $0 < G \leq 0,0025$ – czyli wybrane próbki reprezentowały poziom zagrożenia pożarowego określony przez przepisy jako sytuacja normalna (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016);
- wartość mianownika wskaźnika Grahama musiała zawierać się w przedziale $0,2 \div 5,7$ – dla wyeliminowania niewiarygodnych (zawyżonych i zaniżonych) wartości tego wskaźnika.

W tablicy 4.1. przedstawiono statystyki opisowe dla wyznaczonej w ten sposób próby statystycznej.

Tablica 4.1. *Próba bazowa* – analiza statystyczna bez modyfikacji próby

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	36239	0,064	0,01	21,20	0,10	0,282	35,580
Propylen [ppm]	36239	0,050	0,01	6,81	0,10	0,133	22,609
Acetylen [ppm]	36239	0,011	0,001	14,000	0,015	0,107	74,646
Tlenek węgla [ppm]	36239	9,132	1	142	22	12,776	3,582
Tlen [%]	36239	18,639	0,01	20,78	20,66	3,546	-3,360
Azot [%]	36239	75,690	3,19	79,99	79,68	10,866	-4,365
Dwutlenek węgla [%]	36239	1,156	0,01	94,87	2,08	4,864	12,957
Metan [%]	36239	4,504	0,00	94,08	10,40	12,554	4,491
Wodór [ppm]	36239	10,021	0,2	5700,0	13,7	60,769	43,995
Wsk. Grahama	36239	0,00074	0,00002	0,00255	0,00169	0,00061	1,002
Mianownik wsk. Grahama	36239	1,419	0,20	5,70	3,40	1,264	1,470

Analizując tablicę 4.1. można stwierdzić, że zawarte w niej średnie stężenia niektórych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla, takich jak: etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla oraz wodór, nie wykazywały oznak podwyższonego stanu zagrożenia pożarem endogenicznym (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010). Natomiast maksymalne stężenia tych gazów były już znacznie wyższe.

Jak wiadomo, percentyl 90 oznacza, że 90% przypadków z posiadanej próby statystycznej jest niższa lub równa wartości wskazanej przez ten parametr. Biorąc to pod uwagę, okazało się, że przynajmniej 90% analizowanych próbek powietrza cechowało się znacznie niższymi stężeniami wymienionych gazów niż wynoszą ich stężenia maksymalne. Wynika z tego, że stężenia analizowanych gazów charakteryzowały się bardzo dużą asymetrią w stosunku do wyznaczonych wartości średnich. Potwierdzają to wysokie wartości skośności, która jest miarą asymetrii rozkładu (np. Warsza i Korczyński, 2014; Malska, 2018).

Sugeruje to, że w omawianej próbie statystycznej znajdowały się przypadki nietypowe (nie pasujące do pozostałych), które w następnym kroku zostały wyeliminowane poprzez zastosowanie reguły dwóch sigm (np. Major, 2007). Odrzucono więc wszystkie próbki powietrza, w których stężenia istotnych gazów znajdowały się poza granicą dwóch odchyłeń standardowych, liczonych od wartości średniej (in plus oraz in minus). Tablica 4.2. przedstawia statystykę opisową wykonaną dla *próby bazowej* pozbawionej wartości odstających poprzez zastosowanie wymienionej reguły.

Tablica 4.2. *Próba bazowa* – analiza statystyczna po usunięciu wartości odstających

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	32463	0,036	0,01	0,62	0,07	0,041	4,992
Propylen [ppm]	32463	0,033	0,01	0,31	0,07	0,034	3,051
Acetylen [ppm]	32463	0,007	0,001	0,223	0,014	0,015	6,934
Tlenek węgla [ppm]	32463	6,955	1	34	18	7,205	1,524
Tlen [%]	32463	19,471	11,55	20,78	20,68	1,499	-2,022
Azot [%]	32463	78,055	54,72	79,99	79,69	2,914	-3,335
Dwutlenek węgla [%]	32463	0,614	0,01	10,85	1,59	0,811	3,224
Metan [%]	32463	1,854	0,00	29,49	6,12	3,791	3,230
Wodór [ppm]	32463	5,371	0,2	130,0	10,2	11,160	5,878
Wsk. Grahama	32463	0,00071	0,00002	0,00255	0,00160	0,00058	1,044
Mianownik wsk. Grahama	32463	1,214	0,20	5,70	2,69	1,068	1,744

Z analizy wyników zawartych w tablicy 4.2. wynika, że po odrzuceniu wartości odstających ilość elementów w próbie zmalała do 32 463. Zabieg ten znacznie poprawił skośność prawie wszystkich analizowanych stężeń gazów i przybliżył ich rozkłady do rozkładu normalnego.

Średnie stężenia rozpatrywanych gazów nie wskazywały na występowanie zagrożenia pożarowego. Dodatkowo stwierdzono, że przynajmniej 90% przypadków nie wykazywało oznak zwiększonej intensywności procesu samozagrzewania węgla (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010).

Tak przygotowana próba statystyczna w dalszej części niniejszej rozprawy będzie nazywana „*Próbą bazową*”.

4.3. Analiza porównawcza *Próby bazowej* z wynikami analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z rejonów rozpatrywanych ścian wydobywczych

Po przygotowaniu *Próby bazowej* – zawierającej wyniki analiz chemicznych próbek powietrza, pobranych z rejonów wydobywczych nie poddawanych inertyzacji azotem, dla których stan zagrożenia pożarowego został określony przez wskaźnik Grahama jako sytuacja normalna – postanowiono porównać ją ze stężeniami gazów zawartych w próbkach powietrza pochodzących z rejonów rozpatrywanych ścian I, II, III i IV, dla których wskaźnik Grahama przedstawiał taki sam stan zagrożenia pożarowego.

Dlatego z próbek pobranych z rejonów tych ścian wybrano tylko te przypadki, które spełniały następujące warunki:

- wartość wskaźnika Grahama obliczona na podstawie stężeń gazów zawartych w rozpatrywanych próbkach powietrza musiała znajdować się w przedziale $0 < G \leq 0,0025$;
- stężenie azotu w wytypowanych próbkach musiała być większe lub równe 80% – odrzucono w ten sposób przypadki nietypowe (np. zapowietrzony) oraz próbki pobrane w czasie, gdy nie prowadzono inertyzacji azotem.

W tablicach 4.3-4.6 przedstawiono statystyki opisowe utworzone dla wyselekcjonowanych w ten sposób wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z rejonów analizowanych ścian. Po każdej tablicy zamieszczono krótkie porównanie stężeń niektórych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla z ich odpowiednikami tworzącymi *Próbę bazową* (tablica 4.2.).

Tablica 4.3. Próba z inertyzacji ściany I – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza reprezentujących sytuację normalną wg wskaźnika Grahama

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana I)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	14	2,499	0,37	8,38	0,38	4,99	2,171
Propylen [ppm]	14	2,458	0,50	10,47	0,57	6,44	2,775
Acetylen [ppm]	14	0,0065	0,001	0,032	0,003	0,014	0,008
Tlenek węgla [ppm]	14	79,214	3	430	3	172	116,078
Tlen [%]	14	5,683	3,47	8,27	3,49	7,74	1,698
Azot [%]	14	93,588	91,37	95,96	91,43	95,58	1,585
Dwutlenek węgla [%]	14	0,634	0,21	1,52	0,29	0,95	0,348
Metan [%]	14	0,014	0,00	0,05	0,00	0,05	0,023
Wodór [ppm]	14	17,221	3,4	131,0	4,1	29,4	33,539
Wsk. Grahama	14	0,00040	0,00002	0,00199	0,00002	0,00102	0,00055
Mianownik wsk. Grahama	14	19,118	15,96	21,94	16,47	21,733	2,105

Analizując dane zawarte w tablicy 4.3. można stwierdzić, że średnie stężenia niektórych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (etylen, propylen, tlenek węgla oraz wodór) zawartych w próbkach powietrza wyselekcjonowanych z rejonu ściany I przekraczały średnie stężenia ich odpowiedników z tablicy 4.2. (w przypadku etylenu i propylenu nawet o dwa rzędy), pomimo iż średnia wartość wskaźnika Grahama była niższa niż w *Próbie bazowej*. Dodatkowo zauważono, że średnie stężenia etylenu, propylenu i tlenku węgla były nawet wyższe od maksymalnych stężeń ich odpowiedników z tablicy 4.2.

Jeśli natomiast chodzi o mianownik wskaźnika Grahama, to jego wartości we wszystkich próbkach przekraczały graniczny poziom 5,7, co według wcześniej przeprowadzonych analiz pozwala twierdzić, że wskaźnik Grahama znajdował się poza przedziałem wiarygodności i nie powinien być brany pod uwagę podczas określania poziomu zagrożenia pożarowego.

Średnie stężenie azotu w tych próbkach powietrza wynosiło 95,59%, co znacznie przekraczało wartość jego odpowiednika z *Próby bazowej* (78,06%).

Tablica 4.4. Próba z inertyzacji ściany II – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza reprezentujących sytuację normalną wg wskaźnika Grahama

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana II)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	202	3,817	0,10	12,70	0,95	8,97	3,073
Propylen [ppm]	202	3,233	0,18	13,75	0,66	5,60	2,321
Acetylen [ppm]	202	0,016	0,001	0,126	0,001	0,041	0,021
Tlenek węgla [ppm]	202	126,337	2	565	9	320	129,306
Tlen [%]	202	4,851	0,76	19,71	1,81	8,63	3,439
Azot [%]	202	93,260	80,01	97,83	89,40	96,50	3,331
Dwutlenek węgla [%]	202	1,735	0,07	5,79	1,16	2,24	0,678
Metan [%]	202	0,098	0,00	2,32	0,05	0,15	0,170
Wodór [ppm]	202	50,116	0,7	750,0	5,1	116,0	85,337
Wsk. Grahama	202	0,00066	0,00001	0,00252	0,00004	0,00168	0,00063
Mianownik wsk. Grahama	202	19,863	1,49	25,09	15,06	23,689	4,308

Z analizy danych przedstawionych w tablicy 4.4. wynika, że średnie stężenia etylenu, propylenu, acetyleny, tlenku węgla i wodoru zawarte w próbkach powietrza wyselekcjonowanych z rejonu ściany II przekraczały średnie stężenia tych gazów wyznaczone dla próbek pobranych z rejonów nie poddawanych inertyzacji azotem (tablica 4.2.) – pomimo, że według wskaźnika Grahama obie grupy przedstawiały sytuację normalną. Średnie stężenia etylenu, propylenu i tlenku węgla przewyższały o dwa rzędy średnie stężenia ich odpowiedników z *Próby bazowej*. Opierając się na wartości percentyla 10, można także stwierdzić, że przynajmniej 90% stężeń etylenu i propylenu przekraczało maksymalne stężenia tych gazów w tablicy 4.2.

Zaobserwowano również, że przynajmniej w 90% próbek powietrza wartość mianownika wskaźnika Grahama znacznie przekraczała graniczny poziom 5,7, co (według przeprowadzonych badań) nie pozwala poprawnie ocenić stanu zagrożenia pożarowego w oparciu o ten wskaźnik.

Średnie stężenie azotu w tych próbkach powietrza wynosiło 93,26%, co znacznie przekraczało wartość jego odpowiednika z *Próby bazowej* (78,06%).

Tablica 4.5. Próba z inertyzacji ściany III – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza reprezentujących sytuację normalną wg wskaźnika Grahama

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana III)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	830	0,180	0,01	4,39	0,03	0,28	0,319
Propylen [ppm]	830	0,204	0,01	4,84	0,02	0,34	0,511
Acetylen [ppm]	830	0,015	0,001	0,642	0,001	0,028	0,036
Tlenek węgla [ppm]	830	27,802	1	417	1	74	37,913
Tlen [%]	830	13,619	0,65	19,79	2,61	19,07	5,811
Azot [%]	830	84,453	80,01	99,24	80,30	94,10	5,219
Dwutlenek węgla [%]	830	1,112	0,05	6,72	0,05	2,88	1,100
Metan [%]	830	0,811	0,00	11,98	0,00	2,88	1,942
Wodór [ppm]	830	21,379	0,5	610,0	1,0	36,4	67,479
Wsk. Grahama	830	0,00052	0,00000	0,00253	0,00001	0,00140	0,00058
Mianownik wsk. Grahama	830	8,761	1,43	25,62	2,24	21,367	7,067

Z analizy danych zawartych w tablicy 4.5. wynika, że średnie stężenia gazów, które wydzielają się w procesie samozagrzewania węgla – zawartych w próbkach powietrza wyselekcjonowanych z rejonu ściany III – nie osiągnęły już tak wysokich poziomów jak miało to miejsce w ścianie I i II, co może świadczyć o tym, że stan zagrożenia pożarowego w zrobach ściany III był niższy niż w dwóch poprzednich przypadkach. Jednak również i w tej ścianie zauważono, że średnie stężenia etylenu, propylenu, acetylenu, tlenku węgla i wodoru przekraczały średnie stężenia ich odpowiedników z *Próby bazowej* o jeden rząd – pomimo tego, że obie porównywane grupy zostały ocenione przez wskaźnik Grahama jako sytuacja normalna (czyli jako przypadki, w których nie występuje zagrożenie pożarowe).

Dodatkowo stwierdzono, że średnia wartość wskaźnika Grahama była niższa od jej odpowiednika z *Próby bazowej*.

Również w tym przypadku średnie stężenie azotu przekraczało wartość jego odpowiednika z *Próby bazowej* (78,06%) i wynosiło 84,45%.

Tablica 4.6. Próba z inertyzacji ściany IV – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza reprezentujących sytuację normalną wg wskaźnika Grahama

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana IV)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	85	0,655	0,04	6,87	0,11	0,96	1,058
Propylen [ppm]	85	0,187	0,04	0,87	0,06	0,31	0,132
Acetylen [ppm]	85	0,006	0,001	0,102	0,001	0,013	0,015
Tlenek węgla [ppm]	85	63,800	1	270	7	120	55,514
Tlen [%]	85	7,055	0,63	17,04	1,27	15,47	5,673
Azot [%]	85	86,694	80,14	95,65	81,35	94,11	4,888
Dwutlenek węgla [%]	85	1,132	0,17	4,20	0,42	1,72	0,812
Metan [%]	85	4,998	0,33	14,74	0,71	11,97	4,366
Wodór [ppm]	85	32,769	5,8	112,0	7,9	65,9	25,797
Wsk. Grahama	85	0,00054	0,00001	0,00234	0,00004	0,00142	0,00057
Mianownik wsk. Grahama	85	15,919	4,81	23,33	5,90	22,556	6,582

W przypadku próbek wyselekcjonowanych z rejonu ściany IV średnie stężenia etylenu, propylenu, tlenku węgla i wodoru przekraczały o jeden rząd średnie stężenia ich odpowiedników z tablicy 4.2. Dodatkowo stwierdzono, że średnie stężenia etylenu i tlenku węgla przekraczały nawet maksymalne stężenia tych gazów zawartych w *Próbie bazowej*, która według wskaźnika Grahama odpowiadała temu samemu poziomowi stanu zagrożenia pożarowego. Biorąc pod uwagę wartość mianownika wskaźnika Grahama (określoną przez percentyl 10) można stwierdzić, że przynajmniej 90% przypadków przekraczało wartość 5,7, co (według przeprowadzonych analiz) odpowiada niewiarygodnym wartościom tego wskaźnika.

Średnie stężenie azotu w tych próbkach powietrza wynosiło 86,69% i przekraczało wartość jego odpowiednika z *Próby bazowej* (78,06%).

Podsumowując analizę wpływu inertyzacji azotem na wartość wskaźnika Grahama można sformułować następujące wnioski.

1. Pomimo tego, że wyselekcjonowane próbki powietrza – pobrane z inertyzowanych azotem rejonów ścian I, II, III i IV – zostały ocenione przez wskaźnik Grahama jako przypadki wskazujące na brak zagrożenia pożarem endogenicznym, to średnie stężenia zawartych w nich gazów, wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla, przekraczały (i to czasem znacznie) średnie stężenia ich odpowiedników z *Próby bazowej*, która reprezentowała próbki powietrza ocenione na tym samym poziomie stanu zagrożenia pożarowego, ale pobrane z rejonów nie poddawanych inertyzacji azotem.
2. Duża wartość mianownika wskaźnika Grahama (powodująca zaniżanie rzeczywistego poziomu zagrożenia pożarowego przez ten wskaźnik) wynikała z wysokiego stężenia azotu w analizowanych próbkach powietrza. Było to prawdopodobnie spowodowane tym, że tylko niewielka ilość gazu inertnego przepłynęła przez ognisko samozagrzewania węgla zanim dotarła do miejsca pobierania próbek gazowych do badań (Trenczek, 2003).

4.4. Weryfikacja górnej granicy przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama na przykładzie próbek powietrza pobranych z rejonów ścian poddawanych inertyzacji azotem

Ponieważ dodatkowe stężenie azotu (pochodzące z inertyzacji) zwiększa wartość mianownika wskaźnika Grahama należało sprawdzić, czy określona w rozdziale 3. górna granica przedziału wiarygodności tego wskaźnika jest wystarczającym kryterium w przypadku próbek powietrza pochodzących z rejonów, w których stosuje się inertyzację przy użyciu azotu.

W tym celu z próbek powietrza pobranych z rejonów rozpatrywanych ścian I, II, III i IV, dla których poziom stanu zagrożenia pożarowego został określony przez wskaźnik Grahama jako sytuacja normalna oraz które zawierały stężenie azotu większe lub równe 80% – odrzucono te przypadki, dla których mianownik wskaźnika Grahama przekraczał wartość 5,7. W tablicach 4.7-4.9 zamieszczono statystyki opisowe sporządzone dla wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza, które nie zostały odrzucone według wymienionego warunku, czyli które według wskaźnika Grahama zostały na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącym 95% prawidłowo ocenione jako sytuacja normalna.

Tablica 4.7. Próba z inertyzacji ściany II – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza, dla których mianownik wskaźnika Grahama < 5,7

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana II)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	5	0,770	0,17	1,62	0,17	1,62	0,694
Propylen [ppm]	5	1,168	0,18	2,80	0,18	2,80	1,074
Acetylen [ppm]	5	0,003	0,001	0,005	0,001	0,005	0,002
Tlenek węgla [ppm]	5	25,600	7	46	7	46	17,213
Tlen [%]	5	18,416	16,79	19,71	16,79	19,71	1,112
Azot [%]	5	81,042	80,01	82,50	80,01	82,50	0,996
Dwutlenek węgla [%]	5	0,474	0,20	0,71	0,20	0,71	0,241
Metan [%]	5	0,068	0,05	0,11	0,05	0,11	0,024
Wodór [ppm]	5	27,360	4,5	84,2	4,5	84,2	32,425
Wsk. Grahama	5	0,00090	0,00029	0,00213	0,00029	0,00213	0,001
Mianownik wsk. Grahama	5	3,060	1,49	5,07	1,49	5,073	1,371

Tablica 4.8. Próba z inertyzacji ściany III – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza, dla których mianownik wskaźnika Grahama < 5,7

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana III)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	396	0,095	0,01	1,21	0,04	0,15	0,077
Propylen [ppm]	396	0,056	0,01	0,68	0,02	0,10	0,060
Acetylen [ppm]	396	0,019	0,001	0,242	0,002	0,041	0,029
Tlenek węgla [ppm]	396	23,326	1	130	4	53	22,254
Tlen [%]	396	18,064	15,91	19,79	16,67	19,34	1,011
Azot [%]	396	81,094	80,01	82,96	80,17	82,21	0,768
Dwutlenek węgla [%]	396	0,681	0,05	2,65	0,26	1,27	0,418
Metan [%]	396	0,159	0,00	2,87	0,00	0,62	0,430
Wodór [ppm]	396	5,851	0,5	480,0	0,8	7,1	26,389
Wsk. Grahama	396	0,00069	0,00002	0,00253	0,00013	0,00151	0,00057
Mianownik wsk. Grahama	396	3,425	1,43	5,70	1,92	5,079	1,184

Tablica 4.9. Próba z inertyzacji ściany IV – statystyki opisowe wyników analiz chromatograficznych próbek powietrza, dla których mianownik wskaźnika Grahama < 5,7

Zmienna	Statystyki opisowe (Ściana IV)						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 10	Percentyl 90	Odch. std.
Etylen [ppm]	7	0,111	0,04	0,17	0,04	0,17	0,042
Propylen [ppm]	7	0,056	0,04	0,08	0,04	0,08	0,013
Acetylen [ppm]	7	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,000
Tlenek węgla [ppm]	7	74,429	11	120	11	120	32,536
Tlen [%]	7	16,496	15,94	17,04	15,94	17,04	0,324
Azot [%]	7	81,383	80,66	82,44	80,66	82,44	0,646
Dwutlenek węgla [%]	7	1,317	0,17	2,24	0,17	2,24	0,681
Metan [%]	7	0,763	0,33	1,75	0,33	1,75	0,468
Wodór [ppm]	7	9,943	7,3	18,5	7,3	18,5	3,868
Wsk. Grahama	7	0,00146	0,00023	0,00234	0,00023	0,00234	0,001
Mianownik wsk. Grahama	7	5,071	4,81	5,54	4,81	5,54	0,265

Po odrzuceniu próbek powietrza, dla których wartość mianownika wskaźnika Grahama była większa lub równa wartości 5,7 nasuwają się następujące wnioski (Świerczek, 2021).

1. Nie udało się opracować tablicy ze statystykami opisowymi dla próbek powietrza pobranych z rejonu ściany I, ponieważ wszystkie próbki (według podanego kryterium) zostały odrzucone. Oznacza to, że z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% we wszystkich tych przypadkach wskaźnik Grahama niepoprawnie oceniał stan zagrożenia pożarem endogenicznym jako sytuację normalną.
2. Ilość próbek powietrza pobranych z pozostałych ścian, dla których wskaźnika Grahama poprawnie (według przeprowadzonych badań) oceniał stan zagrożenia pożarem endogenicznym kształtowała się następująco:
 - ściana II – z 202 próbek pozostało 5, czyli odrzucono około 97,5%,
 - ściana III – z 830 próbek pozostało 396, czyli odrzucono około 52,3%,
 - ściana IV – z 85 próbek pozostało 7, czyli odrzucono około 91,8%.

3. Pomimo zastosowania przedstawionego w rozdziale 3. kryterium wiarygodności wskaźnika Grahama średnie stężenia niektórych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (zawarte w pozostałych 408 próbkach powietrza) nadal wyraźnie przekraczały średnie stężenia ich odpowiedników z *Próby bazowej* (tablica 4.2.), dla których stan zagrożenia pożarowego został oceniony przez wskaźnik Grahama jako sytuacja normalna. Wynika z tego, że odrzucenie przypadków, w których mianownik wskaźnika Grahama przekraczał wartość 5,7 było niewystarczającym kryterium wiarygodności tego wskaźnika dla próbek powietrza pochodzących z rejonów ścian, w których stosuje się azot jako gaz inertny. Dlatego też problem niewiarygodnych wartości wskaźnika Grahama wyznaczonych na podstawie próbek powietrza pobranych z takich rejonów został poddany szczegółowej analizie w następnym rozdziale niniejszej rozprawy.

5. Kryteria stosowania wskaźnika Grahama w rejonach poddawanych inertyzacji azotem

Z analiz przedstawionych w rozdziale 4. wynika, że dodatkowe stężenie azotu w próbkach powietrza kopalnianego (pochodzące z inertyzacji) może wpływać na zaniżanie oceny stanu zagrożenia pożarowego określonego przy pomocy wskaźnika Grahama. Może do tego dochodzić nawet, gdy mianownik wskaźnika Grahama znajduje się w przedziale wiarygodności opisanym w rozdziale 3. Dlatego podjęto próbę opracowania kryterium stosowania tego wskaźnika w rejonach, w których prowadzi się inertyzację przy użyciu azotu.

Dla wyznaczenia takiego kryterium postanowiono posłużyć się stężeniami istotnych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla, którymi są min.: etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla i wodór. W tym celu utworzono dwie grupy danych składające się z wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza. Jedna zawierała próbki powietrza pobrane ze zrobów ścianowych i z za tam izolacyjnych, w których nie stosowano azotu jako gazu inertnego – w dalszej części pracy nosi ona nazwę „*Grupa I*”. Natomiast druga grupa składała się z próbek powietrza pobranych w podobnych miejscach, ale zawierających zwiększone stężenia azotu, związane ze stosowaniem inertyzacji – w dalszej części nosi ona nazwę „*Grupa II*”.

Następnie, przy użyciu testu t-Studenta, wyznaczono graniczne stężenia istotnych gazów w *Grupie II*, tak aby uzyskać równość średnich stężeń odpowiadających sobie gazów w *Grupie I* i *Grupie II*. Założono, że osiągnięcie tej równości jest warunkiem koniecznym dla potwierdzenia tego samego stanu zagrożenia pożarowego występującego w obu porównywanych grupach.

5.1. Próba statystyczna składająca się z próbek powietrza zawierających stężenie azotu mniejsze od 80% - *Grupa I*

Jak już wcześniej podano, możliwość wystąpienia uwarunkowań wpływających na zaniżanie oceny stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama jest bardzo niepożądana. Sytuacja taka może bowiem wywołać fałszywe poczucie bezpieczeństwa, co z kolei może skutkować błędnymi decyzjami osób odpowiedzialnych za zwalczanie tego zagrożenia. Najmniej oczekiwanym przypadkiem jest ten, w którym wskaźnik Grahama niepoprawnie oceniałby stan zagrożenia pożarowego jako sytuację normalną (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016), podczas gdy w rzeczywistości zagrożenie pożarowe byłoby na wyższym poziomie. Dlatego też w dalszej analizie omawianego problemu będą rozpatrywane tylko te próbki powietrza, dla których wartości wskaźnika Grahama mieściły się w przedziale od 0 do 0,0025. Zgodnie z Załącznikiem nr 3 do Rozporządzenia Ministra Energii (2016) takie wartości wskaźnika Grahama nie wskazują na występowanie zagrożenia pożarem endogenicznym – sytuacja jest normalna.

Dla wyznaczenia tej próby statystycznej posłużono się obszerną bazą danych zawierającą wyniki analiz chromatograficznych próbek powietrza pobieranych z różnych rejonów wydobywczych kopalń węgla kamiennego. Przy pomocy odpowiednich kwerend napisanych w języku SQL wytypowano tylko te próbki powietrza, które spełniały następujące warunki:

- próbki powietrza były pobrane ze zrobów ścianowych lub zza tam izolacyjnych – według Rozporządzenia Ministra Energii (2016) w tych miejscach należy określać wartość wskaźnika Grahama,
- stężenie azotu w tych próbkach było mniejsze od 80%, ponieważ wyższe stężenia tego gazu obserwuje się już w początkowym etapie inertyzacji,
- wartości wskaźnika Grahama dla tych próbek zawierały się w przedziale $0 < G \leq 0,0025$ – według Rozporządzenia Ministra Energii (2016) oznacza to sytuację normalną (nie występuje zagrożenie pożarowe),
- wartości mianownika tego wskaźnika należały do przedziału $0,2 < (0,265N_2 - O_2) < 5,7$ – według analiz przedstawionych w rozdziale 3. niniejszej rozprawy, z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% oznacza to wiarygodne wartości wskaźnika Grahama.

W tabelicy 5.1. przedstawiono statystyki opisowe przygotowanej w ten sposób próby statystycznej.

Tablica 5.1. Statystyki opisowe wyznaczone dla przypadków, w których stężenie azotu nie przekraczało 80%

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	9624	0,674	0,01	155,00	0,14	8,205	15,056
Propylen [ppm]	9624	0,133	0,01	18,80	0,16	0,943	15,016
Acetylen [ppm]	9624	0,0118	0,001	3,450	0,011	0,089	20,348
Tlenek węgla [ppm]	9624	10,517	1	138	27	15,274	3,078
Tlen [%]	9624	18,116	0,06	20,78	20,72	4,320	-2,724
Azot [%]	9624	74,160	3,05	79,99	79,52	13,343	-3,612
Dwutlenek węgla [%]	9624	1,019	0,05	89,03	2,05	4,914	14,976
Metan [%]	9624	6,687	0,00	96,12	14,15	16,454	3,674
Wodór [ppm]	9624	20,518	0,4	5700,0	41,6	96,910	31,773
Wsk. Grahama	9624	0,00077	0,00002	0,00250	0,00175	0,00062	0,932
Mianownik wsk. Grahama	9624	1,536	0,20	5,70	4,07	1,473	1,223

Z analiz statystyk opisowych przedstawionych w tabelicy 5.1. wynika, że stężenia gazów zawartych w wyselekcjonowanych próbkach powietrza znacznie odbiegały od rozkładu normalnego – wskazują na to wysokie wartości skośności, która jest miarą asymetrii rozkładu. W związku z tym z posiadanej próby statystycznej usunięto elementy odstające poprzez zastosowanie reguły 3 sigma (np. Major, 2007). Oznacza to, że odrzucono wszystkie przypadki, dla których stężenia istotnych gazów znajdowały się poza granicą 3 odchyłeń standardowych, liczonych od wartości średniej. Statystyki opisowe dla tak przygotowanej próby statystycznej przedstawiono w tabelicy 5.2.

Tablica 5.2. Próba statystyczna wyznaczona dla próbek powietrza zawierających stężenie azotu mniejsze od 80% – po odrzuceniu wartości odstających (*Grupa I*)

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	8462	0,036	0,01	0,12	0,08	0,028	1,263
Propylen [ppm]	7985	0,029	0,01	0,10	0,07	0,024	1,367
Acetylen [ppm]	8356	0,0026	0,001	0,008	0,005	0,002	1,250
Tlenek węgla [ppm]	8355	5,706	1	22	14	5,437	1,296
Wodór [ppm]	6958	3,260	0,4	11,0	7,4	2,582	1,159

W tablicy 5.2. zamieszczono statystyki opisowe tylko stężeń gazów istotnych, które wydzielają się w procesie samozagrzewania węgla, zawartych w próbkach powietrza pobranych z rejonów nie poddawanych inertyzacji azotem. Przedstawione gazy tworzą *Grupę I*, którą wykorzystano do dalszej analizy. Z danych przedstawionych w tablicy 5.2. wynika, że usunięcie elementów odstających znacznie zmniejszyło skośność we wszystkich przytoczonych przypadkach, co znacznie zbliżyło ich rozkłady do rozkładu normalnego.

Wartości średnie stężeń gazów istotnych wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla i wodór), w *Grupie I* nie wykazywały oznak podwyższonego stanu zagrożenia pożarem endogenicznym (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010).

5.2. Próba statystyczna składająca się z próbek powietrza zawierających stężenie azotu większe lub równe 80% - *Grupa II*

Aby wyznaczyć próbę statystyczną składającą się ze stężeń gazów zawartych w próbkach powietrza pobranych z rejonów poddawanych inertyzacji azotem posłużono się tą samą bazą danych, co podczas wybierania próbek powietrza tworzących *Grupę I*. W zastosowanej kwerendzie zmieniono jedynie warunek, że stężenie azotu powinno być większe lub równe 80%. Statystyki opisowe powstałej w ten sposób próby przedstawiono w tablicy 5.3.

Tablica 5.3. Statystyki opisowe wyznaczone dla przypadków, w których stężenie azotu było większe lub równe 80%

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	2661	0,080	0,01	8,27	0,13	0,244	21,261
Propylen [ppm]	2661	0,064	0,01	2,80	0,12	0,127	11,699
Acetylen [ppm]	2661	0,0146	0,001	1,510	0,023	0,062	13,840
Tlenek węgla [ppm]	2661	17,902	1	130	54	23,688	1,767
Tlen [%]	2661	17,956	15,57	19,88	19,29	1,004	-0,064
Azot [%]	2661	81,128	80,00	83,24	82,34	0,805	0,475
Dwutlenek węgla [%]	2661	0,661	0,04	4,00	1,46	0,553	1,365
Metan [%]	2661	0,251	0,00	3,71	0,80	0,435	2,617
Wodór [ppm]	2661	39,273	0,5	1860,0	101,0	129,841	6,761
Wsk. Grahama	2661	0,00055	0,00002	0,00250	0,00171	0,00068	1,280
Mianownik wsk. Grahama	2661	3,543	1,33	5,70	5,19	1,173	0,045

Także w tym przypadku (tablica 5.3.) można zauważyć znacząco skośność stężeń przytoczonych gazów, co świadczy o dużej asymetrii rozkładu analizowanych przypadków. Dlatego tę próbę również poddano analizie pod kątem występowania wartości nietypowych, znacznie odstających od średnich. Wykorzystano do tego ponownie metodę 3 sigma, a statystyki opisowe dla próbek powietrza pozostałych po usunięciu wartości odstających przedstawiono w tablicy 5.4.

Tablica 5.4. Próba statystyczna wyznaczona dla próbek powietrza zawierających stężenie azotu większe lub równe 80% – po odrzuceniu wartości odstających *Grupa II*

Zmienna	Statystyki opisowe						
	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Percentyl 90	Odch. std.	Skośność
Etylen [ppm]	2549	0,057	0,01	0,17	0,11	0,039	0,628
Propylen [ppm]	2436	0,041	0,01	0,13	0,08	0,030	1,010
Acetylen [ppm]	2110	0,0031	0,001	0,010	0,007	0,002	1,215
Tlenek węgla [ppm]	2462	12,891	1	60	39	15,739	1,345
Wodór [ppm]	1943	2,965	0,5	11,1	7,5	2,720	1,217

Tablica 5.4. zawiera statystyki opisowe tylko stężeń gazów istotnych, które wydzielają się w procesie samozagrzewania węgla, zawartych w próbkach powietrza pobranych z rejonów poddawanych inertyzacji azotem. Przypadki te tworzą *Grupę II*, którą wykorzystano do dalszych analiz. Usunięcie przypadków nietypowych (znacznie odstających od wartości średniej), podobnie jak w przypadku *Grupy I*, zmniejszyło skośność wszystkich przedstawionych gazów, co zbliżyło ich rozkłady do rozkładu normalnego.

Z analizy statystyk opisowych zawartych w tablicy 5.4. wynika, że średnie stężenia gazów istotnych wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla nie wykazywały oznak podwyższonego stanu zagrożenia pożarowego (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010). Można jednak zauważyć, że średnie stężenia gazów z *Grupy II* – oprócz stężenia wodoru – były wyższe od ich odpowiedników z *Grupy I*.

5.3. Wyznaczenie warunków stosowania wskaźnika Grahama w rejonach poddawanych inertyzacji azotem

W pierwszym kroku porównano średnie stężenia gazów istotnych w *Grupie I* i *Grupie II*. W tym celu zastosowano test t-Studenta na równość wartości średnich. Wyniki tego porównania przedstawiono w tablicy 5.5.

Tablica 5.5. Wyniki testów t-Studenta porównujących równość średnich stężeń gazów (*Grupa I vs Grupa II*)

Grupa I vs Grupa II	Średnia Grupa I	Średnia Grupa II	t dla jednorod. wariacji	df	p dla jednorod. wariacji	t dla niejedn. wariacji	df	p dla niejedn. wariacji
Etylen - grupa I vs Etylen - grupa II	0,0357	0,0569	-30,220	11009	0,000	-25,351	3368,43	0,000
Propylen - grupa I vs Propylen - grupa II	0,0293	0,0415	-20,912	10419	0,000	-18,568	3432,88	0,000
Acetylen - grupa I vs Acetylen - grupa II	0,0026	0,0031	-11,114	10464	0,000	-9,604	2790,95	0,000
Tlenek węgla - grupa I vs Tlenek węgla - grupa II	5,7064	12,8907	-35,203	10815	0,000	-22,262	2636,20	0,000
Wodór - grupa I vs Wodór - grupa II	3,2601	2,9648	4,405	8899	0,000	4,278	2989,15	0,000

Analizując wyniki przeprowadzonych testów (tablica 5.5.) można stwierdzić, że w przypadku wszystkich wymienionych gazów wartość prawdopodobieństwa (p) była bliska zeru. Odrzucono zatem hipotezę zerową (o równości wartości średnich w porównywanych grupach) na rzecz hipotezy alternatywnej, która mówi o braku równości badanych wartości średnich.

Wynika z tego, że pomimo tego iż wskaźnik Grahama klasyfikował próbki powietrza tworzące obie badane *Grupy* jako ten sam stan zagrożenia pożarowego (sytuacja normalna), występują istotne różnice pomiędzy tymi grupami w średnich stężeniach odpowiadających sobie gazów. Średnie stężenia etylenu, propylenu, acetyleny i tlenku węgla w *Grupie II* były wyższe niż w *Grupie I*. Sugeruje to po raz kolejny, że stan zagrożenia pożarowego, który przedstawiały próbki powietrza pobrane z rejonów, gdzie stosuje się azot jako gaz inertny, był wyższy niż określony według wskaźnika Grahama.

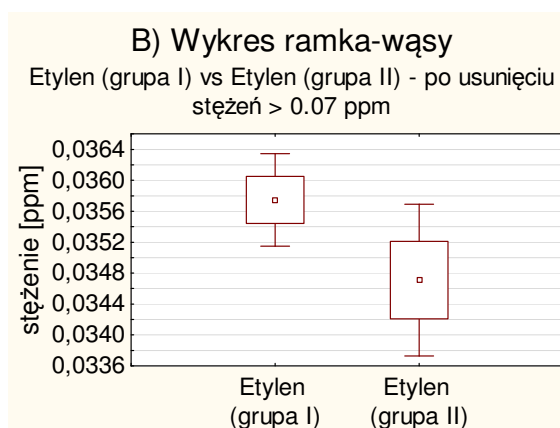
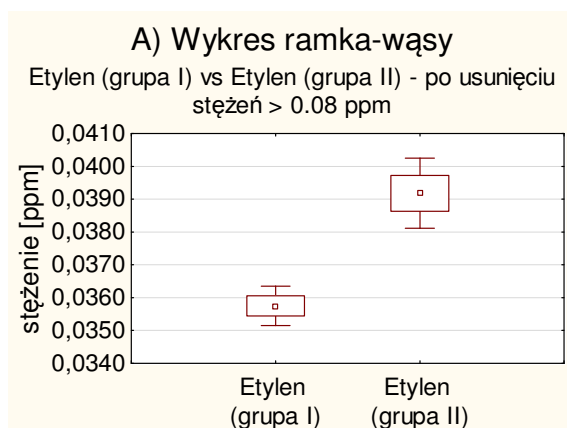
Dalsza analiza polegała na obniżaniu progu stężeń etylenu, propylenu, acetyleny i tlenku węgla w *Grupie II* i porównywaniu jej z *Grupą I*. Wraz z obniżaniem tego progu odrzucano elementy z *Grupy II*, które go przekraczały. Czynność tę uznawano za zakończoną, gdy test t-Studenta wskazywał na równość średnich stężeń porównywanych gazów w obu grupach. Osiągnięcie tej równości było warunkiem koniecznym dla potwierdzenia tego samego poziomu zagrożenia pożarowego występującego w obu porównywanych przypadkach. Średnie stężenie wodoru nie było dalej rozpatrywane, ponieważ stężenie to w *Grupie II* było niższe niż w *Grupie I*. Nie mogło więc zostać użyte do weryfikacji poprawnej oceny stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama w rejonach poddawanych inertyzacji azotem.

W ten sposób dla gazów istotnych (będących zmiennymi *Grupy II*) wyznaczono graniczne stężenia, które nie powinny być przekroczone, aby można było twierdzić (na poziomie pewności wynoszącym co najmniej 95%), że stan zagrożenia pożarowego oceniony według wskaźnika Grahama dla próbek powietrza pobranych z rejonów poddawanych inertyzacji azotem został poprawnie zaliczony jako sytuacja normalna, w której nie występuje zagrożenie pożarem endogenicznym. Należy w tym miejscu wspomnieć, że program

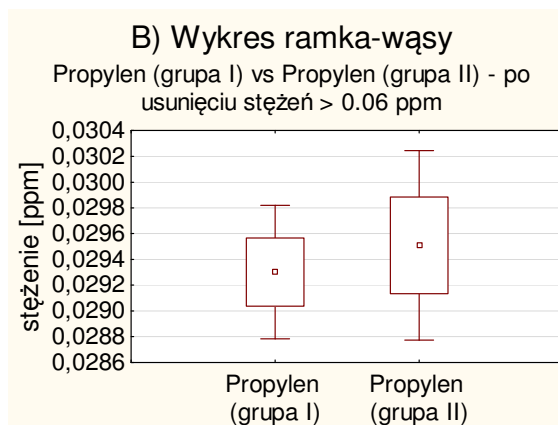
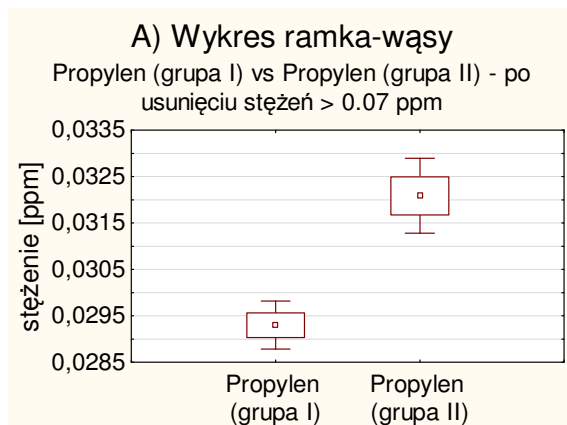
„Statistica” sam dobierał odpowiednie testy t-Studenta w zależności od liczebności badanych grup oraz wyników testów na jednorodność wariancji w analizowanych grupach. Wyniki przeprowadzonych analiz zamieszczono w tabelicy 5.6. Dodatkowo na rysunkach 5.1-5.4 przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników w postaci wykresów „ramka-wąsy”.

Tablica 5.6. Wyniki porównania średnich stężeń gazów istotnych podczas odrzucania coraz niższych stężeń z Grupy II

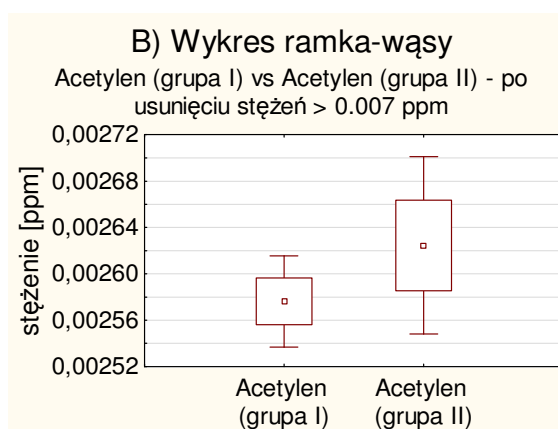
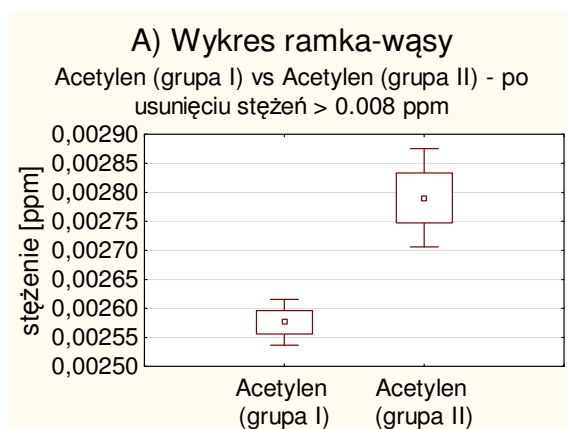
Grupa I vs Grupa II	Średnia Grupa I	Średnia Grupa II	t dla jednorod. wariancji	df	p dla jednorod. wariancji	t dla niejedn. wariancji	df	p dla niejedn. wariancji
Etylen - grupa I vs Etylen - grupa II (usunięto stężenia etylenu > 0,08 ppm)	0,0357	0,0392	-4,975	10395	0,000	-5,487	3260,69	0,000
Etylen - grupa I vs Etylen - grupa II (usunięto stężenia etylenu > 0,07 ppm)	0,0357	0,0347	1,461	10204	0,144	1,769	3189,53	0,077
Propylen - grupa I vs Propylen - grupa II (usunięto stężenia propylenu > 0,07 ppm)	0,0293	0,0321	-4,989	10073	0,000	-5,684	3982,09	0,000
Propylen - grupa I vs Propylen - grupa II (usunięto stężenia propylenu > 0,06 ppm)	0,0293	0,0295	-0,367	9940	0,717	-0,452	4132,31	0,651
Acetylen - grupa I vs Acetylen - grupa II (usunięto stężenia acetyleny > 0,008 ppm)	0,0026	0,0028	-4,645	10363	0,000	-4,500	2939,92	0,000
Acetylen - grupa I vs Acetylen - grupa II (usunięto stężenia acetyleny > 0,007 ppm)	0,0026	0,0026	-1,058	10301	0,290	-1,100	3063,32	0,271
Tlenek węgla - grupa I vs Tlenek węgla - grupa II (usunięto stężenia tlenku węgla > 25 ppm)	5,7064	6,1318	-2,947	10333	0,003	-2,521	2568,03	0,012
Tlenek węgla - grupa I vs Tlenek węgla - grupa II (usunięto stężenia tlenku węgla > 24 ppm)	5,7064	5,8612	-1,080	10305	0,280	-0,950	2582,89	0,342



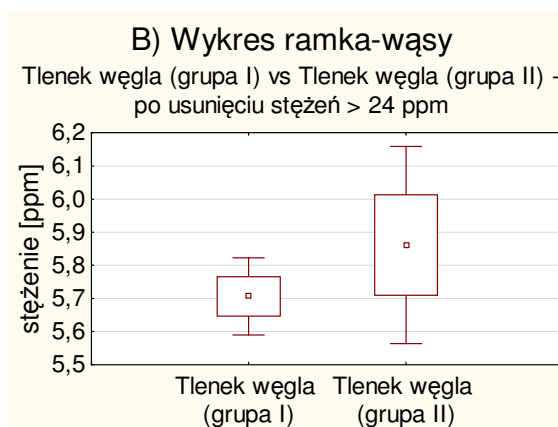
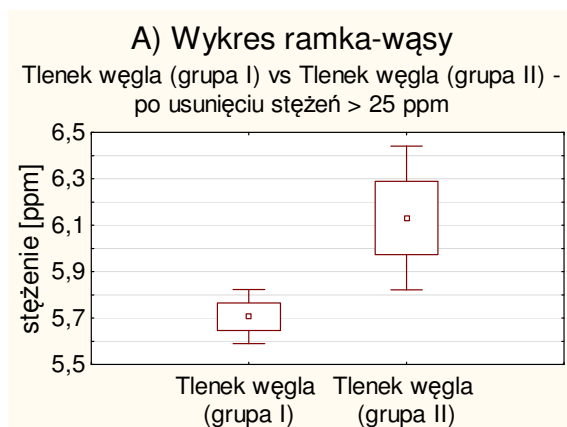
Rys. 5.1. Interpretacja graficzna porównania średnich stężeń etylenu w obu grupach podczas usuwania stężeń tego gazu przekraczających coraz niższe progi w Grupie II



Rys. 5.2. Interpretacja graficzna porównania średnich stężeń propylenu w obu grupach podczas usuwania stężeń tego gazu przekraczających coraz niższe progi w *Grupie II*



Rys. 5.3. Interpretacja graficzna porównania średnich stężeń acetyleny w obu grupach podczas usuwania stężeń tego gazu przekraczających coraz niższe progi w *Grupie II*



Rys. 5.4. Interpretacja graficzna porównania średnich stężeń tlenku węgla w obu grupach podczas usuwania stężeń tego gazu przekraczających coraz niższe progi w *Grupie II*

W oparciu o wyniki analiz zawarte w tabelicy 5.6. można stwierdzić, że odrzucenie z *Grupy II* przypadków przekraczających stężenie 0,08 ppm dla etylenu, 0,07 ppm dla propylenu, 0,008 ppm dla acetyleny i 25 ppm dla tlenku węgla jeszcze różnicowało analizowane grupy na tyle, że nie pozwalało (na akceptowalnym poziomie pewności) przyjąć hipotezy zerowej, która mówi o braku różnic pomiędzy średnimi stężeniami odpowiadających sobie gazów.

Natomiast obniżenie progu stężeń analizowanych gazów w *Grupie II* i nie uwzględnianie przypadków przekraczających stężenie 0,07 ppm dla etylenu, 0,06 ppm dla propylenu, 0,007 ppm dla acetyleny i 24 ppm dla tlenku węgla pozwalało na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącym co najmniej 95% twierdzić, że pomiędzy *Grupami I* i *II* nie ma istotnych różnic w średnich stężeniach odpowiadających sobie gazów. Oznacza to, że zagrożenie pożarowe reprezentowane przez próbki powietrza z tak zmodyfikowanej *Grupy II* można było potraktować jako odpowiadające warunkom *Grupy I*, czyli sytuacji normalnej według wskaźnika Grahama.

Interpretacja graficzna porównania średnich stężeń gazów w obu grupach (rysunki 5.1-5.4) potwierdziła wyniki uzyskane z przeprowadzonych testów. Na przedstawionych rysunkach środkowy kwadrat reprezentował średnie stężenia gazów, natomiast cienkie linie po obu stronach prostokątów (tzw. wąsy) wyznaczały przedział ufności danej średniej – wynoszący 95%. Jeżeli wąsy nie zachodziły na siebie (jak miało to miejsce we wszystkich przypadkach oznaczonych literą „A”), to należało odrzucić hipotezę zerową o równości średnich stężeń gazów w porównywanych grupach. Natomiast w przypadkach oznaczonych literą „B” dla etylenu i acetyleny przedziały ufności zachodziły na siebie. A dla propylenu i tlenku węgla przedziały z *Grupy I* zawierały się całkowicie w przedziałach ufności wyznaczonych dla *Grupy II*. W związku z tym przypadki opisane literą „B” wskazują na to, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, która mówi o równości średnich stężeń gazów w porównywanych grupach.

Z powyższych analiz wynika więc, że jeżeli dla próbek powietrza (zawierających azot w ilości większej lub równej 80%) wskaźnik Grahama określał sytuację normalną (w której nie występuje zagrożenie pożarem endogenicznym) i wartości tego wskaźnika cechowały się wiarygodnością oraz stężenia etylenu w tych próbkach nie przekraczały 0,07 ppm, propylenu – 0,06 ppm, acetyleny – 0,007 ppm, a tlenku węgla – 24 ppm, to stan zagrożenia pożarem endogenicznym oceniony wg wskaźnika Grahama (na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącym co najmniej 95%) był prawidłowy (Świerczek, 2020).

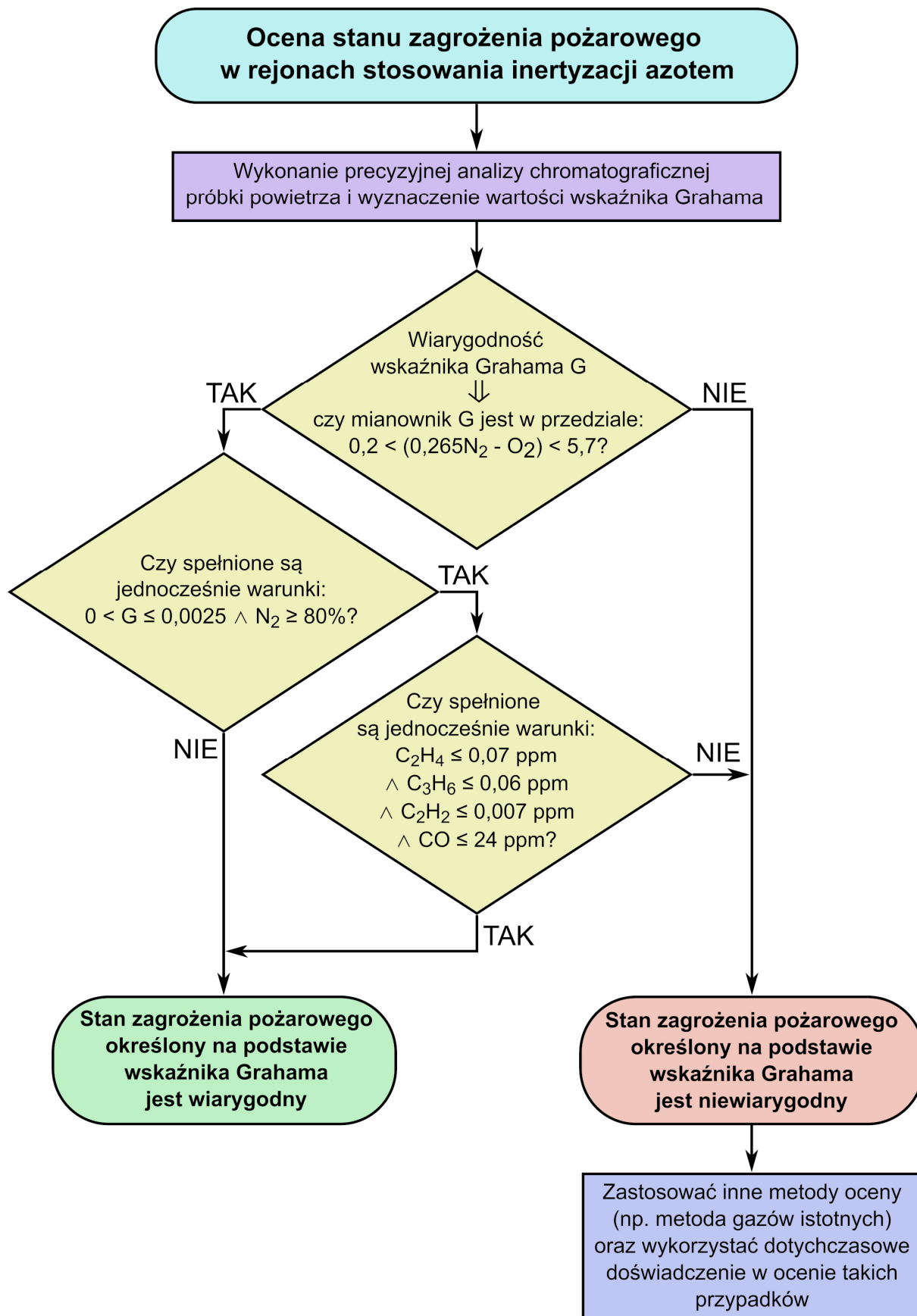
Przeprowadzone analizy wpływu zwiększonych stężeń azotu na wartość wskaźnika Grahama pozwoliły na opracowanie warunków stosowania tego wskaźnika w rejonach kopalń, w których stosuje się ten gaz do inertyzacji.

Sposób postępowania w takich przypadkach powinien być następujący. Jeżeli wskaźnik Grahama wyznaczony dla próbki powietrza określa stan zagrożenia pożarem endogenicznym jako sytuację normalną (nie występuje zagrożenie pożarem endogenicznym), a zawartość azotu w tej próbce jest większa bądź równa 80%, to zaleca się dokonanie następujących czynności sprawdzających.

1. Sprawdzenie, czy wskaźnik Grahama jest wiarygodny, czyli czy wartość jego mianownika znajduje się w przedziale $0,2 < (0,265N_2 - O_2) < 5,7$. Jeżeli wartość mianownika jest poza wymienionym zakresem należy odrzucić interpretację zagrożenia pożarowego przedstawianą przez ten wskaźnik. Natomiast, gdy wskaźnik Grahama znajduje się w przedziale wiarygodności, to należy przejść do postępowania opisanego w punkcie 2.
2. Sprawdzenie, czy spełniony jest warunek stężenia gazów: etylen $\leq 0,07$ ppm, propylen $\leq 0,06$ ppm, acetylen $\leq 0,007$ ppm i tlenek węgla ≤ 24 ppm. Jeżeli podany warunek jest spełniony, to oceniony, najniższy stan zagrożenia pożarowego według

wskaźnika Grahama jest prawidłowy. W przeciwnym razie należy posługiwać się innymi kryteriami oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym – na przykład metodą gazów istotnych (Trenczek, 2003).

Opisany algorytm postępowania został zobrazowany za pomocą schematu blokowego przedstawionego na rysunku 5.5. Przeprowadzone analizy potwierdziły, że postępowanie zgodnie z proponowanym schematem znacznie zwiększa pewność interpretacji stanu zagrożenia pożarem endogenicznym według wskaźnika Grahama, w szczególności w rejonach poddawanych inertyzacji azotem.



Rys. 5.5. Schemat blokowy algorytmu postępowania podczas oceny stanu zagrożenia pożarowego w zrobach ścian i za tamami izolacyjnymi

6. Poziom zagrożenia pożarem endogenicznym wyznaczany przy pomocy sztucznej sieci neuronowej

W poprzednich rozdziałach niniejszej rozprawy omówiono zakres wartości mianownika wskaźnika Grahama, dla którego można twierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że wskaźnik ten jest wiarygodny (rozdział 3.). Podano także warunki stosowania wskaźnika Grahama w przypadku, gdy na jego podstawie określono brak zagrożenia pożarem endogenicznym, a stężenie azotu w analizowanej próbce powietrza było podwyższone (rozdział 5.). Nadal jednak szukać trzeba odpowiedzi na pytanie, jak należy interpretować stan zagrożenia pożarem endogenicznym w przypadku, gdy mianownik wskaźnika Grahama, obliczony dla danej próbki powietrza, znajduje się poza przedziałem wiarygodności lub jest ujemny?

W dalszej części rozprawy przedstawiono propozycję odpowiedzi na to pytanie poprzez wykorzystanie najnowszego osiągnięcia informatycznego, jakim są sztuczne sieci neuronowe (ang. *artificial neural networks*) (np. Abraham, 2005; Krogh, 2008; Krenker i inni, 2011) oraz uczenie maszynowe (ang. *machine learning*) (np. Gurney, 1997; Zocca i inni, 2017; El-Shahat, 2019; Rosa, 2019; Tran, 2022).

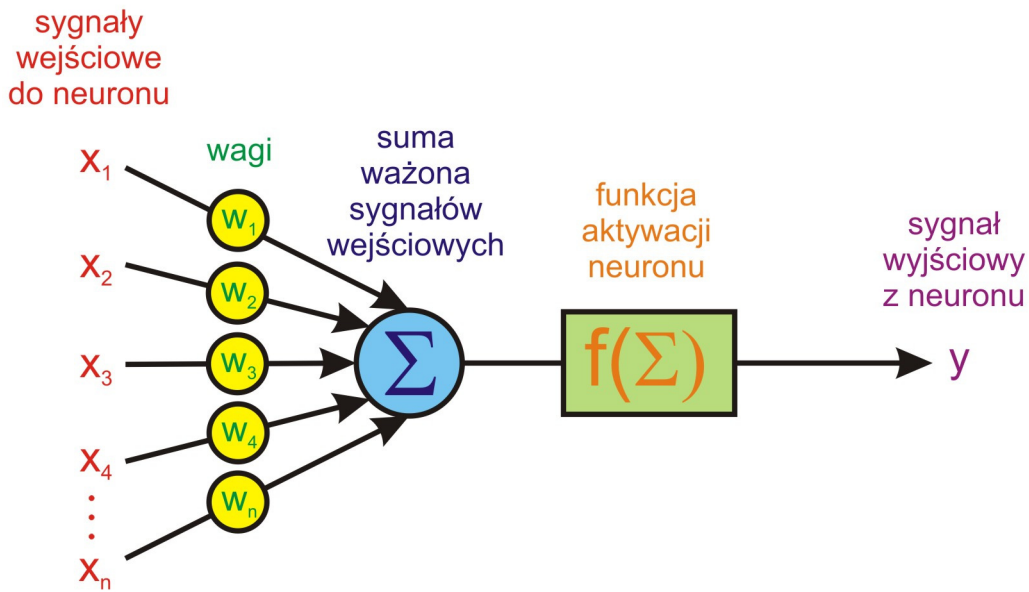
Sztuczne sieci neuronowe znajdują obecnie zastosowanie w wielu dziedzinach życia i są jedną z najprężniej rozwijających się dziedzin nauki. Nieograniczone wręcz możliwości interpretacji przez te sieci różnych zagadnień przemawiają za tym, aby podjąć próbę użycia ich w problematyce związanej z prawidłową oceną stanu zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego.

6.1. Wstęp do uczenia maszynowego

Uczenie maszynowe polega na zapamiętywaniu wzorców podczas szkolenia sztucznej sieci neuronowej, które to wzorce służą następnie do poszukiwania rozwiązań dla nowych danych (Christopher, 2006). Ogólnie mówiąc, sztuczna sieć neuronowa – po odpowiednim wyszkoleniu – może samodzielnie znajdować rozwiązania według wyuczonego schematu. Znamienny jest fakt, że w tym wypadku nie jest konieczne programowanie algorytmu rozwiązania danego problemu przez człowieka, gdyż ten algorytm tworzy się automatycznie w procesie uczenia sieci. Dzięki temu sztuczna sieć neuronowa może wychwycić zależności pomiędzy danymi, na które człowiek mógłby nie zwrócić uwagi.

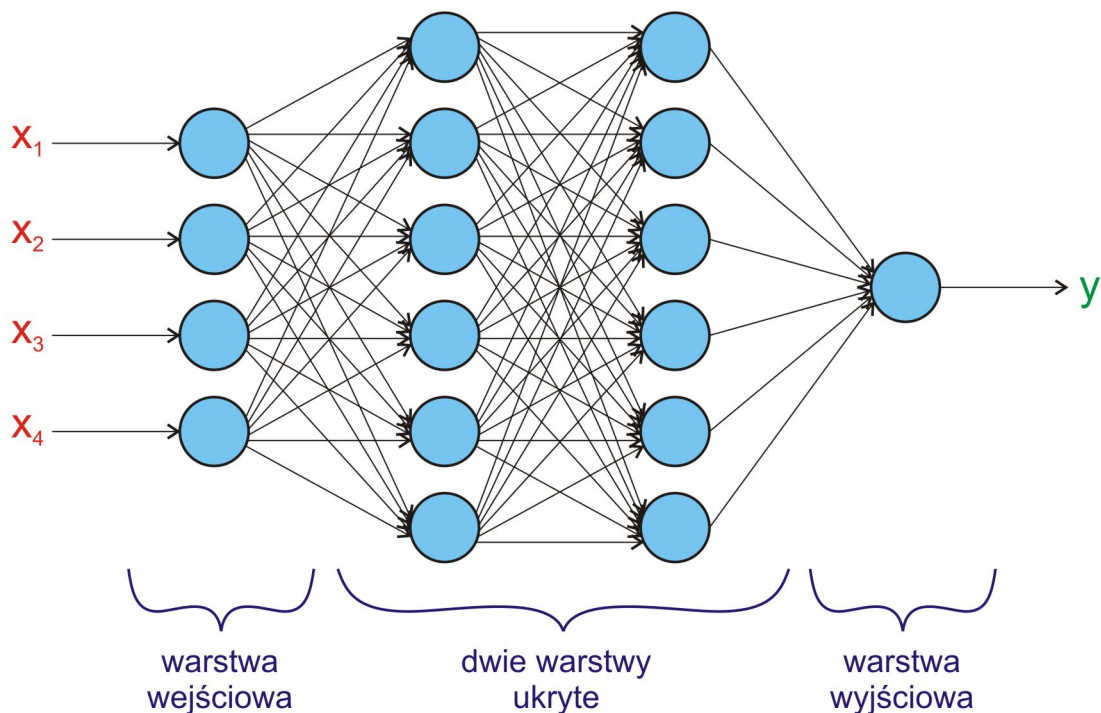
Przed rozpoczęciem uczenia maszynowego należy utworzyć model (graf) sieci neuronowej, który składa się z elementów zwanych neuronami. Nazwa tego pojedynczego elementu pochodzi od jego biologicznego odpowiednika znajdującego się w mózgu człowieka. Neuron (w przypadku uczenia maszynowego) jest reprezentowany przez fragment kodu, który sumuje iloczyny sygnałów wejściowych do neuronu oraz ich wag. Tak zsumowany sygnał jest następnie konwertowany przez nieliniową funkcję nazywaną funkcją aktywacji (pobudzenia) neuronu i jest podawany na wyjście z neuronu. Rolą funkcji aktywacji jest więc wyznaczenie wartości sygnału wyjściowego z neuronu na podstawie sumy ważonej sygnałów wejściowych do neuronu (np. Tadeusiewicz i Szaleniec, 2015; Sharma i inni, 2020; Dubey i inni, 2022).

Ilość wejść do pojedynczego neuronu jest nieograniczona, ale na wyjściu pojawia się tylko jeden sygnał. Działanie pojedynczego neuronu w ujęciu uczenia maszynowego przedstawiono na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Graficzne przedstawienie działania pojedynczego neuronu

Jeden lub kilka neuronów połączonych z warstwą wejściową (warstwą danych wejściowych) i wyjściową (warstwą wyników) tworzy sieć neuronową – zwaną perceptronem (np. Gallant, 1990; Gardner i Dorling, 1998; Olmedo i inni, 2018). W praktyce można spotkać mniej lub bardziej złożone struktury sieci neuronowych, tworzące perceptrony jedno lub wielowarstwowe (np. Ruck i inni, 1990; Popescu i inni, 2020; Ramchoun i inni, 2016). Schemat przykładowego perceptronu dwuwarstwowego przedstawiono na rysunku 6.2. – jest to przykład jednokierunkowej sieci neuronowej.



Rys. 6.2. Przykładowy schemat perceptronu dwuwarstwowego

Jak pokazano na rysunku 6.2, neurony w jednej warstwie ukrytej nie łączą się między sobą. Każdy neuron z warstwy wyższej otrzymuje sygnały od wszystkich neuronów znajdujących się w warstwie poprzedzającej. Przedstawiony perceptron składa się z dwóch warstw ukrytych (stąd wzięła się nazwa zaprezentowanej sieci – perceptron dwuwarstwowy), a w każdej z nich znajduje się po 6 neuronów. W warstwie wejściowej znajdują się cztery neurony, do których podawane są sygnały (dane) wejściowe – x_1 , x_2 , x_3 oraz x_4 . Odpowiedź (y) opisywanej sieci uzyskujemy po przejściu sygnału przez jeden neuron znajdujący się w warstwie wyjściowej.

Ilość neuronów w tzw. warstwie ukrytej oraz ilość warstw ukrytych są podstawowymi parametrami jakie należy określić podczas tworzenia sieci neuronowej. Parametry te zależą przede wszystkim od złożoności modelowanego procesu i mocy obliczeniowej komputera wykorzystanego w procesie uczenia sieci. To sugeruje, że dysponując dużą mocą obliczeniową najlepiej byłoby zastosować możliwie największą liczbę warstw ukrytych – z ogromną ilością neuronów. Nic bardziej mylnego. W procesie ustalania architektury sieci neuronowej należy bowiem mieć na uwadze fakt, że zbyt „rozrośnięta” sieć może prowadzić do tak zwanego efektu przeuczenia sieci (ang. *overfitting*) (np. Schaffer, 1993a; Ying, 2018; Rice i inni, 2020). Dzieje się tak wtedy, gdy sieć zbyt uzależnia swoje działanie od danych użytych podczas jej uczenia (nadmiernie dopasowuje się do tych danych), co nie daje podstaw do jej generalizacji (Tadeusiewicz i Szaleniec, 2015). Z kolei zbyt mała ilość warstw oraz neuronów może prowadzić do niedouczenia sieci (ang. *underfitting*) (np. Bernstein, 2010; Jabbar i Khan, 2015; Czajkowski i Kretowski, 2019), kiedy to sieć nie może uzyskać odpowiedniego dopasowania do danych użytych podczas uczenia – nie osiąga zadanego poziomu błędu (StatSoft – internetowy podręcznik statystyki).

Osoba zajmująca się tworzeniem sztucznej sieci neuronowej boryka się więc z wieloma problemami już podczas wyboru topologii sieci. Oczywiście można w tej kwestii posiłkować się wieloma opracowaniami z tego zakresu. Przykładowo Lippmann (1987) w swojej pracy podał, że perceptron wielowarstwowy z dwiema ukrytymi warstwami jest wystarczający do utworzenia obszarów klasyfikacji o dowolnie pożądanym kształcie. Natomiast Goodfellow i inni (2016) w swojej książce „Deep learning” podali, że większa ilość warstw ukrytych może skutkować lepszym uogólnieniem sieci neuronowej dla szerokiego zakresu danych. Nie istnieje jednak jeden przepis na uzyskanie sieci neuronowej działającej na akceptowalnym poziomie dokładności. Można więc przyjąć, że wybór ostatecznej topologii sieci jest uzależniony od intuicji osoby tworzącej sieć neuronową oraz od wyników eksperymentów przeprowadzonych na różnych topologiach, utworzonych dla konkretnego problemu.

W uczeniu maszynowym, oprócz przedstawionej na rysunku 6.2. sieci jednokierunkowej, można spotkać także wiele innych architektur. Najczęściej stosowane to (np. Haykin, 2008; Hagan i inni, 2014):

- sieci rekurencyjne (sieć Hopfielda, maszyna Boltzmanna),
- samoorganizujące się mapy (sieć Kohonena),
- sieci wektorów wspierających,
- sieci oparte na radialnych funkcjach bazowych.

Należałoby teraz odpowiedzieć na pytanie w jaki sposób sztuczna sieć neuronowa potrafi nauczyć się rozwiązywania konkretnego problemu?

Według Tadeusiewicza i Szaleńca (2015) uczenie jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej polega na dopasowywaniu (podczas kolejnych pętli obliczeniowych) odpowiedzi udzielanych przez sieć do odpowiedzi wzorcowych, należących do zbioru uczącego. Podczas każdego kroku pętli uczącej (tzw. epoki) dochodzi do obliczania błędu estymacji sieci. Następnie, poprzez wsteczną propagację błędów (ang. *backpropagation*) (np. Erb, 1993;

Magoulas i inni, 1997; Boden, 2002), dochodzi do rzutowania tego błędu na neurony znajdujące się w warstwach ukrytych. Każdemu neuronowi zostaje przypisana wartość błędu, która jest wyliczana na podstawie błędów pochodzących od wszystkich neuronów, do których wysłany został sygnał wyjściowy z tego neuronu. Następnie, zgodnie z zastosowanym algorytmem uczenia, dochodzi do zmiany wag sygnałów wejściowych do neuronów – w każdej kolejnej epoce.

Wartości ustalonych w ten sposób wag sygnałów wejściowych dla wszystkich neuronów stanowią „wiedzę” jaką posiadała sieć neuronowa (Tadeusiewicz i Szaleniec, 2015).

Podczas procesu uczenia sztucznej sieci neuronowej można sprawdzać zdolność do jej generalizacji, na przykład poprzez tzw. walidację prostą (np. Larsen i inni, 1996; Bessa i inni, 2014; Jung, 2022;). Ze zbioru uczącego wydziela się wtedy losowo pewną część danych, które nie są używane do uczenia sieci, a jedynie do jej walidacji i określania błędu estymacji. Czyli tworzy się dwa zbiory: uczący i walidacyjny.

Drugim popularnym sposobem oceny, czy sieć neuronowa nie dopasowała się zbyt dokładnie do danych uczących (czyli, czy cechuje się odpowiednim stopniem generalizacji) jest zastosowanie walidacji krzyżowej. W tej metodzie dane wejściowe dzieli się na wiele podzbiorów, a następnie model jest trenowany na każdym z tych podzbiorów po kolei. Natomiast dokładność estymacji modelu jest oceniana na pozostałych podzbiórach (np. Schaffer, 1993b; Krogh i Vedelsby, 1994; Prechelt, 1998).

6.2. Przygotowanie danych do nauki sztucznej sieci neuronowej

Dane wejściowe do uczenia sztucznej sieci neuronowej zaczerpnięto z bazy danych przechowującej wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych z różnych rejonów kopalń węgla kamiennego. Próbkę te pochodziły z miejsc, w których zgodnie z przepisami (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016) należy określać wartości wskaźnika Grahama – czyli ze zrobów ścianowych oraz z za tam izolacyjnych. Przy pomocy odpowiednich kwerend zapisanych w języku SQL (ang. *structured query language*) pozyskano zestaw danych, który w każdym wierszu zawierał stężenia etylenu, propylenu, acetyleny, tlenku węgla, tlenu, azotu, dwutlenku węgla i wodoru. Wybrano akurat te gazy, ponieważ niektóre z nich są produktem utleniania lub rozpadu termicznego węgla, a inne mają bezpośredni wpływ na proces samozagrzewania węgla. Dodatkowo są one oznaczane podczas precyzyjnej analizy chromatograficznej przy monitorowaniu zagrożenia pożarowego.

Następnie – posługując się wskaźnikiem pożarowym WSS (Słowik, 2020) – każdemu wierszowi przypisano jedną z czterech kategorii zagrożenia pożarowego w taki sposób, aby korelowały one z kryteriami wskaźnika Grahama zamieszczonymi w przepisach górniczych.

Wskaźnik pożarowy WSS (Słowik, 2020) jest to średnia arytmetyczna z siedmiu wskaźników nazwanych: WSS-1, WSS-2, WSS-3, WSS-4, WSS-5, WSS-6 i WSS-7. Wymienione wskaźniki uzyskano przy wykorzystaniu m.in. analizy liczb kryterialnych i stanowią je zależności uwzględniające gazy istotne z punktu widzenia procesu utleniania węgla. Końcową formę wskaźniki uzyskały w wyniku szeregu analiz i przekształceń, których celem było dostosowanie i zoptymalizowanie ich do warunków kopalnianych. Stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik WSS uwzględnia ocenę zagrożenia pożarami wyrobisk górniczych stosowaną przez polskie przepisy górnicze (Słowik, 2020).

Z powyższego wynika więc, że uzyskanych w ten sposób kategorii zagrożenia pożarowego nie można traktować stricte jako kryteriów wskaźnika Grahama, ponieważ sposób ich otrzymania nie bazował na standardowym wzorze, który służy do obliczania wartości tego wskaźnika (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016). Otrzymane kategorie zagrożenia, które posłużyły jako dane w procesie uczenia sieci neuronowej, uzyskano wiążąc

ze sobą stężenia wielu różnych gazów (takich jak: etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla, tlen, azot, dwutlenek węgla i wodór), a nie tylko tlenu, azotu i tlenku węgla.

Jest to więc całkowicie nowe podejście do problemu niewiarygodnych wartości wskaźnika Grahama, które (jak się później okazało) pozwala niwelować wpływy zakłóceń pochodzących od podwyższonych stężeń azotu w próbkach powietrza oraz umożliwia określanie stopnia zagrożenia pożarowego w przypadkach, w których wskaźnik Grahama znajduje się poza przedziałem wiarygodności lub jest ujemny.

Ponieważ opracowane w ten sposób cztery kategorie zagrożenia pożarowego korelują z kryteriami wskaźnika Grahama, dlatego można zastosować do nich te same działania prewencyjne, które są ustalone dla tego wskaźnika w obowiązujących przepisach górniczych (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016).

Dane przygotowane do nauki sztucznej sieci neuronowej charakteryzowały się następującą liczebnością przypadków:

- kategoria I zagrożenia pożarowego – 40 000 (42,69% całości),
- kategoria II zagrożenia pożarowego – 40 000 (42,69% całości),
- kategoria III zagrożenia pożarowego – 10 887 (11,62% całości),
- kategoria IV zagrożenia pożarowego – 2 818 (3% całości).

Tak duża rozbieżność w liczebnościach uzyskanych kategorii jest związana z tym, że w praktyce górniczej próbek powietrza reprezentujących najwyższy stan zagrożenia pożarowego jest znacznie mniej niż próbek powietrza reprezentujących niski lub lekko podwyższony stan zagrożenia.

W uczeniu maszynowym należy jednak dążyć do tego, żeby liczebność prób dla każdej klasy była porównywalna. Jeśli ilości przypadków w klasach są znacząco różne (kategorie nie są zbalansowane), to może dochodzić do popełniania dużych błędów związanych z precyzją predykcji sieci neuronowej (np. Chawla i inni, 2002; Plessis i Sugiyama, 2014; Sun i inni, 2022). Chodzi o to, że dokładność prognozy sieci może być bardzo dobra w klasach o dużej liczebności, a jednocześnie bardzo słaba w klasach, które charakteryzują się małą liczbą przypadków.

W celu uniknięcia błędów pochodzących od nieprawidłowego zbalansowania kategorii można postąpić w jeden z następujących sposobów:

- Losowo zmniejszyć liczebność dużych klas (ang. *undersampling majority class*) (np. Ofek i inni, 2017; Mohammed i inni, 2020; Wang i inni, 2020) – w takim przypadku doszłoby do znacznego zmniejszenia ilości danych w klasach od I do III, co mogłoby skutkować utratą potencjalnie ważnych informacji potrzebnych do wyuczenia sieci neuronowej na odpowiednim poziomie dokładności.
- Zwiększyć liczebność małych klas (ang. *oversampling minority class*) (np. Singh i Dhall, 2018; Mohammed i inni, 2020; Rachburee i Punlumjeak, 2021) poprzez losowe dodawanie kopii danych w każdej (mało licznej) klasie. Jednak zbyt duża ilość zdublowanych przypadków może prowadzić do tego, że algorytm uczący zbyt dokładnie się do nich dopasuje, co może skutkować brakiem dobrej generalizacji sieci neuronowej i powstaniem efektu przeuczenia sieci (ang. *overfitting*) (np. Chawla i inni, 2002).
- Dodać sztuczne dane do klas charakteryzujących się małą liczebnością, np. poprzez użycie metody SMOTE (ang. *synthetic minority over-sampling technique*) (np. Chawla i inni, 2002; Jishan i inni, 2015; Mansourifar i Shi, 2020) – jest to jedna z najczęściej stosowanych obecnie metod zwiększania liczebności klas (np. Bahaweres i inni 2020; Glazkova, 2020; Fonseca i inni, 2021).

Aby nie utracić potencjalnie ważnych danych z kategorii I i II postanowiono zwiększyć ilość przypadków w kategoriach III i IV posługując się metodą SMOTE. Algorytm tej metody działa w następujący sposób (Chawla i inni, 2002; Wang, 2006):

- w klasach mniejszościowych znajduje w każdym wierszu k-najbliższych sąsiadów (dla każdej cechy),
- wyznacza proste z wybranego punktu do wyszukanych k-sąsiadów,
- generuje losowo punkty na wyznaczonych liniach.

Poprzez zastosowanie algorytmu SMOTE zwiększono licznosc danych w kategoriach III oraz IV, tak że w każdej kategorii ilość przypadków wynosiła 40 000.

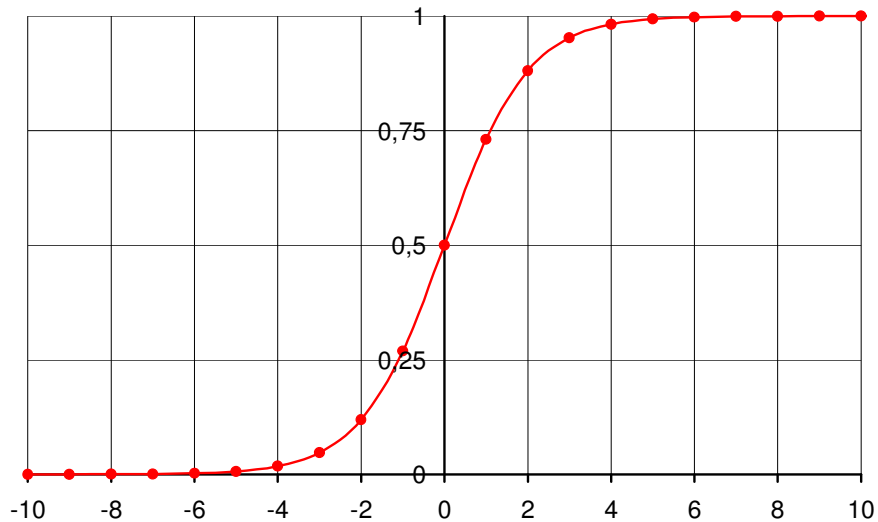
6.3. Sposób tworzenia sieci neuronowych

Do utworzenia modeli sztucznych sieci neuronowych użyto silnika TensorFlow (np. Abadi i inni, 2016; Goldsborough, 2016) firmy Google. Jest to kompleksowa platforma zawierająca darmowe biblioteki (ang. *open source*), która oferuje zestaw narzędzi do projektowania oraz trenowania sieci neuronowych. Można je pobrać ze strony www.tensorflow.org. TensorFlow jest uniwersalnym środowiskiem obliczeniowym, który obsługuje wiele języków programowania.

W roku 2018 doktorant ukończył studia podyplomowe prowadzone w Instytucie Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, na kierunku: „Sieci, systemy komputerowe i bazy danych”. Udział w tych studiach był bardzo pomocny w procesie tworzenia programu komputerowego generującego i uczącego różne topologie sztucznych sieci neuronowych. Sieci neuronowe, które użyto na potrzeby niniejszej rozprawy zostały wygenerowane i uczone przy wykorzystaniu języka Python (np. Richert, 2013). Przykładowy kod, który posłużył do utworzenia i uczenia sieci z jedną warstwą ukrytą znajduje się w załączniku nr 1. Wszystkie utworzone sieci neuronowe to perceptrony jednokierunkowe, które uczono z tzw. nauczycielem, czyli każdemu zestawowi danych wejściowych odpowiadała jedna wartość wyjściowa – odpowiedź wzorcowa (np. Mia i inni, 2015; Tadeusiewicz i Szaleniec, 2015; Popescu i inni, 2020).

W czasie trenowania utworzonych sieci neuronowych algorytm uczenia modyfikował wagi każdego neuronu w celu minimalizacji wartości błędu, który wynikał z różnicy pomiędzy odpowiedzią sieci i odpowiedzią wzorcową (Tadeusiewicz i Szaleniec, 2015). Było to realizowane przy pomocy wstecznej propagacji błędu oraz algorytmu optymalizacyjnego o nazwie ADAM (ang. *adaptive moment estimation*) (Kingma i Ba, 2015). Według Bocka i innych (2018) jest to jeden z najbardziej popularnych optymalizatorów, a niektórzy badacze (np. Ruder, 2017) twierdzą nawet, że jak dotąd jest to najlepszy optymalizator możliwy do zastosowania podczas uczenia sztucznej sieci neuronowej.

W każdym neuronie, znajdującym się w warstwach ukrytych utworzonych sieci neuronowych, suma ważona sygnałów wejściowych była argumentem dla funkcji Sigmoid, którą zastosowano do aktywacji neuronu. Czyli każdy neuron w modelowanej sieci mógł osiągać na wyjściu wartości z przedziału od 0 do 1 (np. Kilian i Siegelmann, 1993; Menon i inni, 1996) – rysunek 6.3.



Rys. 6.3. Wykres funkcji Sigmoid zastosowanej do aktywacji neuronów w warstwach ukrytych utworzonych sieci neuronowych

Według Tadeusiewicza i Szaleńca (2015) funkcja Sigmoid jest najbardziej popularna w obecnie stosowanych sieciach neuronowych i pozwala na bardzo dobre dopasowanie parametrów sieci do rozwiązywanego zagadnienia.

Po przygotowaniu danych szkoleniowych oraz określeniu podstawowych parametrów sztucznej sieci neuronowej ostatnim etapem był dobór odpowiedniej topologii sieci. Jak już wspomniano wcześniej, podczas ustalania topologii sieci należy wybrać taką ilość warstw ukrytych, aby z jednej strony sieć charakteryzowała się jak najmniejszym błędem popełnianym podczas estymacji, a z drugiej strony cechowała się dobrą generalizacją – czyli aby nie dochodziło do przeuczenia sieci (ang. *overfitting*).

Ponieważ jedni badacze uważają, że sztuczna sieć neuronowa o dwóch warstwach ukrytych wystarczy do opisanie każdego problemu (Lippmann, 1987), a inni skłaniają się ku większej ilości warstw (Goodfellow i inni, 2016), dlatego przeprowadzono analizę kilkudziesięciu różnych topologii sztucznych sieci neuronowych, w celu uzyskania modelu najlepiej dopasowanego do danych.

Utworzone sieci neuronowe posiadały 8 neuronów w warstwie wejściowej, co odpowiadało ośmiu stężeniom gazów znajdujących w każdym wierszu przygotowanego zbioru uczącego (etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla, tlen, azot, dwutlenek węgla i wodór).

Natomiast w warstwie wyjściowej każdej sztucznej sieci neuronowej znajdowały się cztery neurony, które charakteryzowały jedną z czterech wyznaczonych kategorii zagrożenia pożarowego, korelujących z kryteriami wskaźnika Grahama.

Utworzone sieci neuronowe sklasyfikowano w zaprezentowany niżej sposób (w podanych oznaczeniach stosowano następującą nomenklaturę: pierwsza liczba oznacza ilość neuronów w warstwie wejściowej, ostatnia liczba reprezentuje ilość neuronów w warstwie wyjściowej, liczba/liczby znajdujące się pomiędzy nimi określają ilość warstw ukrytych oraz ilość neuronów w każdej warstwie ukrytej):

a. Sieci neuronowe z jedną warstwą ukrytą

- 6 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-6-4,
- 12 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-12-4,
- 18 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-18-4,
- 24 neurony w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-24-4,

- 30 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-30-4,
 - 36 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-36-4,
 - 42 neurony w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-42-4,
 - 48 neuronów w jednej warstwie ukrytej – oznaczenie sieci 8-48-4.
- b. Sieci neuronowe z dwoma warstwami ukrytymi
- 6 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-6-6-4,
 - 12 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-12-12-4,
 - 18 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-18-18-4,
 - 24 neurony w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-24-24-4,
 - 30 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-30-30-4,
 - 36 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-36-36-4,
 - 42 neurony w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-42-42-4,
 - 48 neuronów w każdej z dwóch warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-48-48-4.
- c. Sieci neuronowe z trzema warstwami ukrytymi
- 6 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-6-6-6-4,
 - 12 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-12-12-12-4,
 - 18 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-18-18-18-4,
 - 24 neurony w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-24-24-24-4,
 - 30 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-30-30-30-4,
 - 36 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-36-36-36-4,
 - 42 neurony w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-42-42-42-4,
 - 48 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych – oznaczenie sieci 8-48-48-48-4.

Z przedstawionego zestawienia wynika, że na potrzeby niniejszych badań przygotowano 24 różne topologie sztucznych sieci neuronowych. Każdą taką sieć poddano procesowi uczenia, który wynosił 1 000 000 cykli obliczeniowych (tzw. epok).

Aby móc sprawdzać zdolność do generalizacji każdej sieci neuronowej, podczas ich szkolenia stosowano walidację prostą. Z posiadanego zbioru danych uczących wydzielano losowo 20% przypadków (24 000 wierszy), które nie brały udziału w szkoleniu sieci, ale służyły do wyznaczania jakości wyuczenia sieci (ang. *accuracy*) (np. Hashem i Schmeiser, 1995; Shi i inni, 1999; Kavzoglu, 2009) oraz wartości funkcji strat (ang. *loss function*) (np. Webb, 1999; Li i Yang, 2003) – były to tzw. dane testowe.

6.4. Poszukiwania optymalnej sieci neuronowej

Dla każdej z 24 opracowanych topologii sieci neuronowych przeprowadzono analizę jakości estymacji (ang. *accuracy*), czyli sprawdzono jak dobrze każda z sieci dopasowywała się do danych uczących i testowych. Dzięki temu można było określić, czy podczas szkolenia sieci nie dochodziło do jej przeuczenia (ang. *overfitting*), czyli do nadmiernego dopasowania się do danych.

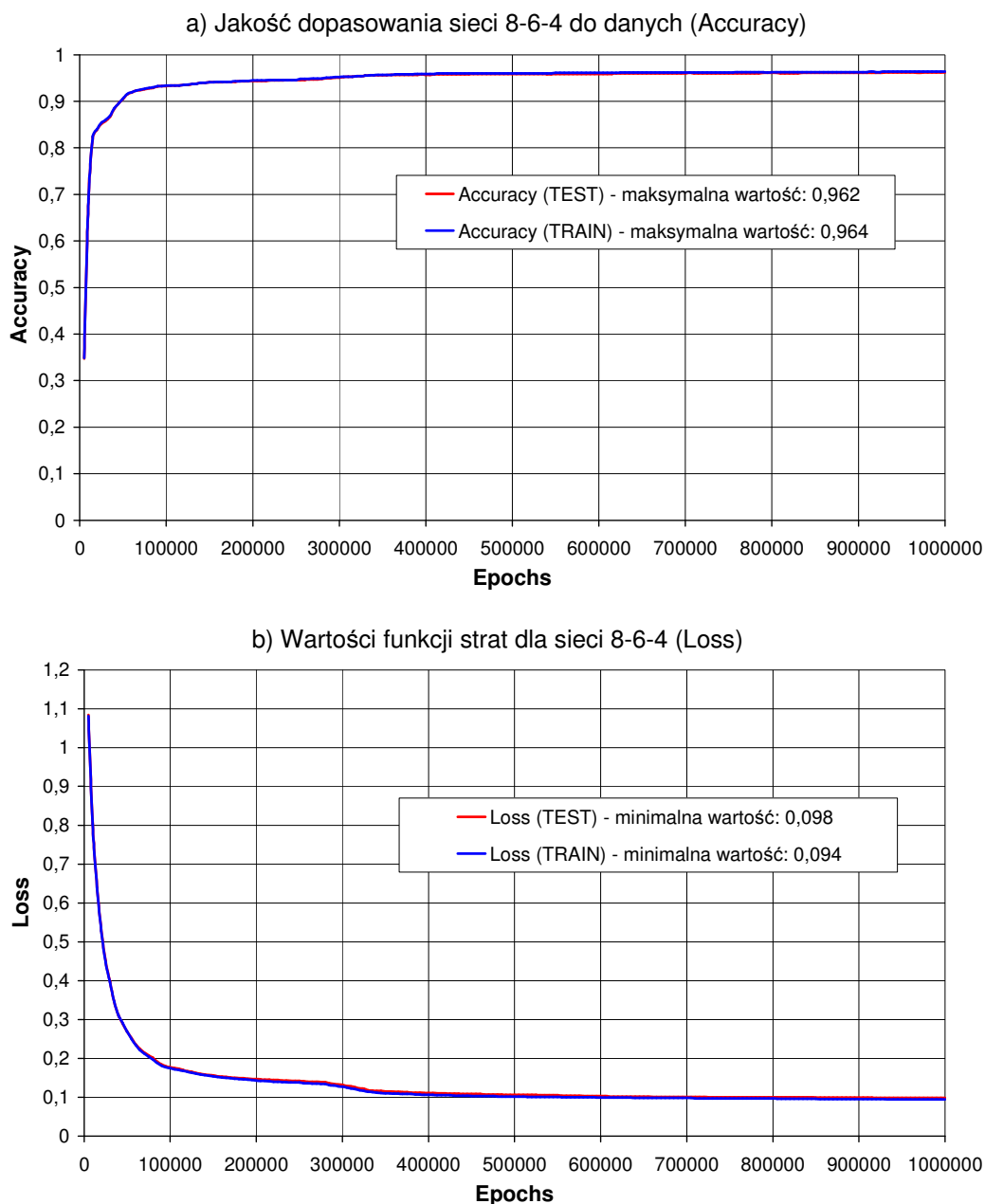
Dodatkowo wyznaczano wartość funkcji strat (ang. *loss function*), która określała różnicę pomiędzy wynikami podawanymi przez sieć neuronową, a prawidłowymi wynikami zawartymi w zbiorze danych uczących oraz testowych.

W związku z tym, podczas szkolenia opracowanych sieci neuronowych, algorytm uczący zapisywał do pliku wartości następujących wielkości:

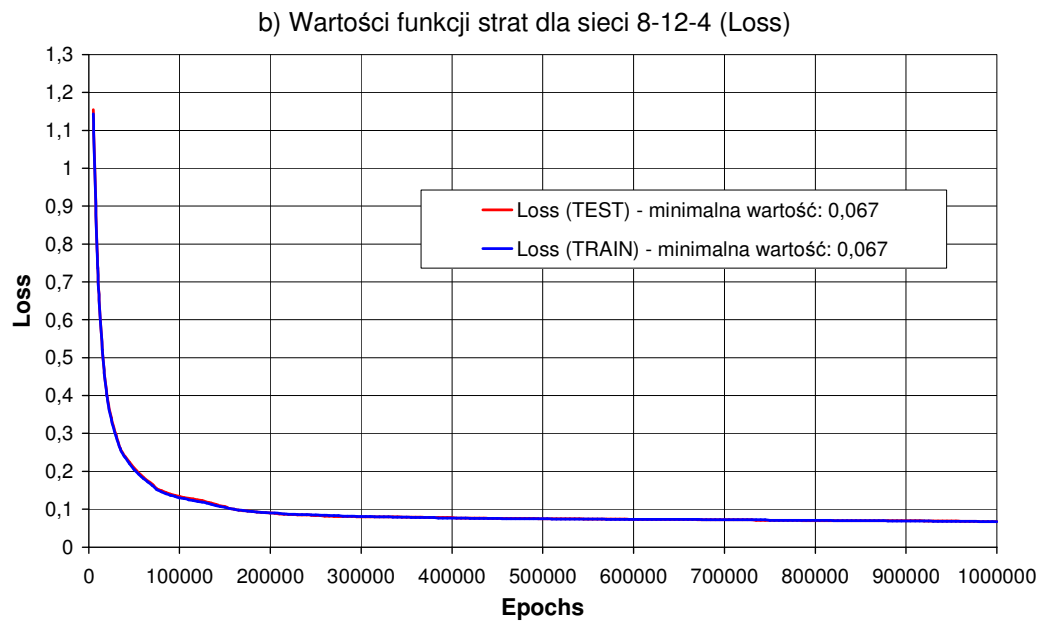
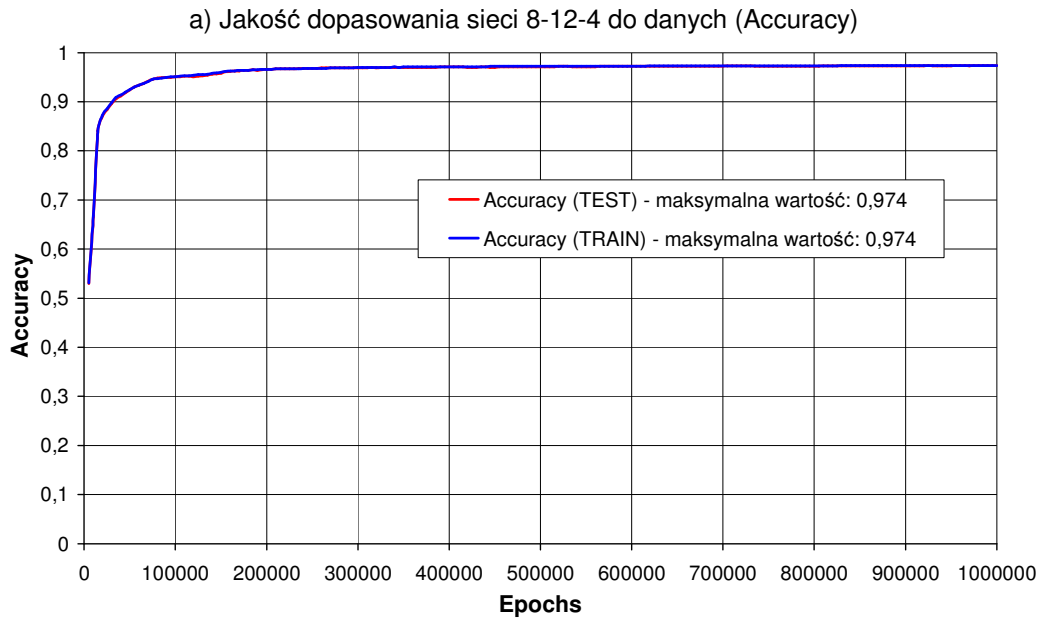
- Accuracy (TRAIN) – jakość dopasowania sieci do danych uczących,
- Accuracy (TEST) – jakość dopasowania sieci do danych testowych,
- Loss (TRAIN) – wartość funkcji straty dla danych uczących,

- Loss (TEST) – wartość funkcji straty dla danych testowych.
Następnie dla otrzymanych wyników utworzono odpowiednie wykresy.

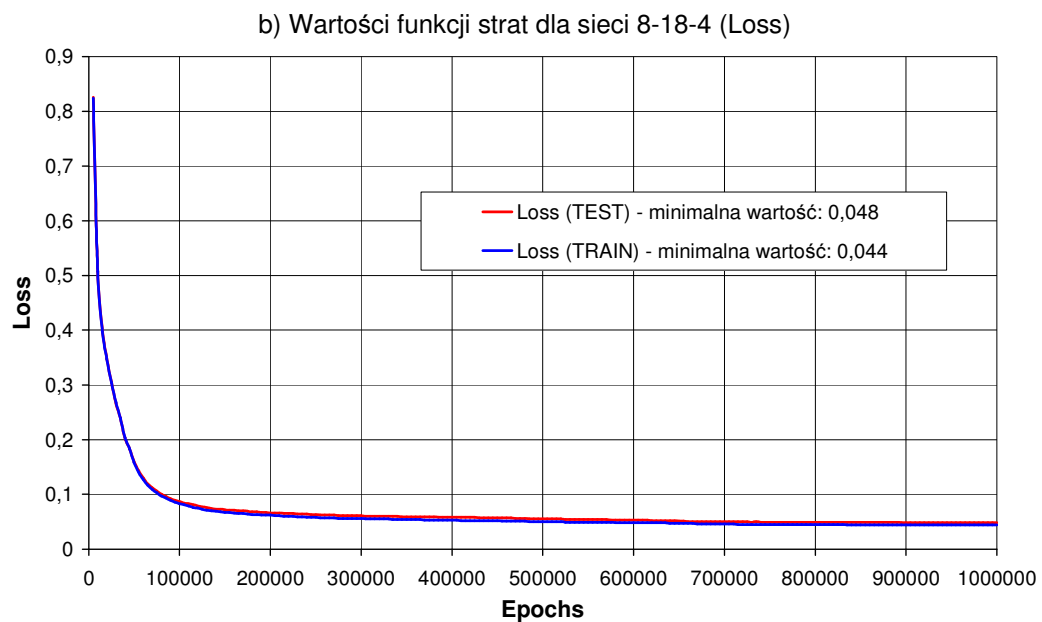
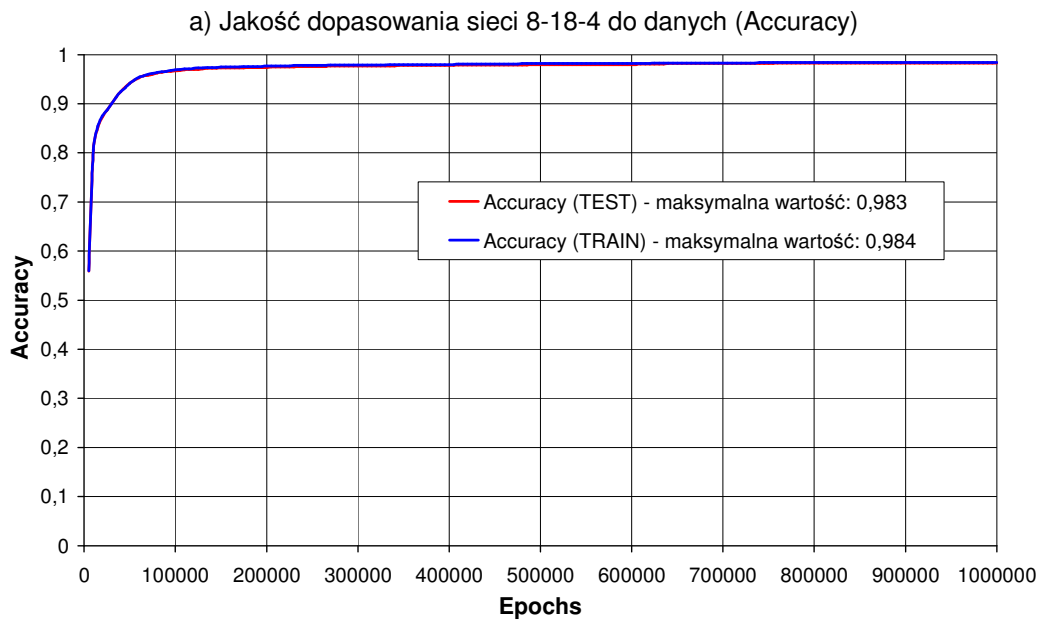
Na rysunkach 6.4-6.11 przedstawiono wykresy jakości dopasowania do danych oraz wartości funkcji strat dla opracowanych jednowarstwowych sieci neuronowych.



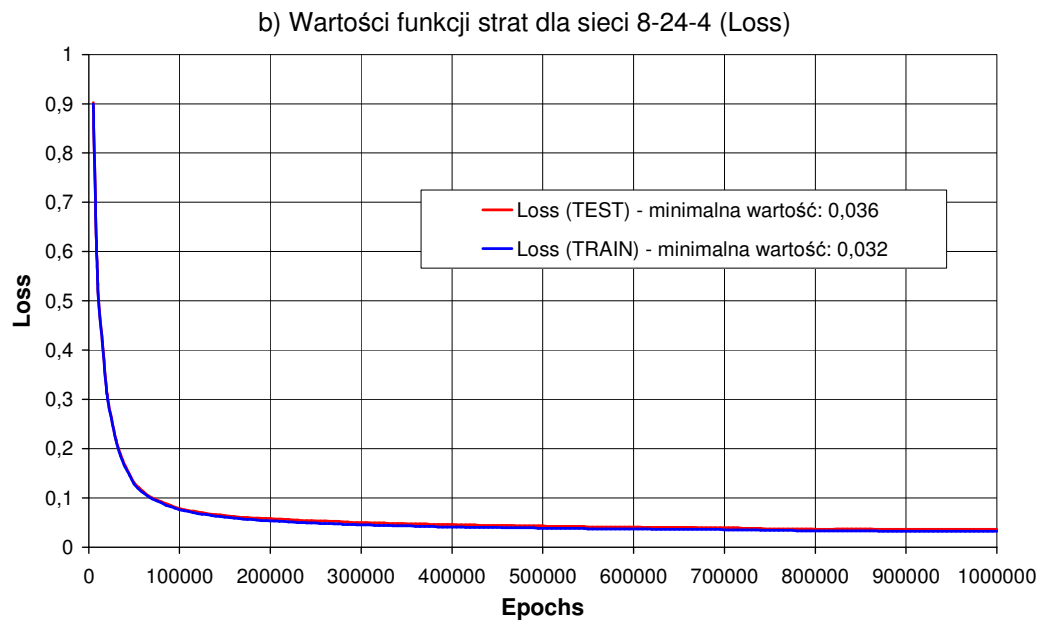
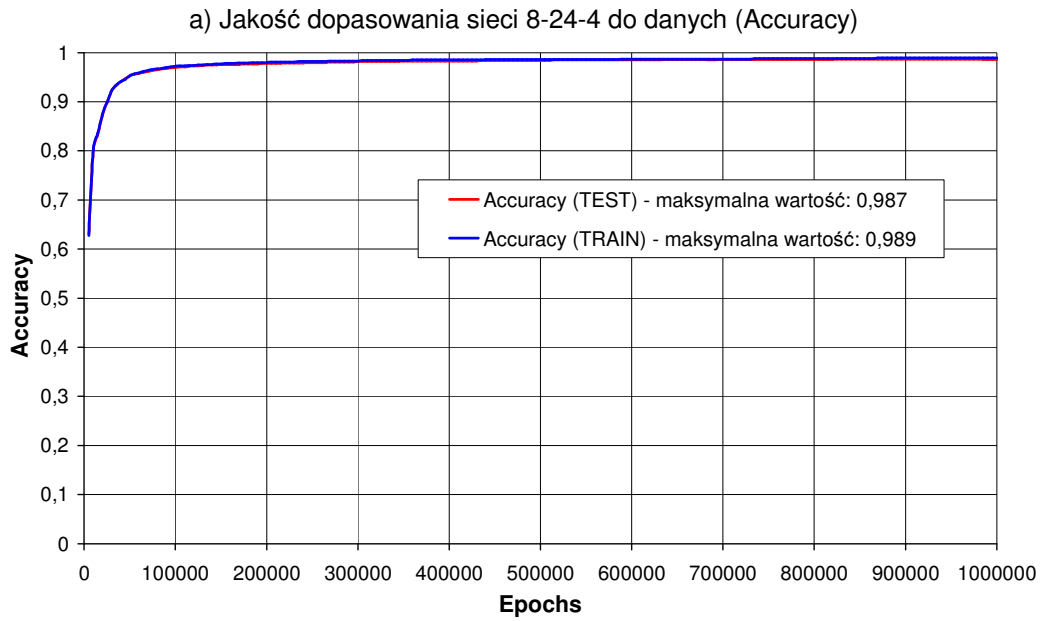
Rys. 6.4. Jakość dopasowania sieci 8-6-4 do danych oraz wartości funkcji strat



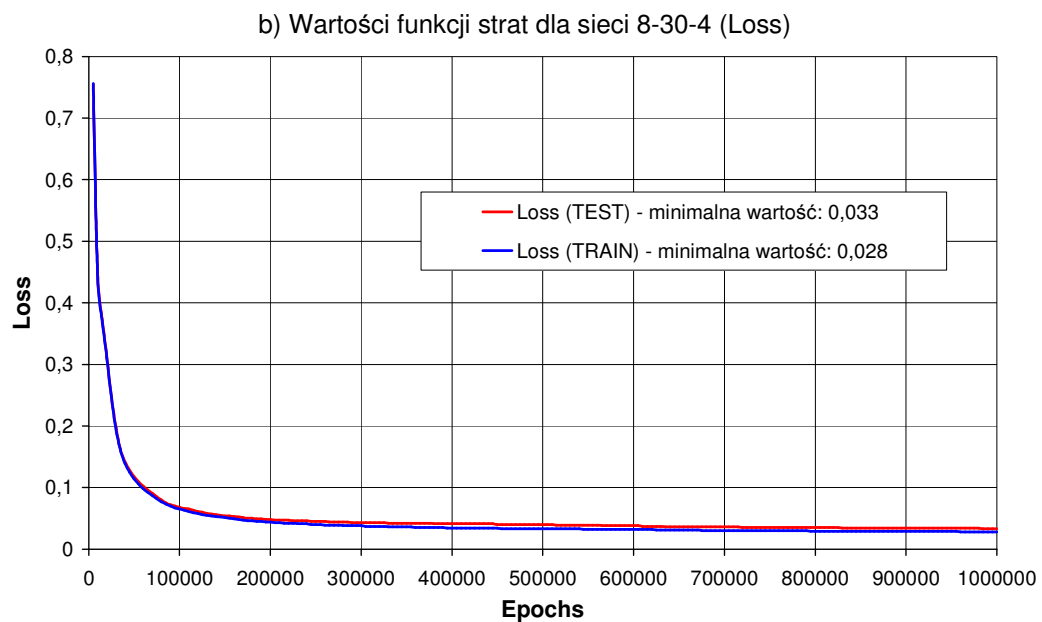
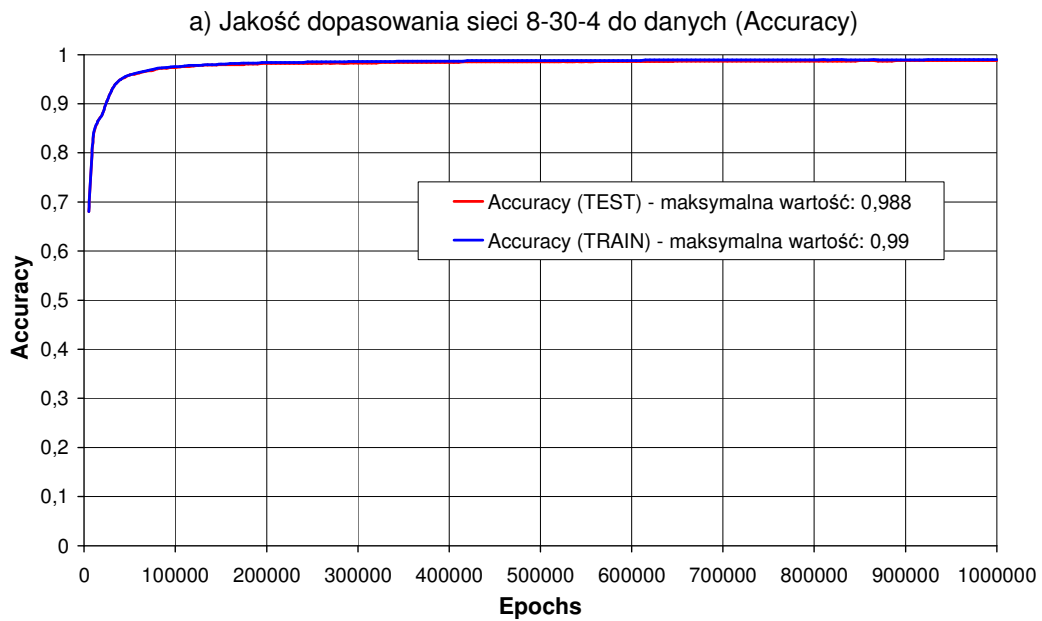
Rys. 6.5. Jakość dopasowania sieci 8-12-4 do danych oraz wartości funkcji strat



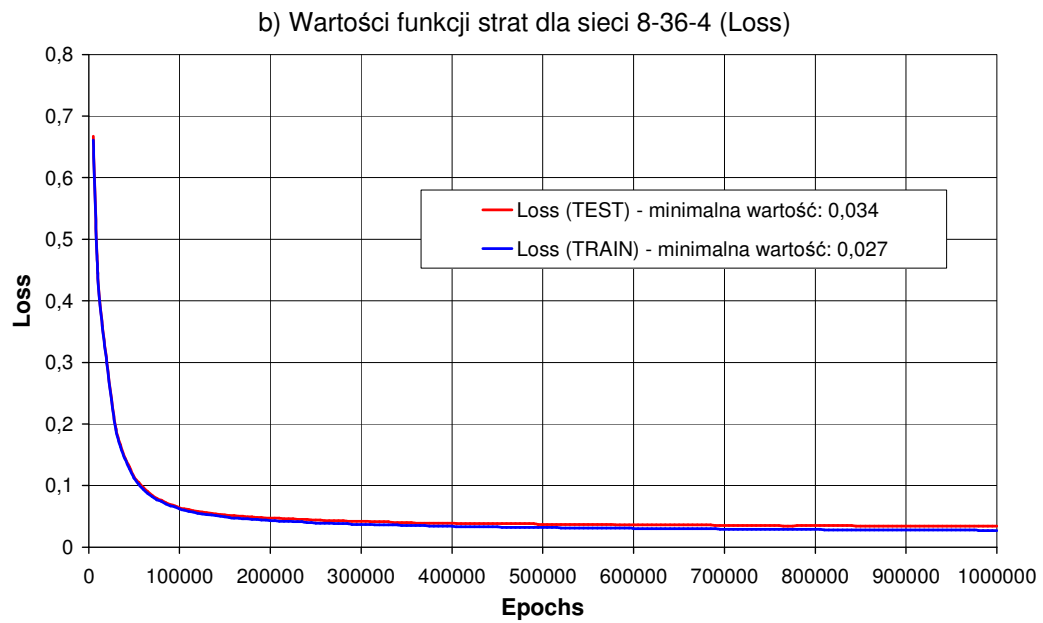
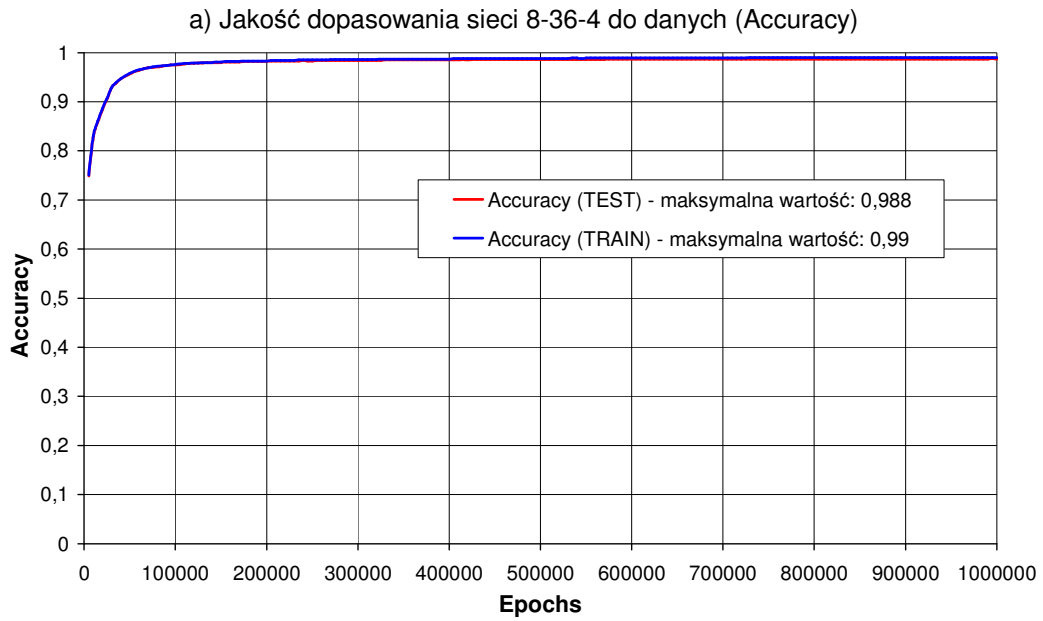
Rys. 6.6. Jakość dopasowania sieci 8-18-4 do danych oraz wartości funkcji strat



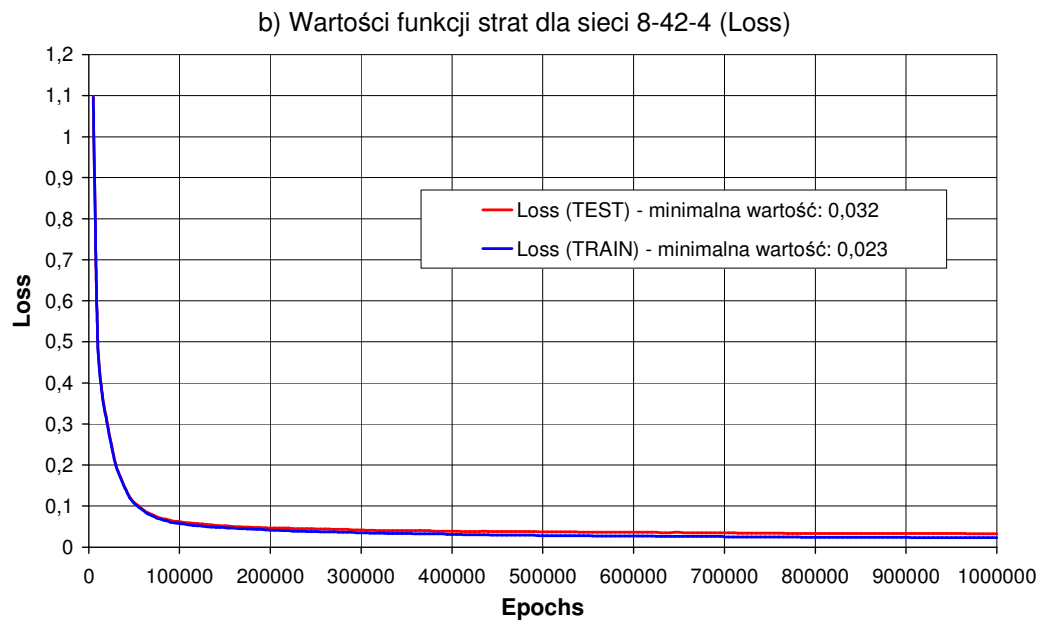
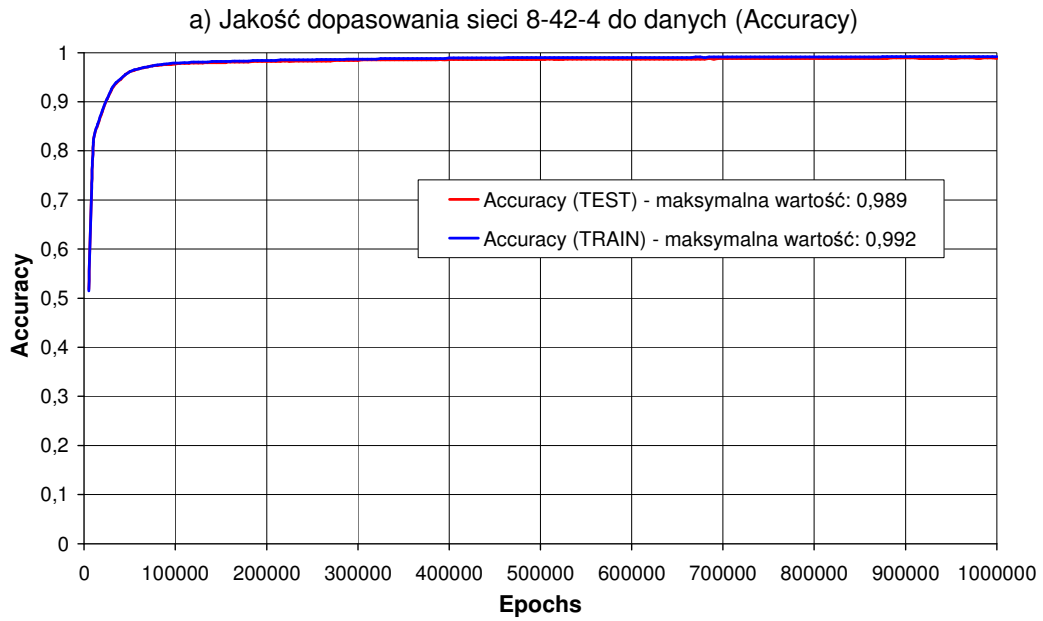
Rys. 6.7. Jakość dopasowania sieci 8-24-4 do danych oraz wartości funkcji strat



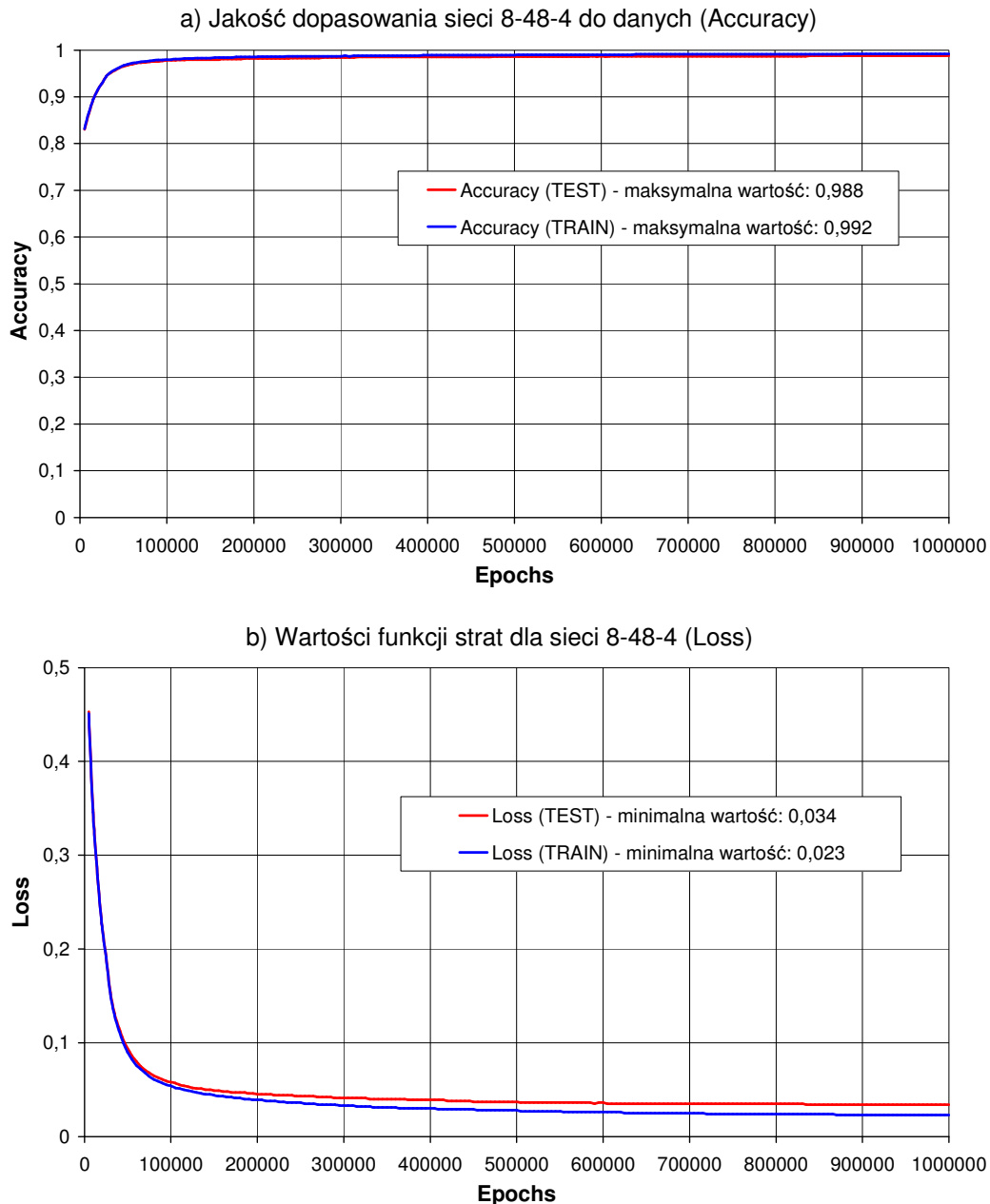
Rys. 6.8. Jakość dopasowania sieci 8-30-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.9. Jakość dopasowania sieci 8-36-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.10. Jakość dopasowania sieci 8-42-4 do danych oraz wartości funkcji strat

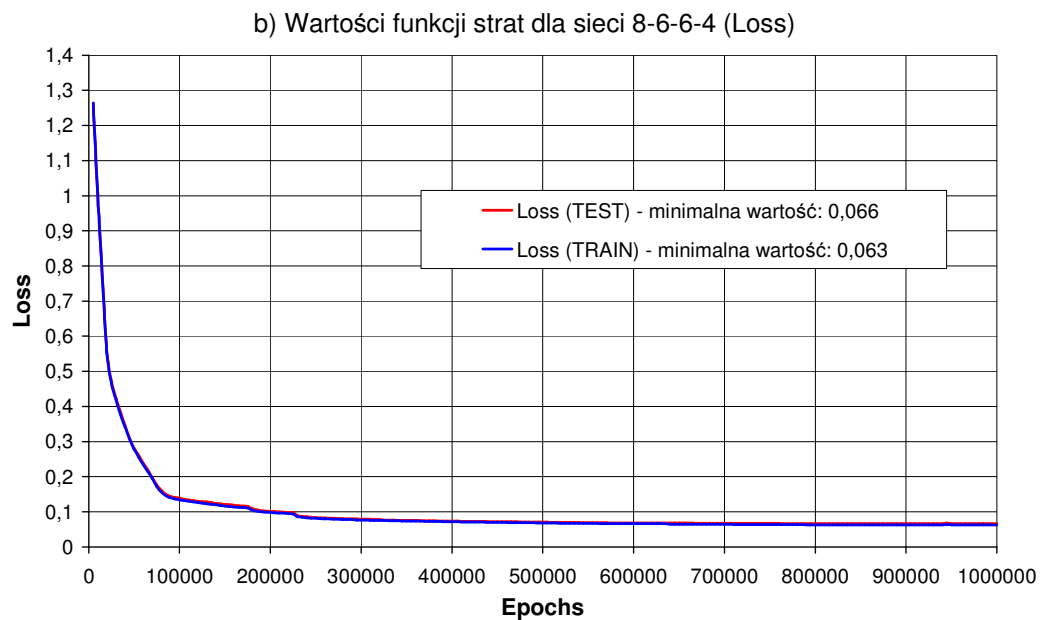
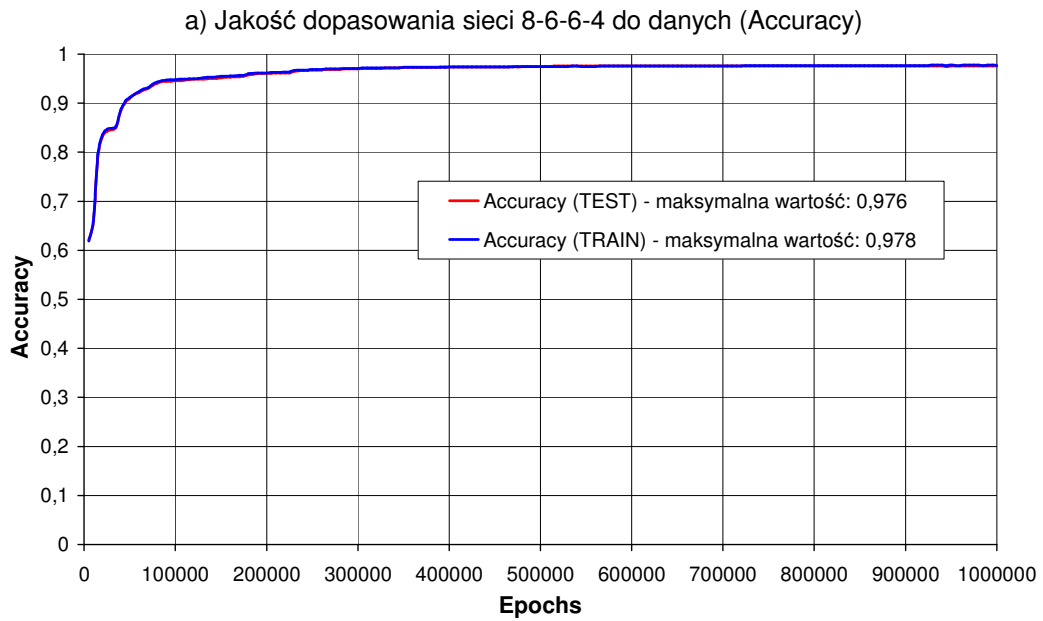


Rys. 6.11. Jakość dopasowania sieci 8-48-4 do danych oraz wartości funkcji strat

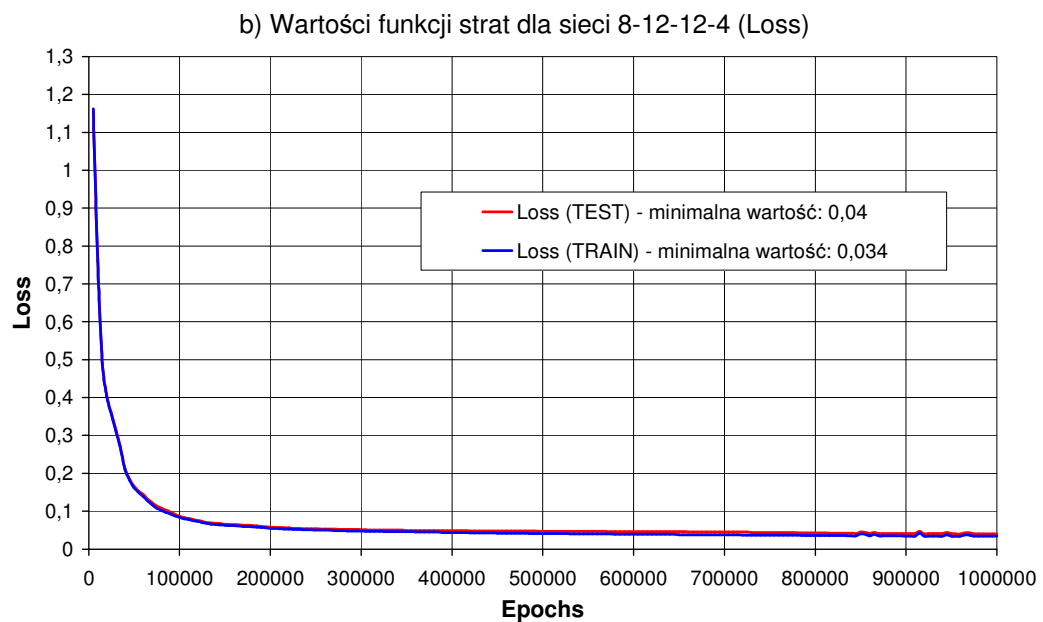
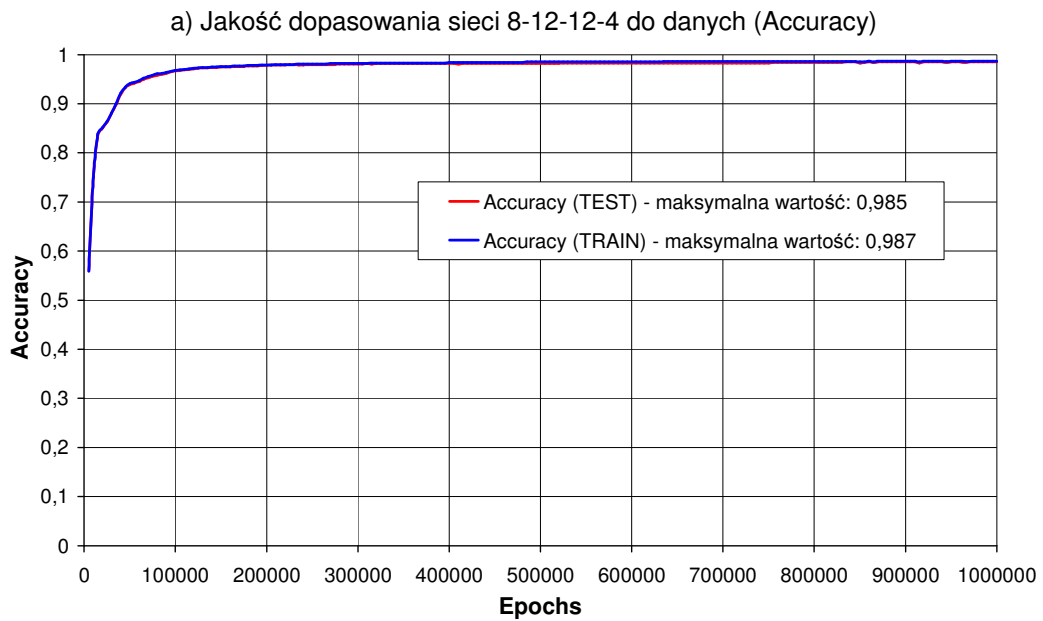
Analizując wykresy jakości dopasowania do danych (ang. *accuracy*) i rozkładu funkcji strat (ang. *loss function*) dla sztucznych sieci neuronowych jednowarstwowych (rys. 6.4-6.11) można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zastosowane funkcje przejścia (Sigmoid) i algorytm optymalizacyjny (ADAM) pozwoliły na bardzo dokładne dopasowanie się sieci do przygotowanych danych.
- Zwiększanie ilości neuronów w warstwie ukrytej przyniosło oczekiwany skutek, w postaci coraz dokładniejszej predykcji sieci neuronowej. Sieć, po przeprowadzeniu 1 000 000 pętli uczących (Epok), potrafiła wyjaśnić około 96,2% przypadków (dla danych testowych) – gdy ilość neuronów w warstwie ukrytej wynosiła 6. Natomiast, gdy ilość tych neuronów zwiększono do 48, to procent przypadków wyjaśnianych przez sieć zbliżył się do wartości 98,8% (dla danych testowych).
- Zwiększanie liczby neuronów w warstwie ukrytej było równoznaczne ze zmniejszaniem się wartości funkcji strat wyznaczanych dla każdej topologii sieci.

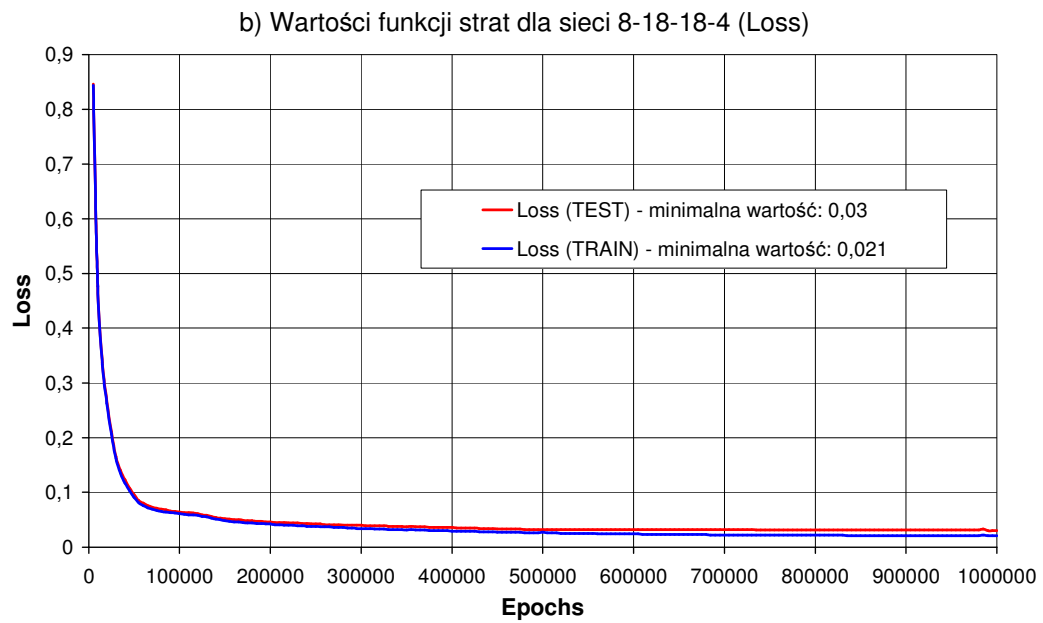
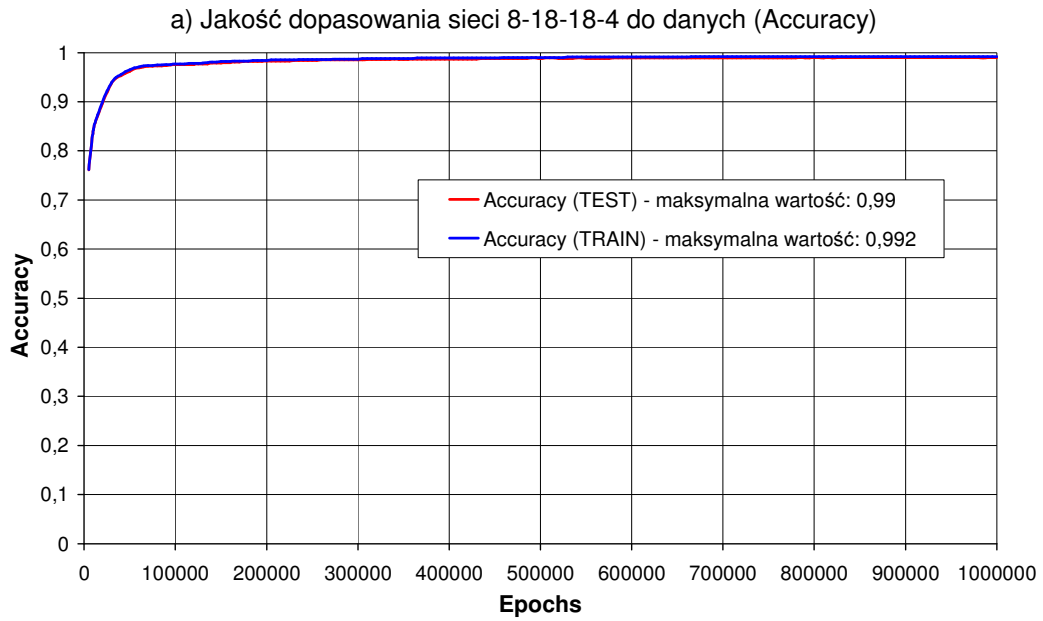
- Coraz większa liczba neuronów w kolejno badanych topologiach przyniosła także negatywny skutek. Na rysunku 6.11. można zaobserwować oznaki nieznacznego, ale już widocznego, przeuczenia się sieci. Na rysunku a) zauważamy rozbieżność pomiędzy maksymalnymi wartościami jakości dopasowania sieci dla danych uczących (0,992) i testowych (0,988).
- Także minimalne wartości funkcji strat różnią się między sobą. Dla danych testowych minimalna wartość tej funkcji wynosi 0,034, a dla danych uczących 0,023. Co więcej, podobne zachowanie szkolonych sieci można zaobserwować nawet przy mniejszej ilości zastosowanych neuronów.
- Zaistniała sytuacja pozwala więc twierdzić, że dalsze zwiększanie liczby neuronów w warstwie ukrytej będzie powodowało występowanie coraz bardziej widocznego przeuczenia się sieci (ang. *overfitting*). Niestety, jest to sytuacja niepożądana, ponieważ prowadzi do pogorszenia generalizacji sieci, wskutek czego sztuczna sieć neuronowa zamiast zwiększać dokładność predykcji, znacznie ją pogarsza.
- Ponieważ zwiększanie liczby neuronów w warstwie ukrytej, w przypadku przygotowanych danych wejściowych, nie przyniosła pożądanego efektu, postanowiono przeprowadzić szkolenie topologii z dwoma warstwami ukrytymi. Wyniki jakości dopasowania sieci do danych i wartości funkcji strat, wyznaczanych podczas tych obliczeń, przedstawiono na rysunkach 6.12-6.19.



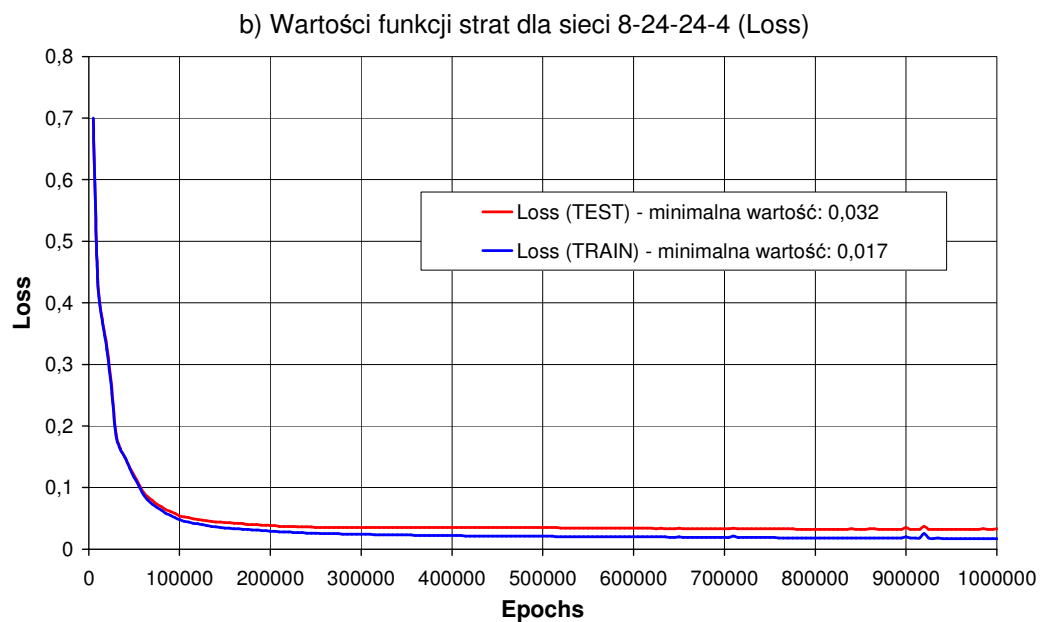
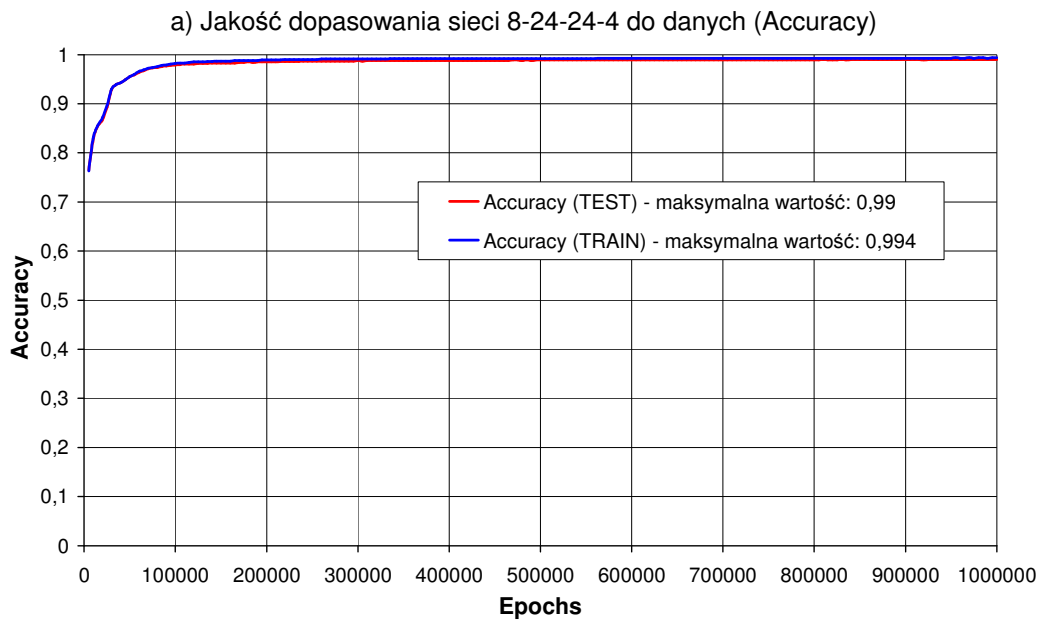
Rys. 6.12. Jakość dopasowania sieci 8-6-6-4 do danych oraz wartości funkcji strat



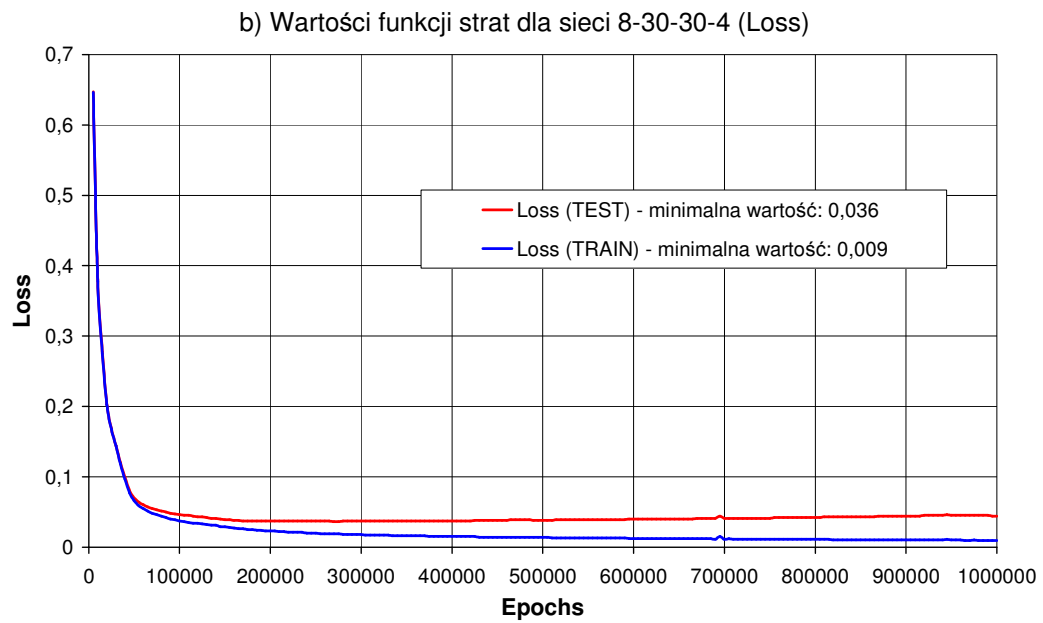
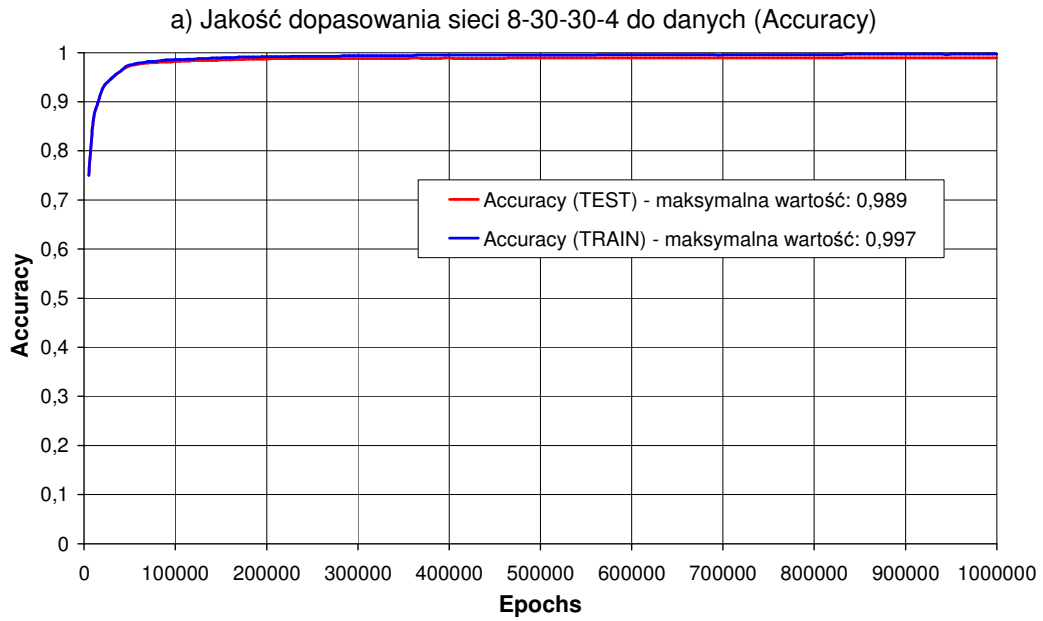
Rys. 6.13. Jakość dopasowania sieci 8-12-12-4 do danych oraz wartości funkcji strat



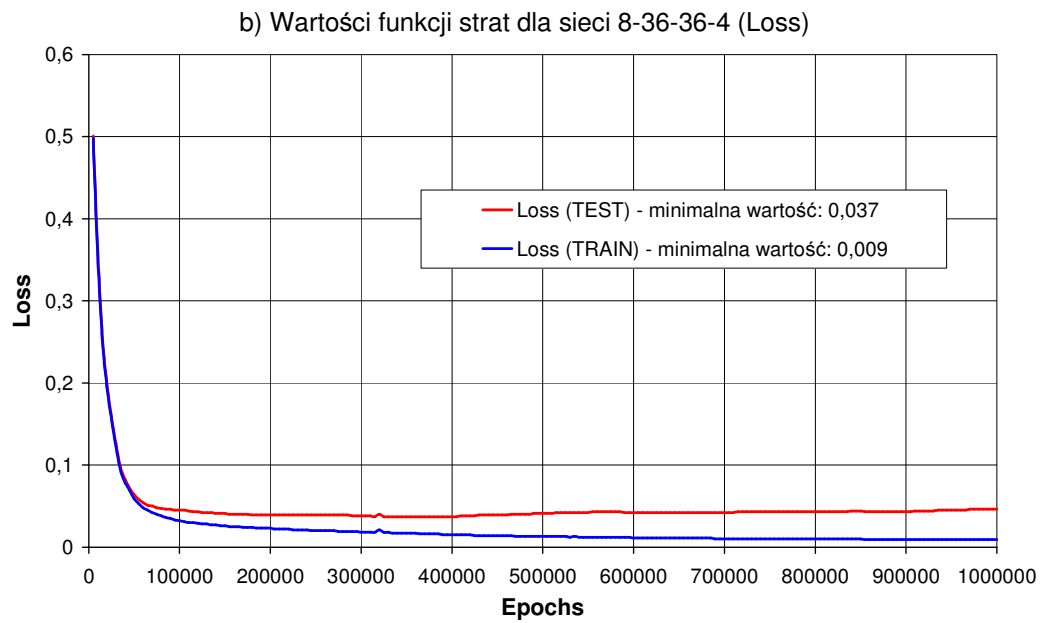
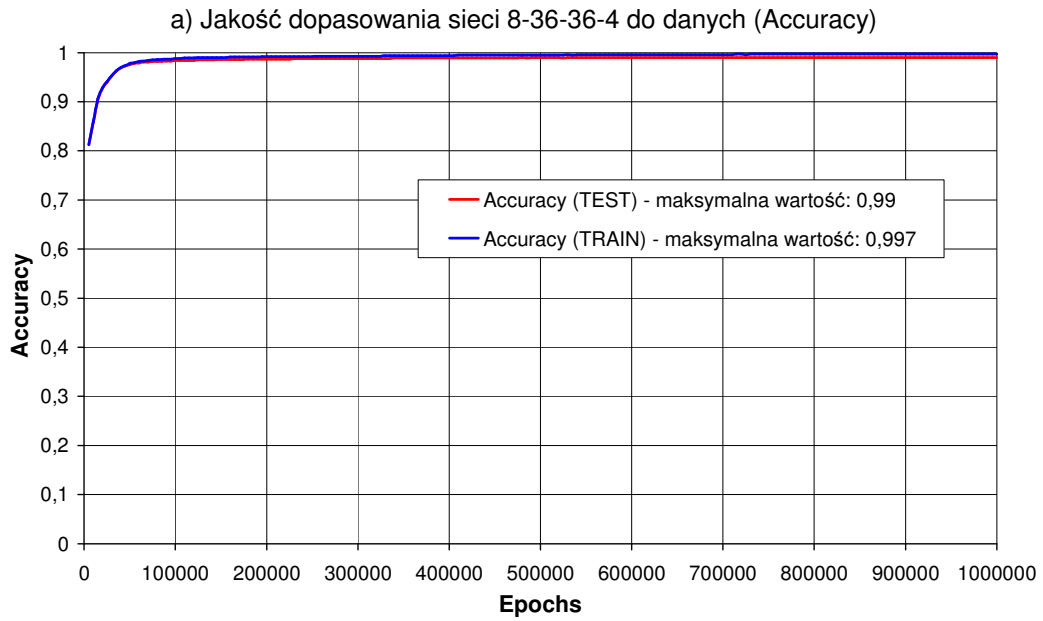
Rys. 6.14. Jakość dopasowania sieci 8-18-18-4 do danych oraz wartości funkcji strat



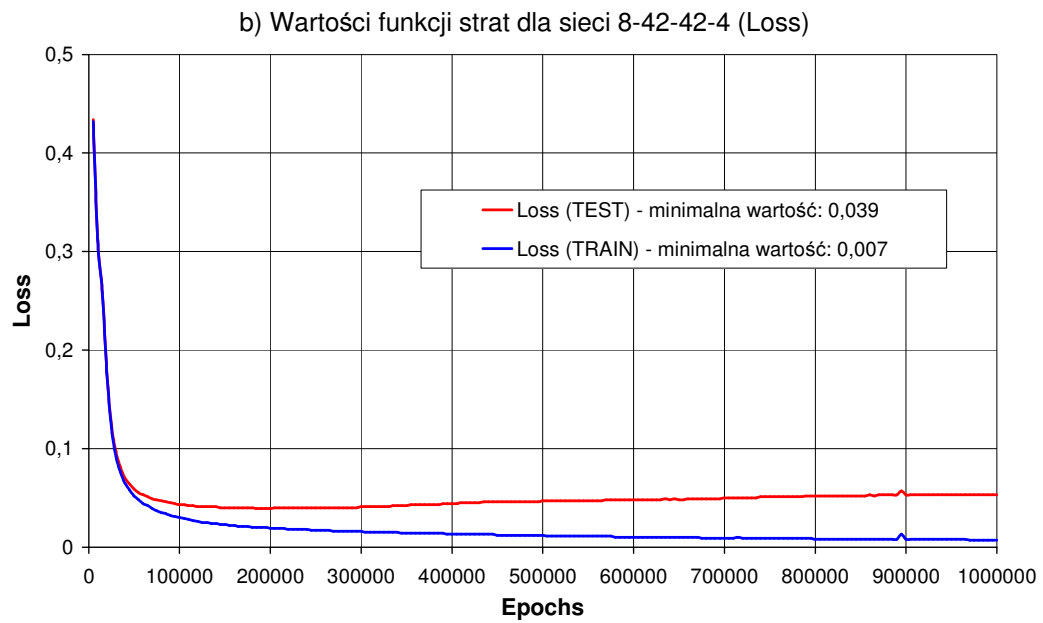
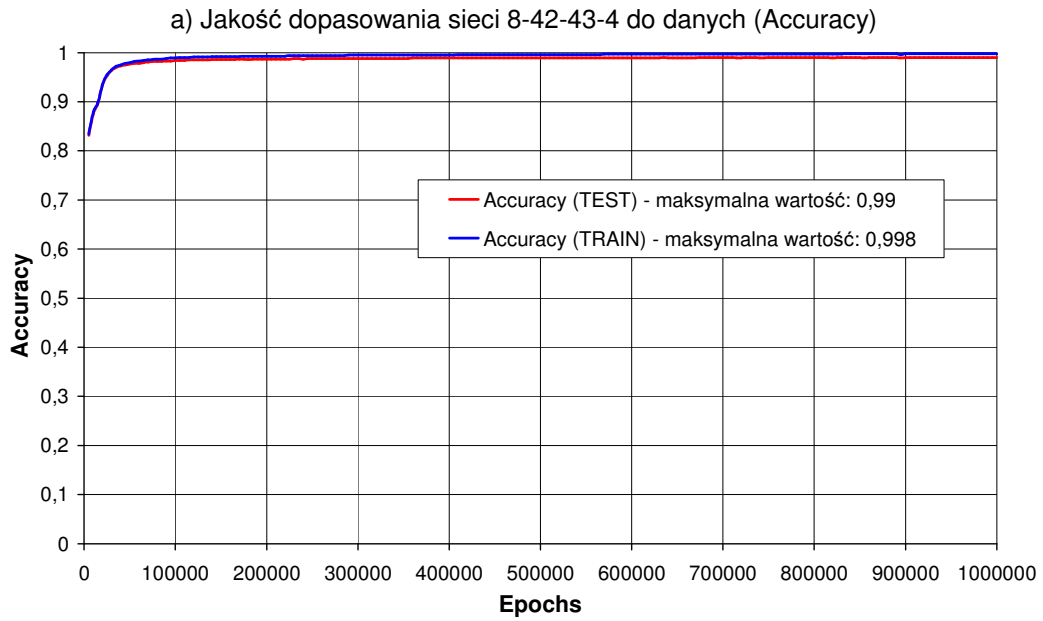
Rys. 6.15. Jakość dopasowania sieci 8-24-24-4 do danych oraz wartości funkcji strat



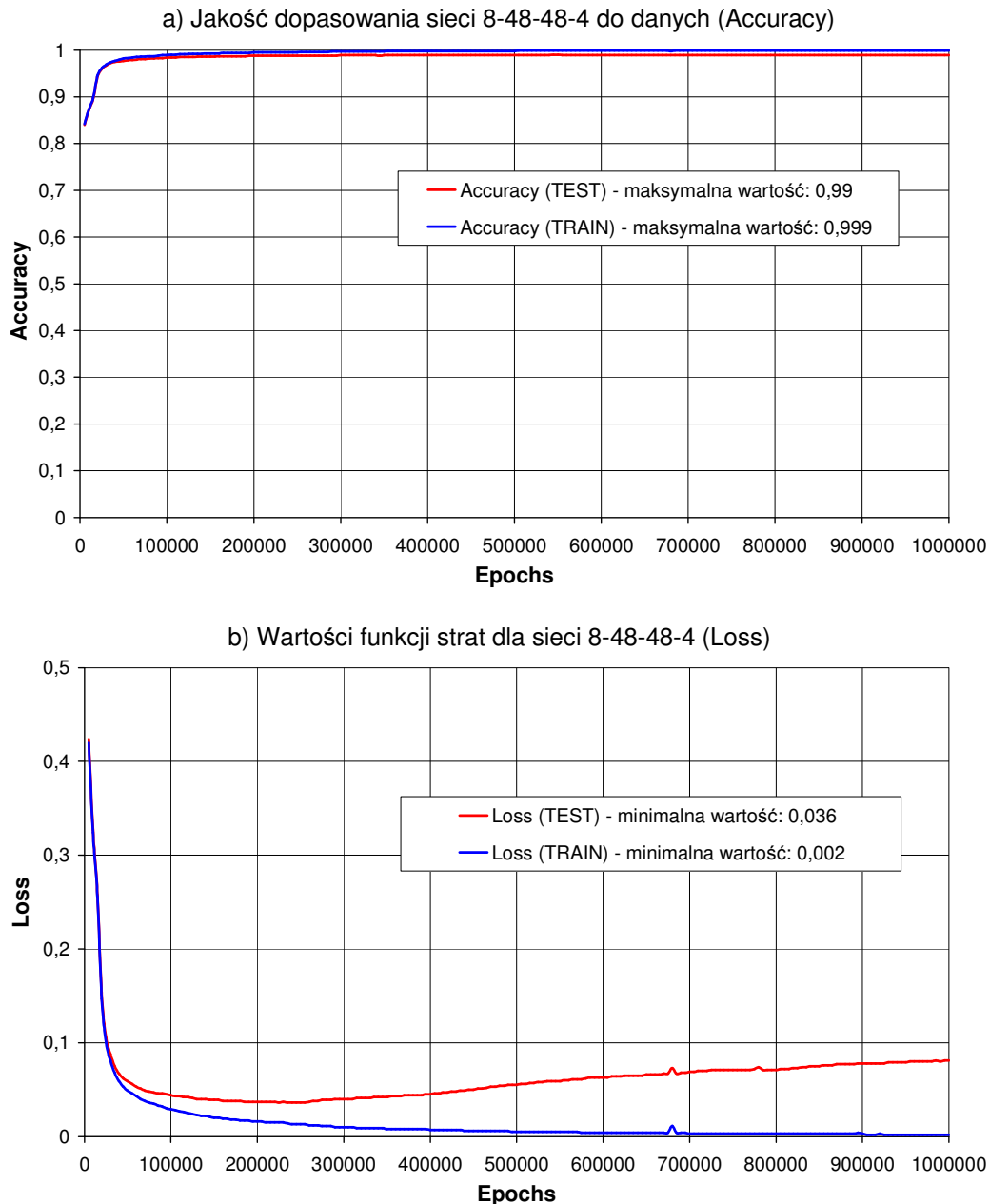
Rys. 6.16. Jakość dopasowania sieci 8-30-30-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.17. Jakość dopasowania sieci 8-36-36-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.18. Jakość dopasowania sieci 8-42-42-4 do danych oraz wartości funkcji strat



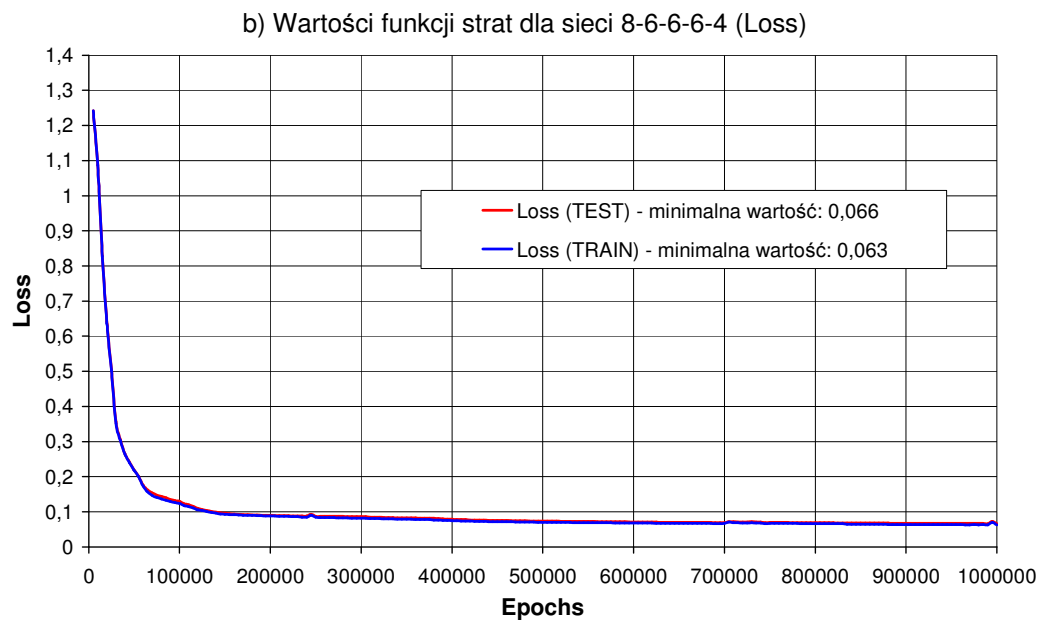
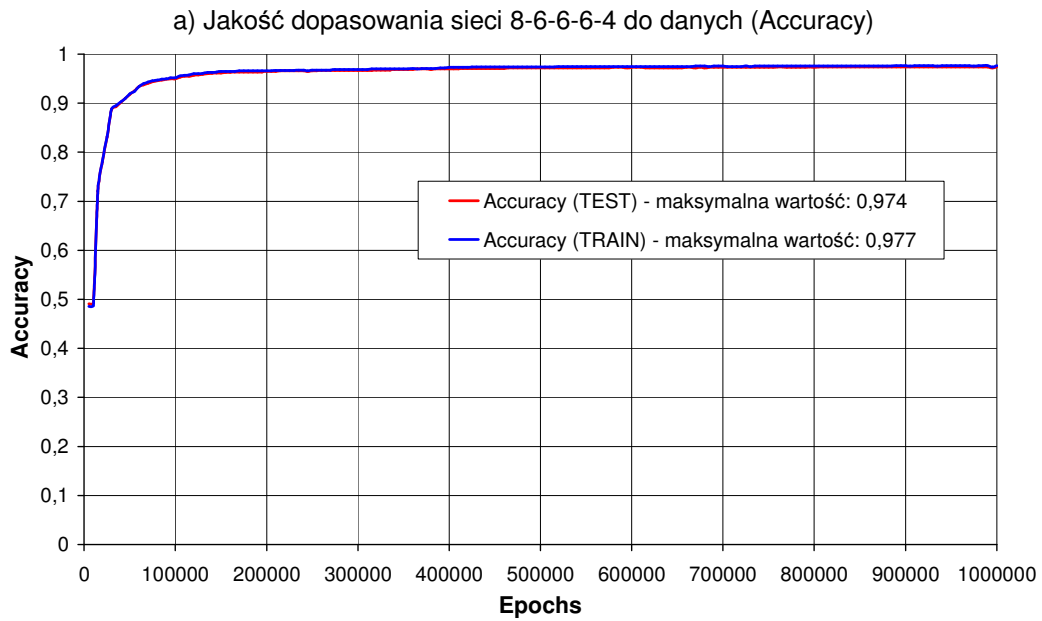
Rys. 6.19. Jakość dopasowania sieci 8-48-48-4 do danych oraz wartości funkcji strat

Analizując wykresy jakości dopasowania do danych (ang. *accuracy*) i rozkładu funkcji strat (ang. *loss function*) dla sztucznych sieci neuronowych dwuwarstwowych (rys. 6.12-6.19) można wyciągnąć następujące wnioski:

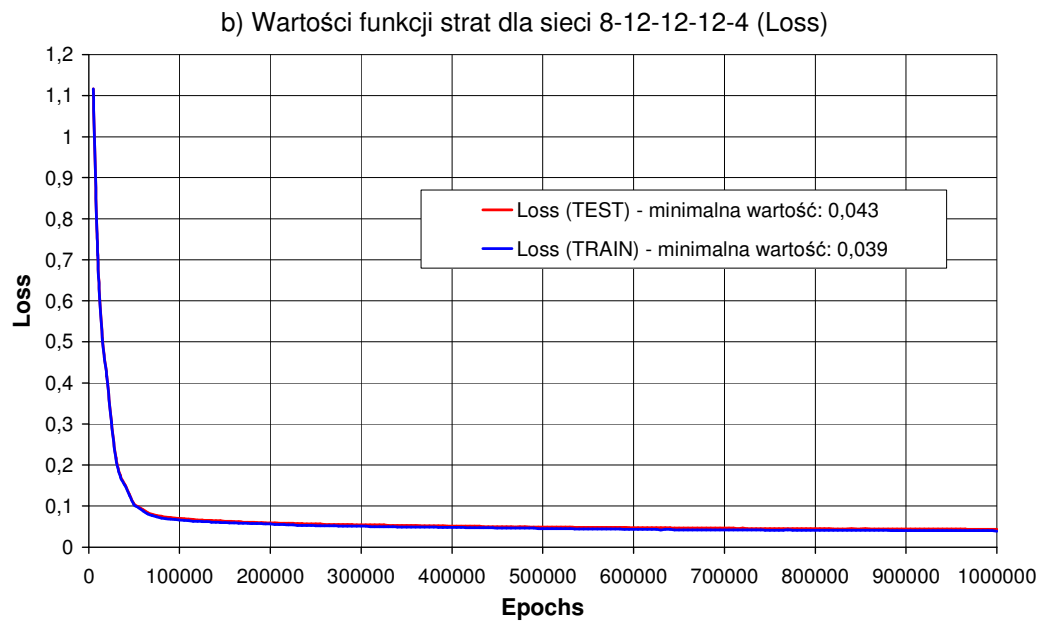
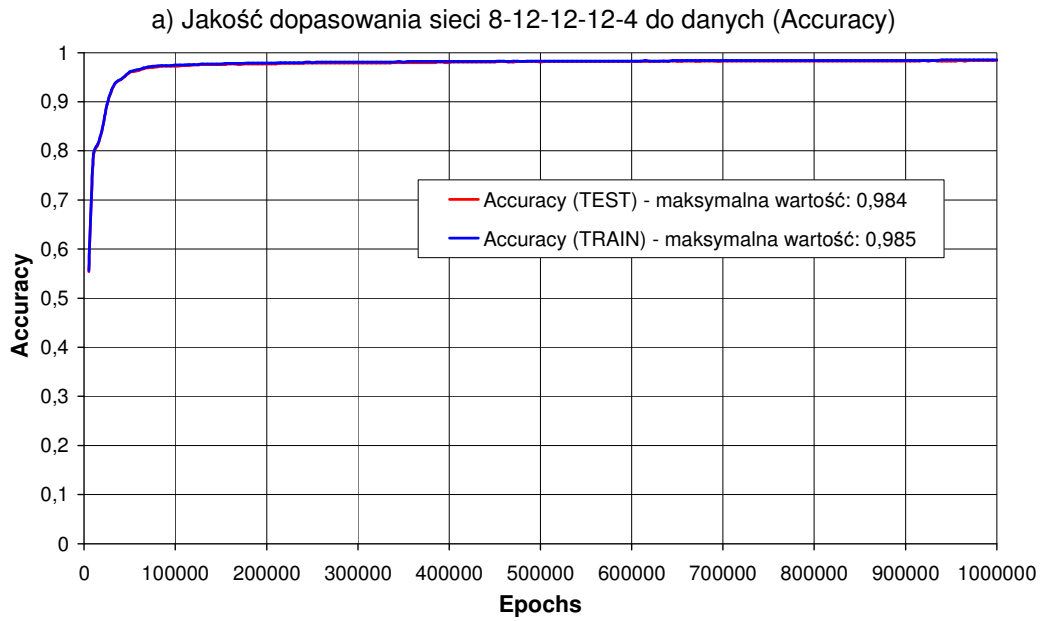
- Uzyskano lepszą dobroć dopasowania do danych testowych niż miało to miejsce w przypadku sieci jednowarstwowych. Gdy liczba neuronów w każdej warstwie ukrytej wynosiła 6, to sieć potrafiła wyjaśnić 97,6% przypadków. Natomiast, gdy zwiększono liczbę tych neuronów do 48 w każdej warstwie ukrytej, wtedy dobroć dopasowania do danych testowych wynosiła już 99%.
- Podobnie jak w poprzedniej topologii, zwiększanie liczby neuronów w warstwach ukrytych spowodowało wystąpienie efektu przeuczenia sieci (ang. *overfitting*). Sieć zawierająca po 18 neuronów w każdej warstwie ukrytej (oznaczona 8-18-18-4) osiągnęła dobroć dopasowania do danych testowych na poziomie 99%. Dalsze zwiększanie liczby tych neuronów nie powodowało już zwiększania się dokładności predykcji sieci (dla

danych testowych). Natomiast dla danych uczących następował ciągły wzrost tego parametru, aż do poziomu 99,9% (dla 48 neuronów w każdej warstwie ukrytej).

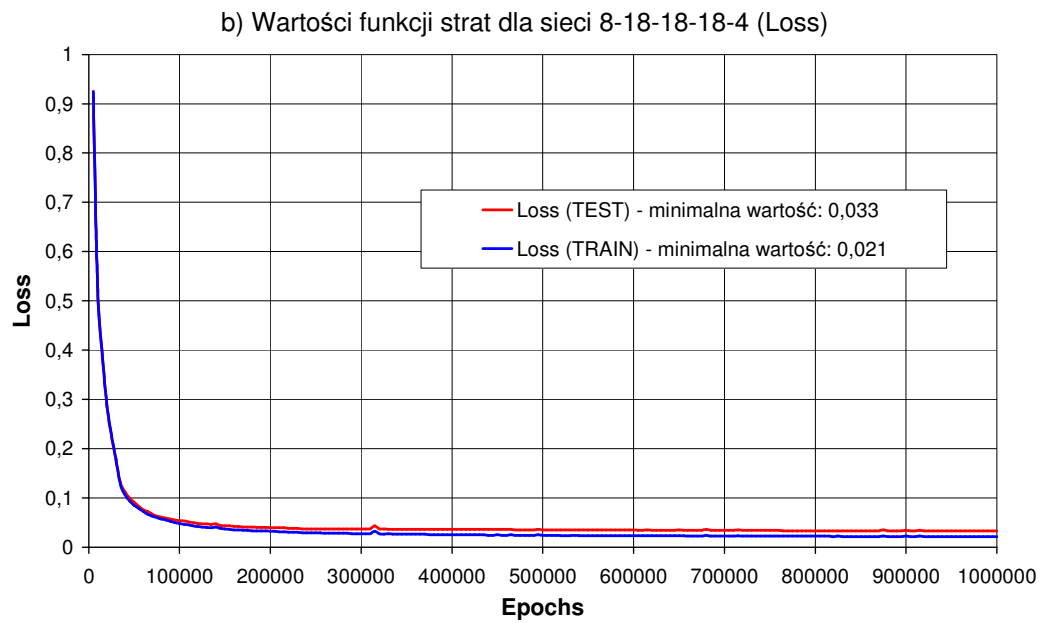
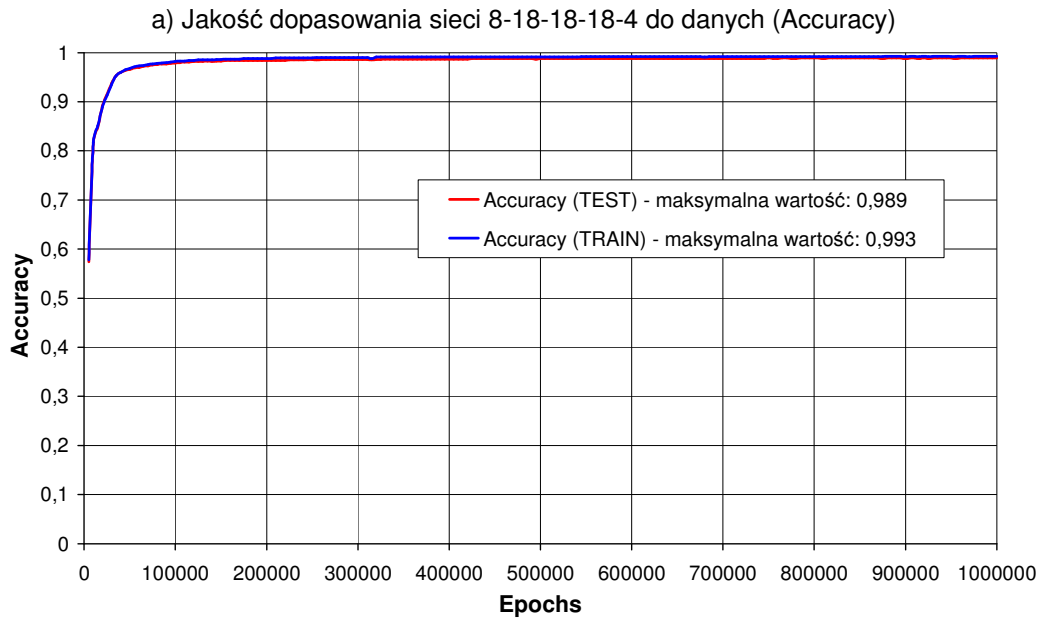
- Przeuczenie sieci jest również zauważalne poprzez zwiększanie się różnicy pomiędzy wartościami funkcji błędu wyznaczonej dla danych testowych i uczących. W przypadku ostatniej badanej topologii (oznaczonej 8-48-48-4) minimalna wartość tej funkcji dla danych testowych wynosiła 0,036, natomiast dla danych uczących tylko 0,002.
- Należy się więc spodziewać, że dalsze zwiększanie ilości neuronów w warstwach ukrytych będzie skutkowało coraz bardziej wyraźnym efektem przeuczenia sieci, prowadząc do pogorszenia jej generalizacji.
- Ponieważ niektórzy badacze uważają, że większa liczba warstw ukrytych pozwala na lepsze dopasowanie sieci do danych (np. Goodfellow i inni, 2016), dlatego postanowiono przeprowadzić również szkolenie topologii zawierających trzy warstwy ukryte. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunkach 6.20-6.27.



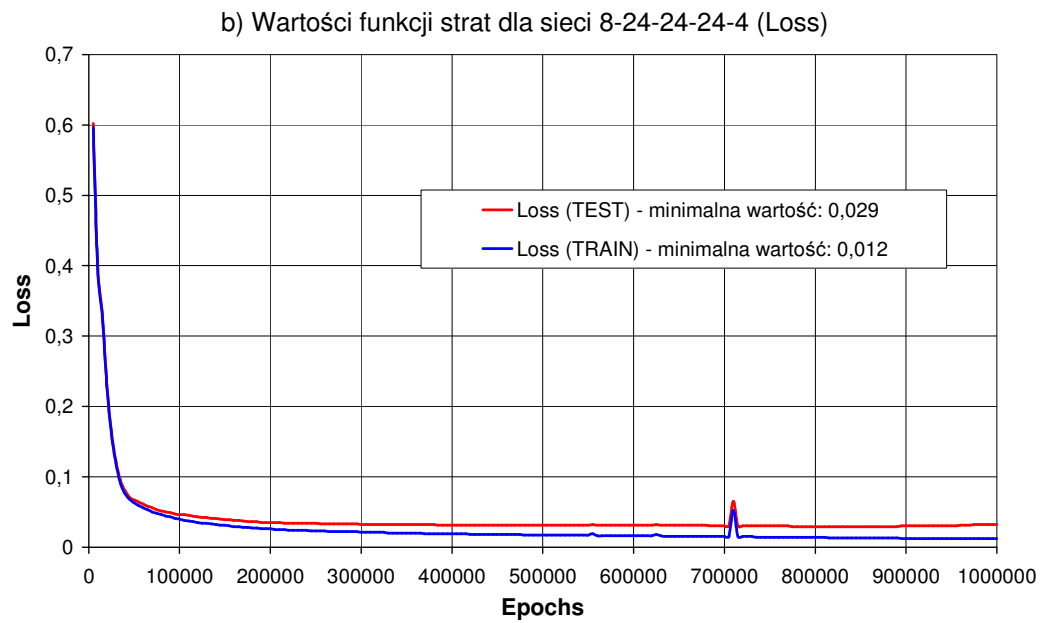
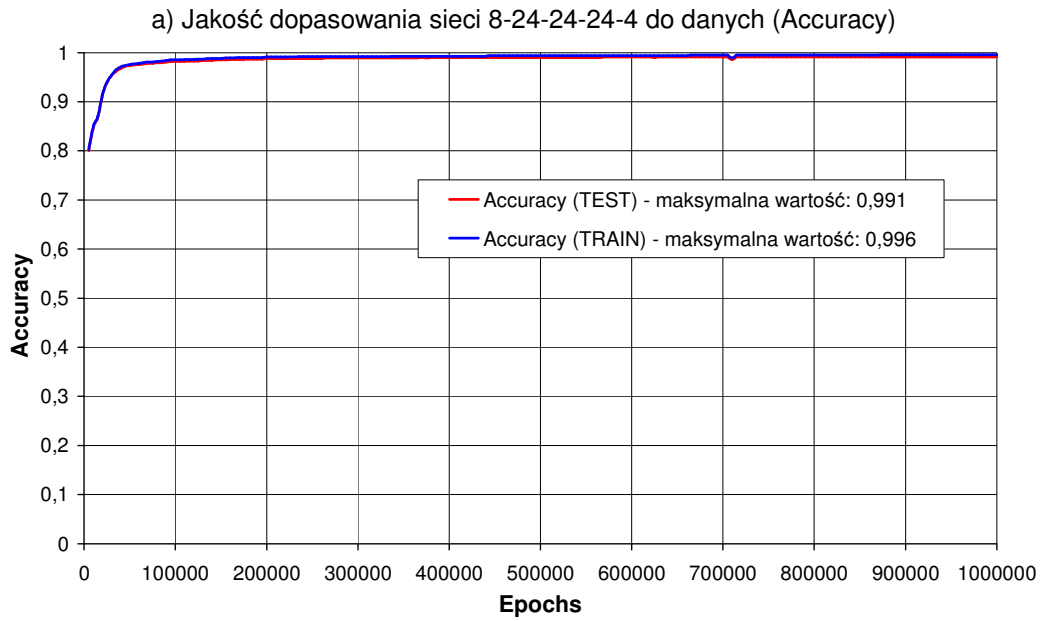
Rys. 6.20. Jakość dopasowania sieci 8-6-6-6-4 do danych oraz wartości funkcji strat



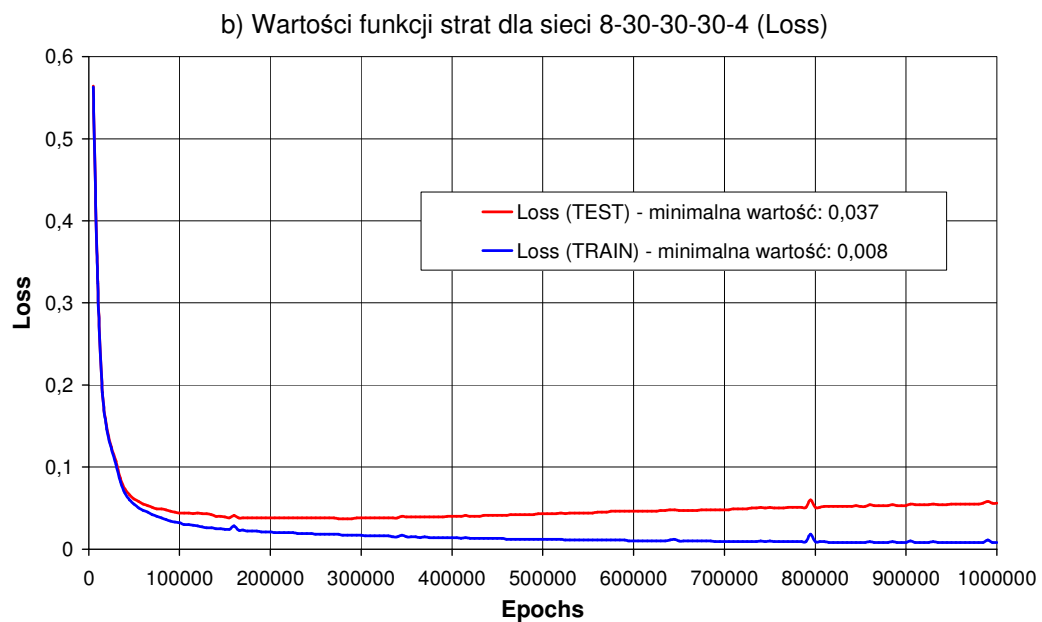
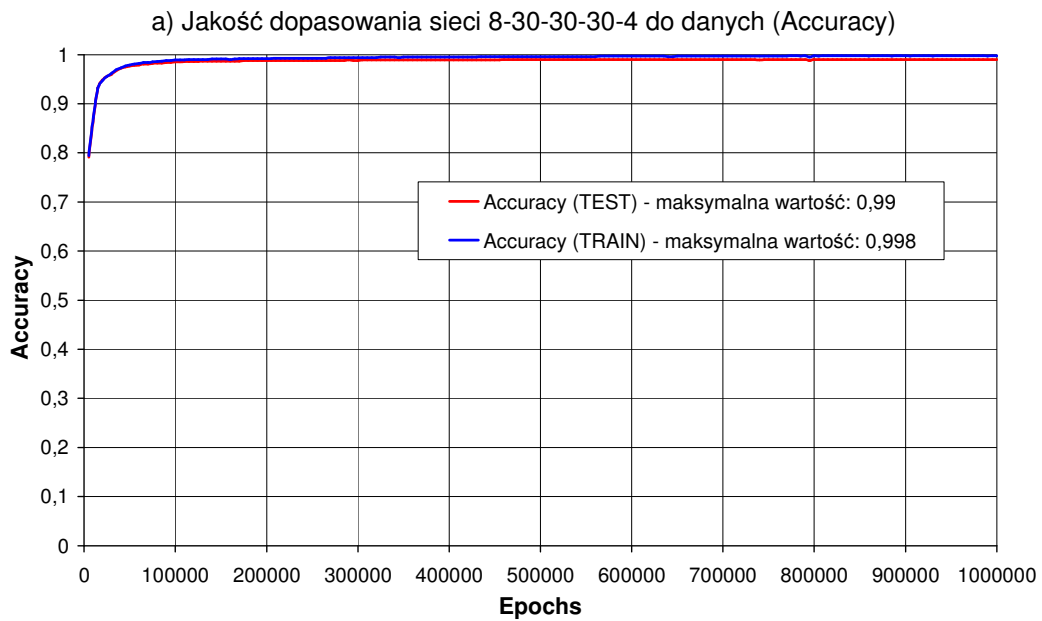
Rys. 6.21. Jakość dopasowania sieci 8-12-12-12-4 do danych oraz wartości funkcji strat



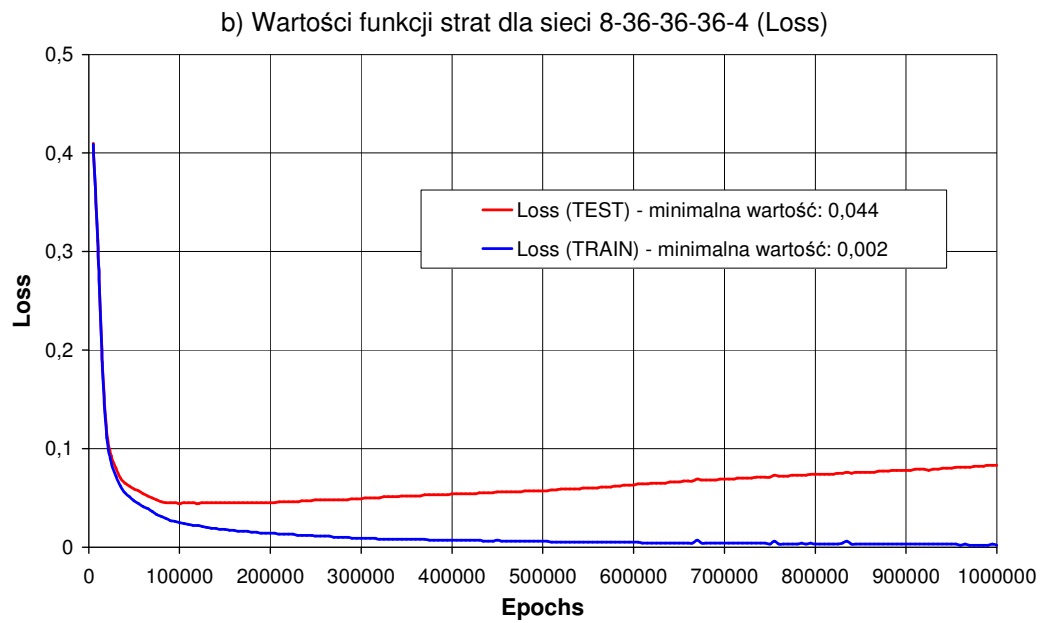
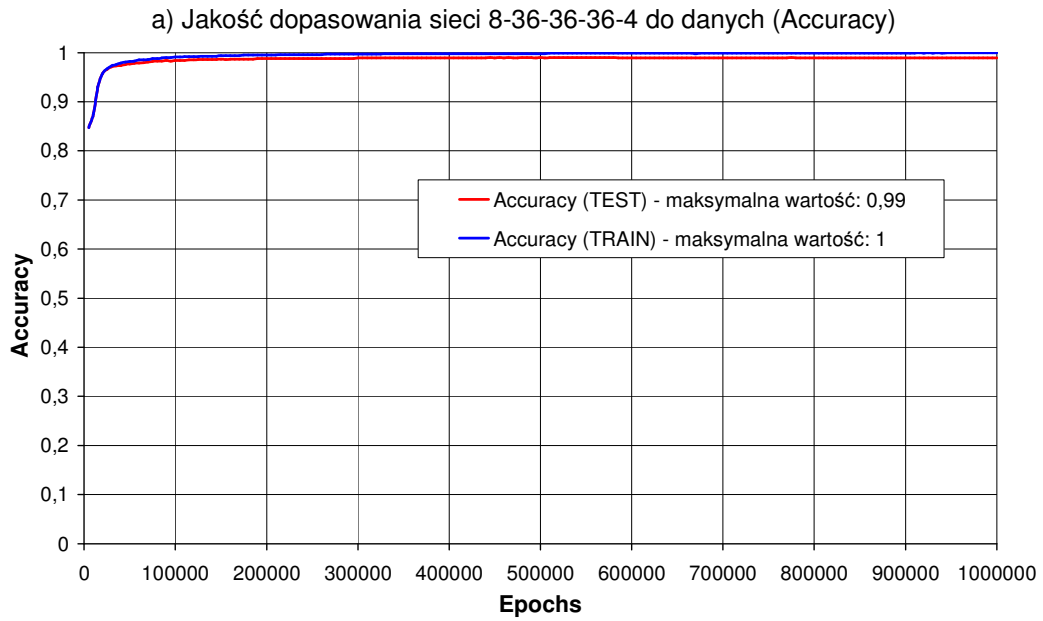
Rys. 6.22. Jakość dopasowania sieci 8-18-18-18-4 do danych oraz wartości funkcji strat



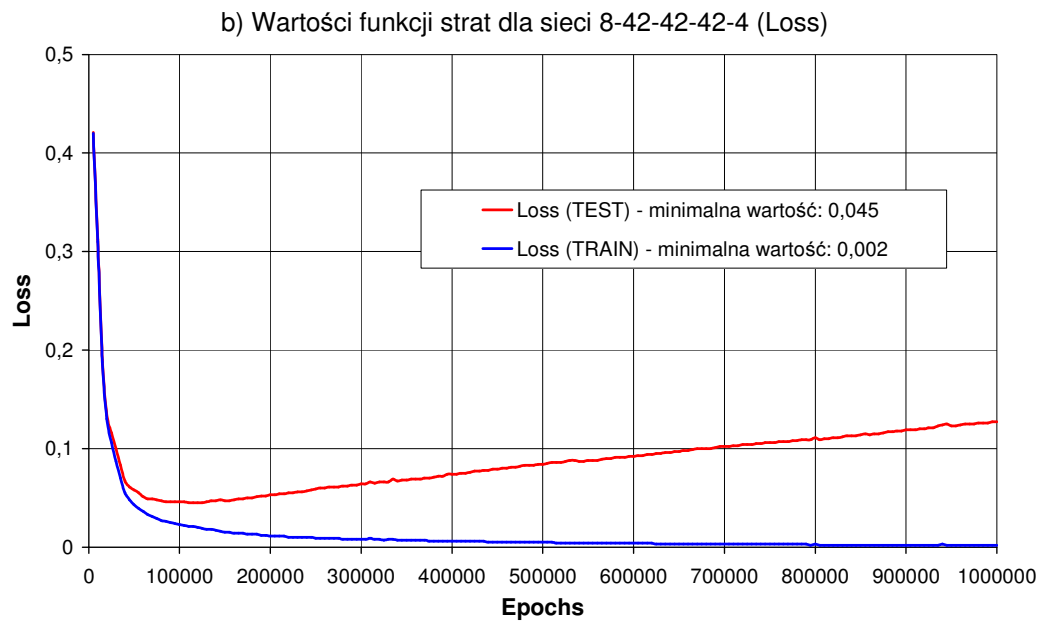
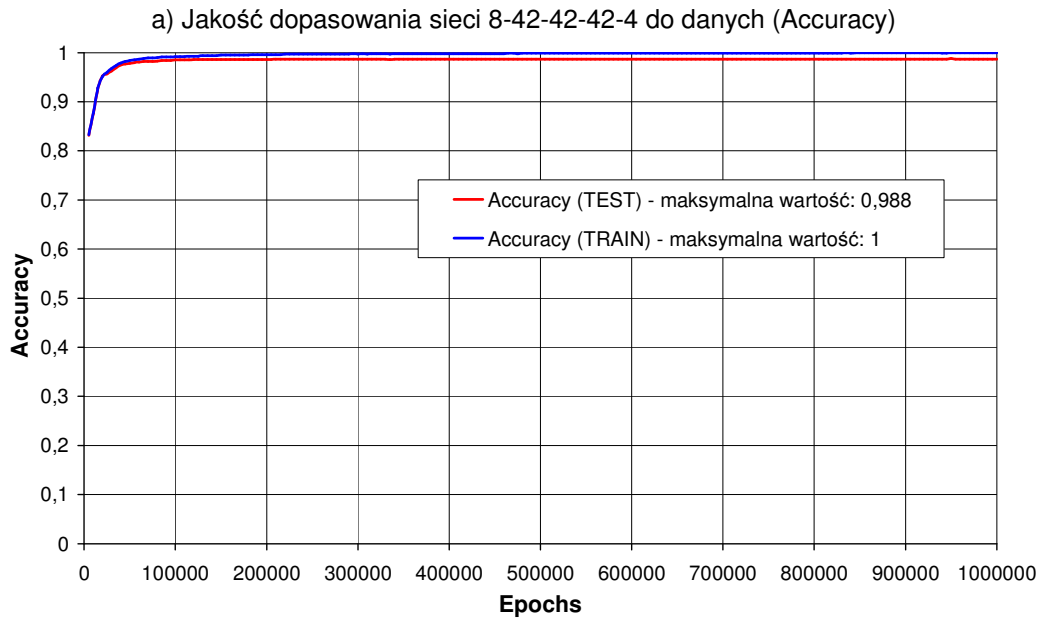
Rys. 6.23. Jakość dopasowania sieci 8-24-24-24-4 do danych oraz wartości funkcji strat



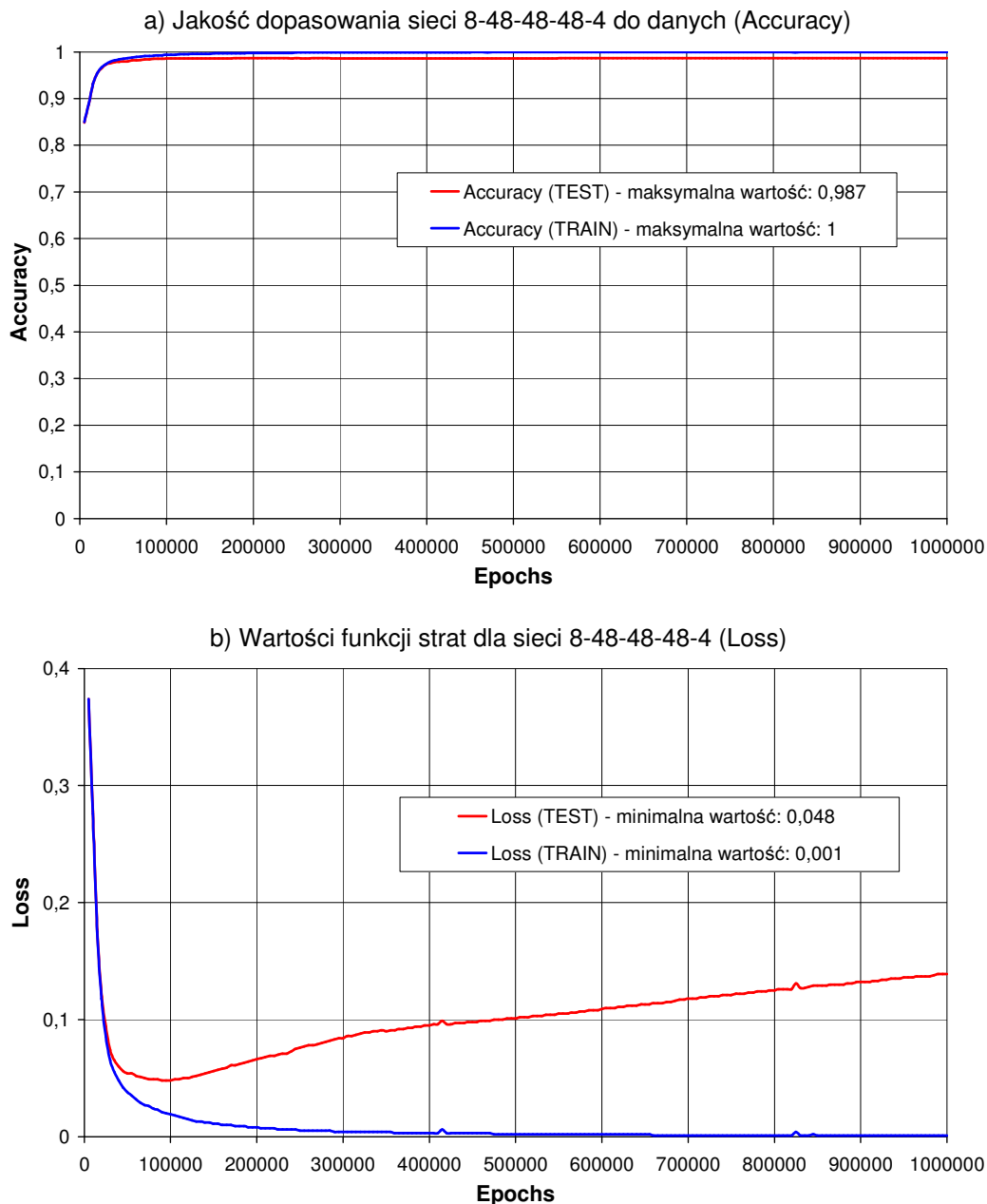
Rys. 6.24. Jakość dopasowania sieci 8-30-30-30-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.25. Jakość dopasowania sieci 8-36-36-36-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.26. Jakość dopasowania sieci 8-42-42-42-4 do danych oraz wartości funkcji strat



Rys. 6.27. Jakość dopasowania sieci 8-48-48-48-4 do danych oraz wartości funkcji strat

Analizując wykresy jakości dopasowania do danych (ang. *accuracy*) i rozkładu funkcji strat (ang. *loss function*) dla opracowanych topologii sieci trójwarstwowych (rys. 6.20-6.27) można wyciągnąć następujące wnioski:

- Pomimo zwiększenia liczby warstw ukrytych do trzech nie udało się osiągnąć lepszego dopasowania tych sieci neuronowych do danych testowych niż na poziomie 99,1%.
- W przypadku szkolenia sieci trójwarstwowych jeszcze bardziej pogłębił się efekt przeuczenia sieci. Od topologii zawierającej po 36 neuronów w każdej warstwie ukrytej (oznaczonej 8-36-36-36-4) ilość wyjaśnianych przypadków dla danych uczących wynosiła już 100%.
- Ten efekt jest również wyraźnie widoczny na wykresach wartości funkcji strat. Im bardziej zwiększano liczbę neuronów w warstwach ukrytych, tym większa była różnica pomiędzy wartościami funkcji strat dla danych testowych i danych uczących. Na przykład dla sieci zawierającej po 48 neuronów w każdej z trzech warstw ukrytych (rys. 6.27.) minimalna

wartość funkcji strat dla danych testowych wynosiła 0,048 i wyraźnie różniła się od tej wartości obliczonej dla danych uczących (0,001).

- Zwiększenie liczby warstw ukrytych do trzech przyczyniło się więc do zmniejszenia generalizacji testowanych sieci neuronowych.
- Większa liczba warstw ukrytych poprawiła maksymalną jakość dopasowania sieci do danych testowych tylko o 0,1%, czyli nie przyniosła znaczącej poprawy jakości predykcji sieci.

Z przedstawionych analiz 24 różnych konfiguracji sztucznych sieci neuronowych wynika, że dla przygotowanych danych najlepiej dopasowaną siecią była dwuwarstwowa topologia posiadająca po 18 neuronów w każdej warstwie ukrytej (oznaczona 8-18-18-4). Przemawiają za tym następujące argumenty:

- wybrana sztuczna sieć neuronowa cechowała się bardzo wysokim współczynnikiem dopasowania do danych testowych – ostateczna wartość Accuracy (po przeprowadzeniu 1 000 000 kroków obliczeniowych) wynosiła w jej przypadku 99%,
- jednocześnie miała ona najmniejszy współczynnik przetrenowania. Maksymalna różnica pomiędzy jakością dopasowania obliczoną dla danych testowych i uczących wynosiła tylko 0,2%,
- dodatkowo, różnica pomiędzy wartością funkcji strat liczonej dla danych testowych i uczących była znikoma i wynosiła maksymalnie 0,009.

W związku z tym, wyżej wymieniona sztuczna sieć neuronowa (oznaczona 8-18-18-4) została wybrana do dalszej analizy, czyli do sprawdzenia jej przydatności pod względem określania poziomu zagrożenia pożarem endogenicznym.

6.5. Porównanie poziomu zagrożenia pożarowego wyznaczonego przy pomocy wskaźnika Grahama oraz przy pomocy sztucznej sieci neuronowej

W celu sprawdzenia przydatności wybranej sztucznej sieci neuronowej (oznaczonej 8-18-18-4) do określania stanu zagrożenia pożarowego, porównano poziomy zagrożenia otrzymane z predykcji tej sieci z poziomami wyznaczonymi przy pomocy wskaźnika Grahama (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016). Dla lepszego zobrazowania wyników takiego porównania – w przedstawionych tablicach – każdemu z czterech kryteriów zagrożenia określonego przez wskaźnik Grahama przyporządkowano odpowiedni kolor wg schematu zaprezentowanego w tablicy 6.1.

Tablica 6.1. Kryteria zagrożenia pożarowego wg wskaźnika Grahama wraz z naniesionymi kolorami reprezentującymi kolejne kategorie

Wskaźnik Grahama G	Sposób postępowania	Kryteria zagrożenia wg wsk. Grahama
$0 < G \leq 0,0025$	Sytuacja normalna — nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach.	1
$0,0025 < G \leq 0,0070$	Wzmoczona obserwacja atmosfery w zrobach, zwiększona częstotliwość pobierania prób powietrza.	2
$0,0070 < G \leq 0,0300$	Należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie, przy czym plan tych prac opracowuje kierownik działu wentylacji, a zatwierdza kierownik ruchu zakładu górniczego.	3
$G > 0,0300$	Akcja przeciwpożarowa.	4

W poprzednich rozdziałach rozprawy udowodniono, że zwiększone stężenia azotu w próbce powietrza mogą powodować obniżanie stanu zagrożenia pożarowego wyznaczanego według wskaźnika Grahama. Dlatego postanowiono sprawdzić czy opracowany graf sztucznej sieci neuronowej jest odporny na tego typu zakłócenie.

W tym celu dla każdego kryterium wskaźnika Grahama przygotowano zestaw wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pochodzących z miejsc, gdzie nie stosowano oraz stosowano inertyzację azotem. Z obszernej bazy danych, zawierającej wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza kopalnianego, wybrano losowo po 78 przypadków dla każdego kryterium zagrożenia pożarowego. Wybrano akurat 78 próbek gazowych, aby dla każdego wariantu uzyskać możliwie jak największą próbę statystyczną, przy założeniu, że objętość tej próby nie przekroczy trzech stron formatu A4.

W ten sposób opracowano 8 zestawów danych, dla których przeprowadzono predykcję zagrożenia pożarowego przy pomocy sztucznej sieci neuronowej. Należy w tym miejscu zauważyć, że dane przygotowane do przeprowadzenia predykcji sieci nie były zamieszczone w zbiorze danych szkoleniowych i nie brały udziału w procesie uczenia żadnej z analizowanych sztucznych sieci neuronowych. Próbki powietrza wybrane do tej analizy pochodziły ze zrobów ścianowych oraz z za tam izolacyjnych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tablicach od 6.2-6.9.

W każdej zaprezentowanej tablicy stężenia gazów, które przekraczały przyjęte dla nich poziomy odniesienia zostały wyróżnione kolorem czerwonym i pogrubione.

Jeżeli wielkości znajdujące się w kolumnie opisanej „Wartość mianownika wskaźnika Grahama” znajdowały się poza przedziałem wiarygodności tego wskaźnika (podanym w rozdziale 3. niniejszej rozprawy), to zostały one uwydatnione przez zmianę ich koloru na fioletowy i pogrubienie czcionki.

Tablica 6.2.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	0,13	0,01	0,02	0,01	0,001	3	20,63	79,19	0,18	0,00	0,5	0,0008	0,36	1	1
2	242,43	0,05	23,29	0,03	0,001	18	18,07	72,92	1,09	7,92	5,2	0,0014	1,25	1	1
3	34,84	0,05	3,29	0,05	0,001	27	18,54	79,37	0,97	1,12	7,7	0,0011	2,49	1	2
4	0,13	0,02	0,02	0,02	0,001	4	20,62	79,25	0,13	0,00	1,4	0,0010	0,38	1	1
5	446,37	0,16	8,34	0,07	0,001	87	9,12	72,08	2,29	16,51	8,1	0,0009	9,98	1	2
6	112,66	0,10	16,07	0,14	0,001	3	10,93	69,05	3,50	16,52	109,0	0,0000	7,37	1	2
7	55,20	0,03	9,66	0,02	0,001	14	18,88	76,35	0,61	4,16	2,8	0,0010	1,35	1	1
8	2070,00	0,02	150,00	0,02	0,001	7	19,45	75,89	0,44	4,00	8,3	0,0011	0,66	1	1
9	11,00	0,01	0,92	0,01	0,001	2	19,71	79,79	0,39	0,11	1,7	0,0001	1,43	1	1
10	26,50	0,03	6,55	0,02	0,001	22	19,68	78,82	0,57	0,92	6,9	0,0018	1,21	1	1
11	750,00	0,03	111,00	0,11	0,001	4	1,75	23,41	2,33	72,41	86,4	0,0001	4,45	1	1
12	24,80	0,05	3,59	0,01	0,005	5	20,04	78,75	0,17	1,04	4,2	0,0006	0,83	1	1
13	414,00	0,23	8,36	0,12	0,001	130	8,34	74,43	2,62	14,55	9,5	0,0011	11,38	1	3
14	13,19	0,02	1,11	0,03	0,001	15	20,14	79,11	0,37	0,38	6,5	0,0018	0,82	1	1
15	0,10	0,01	0,02	0,01	0,004	1	20,78	79,14	0,08	0,00	0,5	0,0005	0,19	1	1
16	0,07	0,03	0,02	0,02	0,005	9	20,34	79,35	0,31	0,00	2,7	0,0013	0,69	1	1
17	0,08	0,03	0,02	0,02	0,003	6	20,60	79,15	0,25	0,00	3,0	0,0016	0,37	1	1
18	0,04	0,01	0,02	0,01	0,002	2	20,78	79,07	0,15	0,00	1,1	0,0012	0,17	1	1
19	0,18	0,01	0,03	0,01	0,001	1	20,78	79,10	0,12	0,00	0,7	0,0006	0,18	1	1
20	38,00	0,10	6,10	0,10	0,001	2	0,77	69,54	12,99	16,69	18,4	0,0000	17,66	1	1
21	1,44	0,02	0,65	0,02	0,001	1	13,27	78,25	4,44	4,04	0,5	0,0000	7,47	1	1
22	0,31	0,01	0,06	0,02	0,004	5	20,69	79,20	0,11	0,00	1,9	0,0017	0,30	1	1
23	59,30	0,06	11,60	0,06	0,001	2	13,76	75,32	3,28	7,63	2,9	0,0000	6,20	1	1
24	69,30	0,11	13,80	0,11	0,001	32	8,54	71,65	6,53	13,27	11,8	0,0003	10,45	1	2
25	4,71	0,02	1,27	0,07	0,002	3	18,88	78,98	0,92	1,22	21,9	0,0001	2,05	1	1
26	358,00	0,25	7,57	0,13	0,002	168	9,00	76,36	2,49	12,10	8,7	0,0015	11,24	1	3

Tablica 6.2.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	177,00	0,03	16,90	0,03	0,004	8	16,98	73,11	1,71	8,18	21,7	0,0003	2,39	1	1
28	146,00	0,03	13,10	0,02	0,003	5	17,89	74,59	1,34	6,16	5,5	0,0003	1,88	1	1
29	15,20	0,03	2,14	0,02	0,003	12	18,87	75,47	0,55	5,11	1,2	0,0011	1,13	1	1
30	104,00	0,05	18,00	0,03	0,002	44	16,52	78,76	0,64	4,07	5,0	0,0010	4,35	1	2
31	10,40	0,01	0,66	0,01	0,002	2	20,71	78,62	0,08	0,59	5,3	0,0016	0,12	1	1
32	10,50	0,03	0,37	0,02	0,002	9	19,79	78,99	0,51	0,71	3,3	0,0008	1,14	1	1
33	8,52	0,02	1,62	0,02	0,009	4	20,61	78,83	0,11	0,45	3,3	0,0014	0,28	1	1
34	152,00	0,20	8,27	0,07	0,001	50	13,39	78,35	1,60	6,64	3,6	0,0007	7,37	1	2
35	2,22	0,32	0,80	0,37	0,006	23	19,19	79,69	1,12	0,00	9,3	0,0012	1,93	1	2
36	246,00	0,15	40,70	0,04	0,001	69	13,45	77,30	1,09	8,12	5,2	0,0010	7,03	1	2
37	18,60	0,02	3,17	0,05	0,001	7	18,74	77,46	0,98	2,82	42,8	0,0004	1,79	1	1
38	1,33	0,01	0,26	0,01	0,001	3	20,65	79,08	0,16	0,11	2,1	0,0010	0,31	1	1
39	53,00	0,02	5,77	0,02	0,001	8	19,12	77,55	1,05	2,27	6,5	0,0006	1,43	1	1
40	22,20	0,02	2,06	0,04	0,002	5	20,04	78,09	0,66	1,21	8,8	0,0008	0,65	1	1
41	53,00	0,01	2,77	0,01	0,002	3	19,76	77,52	0,60	2,11	3,3	0,0004	0,78	1	1
42	14,90	0,01	1,14	0,02	0,001	2	20,35	78,93	0,18	0,54	104,0	0,0004	0,57	1	1
43	123,00	0,21	13,80	0,17	0,009	49	15,08	78,15	0,12	6,64	460,0	0,0009	5,63	1	3
44	146,00	0,06	19,00	0,05	0,002	2	15,10	77,35	1,92	5,63	5,7	0,0000	5,40	1	1
45	32,30	0,01	3,95	0,02	0,001	9	19,81	78,81	0,07	1,31	5,8	0,0008	1,07	1	1
46	1,89	0,02	0,15	0,02	0,002	4	20,56	78,96	0,15	0,33	1,4	0,0011	0,36	1	1
47	8,57	0,03	1,51	0,02	0,003	10	19,25	76,52	0,50	3,73	1,3	0,0010	1,03	1	1
48	1,32	0,02	0,13	0,01	0,012	2	20,78	79,05	0,09	0,08	1,7	0,0012	0,17	1	1
49	35,70	0,04	9,89	0,02	0,002	19	19,12	79,43	0,34	1,10	2,0	0,0010	1,93	1	1
50	11,00	0,01	3,07	0,01	0,004	2	20,67	78,44	0,08	0,81	0,8	0,0017	0,12	1	1
51	244,00	0,03	39,00	0,02	0,003	20	19,46	76,60	0,26	3,68	3,3	0,0024	0,84	1	1
52	82,50	0,02	6,39	0,02	0,002	1	20,78	78,80	0,13	0,28	1,7	0,0010	0,10	1	1

Tablica 6.2.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	355,00	0,15	72,00	0,20	0,002	32	6,35	67,02	4,54	22,04	56,9	0,0003	11,41	1	2
54	306,00	0,10	71,00	0,21	0,001	31	7,56	66,23	4,74	21,42	56,0	0,0003	9,99	1	2
55	1200,00	0,39	99,00	0,13	0,001	1	0,76	74,62	0,05	24,39	495,0	0,0000	19,01	1	2
56	1910,00	0,03	129,00	0,04	0,001	18	19,32	75,96	0,61	3,90	22,9	0,0022	0,81	1	2
57	36,80	0,08	3,13	0,09	0,002	2	17,52	77,70	1,08	3,70	5,6	0,0001	3,07	1	1
58	2,14	0,02	0,17	0,01	0,003	1	20,61	79,33	0,06	0,00	2,7	0,0002	0,41	1	1
59	82,00	0,02	16,40	0,02	0,002	7	19,52	75,01	0,22	5,24	1,7	0,0020	0,36	1	1
60	5,90	0,04	0,17	0,01	0,004	4	20,55	78,72	0,14	0,59	2,4	0,0013	0,31	1	1
61	2470,00	0,45	147,00	0,15	0,001	1	1,72	62,30	0,05	35,62	511,0	0,0000	14,79	1	2
62	16,60	0,11	4,82	0,20	0,002	43	5,86	77,07	9,83	7,23	145,0	0,0003	14,56	1	3
63	90,70	0,02	10,70	0,01	0,003	5	19,17	76,03	0,96	3,83	5,9	0,0005	0,98	1	1
64	54,70	0,02	4,61	0,01	0,003	3	20,00	77,68	0,46	1,86	5,4	0,0005	0,59	1	1
65	24,90	0,04	2,00	0,09	0,004	2	20,27	78,50	0,43	0,78	218,0	0,0004	0,53	1	1
66	60,20	0,03	3,27	0,01	0,006	2	19,90	77,32	0,63	2,15	11,1	0,0003	0,59	1	1
67	8,49	0,05	0,80	0,01	0,016	3	20,26	78,54	0,43	0,78	44,8	0,0005	0,55	1	1
68	0,07	0,03	0,02	0,02	0,007	5	20,21	79,53	0,26	0,00	1,4	0,0006	0,87	1	1
69	2,53	0,02	0,19	0,01	0,003	2	20,76	78,77	0,16	0,31	1,3	0,0018	0,11	1	1
70	8,69	0,02	1,57	0,02	0,002	9	19,12	76,35	0,55	3,98	0,5	0,0008	1,11	1	1
71	82,60	0,15	1,49	0,03	0,002	66	10,82	55,70	0,18	33,29	11,0	0,0017	3,94	1	2
72	10,00	0,04	0,82	0,01	0,006	10	20,31	79,23	0,09	0,37	2,2	0,0015	0,69	1	1
73	3,07	0,03	0,13	0,01	0,002	4	20,49	79,15	0,15	0,21	2,3	0,0008	0,48	1	1
74	5,03	0,04	0,22	0,02	0,003	20	19,16	79,40	1,11	0,33	2,8	0,0011	1,88	1	1
75	0,05	0,02	0,02	0,01	0,006	1	20,78	79,15	0,07	0,00	0,9	0,0005	0,19	1	1
76	0,04	0,02	0,02	0,01	0,007	1	20,78	79,15	0,07	0,00	0,7	0,0005	0,19	1	1
77	0,05	0,02	0,02	0,01	0,007	1	20,78	79,15	0,07	0,00	0,9	0,0005	0,19	1	1
78	0,05	0,02	0,02	0,01	0,006	1	20,78	79,15	0,07	0,00	1,4	0,0005	0,19	1	1

W tablicy 6.2.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) sytuację normalną, gdzie nie występuje zagrożenie pożarowe (1. kryterium zagrożenia). Z analizy zaprezentowanej tablicy wynika, co następuje.

- W większości rozpatrywanych przypadków poziom zagrożenia pożarowego wyznaczony za pomocą sztucznej sieci neuronowej pokrywał się z poziomem określonym przez wskaźnik Grahama.
- Istnieją jednak próbki powietrza, dla których sztuczna sieć neuronowa wskazywała na 2., a nawet 3. kategorię zagrożenia pożarem endogenicznym. W większości tych przypadków mieliśmy do czynienia z obniżonymi stężeniami tlenu, wywołanymi podwyższoną zawartością metanu i/lub dwutlenku węgla w próbkach powietrza – co skutkowało zwiększonymi wartościami mianownika wskaźnika Grahama. W wielu takich próbkach można zaobserwować, że wartość mianownika przekraczała próg 5,7, co z godnie z wynikami przeprowadzonych analiz pozwala stwierdzić, że wskaźnik Grahama znajdował się poza przedziałem wiarygodności.
- Wyższym kategoriom zagrożenia, wyznaczonym przez sztuczną sieć neuronową, towarzyszyły podwyższone stężenia gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) – co wskazuje na poprawną korelację między nimi.
- Powyższe pozwala stwierdzić, że opracowany graf sztucznej sieci neuronowej cechuje się dużą odpornością na zakłócenia wywołane obniżonymi stężeniami tlenu oraz zwiększonym stężeniami metanu i/lub dwutlenku węgla w próbkach powietrza kopalnianego.

Tablica 6.3.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	39,12	0,07	1,90	0,13	0,001	4	1,59	90,01	6,16	2,24	27,8	0,0000	22,26	1	1
2	0,30	0,06	0,08	0,06	0,001	6	17,07	82,47	0,46	0,00	9,3	0,0001	4,78	1	1
3	4,26	0,32	2,65	0,87	0,004	1	10,11	82,52	2,60	4,72	454,0	0,0000	11,76	1	2
4	45,30	0,04	8,81	0,03	0,001	9	14,85	84,35	0,43	0,36	3,2	0,0001	7,50	1	1
5	58,10	0,09	13,30	0,05	0,001	61	14,64	83,54	0,71	1,10	4,2	0,0008	7,50	1	2
6	24,20	0,02	5,46	0,03	0,003	2	4,03	83,25	3,60	9,12	2,1	0,0000	18,03	1	1
7	0,37	0,12	0,19	0,08	0,006	40	16,67	82,36	0,96	0,00	27,8	0,0008	5,16	1	2
8	1,62	0,21	0,55	0,16	0,006	3	10,11	88,50	1,34	0,05	16,8	0,0000	13,34	1	2
9	0,19	0,04	0,02	0,02	0,074	4	7,78	92,15	0,07	0,00	11,3	0,0000	16,64	1	1
10	1,73	0,01	0,25	0,02	0,001	1	6,74	81,93	6,69	4,64	4,2	0,0000	14,97	1	1
11	20,70	0,04	1,53	0,05	0,001	2	1,68	96,16	0,97	1,18	35,1	0,0000	23,80	1	1
12	0,06	0,03	0,03	0,01	0,002	12	16,68	82,00	1,32	0,00	3,3	0,0002	5,05	1	1
13	64,10	0,02	15,37	0,04	0,001	1	3,12	81,22	4,11	11,55	54,5	0,0000	18,40	1	1
14	3,29	0,51	1,63	1,33	0,007	9	3,36	83,52	3,26	9,80	571,0	0,0000	18,77	1	3
15	0,76	0,07	0,22	0,03	0,003	16	17,65	81,88	0,47	0,00	11,7	0,0004	4,05	1	1
16	10,20	0,05	0,63	0,06	0,001	2	2,14	96,78	0,16	0,91	37,5	0,0000	23,51	1	1
17	35,95	0,01	3,98	0,03	0,001	4	14,40	82,73	2,44	0,43	17,9	0,0001	7,52	1	1
18	9,82	0,02	0,58	0,07	0,001	2	2,73	95,14	1,18	0,95	39,8	0,0000	22,48	1	1
19	0,30	0,07	0,10	0,02	0,006	17	16,67	81,79	1,54	0,00	2,3	0,0003	5,00	1	1
20	20,12	0,09	16,82	0,06	0,003	67	18,09	81,43	0,43	0,05	4,5	0,0019	3,49	1	2
21	8,46	0,02	7,04	0,03	0,001	2	2,71	83,82	5,28	8,19	1,5	0,0000	19,50	1	1
22	0,28	0,18	0,09	0,13	0,045	130	16,10	83,10	0,79	0,00	5,0	0,0022	5,92	1	3
23	0,32	0,01	0,02	0,01	0,001	1	4,46	95,34	0,20	0,00	1,5	0,0000	20,81	1	1
24	124,00	0,10	33,70	0,03	0,001	100	17,23	81,27	0,42	1,05	7,1	0,0023	4,31	1	2
25	1,77	0,12	0,28	0,11	0,023	8	16,75	82,67	0,46	0,11	77,0	0,0002	5,16	1	2
26	5,42	0,08	0,28	0,08	0,002	39	15,83	82,12	0,91	1,13	97,7	0,0007	5,93	1	2

Tablica 6.3.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	0,61	0,01	0,03	0,01	0,001	1	18,36	81,40	0,11	0,13	0,5	0,0000	3,21	1	1
28	3,40	0,70	1,80	1,67	0,005	10	4,36	83,89	2,82	8,89	421,0	0,0001	17,87	1	3
29	0,32	0,05	0,06	0,04	0,001	20	17,61	81,89	0,50	0,00	12,9	0,0005	4,09	1	1
30	0,63	0,21	0,31	0,12	0,003	31	12,93	85,31	1,75	0,00	42,9	0,0003	9,68	1	2
31	0,04	0,02	0,02	0,01	0,002	2	8,46	91,49	0,05	0,00	6,4	0,0000	15,78	1	1
32	21,20	0,01	2,42	0,02	0,001	2	10,33	86,63	2,78	0,25	27,7	0,0000	12,63	1	1
33	0,38	0,01	0,08	0,02	0,001	1	11,56	82,06	6,38	0,00	0,5	0,0000	10,19	1	1
34	0,30	0,19	0,12	0,10	0,017	116	15,44	83,08	1,47	0,00	4,7	0,0018	6,58	1	3
35	0,22	0,15	0,07	0,09	0,031	61	17,18	82,34	0,47	0,00	4,0	0,0013	4,64	1	2
36	0,06	0,03	0,03	0,02	0,005	4	15,38	84,54	0,08	0,00	8,3	0,0001	7,02	1	1
37	95,00	0,25	2,79	0,15	0,001	150	11,98	83,17	2,00	2,82	10,2	0,0015	10,06	1	3
38	8,99	0,01	7,17	0,03	0,001	1	3,62	81,08	5,60	9,70	0,9	0,0000	17,87	1	1
39	554,00	0,29	155,00	0,10	0,002	340	8,32	86,97	1,32	3,32	20,2	0,0023	14,73	1	3
40	0,23	0,10	0,08	0,03	0,006	8	18,36	81,20	0,44	0,00	23,9	0,0003	3,16	1	1
41	0,23	0,04	0,08	0,02	0,002	1	5,09	94,67	0,24	0,00	2,5	0,0000	20,00	1	1
42	0,45	0,14	0,13	0,09	0,016	104	16,09	82,43	1,47	0,00	4,2	0,0018	5,75	1	2
43	0,35	0,01	0,16	0,01	0,001	1	14,85	82,92	2,23	0,00	0,5	0,0000	7,12	1	1
44	0,96	0,02	0,05	0,01	0,001	1	17,33	82,15	0,20	0,32	0,5	0,0000	4,44	1	1
45	3,52	0,98	1,94	2,26	0,001	11	2,46	86,44	3,02	8,01	683,0	0,0001	20,45	1	3
46	7,95	0,05	2,35	0,16	0,004	1	14,61	81,59	1,75	2,05	17,4	0,0000	7,01	1	1
47	0,60	0,07	0,16	0,04	0,012	6	11,01	85,73	3,26	0,00	3,2	0,0001	11,71	1	1
48	0,13	0,03	0,07	0,09	0,002	5	12,07	83,34	4,59	0,00	0,5	0,0000	10,02	1	1
49	0,36	0,09	0,26	0,02	0,002	15	16,97	82,36	0,67	0,00	10,2	0,0003	4,86	1	1
50	4,34	0,29	1,62	0,16	0,021	132	15,22	83,72	1,04	0,00	19,5	0,0019	6,97	1	3
51	0,07	0,03	0,04	0,01	0,003	3	4,72	92,02	3,26	0,00	0,5	0,0000	19,67	1	1
52	0,76	0,03	0,09	0,03	0,002	14	12,73	86,48	0,64	0,15	4,0	0,0001	10,19	1	1

Tablica 6.3.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – pierwsze kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	0,28	0,14	0,14	0,04	0,003	23	16,70	82,00	1,30	0,00	77,4	0,0005	5,03	1	2
54	0,02	0,02	0,01	0,02	0,002	1	3,53	96,42	0,05	0,00	17,9	0,0000	22,02	1	1
55	9,69	0,36	0,91	0,30	0,036	11	12,39	87,20	0,30	0,06	510,0	0,0001	10,72	1	2
56	11,79	0,59	1,12	0,46	0,084	10	12,59	87,01	0,29	0,06	493,0	0,0001	10,47	1	3
57	0,86	0,02	0,03	0,01	0,002	1	17,91	81,69	0,13	0,27	0,5	0,0000	3,74	1	1
58	2,71	0,62	1,11	1,60	0,008	16	12,16	83,40	1,86	2,56	145,0	0,0002	9,94	1	3
59	0,23	0,11	0,07	0,04	0,011	5	16,60	81,91	1,49	0,00	2,6	0,0001	5,11	1	1
60	6,03	0,06	2,12	0,21	0,005	1	14,62	81,98	1,70	1,69	89,8	0,0000	7,10	1	2
61	190,56	0,33	5,06	0,14	0,001	280	9,58	82,26	2,42	5,69	12,2	0,0023	12,22	1	3
62	17,37	0,02	8,77	0,02	0,001	1	0,76	82,05	6,37	10,82	0,6	0,0000	20,98	1	1
63	0,53	0,13	0,24	0,09	0,004	20	15,12	83,34	1,53	0,00	38,0	0,0003	6,97	1	2
64	62,79	0,04	8,37	0,08	0,005	3	3,02	90,24	5,55	1,19	7,2	0,0000	20,89	1	1
65	3,60	0,07	0,25	0,05	0,001	49	16,30	83,16	0,37	0,17	4,0	0,0009	5,74	1	2
66	0,08	0,01	0,02	0,01	0,001	3	15,67	83,95	0,38	0,00	1,7	0,0000	6,58	1	1
67	0,32	0,04	0,12	0,22	0,001	1	9,19	89,36	1,45	0,00	530,0	0,0000	14,49	1	2
68	24,50	0,02	3,23	0,03	0,001	1	5,50	90,26	3,62	0,62	26,8	0,0000	18,42	1	1
69	16,30	0,06	0,94	0,06	0,001	6	5,03	91,51	2,15	1,31	10,2	0,0000	19,22	1	1
70	0,07	0,05	0,03	0,03	0,002	14	18,23	81,54	0,23	0,00	1,6	0,0004	3,38	1	1
71	0,51	0,29	0,21	0,16	0,011	127	13,01	84,28	2,71	0,00	5,2	0,0014	9,32	1	3
72	0,11	0,17	0,05	0,02	0,001	87	12,07	86,43	1,50	0,00	4,3	0,0008	10,83	1	2
73	0,21	0,02	0,10	0,07	0,002	1	2,98	94,20	2,82	0,00	29,8	0,0000	21,98	1	1
74	0,07	0,01	0,05	0,02	0,001	7	8,91	88,46	2,63	0,00	0,6	0,0000	14,53	1	1
75	4,25	0,05	1,28	0,10	0,004	1	15,93	81,44	1,29	1,32	191,0	0,0000	5,65	1	1
76	2,92	0,54	0,98	1,04	0,005	5	12,33	82,59	1,12	3,94	171,0	0,0001	9,56	1	2
77	0,21	0,03	0,06	0,02	0,020	1	17,39	81,34	1,27	0,00	1,6	0,0000	4,17	1	1
78	0,77	0,07	0,24	0,04	0,003	1	12,03	87,01	0,96	0,00	4,7	0,0000	11,03	1	1

W tablicy 6.3.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych, gdzie stosowano inertyzację azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) sytuację normalną (nie występuje zagrożenie pożarowe – 1. kryterium zagrożenia). Z analizy zaprezentowanej tablicy wynika, co następuje.

- Znacznie więcej próbek powietrza zostało sklasyfikowanych przez sztuczną sieć neuronową do wyższej kategorii zagrożenia pożarowego, niż miało to miejsce w poprzednim przypadku – tablica 6.2.(a-c).
- W przedstawionych przykładach, oprócz obniżonych stężeń tlenu, mamy do czynienia z podwyższonymi stężeniami azotu, co w większości rozpatrywanych próbek powietrza skutkowało wysokimi wartościami mianownika wskaźnika Grahama. Opierając się na wcześniej przedstawionych wynikach analiz można stwierdzić, że jeżeli wartości mianownika wskaźnika Grahama przekraczają 5,7, to wskaźnik Grahama jest niewiarygodny.
- Podobnie jak w przypadku tablicy 6.2.(a-c), podwyższonym kategoriom zagrożenia, wyznaczonym przez sztuczną sieć neuronową, towarzyszyły podwyższone stężenia gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) – co wskazuje na poprawną korelację między nimi.
- Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że opracowany graf sztucznej sieci neuronowej dobrze radzi sobie z zakłóceniami spowodowanymi przez zwiększone stężenia azotu zawarte w próbkach powietrza pobranych z rejonów, w których stosuje się ten gaz do inertyzacji.

Tablica 6.4.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	207,22	0,10	16,82	0,04	0,001	125	15,03	73,04	0,26	11,67	13,1	0,0029	4,33	2	2
2	7,22	0,02	0,45	0,02	0,002	38	20,06	78,90	0,39	0,65	5,2	0,0045	0,85	2	2
3	150,00	0,06	42,70	0,03	0,003	65	18,85	79,30	0,52	1,30	14,8	0,0030	2,16	2	2
4	7,53	0,03	0,23	0,02	0,002	4	20,67	78,37	0,15	0,81	2,6	0,0041	0,10	2	1
5	7,72	0,02	0,17	0,01	0,003	13	20,36	78,43	0,31	0,90	2,4	0,0031	0,42	2	1
6	277,00	0,29	41,50	0,10	0,006	167	15,20	76,17	0,05	8,53	41,1	0,0034	4,99	2	3
7	1,43	0,06	0,16	0,03	0,009	16	20,63	79,25	0,12	0,00	11,1	0,0043	0,37	2	2
8	62,43	0,02	4,89	0,02	0,008	17	20,07	77,06	0,30	2,56	4,2	0,0048	0,35	2	1
9	2,91	0,03	0,31	0,01	0,003	4	20,74	78,60	0,29	0,37	1,5	0,0045	0,09	2	1
10	0,72	0,03	0,07	0,02	0,001	9	20,73	79,00	0,22	0,05	1,4	0,0044	0,21	2	1
11	213,00	0,12	29,80	0,06	0,001	183	15,13	69,22	0,31	15,30	9,8	0,0057	3,21	2	2
12	9,36	0,38	0,33	0,21	0,001	13	20,45	78,47	0,15	0,93	4,8	0,0038	0,34	2	2
13	306,00	0,20	39,00	0,08	0,002	206	14,71	72,12	0,42	12,69	16,0	0,0047	4,40	2	2
14	1496,60	0,01	94,92	0,01	0,001	6	20,09	76,41	0,36	2,98	3,5	0,0038	0,16	2	1
15	0,06	0,06	0,03	0,03	0,004	54	20,17	79,66	0,16	0,00	1,5	0,0057	0,94	2	2
16	0,36	0,04	0,20	0,02	0,008	26	20,42	79,46	0,12	0,00	7,5	0,0041	0,64	2	2
17	0,08	0,07	0,03	0,04	0,013	57	20,04	79,77	0,18	0,00	5,5	0,0052	1,10	2	2
18	2980,00	0,08	199,00	0,06	0,004	29	18,17	72,80	1,04	7,67	18,2	0,0026	1,12	2	2
19	139,00	0,08	14,46	0,04	0,001	82	17,32	76,14	0,24	6,27	24,8	0,0029	2,86	2	2
20	8,44	0,02	2,36	0,02	0,001	12	20,54	78,85	0,42	0,19	5,2	0,0034	0,36	2	1
21	8,75	0,04	0,22	0,02	0,003	6	20,61	78,31	0,13	0,95	4,2	0,0042	0,14	2	1
22	9,65	0,04	0,75	0,02	0,005	13	20,34	77,76	0,12	1,78	1,8	0,0049	0,27	2	1
23	207,15	0,10	22,54	0,03	0,002	114	16,76	70,88	0,30	12,02	8,9	0,0056	2,02	2	2
24	9,32	0,04	0,62	0,01	0,002	60	19,57	79,34	0,46	0,63	4,7	0,0041	1,46	2	2
25	0,13	0,06	0,06	0,03	0,008	36	20,29	79,56	0,15	0,00	9,6	0,0045	0,79	2	2
26	0,06	0,09	0,03	0,04	0,011	9	20,62	79,16	0,22	0,00	24,5	0,0025	0,36	2	2

Tablica 6.4.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	0,06	0,06	0,02	0,02	0,016	42	20,23	79,62	0,15	0,00	2,6	0,0048	0,87	2	2
28	0,04	0,05	0,01	0,02	0,044	4	20,78	78,99	0,23	0,00	3,0	0,0026	0,15	2	1
29	194,69	0,11	22,68	0,04	0,001	138	17,12	72,60	0,27	9,97	7,8	0,0065	2,12	2	2
30	0,07	0,02	0,04	0,02	0,005	20	20,10	78,33	1,57	0,00	5,4	0,0030	0,66	2	2
31	12,94	0,04	3,64	0,02	0,015	16	20,31	78,98	0,52	0,19	7,4	0,0026	0,62	2	1
32	68,00	0,07	27,00	0,05	0,001	50	19,87	78,98	0,36	0,77	7,2	0,0047	1,06	2	2
33	11,44	0,04	0,36	0,02	0,001	12	20,47	78,18	0,13	1,22	3,1	0,0048	0,25	2	1
34	0,04	0,01	0,03	0,01	0,005	6	20,70	78,88	0,42	0,00	3,9	0,0030	0,20	2	1
35	0,17	0,09	0,22	0,03	0,120	29	20,11	79,62	0,27	0,00	9,7	0,0029	0,99	2	2
36	0,09	0,08	0,04	0,04	0,521	33	20,04	79,68	0,28	0,00	9,8	0,0031	1,08	2	2
37	66,00	0,02	6,39	0,02	0,001	6	19,97	76,14	0,96	2,92	5,8	0,0029	0,21	2	1
38	129,00	0,06	22,80	0,03	0,002	80	18,74	79,72	0,33	1,19	10,4	0,0034	2,39	2	2
39	20,55	0,02	4,07	0,02	0,001	7	20,61	78,63	0,35	0,41	20,5	0,0031	0,23	2	1
40	11,70	0,27	0,62	0,09	0,015	6	20,70	78,45	0,09	0,76	11,3	0,0067	0,09	2	2
41	109,00	0,07	28,20	0,03	0,002	74	18,78	79,61	0,33	1,27	10,3	0,0032	2,32	2	2
42	283,34	0,10	23,00	0,05	0,001	102	15,21	65,86	0,33	18,60	25,6	0,0045	2,24	2	2
43	0,10	0,09	0,04	0,06	0,048	45	19,97	79,78	0,25	0,00	4,1	0,0038	1,17	2	2
44	148,24	0,06	29,25	0,03	0,001	54	18,28	74,86	0,48	6,38	4,1	0,0035	1,56	2	2
45	8,70	0,04	0,45	0,01	0,003	20	20,25	78,96	0,13	0,66	5,9	0,0030	0,67	2	1
46	53,43	0,03	12,28	0,02	0,001	32	20,00	79,17	0,20	0,62	5,1	0,0033	0,98	2	1
47	122,65	0,03	20,44	0,02	0,001	26	19,35	75,42	0,29	4,92	2,8	0,0041	0,64	2	1
48	248,48	0,13	38,75	0,08	0,001	110	16,00	75,03	0,18	8,75	27,0	0,0028	3,88	2	2
49	390,33	0,01	29,47	0,01	0,002	3	20,68	78,34	0,15	0,79	3,2	0,0037	0,08	2	1
50	81,80	0,05	24,07	0,03	0,001	55	19,39	79,55	0,17	0,87	7,3	0,0033	1,69	2	2
51	191,90	0,05	22,63	0,04	0,001	88	16,07	73,11	0,30	10,51	6,4	0,0027	3,30	2	2
52	335,00	0,12	68,00	0,04	0,001	74	18,30	79,63	0,34	1,68	19,9	0,0026	2,80	2	2

Tablica 6.4.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	111,00	0,08	19,60	0,12	0,001	44	18,38	72,21	0,38	9,01	3,6	0,0058	0,76	2	2
54	36,70	0,03	4,30	0,01	0,005	25	20,02	77,50	0,46	2,02	3,5	0,0048	0,52	2	1
55	318,00	0,13	37,20	0,05	0,001	119	15,00	69,06	0,59	15,30	10,0	0,0036	3,30	2	2
56	0,23	0,06	0,09	0,02	0,286	30	20,19	79,53	0,28	0,00	1,1	0,0034	0,89	2	2
57	25,90	0,39	4,01	0,09	0,008	76	19,39	78,93	0,67	1,00	17,2	0,0050	1,53	2	2
58	1,97	0,02	0,16	0,02	0,004	4	20,78	78,86	0,12	0,24	2,2	0,0034	0,12	2	1
59	4,69	0,02	0,68	0,01	0,001	10	20,55	78,97	0,22	0,26	1,6	0,0027	0,38	2	1
60	3,46	0,09	0,38	0,04	0,001	56	18,92	79,76	0,60	0,71	1,9	0,0025	2,22	2	2
61	3,96	0,04	0,53	0,02	3,571	33	20,10	79,68	0,22	0,00	6,9	0,0033	1,02	2	2
62	86,00	0,01	5,82	0,02	0,002	5	20,64	78,43	0,26	0,66	1,6	0,0035	0,14	2	1
63	6,52	0,04	0,20	0,02	0,007	28	20,37	78,76	0,14	0,73	7,2	0,0056	0,50	2	2
64	392,00	0,18	70,00	0,06	0,008	148	15,65	71,96	0,64	11,69	13,3	0,0043	3,42	2	2
65	2597,00	0,05	187,00	0,04	0,001	17	19,33	74,89	0,66	4,84	26,0	0,0033	0,52	2	2
66	193,00	0,06	35,70	0,03	0,003	71	18,54	75,78	0,29	5,36	6,5	0,0046	1,54	2	2
67	140,00	0,07	28,30	0,03	0,003	63	19,04	77,19	0,25	3,50	3,5	0,0045	1,42	2	2
68	208,00	0,06	26,40	0,04	0,001	78	17,32	72,55	0,34	9,77	7,6	0,0041	1,91	2	2
69	225,00	0,11	47,20	0,05	0,004	116	17,74	75,88	0,40	5,95	9,8	0,0049	2,37	2	2
70	691,00	0,01	44,70	0,02	0,001	6	20,49	78,06	0,20	1,18	7,5	0,0031	0,20	2	1
71	227,00	0,06	29,60	0,05	0,001	79	17,31	72,04	0,32	10,33	7,8	0,0044	1,78	2	2
72	27,10	0,02	4,07	0,01	0,004	4	20,71	78,38	0,09	0,82	1,8	0,0066	0,06	2	1
73	170,00	0,05	34,40	0,03	0,001	62	18,74	76,24	0,33	4,69	4,0	0,0042	1,46	2	2
74	0,13	0,08	0,08	0,03	0,002	24	20,39	79,47	0,14	0,00	3,8	0,0036	0,67	2	2
75	44,80	0,07	7,41	0,05	0,002	65	19,07	79,72	0,25	0,95	16,6	0,0032	2,06	2	2
76	152,00	0,08	31,20	0,02	0,004	53	19,29	76,85	0,25	3,59	4,7	0,0049	1,08	2	2
77	500,00	0,21	100,00	0,13	0,001	196	14,44	72,12	0,88	12,48	25,3	0,0042	4,67	2	3
78	267,00	0,07	34,70	0,05	0,002	72	16,78	69,74	0,35	13,10	10,2	0,0042	1,70	2	2

W tablicy 6.4.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i z za tam izolacyjnych, gdzie nie stosowano inertyzacji azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) drugie kryterium zagrożenia pożarowego, gdzie powinno się wzmóc obserwację atmosfery w zrobach oraz zwiększyć częstotliwość pobierania prób powietrza. Z analizy tej tablicy wynika co następuje.

- W większości zaprezentowanych przypadków można zaobserwować, że poziom zagrożenia pożarem określony przez sztuczną sieć neuronową pokrywał się z poziomem wyznaczonym przez wskaźnik Grahama.
- Jednak dla wielu wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych sztuczna sieć neuronowa wskazywała niższy poziom zagrożenia niż wskaźnik Grahama. Zazwyczaj z taką sytuacją mamy do czynienia, gdy próbka powietrza charakteryzuje się wysoką zawartością tlenu. W wielu takich przypadkach mianownik wskaźnika Grahama zbliża się do zera, co zgodnie z wcześniej przedstawionymi wynikami analiz, może powodować niewiarygodne, wysokie wartości tego wskaźnika.
- W omawianej tablicy 6.4.(a-c) zaobserwowano również dwa przypadki, w których kategoria zagrożenia pożarem endogenicznym wskazywana przez sztuczną sieć neuronową była wyższa od kategorii wyznaczonej przez wskaźnik Grahama (przypadek 6. i 77.). Te dwie próbki powietrza charakteryzowały się podwyższonymi stężeniami metanu, co generuje zwiększone wartości mianownika wskaźnika Grahama i jednocześnie zmniejsza wartość tego wskaźnika.
- Biorąc pod uwagę stężenia gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010), to kategorie zagrożenia pożarowego określone przez sztuczną sieć neuronową wykazywały z nimi dobrą korelację.
- Powyższe wnioski pozwalają twierdzić, że analizowany model sztucznej sieci neuronowej jest odporny na zakłócenia wynikające ze zwiększonych stężeń metanu i/lub dwutlenku węgla zawartych w próbkach powietrza poddanych analizie. Okazało się również, że omawiana topologia dobrze radzi sobie w sytuacji, gdy próbka powietrza jest zapowietrzona i zawiera wysokie stężenie tlenu.

Tablica 6.5.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	66,60	1,57	10,60	0,63	0,023	214	15,11	81,43	0,81	2,62	193,0	0,0033	6,47	2	3
2	115,00	71,40	29,20	12,60	1,340	400	15,37	83,26	1,16	0,11	368,0	0,0060	6,69	2	4
3	333,34	36,52	84,32	25,68	0,102	840	6,98	89,59	3,16	0,27	14,7	0,0050	16,76	2	4
4	0,19	0,23	0,06	0,09	0,015	180	17,08	82,53	0,39	0,00	6,0	0,0038	4,79	2	3
5	280,00	15,60	82,70	9,66	0,009	830	3,49	93,58	2,62	0,19	19,0	0,0039	21,31	2	3
6	352,00	16,60	105,00	11,00	0,006	700	5,86	91,05	2,75	0,23	11,8	0,0038	18,27	2	3
7	0,31	0,24	0,09	0,10	0,023	308	15,66	83,70	0,63	0,00	13,0	0,0047	6,52	2	3
8	0,39	0,21	0,13	0,11	0,023	110	17,38	82,17	0,44	0,00	316,0	0,0025	4,40	2	3
9	15,20	0,46	3,61	0,25	0,001	665	5,59	90,01	4,28	0,05	1,1	0,0036	18,26	2	3
10	0,24	0,31	0,06	0,11	0,062	165	17,35	82,16	0,49	0,00	5,8	0,0037	4,42	2	3
11	0,39	0,30	0,09	0,12	0,036	310	13,38	86,10	0,49	0,00	45,6	0,0033	9,44	2	3
12	0,23	0,19	0,08	0,10	0,026	142	17,70	81,56	0,74	0,00	3,6	0,0036	3,91	2	3
13	588,00	0,17	61,00	0,06	0,001	190	16,28	82,23	0,65	0,76	21,5	0,0034	5,51	2	2
14	0,74	0,24	0,25	0,12	0,005	222	16,84	82,56	0,57	0,00	36,1	0,0044	5,04	2	3
15	416,00	0,08	33,40	0,04	0,001	155	17,08	81,50	0,39	0,97	9,0	0,0034	4,52	2	2
16	145,00	4,08	18,20	1,33	0,002	614	2,24	90,20	1,14	6,31	286,0	0,0028	21,66	2	3
17	0,49	0,13	0,18	0,12	0,095	150	17,40	81,94	0,64	0,00	12,3	0,0035	4,31	2	3
18	0,47	0,15	0,16	0,10	0,112	165	16,58	82,64	0,76	0,00	12,9	0,0031	5,32	2	3
19	0,58	0,15	0,22	0,16	0,108	173	16,62	82,55	0,81	0,00	11,9	0,0033	5,26	2	3
20	0,50	0,11	0,18	0,14	0,094	130	16,95	82,25	0,80	0,00	9,4	0,0027	4,85	2	3
21	0,53	0,13	0,19	0,15	0,099	162	16,97	82,27	0,76	0,00	8,7	0,0034	4,83	2	3
22	0,42	0,16	0,14	0,09	0,084	144	16,33	82,86	0,81	0,00	9,2	0,0026	5,63	2	3
23	134,63	9,30	34,76	4,97	0,126	1218	3,40	91,01	5,30	0,15	52,4	0,0059	20,72	2	4
24	0,44	0,31	0,12	0,15	0,027	230	13,98	85,43	0,57	0,00	8,7	0,0027	8,66	2	3
25	0,47	0,11	0,21	0,06	0,006	105	18,24	81,45	0,30	0,00	9,8	0,0031	3,34	2	2
26	0,21	0,17	0,06	0,09	0,602	97	18,05	81,50	0,44	0,00	5,1	0,0027	3,55	2	3

Tablica 6.5.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	125,00	52,50	33,20	16,40	1,200	1320	3,01	94,97	1,92	0,10	1870,0	0,0060	22,16	2	4
28	128,00	50,00	37,50	16,50	0,486	1274	2,33	95,73	1,85	0,09	1800,0	0,0055	23,04	2	4
29	392,00	51,90	86,80	17,00	0,194	848	4,86	90,66	3,95	0,39	15,7	0,0044	19,16	2	4
30	17,27	0,26	0,96	0,15	0,002	230	15,13	82,56	1,40	0,88	8,6	0,0034	6,75	2	3
31	18,00	0,28	1,10	0,13	0,003	240	13,31	83,27	2,37	1,02	8,9	0,0027	8,76	2	3
32	16,62	0,25	0,91	0,16	0,001	240	11,98	81,17	5,72	1,10	6,4	0,0025	9,53	2	3
33	0,24	0,15	0,08	0,11	0,037	162	18,69	81,02	0,27	0,00	15,3	0,0058	2,78	2	3
34	35,30	1,49	7,03	1,34	0,003	420	14,48	83,00	1,70	0,77	29,4	0,0056	7,52	2	3
35	25,79	0,80	3,66	1,00	0,006	340	13,29	84,17	1,75	0,75	16,3	0,0038	9,02	2	3
36	20,80	1,34	4,73	1,53	0,008	350	10,24	88,55	0,86	0,31	41,8	0,0026	13,23	2	3
37	0,42	0,30	0,15	0,19	0,018	168	15,52	83,52	0,94	0,00	7,1	0,0025	6,61	2	3
38	0,37	0,33	0,12	0,21	0,034	270	16,64	82,78	0,55	0,00	5,1	0,0051	5,30	2	3
39	0,56	0,16	0,20	0,09	0,050	102	17,82	81,85	0,32	0,00	7,2	0,0026	3,87	2	2
40	108,00	0,28	2,54	0,10	0,001	215	13,32	82,11	1,41	3,13	14,3	0,0025	8,44	2	3
41	16,40	1,02	3,32	0,61	0,010	208	13,70	81,22	5,06	0,00	1,6	0,0027	7,82	2	3
42	28,70	0,42	3,72	0,22	0,027	333	14,78	84,63	0,55	0,00	6,4	0,0044	7,65	2	3
43	323,00	0,16	93,00	0,09	0,001	360	8,70	86,80	1,24	3,18	13,4	0,0025	14,30	2	3
44	154,27	0,33	4,41	0,13	0,001	290	11,83	81,82	2,40	3,90	11,7	0,0029	9,85	2	3
45	0,74	0,45	0,23	0,30	0,004	498	13,75	85,40	0,85	0,00	4,3	0,0056	8,88	2	3
46	0,23	0,13	0,08	0,09	0,011	99	18,74	81,02	0,23	0,00	2,1	0,0036	2,73	2	2
47	0,60	0,43	0,20	0,25	0,014	342	15,36	84,13	0,48	0,00	5,8	0,0049	6,93	2	3
48	0,22	0,15	0,07	0,11	0,003	234	17,69	81,71	0,58	0,00	4,0	0,0059	3,96	2	3
49	215,00	0,29	7,06	0,06	0,001	290	10,42	81,37	1,91	6,25	11,5	0,0026	11,14	2	3
50	0,38	0,25	0,13	0,19	0,032	225	16,03	83,20	0,77	0,00	6,0	0,0037	6,02	2	3
51	0,28	0,21	0,11	0,14	0,009	150	17,43	81,95	0,61	0,00	2,8	0,0035	4,29	2	2
52	0,21	0,16	0,07	0,07	0,060	215	15,35	84,35	0,28	0,00	6,4	0,0031	7,00	2	3

Tablica 6.5.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – drugie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	0,18	0,20	0,04	0,07	0,363	160	17,95	81,48	0,55	0,00	3,2	0,0044	3,64	2	3
54	0,43	0,16	0,11	0,07	0,229	107	18,15	81,19	0,65	0,00	19,9	0,0032	3,37	2	3
55	72,10	0,15	10,30	0,08	0,090	81	18,65	81,11	0,22	0,00	24,6	0,0028	2,84	2	2
56	0,21	0,13	0,07	0,07	0,023	109	18,51	81,09	0,39	0,00	30,5	0,0037	2,98	2	2
57	0,18	0,22	0,07	0,15	0,130	181	17,63	81,79	0,56	0,00	7,8	0,0045	4,04	2	3
58	0,23	0,19	0,08	0,14	0,032	174	18,13	81,45	0,40	0,00	3,2	0,0050	3,45	2	3
59	29,40	7,18	7,67	2,83	0,214	269	16,81	81,71	1,48	0,00	88,1	0,0056	4,84	2	3
60	18,40	3,18	4,73	2,43	0,193	114	17,14	81,37	1,49	0,00	26,6	0,0026	4,42	2	3
61	22,20	2,54	5,84	2,41	0,092	116	17,89	81,01	1,09	0,00	10,4	0,0032	3,58	2	3
62	46,20	7,68	11,80	3,59	0,148	290	17,21	81,38	1,41	0,00	12,9	0,0067	4,36	2	3
63	39,80	4,80	10,70	4,50	0,083	250	14,29	83,84	1,84	0,00	19,6	0,0032	7,93	2	3
64	71,00	6,70	18,70	6,86	0,076	466	13,45	84,61	1,94	0,00	11,0	0,0052	8,97	2	4
65	0,47	0,36	0,17	0,20	0,046	324	12,44	84,40	3,13	0,00	9,5	0,0033	9,93	2	3
66	0,19	0,07	0,05	0,07	0,015	88	18,58	81,05	0,36	0,00	6,8	0,0030	2,90	2	2
67	0,24	0,18	0,08	0,07	0,008	73	18,64	81,06	0,29	0,00	18,8	0,0026	2,84	2	2
68	0,21	0,24	0,08	0,15	0,021	203	17,01	81,73	1,24	0,00	6,2	0,0044	4,65	2	3
69	0,32	0,19	0,08	0,09	0,028	136	17,87	81,65	0,48	0,00	7,2	0,0036	3,77	2	2
70	0,25	0,18	0,11	0,14	0,023	265	14,33	83,74	1,90	0,00	5,3	0,0034	7,86	2	3
71	0,28	0,18	0,11	0,15	0,186	178	14,96	82,82	2,20	0,00	6,2	0,0025	6,99	2	3
72	53,00	5,38	14,70	3,19	0,045	292	11,55	85,88	2,53	0,00	13,5	0,0026	11,21	2	3
73	73,00	7,59	20,00	4,53	0,034	447	10,76	86,41	2,72	0,05	20,7	0,0037	12,14	2	3
74	92,90	9,86	26,00	5,96	0,039	570	10,87	86,28	2,72	0,06	13,3	0,0048	11,99	2	4
75	70,50	7,17	18,80	4,14	0,043	394	10,68	86,40	2,86	0,05	22,6	0,0032	12,22	2	3
76	0,64	0,32	0,17	0,16	0,021	222	15,68	83,58	0,72	0,00	9,9	0,0034	6,47	2	3
77	2,12	0,14	0,26	0,05	0,037	179	17,37	82,05	0,56	0,00	7,1	0,0041	4,37	2	3
78	0,48	0,40	0,14	0,24	0,059	205	14,81	84,64	0,52	0,00	67,4	0,0027	7,62	2	3

W tablicy 6.5.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i z za tam izolacyjnych, gdzie stosowano inertyzację azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) drugie kryterium zagrożenia pożarowego, gdzie powinno się wzmóc obserwację atmosfery w zrobach oraz zwiększyć częstotliwość pobierania próbek powietrza. Z analizy wyników zaprezentowanych w tablicy 6.5.(a-c) wynika co następuje.

- Większość próbek powietrza zostało sklasyfikowanych przez sztuczną sieć neuronową do wyższej kategorii zagrożenia pożarowego niż określał to wskaźnik Grahama.
- Przypadki takie cechują się podwyższonymi stężeniami azotu oraz obniżonymi stężeniami tlenu – co w większości próbek skutkuje podwyższonymi wartościami mianownika wskaźnika Grahama. Przedstawione wcześniej wyniki analiz pozwalają stwierdzić, że jeżeli mianownik wskaźnika Grahama przekracza wartość 5,7, to wartość wskaźnika Grahama jest niewiarygodna i może być zaniżona w stosunku do rzeczywistego poziomu zagrożenia.
- Analiza stężeń gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) – wydzielanych w procesie samozagrzewania węgla – potwierdza poprawną korelację pomiędzy stężeniami tych gazów, a kategorią zagrożenia pożarowego uzyskaną z predykcji sztucznej sieci neuronowej.
- Z powyższego wynika, że na wskazania opracowanej sztucznej sieci neuronowej niewielki wpływ mają zakłócenia wynikające ze zwiększonych stężeń azotu.

Tablica 6.6.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	78,00	0,52	16,40	0,36	0,019	595	16,48	76,77	1,95	4,79	25,8	0,0154	3,86	3	3
2	40,30	0,23	12,50	0,17	0,006	542	17,06	78,73	1,85	2,35	34,5	0,0143	3,80	3	3
3	63,90	0,09	11,10	0,14	0,003	286	17,57	76,54	1,25	4,60	13,0	0,0105	2,71	3	3
4	32,50	2,13	4,97	0,75	0,042	330	19,79	79,03	0,34	0,76	412,0	0,0286	1,15	3	3
5	67,00	0,15	11,40	0,16	0,004	212	18,43	76,52	1,42	3,60	15,6	0,0115	1,85	3	3
6	63,60	0,05	11,50	0,13	0,003	285	17,13	75,94	2,23	4,68	28,0	0,0095	2,99	3	3
7	185,00	0,01	9,88	0,01	0,002	13	20,23	76,89	0,38	2,50	2,6	0,0089	0,15	3	1
8	100,41	0,02	7,04	0,01	0,004	17	20,21	77,18	0,35	2,26	4,1	0,0070	0,24	3	1
9	122,30	3,04	25,63	3,39	0,013	875	6,01	65,46	4,01	24,52	245,0	0,0077	11,34	3	4
10	100,00	39,40	23,60	9,90	2,575	875	14,79	76,55	1,86	6,58	1190,0	0,0159	5,50	3	4
11	186,00	22,60	40,10	7,79	0,157	1180	5,02	63,18	4,65	26,92	850,0	0,0101	11,72	3	4
12	139,84	0,02	9,22	0,01	0,002	9	20,40	77,18	0,19	2,23	2,9	0,0171	0,05	3	1
13	5,02	0,01	0,26	0,01	0,001	4	20,77	78,54	0,09	0,60	1,2	0,0093	0,04	3	1
14	27,40	6,98	7,58	2,30	0,102	207	20,26	79,11	0,55	0,05	263,0	0,0294	0,70	3	4
15	61,33	2,60	10,11	1,84	0,050	1390	12,33	74,78	2,31	10,44	500,0	0,0186	7,49	3	4
16	12,49	0,16	1,42	0,14	0,003	74	20,34	78,47	0,22	0,96	35,1	0,0163	0,45	3	2
17	5,53	0,03	0,25	0,01	0,004	2	20,68	78,09	0,09	1,14	1,4	0,0144	0,01	3	1
18	227,23	0,03	32,94	0,02	0,001	16	20,56	78,43	0,38	0,63	2,1	0,0071	0,22	3	1
19	141,18	0,03	21,21	0,02	0,001	11	20,68	78,48	0,32	0,50	3,4	0,0094	0,12	3	1
20	13,47	0,02	0,95	0,01	0,003	4	20,23	76,51	0,12	3,14	1,3	0,0089	0,05	3	1
21	801,62	19,76	178,93	23,94	0,053	2416	2,03	71,72	5,96	20,05	109,0	0,0142	16,98	3	4
22	10,10	0,07	2,05	0,06	0,001	19	20,78	79,14	0,08	0,00	1,9	0,0099	0,19	3	2
23	63,30	2,59	5,52	0,14	0,070	78	20,39	79,28	0,15	0,17	66,2	0,0126	0,62	3	3
24	636,00	3,73	47,80	1,22	0,036	260	11,18	54,57	1,00	33,15	69,3	0,0079	3,28	3	3
25	656,00	3,51	43,60	0,58	0,013	230	9,63	47,89	0,88	41,60	20,6	0,0075	3,06	3	3
26	5,22	0,03	0,17	0,02	0,007	6	20,75	78,49	0,12	0,64	2,4	0,0120	0,05	3	1

Tablica 6.6.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	5,91	0,02	0,18	0,01	0,005	2	20,74	78,33	0,10	0,83	1,3	0,0115	0,02	3	1
28	109,17	0,02	6,74	0,01	0,003	3	20,73	78,34	0,18	0,75	2,3	0,0100	0,03	3	1
29	206,55	0,02	13,13	0,01	0,004	2	20,72	78,22	0,19	0,87	2,8	0,0241	0,01	3	1
30	763,90	15,41	68,22	4,36	1,638	1365	4,63	36,89	3,59	54,67	57,8	0,0265	5,15	3	4
31	711,77	10,69	67,12	2,51	0,371	918	5,31	40,01	3,46	51,21	93,7	0,0173	5,29	3	4
32	6,58	0,02	0,32	0,01	0,003	3	20,72	78,33	0,10	0,85	1,3	0,0080	0,04	3	1
33	75,60	12,13	7,56	1,97	0,618	1045	16,87	77,85	1,20	3,87	940,0	0,0278	3,76	3	4
34	89,90	13,50	8,07	2,27	0,459	717	16,08	78,05	1,79	4,00	333,0	0,0156	4,60	3	4
35	22,10	0,06	4,15	0,02	0,009	11	20,36	77,17	0,25	2,22	2,0	0,0122	0,09	3	1
36	0,09	0,11	0,05	0,07	0,011	75	20,52	79,16	0,31	0,00	1,9	0,0164	0,46	3	2
37	11,30	0,05	1,77	0,03	0,005	25	20,54	78,21	0,63	0,62	4,0	0,0135	0,18	3	2
38	12,55	0,02	1,34	0,01	0,001	3	20,78	78,55	0,18	0,49	2,8	0,0084	0,04	3	1
39	195,00	0,01	12,30	0,01	0,001	1	20,78	78,43	0,13	0,64	0,5	0,0253	0,00	3	1
40	7,22	0,03	0,99	0,01	0,003	7	20,49	77,58	0,80	1,13	2,1	0,0102	0,07	3	1
41	6,34	0,04	0,78	0,01	0,005	3	20,72	78,33	0,16	0,79	1,6	0,0080	0,04	3	1
42	7,52	0,19	0,28	0,07	0,006	12	20,74	78,69	0,08	0,49	5,6	0,0106	0,11	3	2
43	97,50	0,04	13,70	0,02	0,003	6	20,11	76,19	0,25	3,44	1,7	0,0075	0,08	3	1
44	0,24	0,05	0,09	0,02	0,004	41	20,48	79,35	0,17	0,00	8,7	0,0075	0,55	3	2
45	6,14	0,04	0,38	0,02	0,002	3	20,78	78,51	0,11	0,60	2,4	0,0119	0,03	3	1
46	341,00	28,80	56,10	5,52	0,045	5130	2,82	76,46	4,31	15,84	158,0	0,0294	17,44	3	4
47	0,12	0,05	0,05	0,02	0,039	21	20,78	79,02	0,20	0,00	15,8	0,0131	0,16	3	2
48	35,90	0,02	6,80	0,01	0,001	9	20,74	78,56	0,20	0,50	1,7	0,0115	0,08	3	1
49	7,75	0,03	0,35	0,02	0,002	8	20,68	78,23	0,13	0,96	2,9	0,0157	0,05	3	1
50	93,00	0,04	36,60	0,04	0,004	14	20,19	76,93	0,27	2,59	6,7	0,0071	0,20	3	1
51	74,00	0,02	9,51	0,01	0,002	13	20,21	76,84	0,40	2,54	1,6	0,0085	0,15	3	1
52	11,97	0,01	0,20	0,01	0,001	1	20,78	78,44	0,12	0,66	0,8	0,0152	0,01	3	1

Tablica 6.6.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	67,00	0,04	6,54	0,03	0,001	45	19,97	77,31	0,48	2,23	5,0	0,0087	0,52	3	2
54	30,88	0,01	2,89	0,01	0,001	6	20,59	77,92	0,14	1,35	8,9	0,0102	0,06	3	1
55	58,10	0,02	3,93	0,02	0,001	15	20,08	76,53	0,21	3,18	5,2	0,0075	0,20	3	1
56	5,24	0,02	0,29	0,01	0,018	4	20,78	78,62	0,12	0,48	1,7	0,0074	0,05	3	1
57	128,00	0,06	35,20	0,04	0,002	33	20,40	78,66	0,60	0,32	4,7	0,0074	0,44	3	2
58	34,00	0,02	9,51	0,01	0,001	27	20,47	78,17	0,34	1,02	3,5	0,0110	0,25	3	2
59	15,26	0,02	0,99	0,03	0,001	15	20,78	78,69	0,12	0,41	52,1	0,0206	0,07	3	1
60	17,76	0,02	6,18	0,01	0,005	15	20,73	78,80	0,24	0,23	3,3	0,0099	0,15	3	1
61	41,50	0,02	3,41	0,02	0,006	10	20,43	77,53	0,16	1,88	4,3	0,0087	0,12	3	1
62	2,15	0,03	0,50	0,18	0,007	43	20,36	79,10	0,35	0,19	2,0	0,0071	0,60	3	2
63	117,00	0,02	22,40	0,01	0,003	2	20,78	78,47	0,11	0,64	1,8	0,0137	0,01	3	1
64	18,13	0,04	6,70	0,02	0,016	17	20,68	78,81	0,25	0,26	1,9	0,0083	0,20	3	2
65	49,80	0,02	13,40	0,02	0,001	23	20,76	78,84	0,26	0,13	6,0	0,0173	0,13	3	2
66	13,79	0,02	5,10	0,01	0,002	15	20,74	78,76	0,27	0,23	1,8	0,0114	0,13	3	1
67	122,05	0,02	3,55	0,01	0,001	5	20,03	75,66	0,36	3,94	2,5	0,0251	0,02	3	1
68	7,93	0,03	1,19	0,02	0,007	6	20,78	78,54	0,14	0,54	2,4	0,0181	0,03	3	1
69	1,63	0,03	0,52	0,02	0,009	17	20,71	78,91	0,33	0,05	1,7	0,0085	0,20	3	1
70	317,00	0,02	51,00	0,02	0,001	7	20,17	76,41	0,23	3,15	2,5	0,0089	0,08	3	1
71	109,00	0,05	12,60	0,02	0,002	10	20,69	78,41	0,33	0,56	5,8	0,0113	0,09	3	1
72	6,28	0,01	0,32	0,02	0,002	6	20,78	78,56	0,14	0,52	2,2	0,0156	0,04	3	1
73	6,50	0,06	0,27	0,03	0,005	69	20,29	78,83	0,17	0,70	5,8	0,0115	0,60	3	2
74	0,55	0,05	0,02	0,03	0,688	15	20,78	79,11	0,11	0,00	7,1	0,0081	0,18	3	2
75	4167,00	0,01	299,00	0,04	0,001	10	19,68	74,60	0,53	4,74	7,8	0,0112	0,09	3	1
76	11,50	0,02	0,40	0,02	0,003	11	20,55	78,02	0,08	1,35	1,4	0,0088	0,13	3	1
77	37,16	0,01	2,48	0,01	0,001	4	20,47	77,32	0,48	1,73	5,5	0,0202	0,02	3	1
78	10,79	0,04	0,43	0,01	0,002	8	20,59	77,98	0,15	1,28	6,9	0,0107	0,07	3	1

W tablicy 6.6.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych, gdzie nie stosowano inertyzacji azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) trzecie kryterium zagrożenia pożarowego, gdzie należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia – przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie. Z analizy tej tablicy wynika co następuje.

- W większości zaprezentowanych przypadków można zaobserwować, że poziom zagrożenia pożarem endogenicznym, uzyskany z predykcji sztucznej sieci neuronowej, nie pokrywa się z poziomem wyznaczonym przez wskaźnik Grahama.
- W przedstawionej tablicy 6.6.(a-c) próbki powietrza, które sieć neuronowa zakwalifikowała do niższej kategorii niż wskaźnik Grahama, przeważnie cechowały się wysokimi stężeniami tlenu. Dochodzi wtedy do obniżania wartości mianownika wskaźnika Grahama, co może generować jego niewiarygodnie wysokie wartości. Jak wynika z przeprowadzonych analiz, jeżeli wartość mianownika jest mniejsza bądź równa 0,2, to wskaźnik Grahama zawyża stan zagrożenia pożarowego w stosunku do rzeczywistości panującego poziomu.
- Próbki powietrza zakwalifikowane przez sztuczną sieć neuronową do wyższej kategorii zagrożenia niż wskaźnik Grahama w większości cechowały się podwyższonymi stężeniami metanu i/lub dwutlenku węgla, co skutkowało obniżonymi stężeniami tlenu, a tym samym zwiększonymi wartościami mianownika wskaźnika Grahama.
- W tym przypadku również przeanalizowano wskazania sztucznej sieci neuronowej pod względem zgodności ze stężeniami gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla. Ponownie okazało się, że kategorie zagrożenia pożarowego wyznaczone przez sztuczną sieć neuronową dobrze korelowały ze stężeniami gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010).
- Przedstawione wyżej wnioski potwierdzają ponownie, że opracowany model sztucznej sieci neuronowej jest odporny na zakłócenia wynikające ze zwiększonych stężeń metanu i/lub dwutlenku węgla w próbce powietrza poddanej analizie, a także w przypadkach zapowietrzonych próbek powietrza. Model dobrze radzi sobie również w sytuacji, gdy próbka powietrza zawiera małą ilość tlenu.

Tablica 6.7.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	0,67	0,28	0,13	0,22	0,018	474	16,78	82,55	0,67	0,00	7,9	0,0093	5,10	3	3
2	84,90	24,50	19,20	11,10	0,106	1130	13,80	82,54	3,58	0,08	700,0	0,0140	8,07	3	4
3	95,60	37,50	19,90	8,40	0,001	2900	10,92	85,21	3,80	0,07	830,0	0,0249	11,66	3	4
4	97,20	38,20	20,10	8,39	0,001	3090	10,56	85,39	3,95	0,10	690,0	0,0256	12,07	3	4
5	93,20	35,00	19,80	6,97	0,010	2380	11,10	84,90	3,88	0,12	280,0	0,0209	11,40	3	4
6	297,00	43,70	57,50	24,40	0,102	1800	9,02	86,06	4,06	0,34	3000,0	0,0131	13,79	3	4
7	487,36	73,96	90,99	43,96	0,110	2230	7,26	86,53	5,08	0,47	3700,0	0,0142	15,67	3	4
8	402,77	39,45	98,38	19,65	0,371	2650	11,00	83,33	0,90	4,43	156,0	0,0239	11,08	3	4
9	344,00	11,00	82,80	13,90	0,051	2825	7,43	85,03	1,34	6,20	276,0	0,0187	15,10	3	4
10	269,00	9,29	61,50	8,96	0,045	2400	8,99	84,43	1,12	5,46	274,0	0,0179	13,38	3	4
11	279,00	8,54	60,40	9,04	0,038	2326	7,27	84,74	1,22	6,77	255,0	0,0153	15,19	3	4
12	287,90	57,90	63,80	15,50	0,304	3825	6,73	83,90	8,49	0,40	500,0	0,0247	15,50	3	4
13	453,90	22,66	87,18	11,95	1,250	4600	8,10	90,17	0,28	0,92	87,5	0,0291	15,80	3	4
14	391,00	18,20	74,20	9,16	2,160	2770	6,78	91,74	0,20	0,95	53,9	0,0158	17,53	3	4
15	198,00	18,00	38,10	5,70	0,329	4300	7,57	83,13	4,58	4,17	900,0	0,0297	14,46	3	4
16	181,00	18,50	34,80	5,68	0,344	3900	8,90	83,39	3,69	3,52	900,0	0,0295	13,20	3	4
17	129,88	5,33	27,12	4,34	0,013	925	13,30	82,08	0,74	3,76	291,0	0,0109	8,45	3	4
18	740,00	39,70	194,00	58,90	0,424	1111	8,91	82,46	3,37	4,85	2000,0	0,0086	12,94	3	4
19	74,80	8,58	19,40	8,55	0,021	1119	8,41	89,54	1,92	0,00	40,0	0,0073	15,32	3	4
20	547,00	62,80	116,00	54,50	0,007	3169	5,52	87,83	4,98	0,55	8040,0	0,0178	17,75	3	4
21	145,00	51,20	35,00	16,30	0,178	1345	9,70	87,57	1,52	0,92	1300,0	0,0100	13,51	3	4
22	247,00	44,00	60,50	15,80	0,834	1516	3,67	91,82	2,86	1,44	213,0	0,0073	20,66	3	4
23	315,00	55,00	72,70	31,10	0,338	2100	5,95	91,26	2,26	0,25	250,0	0,0115	18,23	3	4
24	95,50	33,20	24,40	16,60	1,420	1248	16,76	81,80	1,11	0,10	840,0	0,0254	4,92	3	4
25	12,60	2,64	1,18	0,23	0,015	585	15,94	81,16	0,82	2,02	47,1	0,0105	5,57	3	3
26	19,50	0,69	9,15	1,78	0,003	610	14,56	81,62	3,45	0,30	9,0	0,0086	7,07	3	3

Tablica 6.7.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	21,90	0,83	10,30	2,10	0,002	1205	13,78	81,11	3,30	1,68	29,0	0,0156	7,71	3	3
28	287,00	29,10	42,30	7,39	0,012	1585	7,06	87,40	5,13	0,25	206,0	0,0098	16,10	3	4
29	612,59	34,85	129,90	12,80	0,001	2145	2,85	86,50	8,39	1,38	5900,0	0,0107	20,07	3	4
30	60,20	16,80	10,20	5,50	0,154	415	16,23	81,52	1,55	0,64	88,6	0,0077	5,37	3	4
31	59,90	15,40	10,60	5,04	0,056	515	15,73	82,16	1,45	0,60	42,9	0,0085	6,04	3	4
32	55,80	2,78	13,30	1,73	0,005	660	15,46	82,18	1,65	0,61	310,0	0,0104	6,32	3	3
33	90,00	4,39	21,80	3,18	0,009	1109	11,20	85,54	1,71	1,38	430,0	0,0097	11,47	3	4
34	66,40	16,90	13,40	4,21	2,610	1885	5,51	87,27	0,99	6,04	1086,0	0,0107	17,62	3	4
35	330,00	8,86	38,30	4,17	0,017	2308	12,05	82,53	2,45	2,67	297,0	0,0235	9,82	3	4
36	393,00	6,49	48,30	3,97	0,011	1091	9,58	84,02	3,33	2,91	52,9	0,0086	12,69	3	4
37	109,00	39,20	16,00	5,33	2,720	3768	5,44	87,15	2,56	4,43	266,0	0,0213	17,65	3	4
38	67,30	13,40	16,20	6,38	0,385	1143	8,38	90,37	1,07	0,00	600,0	0,0073	15,57	3	4
39	113,00	23,60	26,70	10,40	0,691	2221	10,07	88,36	1,15	0,05	1300,0	0,0166	13,35	3	4
40	123,00	25,20	28,30	11,40	0,752	2607	11,41	86,83	1,14	0,20	1400,0	0,0225	11,60	3	4
41	58,80	11,70	14,10	6,85	0,461	1301	11,96	87,09	0,75	0,00	650,0	0,0117	11,12	3	4
42	71,00	14,50	16,80	6,39	0,498	1618	12,03	86,85	0,83	0,05	660,0	0,0147	10,99	3	4
43	41,30	0,38	15,10	0,13	0,008	435	15,62	81,57	1,68	1,08	9,1	0,0073	6,00	3	3
44	82,60	6,17	21,10	5,30	0,027	1060	10,27	85,35	4,20	0,05	89,3	0,0086	12,35	3	4
45	149,00	8,89	22,60	2,90	0,034	1616	6,79	91,51	0,39	1,13	830,0	0,0093	17,46	3	4
46	393,97	34,17	94,14	20,25	0,106	1342	13,66	81,58	1,39	3,07	1120,0	0,0169	7,96	3	4
47	97,40	159,00	12,80	15,20	17,800	1558	10,89	86,51	1,53	0,82	680,0	0,0129	12,04	3	4
48	115,00	33,00	25,20	5,60	0,165	879	14,02	84,74	1,04	0,10	8,5	0,0104	8,44	3	4
49	138,00	39,30	29,90	6,84	0,352	963	12,96	86,04	1,04	0,12	6,4	0,0098	9,84	3	4
50	151,00	39,50	30,50	6,69	0,232	770	13,42	85,40	0,96	0,14	4,2	0,0084	9,21	3	4
51	162,00	42,00	34,80	6,73	0,302	860	12,94	85,74	1,02	0,19	3,9	0,0088	9,78	3	4
52	126,00	34,90	26,70	5,87	0,264	910	13,98	84,79	0,95	0,17	3,0	0,0107	8,49	3	4

Tablica 6.7.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – trzecie kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	361,20	96,00	85,00	43,72	2,050	2680	8,11	88,20	2,97	0,36	322,0	0,0176	15,26	3	4
54	339,00	115,00	83,30	27,00	2,030	2210	8,24	88,05	3,05	0,37	165,0	0,0146	15,09	3	4
55	104,89	7,48	22,71	6,38	0,093	1211	10,47	88,45	0,85	0,12	850,0	0,0093	12,97	3	4
56	97,09	6,49	21,10	6,10	0,029	1371	5,24	93,07	1,42	0,12	417,0	0,0071	19,42	3	4
57	59,90	5,96	10,50	0,62	0,069	995	14,32	82,34	2,06	1,07	1020,0	0,0133	7,50	3	4
58	107,00	11,40	19,70	1,90	0,178	2187	12,17	83,10	2,89	1,39	2140,0	0,0222	9,85	3	4
59	1170,00	30,60	150,00	23,60	0,016	1780	3,30	83,35	9,12	3,81	1080,0	0,0095	18,79	3	4
60	1175,00	34,90	158,00	25,60	0,022	2800	5,15	82,52	8,46	3,42	280,0	0,0167	16,72	3	4
61	383,00	0,24	3,73	0,15	0,005	395	16,60	81,89	0,71	0,72	6,3	0,0077	5,10	3	3
62	122,00	12,10	28,10	7,76	0,052	916	12,68	83,59	3,51	0,05	620,0	0,0097	9,47	3	4
63	110,79	11,55	26,27	8,14	0,040	850	15,58	82,03	2,17	0,05	740,0	0,0138	6,16	3	4
64	118,24	11,34	28,96	7,57	0,039	922	15,42	82,03	2,31	0,05	840,0	0,0146	6,32	3	4
65	132,00	13,20	33,10	8,17	0,068	1028	13,16	83,70	2,85	0,09	830,0	0,0114	9,02	3	4
66	82,02	6,43	31,23	2,12	0,093	1295	6,70	88,51	3,62	1,03	138,0	0,0077	16,76	3	4
67	46,30	6,69	15,67	1,71	0,193	1945	13,10	83,76	2,33	0,62	275,0	0,0214	9,10	3	4
68	41,88	3,22	13,62	0,96	0,091	569	14,29	83,50	1,64	0,54	91,3	0,0073	7,84	3	3
69	34,10	0,24	1,22	0,08	0,014	550	15,42	82,54	1,68	0,30	29,2	0,0085	6,45	3	3
70	170,84	9,80	50,88	12,59	0,022	2144	13,82	82,48	1,59	1,72	1480,0	0,0267	8,04	3	4
71	49,09	2,73	15,29	3,65	0,005	516	17,96	81,05	0,61	0,37	483,0	0,0147	3,52	3	3
72	450,00	29,40	95,00	10,10	0,428	2715	2,82	83,04	1,18	12,96	900,0	0,0142	19,19	3	4
73	823,34	98,98	135,94	18,88	0,015	2040	1,60	85,38	0,06	12,32	3330,0	0,0097	21,03	3	4
74	101,00	8,59	25,60	6,00	0,036	509	16,31	82,17	0,26	1,18	193,0	0,0093	5,47	3	3
75	209,10	7,30	48,21	4,97	0,007	1242	10,85	85,07	0,33	3,56	348,0	0,0106	11,69	3	4
76	41,40	0,85	5,29	0,26	0,002	750	13,35	84,27	0,48	1,82	40,3	0,0084	8,98	3	3
77	113,89	6,63	30,19	4,08	0,011	2058	8,36	81,66	6,76	2,98	214,0	0,0155	13,28	3	4
78	451,00	11,93	110,66	13,85	0,009	1530	9,16	81,97	3,37	5,30	14,7	0,0122	12,56	3	4

W tablicy 6.7.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych, gdzie stosowano inertyzację azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) trzecie kryterium zagrożenia pożarowego, które wymaga przystąpienia do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia – przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie. Z analizy zaprezentowanej tablicy wynika co następuje.

- Przeważająca większość próbek powietrza została przez sztuczną sieć neuronową zakwalifikowana do wyższej kategorii zagrożenia pożarowego, niż określał to wskaźnik Grahama.
- Ponieważ omawiane próbki zawierały podwyższone stężenia azotu, dlatego uzyskiwano dla nich zwiększone wartości mianownika wskaźnika Grahama. W przeważającej większości przypadków mianownik ten przekraczał wartość 5,7, co według przeprowadzonych analiz, determinuje niewiarygodne wartości wskaźnika Grahama (wartość wskaźnika jest wtedy zaniżana w stosunku do rzeczywistego stanu zagrożenia pożarowego).
- Opierając się na analizie gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) można zaobserwować poprawną korelację pomiędzy stężeniami gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla, a wskazaniem sztucznej sieci neuronowej.
- Powyższe po raz kolejny wskazuje na to, że opracowany model sztucznej sieci neuronowej jest odporny na zakłócenia wynikające ze zwiększonych wartości stężenia azotu.

Tablica 6.8.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	6,02	0,06	0,94	0,03	0,087	360	20,03	79,50	0,45	0,00	150,0	0,0347	1,04	4	3
2	1978,06	3,06	193,18	0,55	0,012	638	4,11	21,38	3,57	70,88	410,0	0,0410	1,56	4	4
3	191,05	0,40	87,80	0,23	0,002	1254	8,38	46,54	43,41	1,54	46,9	0,0317	3,95	4	4
4	248,00	53,20	68,00	29,50	3,350	4390	18,21	78,21	1,40	1,54	1750,0	0,1745	2,52	4	4
5	115,00	22,10	27,20	7,18	0,702	2533	18,46	78,91	1,35	0,91	1200,0	0,1033	2,45	4	4
6	104,00	16,90	24,40	7,25	0,827	2361	18,56	78,95	1,28	0,86	1100,0	0,1000	2,36	4	4
7	116,00	22,40	27,20	7,21	0,767	2412	18,33	79,07	1,33	0,91	1200,0	0,0919	2,62	4	4
8	65,00	4,52	21,10	4,40	0,005	2000	17,68	79,39	1,99	0,63	1000,0	0,0596	3,36	4	4
9	170,00	20,80	33,60	6,36	0,399	3600	15,55	78,03	2,61	3,33	1000,0	0,0702	5,13	4	4
10	114,00	14,50	24,20	6,14	0,298	2800	17,66	78,74	1,40	1,82	800,0	0,0873	3,21	4	4
11	127,00	14,90	25,80	6,10	0,381	3100	17,11	78,14	1,78	2,54	1050,0	0,0862	3,60	4	4
12	35,20	1,41	7,01	1,05	0,018	323	20,06	78,23	0,54	1,10	330,0	0,0481	0,67	4	3
13	446,00	0,02	37,10	0,04	0,003	6	20,05	75,72	0,61	3,57	4,4	0,0380	0,02	4	1
14	32,01	0,01	1,37	0,01	0,004	4	20,17	76,14	0,15	3,54	1,0	0,0563	0,01	4	1
15	315,00	27,50	74,00	15,70	0,672	4680	9,22	79,26	10,43	0,58	2600,0	0,0397	11,78	4	4
16	379,00	22,60	84,60	15,70	1,810	5290	7,15	78,81	12,42	0,85	1910,0	0,0385	13,73	4	4
17	63,88	0,02	6,61	0,03	0,004	6	20,63	77,86	0,18	1,32	2,2	0,2069	0,00	4	1
18	5,80	0,04	1,71	0,02	0,005	8	20,78	78,42	0,73	0,07	1,7	0,6154	0,00	4	1
19	63,50	3,35	17,00	2,92	0,004	476	16,52	68,28	15,00	0,09	560,0	0,0302	1,57	4	4
20	1,81	0,01	0,19	0,04	0,002	99	20,66	78,89	0,12	0,33	1,1	0,0403	0,25	4	2
21	254,70	15,20	56,20	8,89	0,845	2175	15,07	74,77	2,38	7,43	1000,0	0,0458	4,74	4	4
22	62,70	66,10	12,90	9,39	24,100	1408	18,76	78,87	1,10	0,84	2700,0	0,0658	2,14	4	4
23	176,00	153,00	35,30	28,70	7,800	3767	13,32	78,95	5,03	1,98	3000,0	0,0496	7,60	4	4
24	126,00	166,00	19,00	25,00	17,600	5390	16,49	78,49	2,63	1,39	4260,0	0,1251	4,31	4	4
25	150,00	204,00	23,10	27,80	16,400	5220	15,78	78,49	3,20	1,50	4700,0	0,1040	5,02	4	4
26	617,00	159,00	62,20	16,30	0,900	4290	8,39	64,31	3,82	22,64	3220,0	0,0496	8,65	4	4

Tablica 6.8.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	550,00	192,00	57,20	21,20	2,290	4630	9,55	67,81	3,76	17,81	5250,0	0,0550	8,42	4	4
28	516,00	122,00	50,30	12,30	0,865	3920	9,32	66,93	3,52	19,52	2500,0	0,0466	8,42	4	4
29	1086,00	186,00	136,00	30,40	0,805	6320	0,64	55,19	5,59	37,15	6500,0	0,0452	13,99	4	4
30	1095,00	182,00	138,00	30,00	1,099	5810	2,04	55,50	5,33	35,73	6700,0	0,0459	12,67	4	4
31	1300,00	114,00	170,00	31,60	1,047	3652	1,00	48,66	3,95	45,17	6948,0	0,0307	11,89	4	4
32	0,65	0,01	0,03	0,01	0,003	2	20,92	78,96	0,12	0,00	2,1	0,0455	0,00	4	1
33	6,24	0,02	1,18	0,02	0,003	3	20,92	78,95	0,13	0,00	1,4	0,1714	0,00	4	1
34	0,87	0,02	0,08	0,01	0,004	8	20,92	79,00	0,08	0,00	1,0	0,0533	0,02	4	1
35	1,77	0,01	0,17	0,04	0,005	4	20,92	78,97	0,11	0,00	2,0	0,0567	0,01	4	1
36	158,00	0,02	26,30	0,02	0,003	17	19,76	74,68	0,35	5,19	4,1	0,0563	0,03	4	1
37	208,00	0,02	37,60	0,02	0,006	20	19,87	75,09	0,23	4,78	1,4	0,0693	0,03	4	1
38	7,90	6,76	1,86	2,41	0,611	398	20,11	79,25	0,57	0,00	282,0	0,0447	0,89	4	4
39	114,00	0,03	3,24	0,02	0,007	14	18,84	71,15	0,34	9,66	3,8	0,0949	0,01	4	1
40	178,00	45,90	17,20	3,24	0,134	4808	2,14	48,96	5,38	43,01	8,0	0,0444	10,83	4	4
41	373,00	63,00	54,00	8,70	0,123	3870	2,51	49,26	3,15	44,64	44,5	0,0367	10,54	4	4
42	4,33	0,03	0,22	0,02	0,006	2	20,76	78,36	0,24	0,64	4,2	0,0370	0,01	4	1
43	846,00	29,30	219,00	23,00	0,840	2869	13,33	74,40	3,81	8,02	400,0	0,0449	6,39	4	4
44	12,90	11,30	1,71	1,07	2,820	243	20,26	78,85	0,43	0,40	350,0	0,0383	0,64	4	4
45	15,01	0,02	1,41	0,02	0,002	8	20,36	76,87	0,44	2,33	1,2	0,0758	0,01	4	1
46	419,00	38,60	90,70	21,70	0,135	3812	9,46	77,76	11,71	0,37	2660,0	0,0342	11,15	4	4
47	14,20	3,05	2,95	1,61	0,011	2840	20,73	78,54	0,29	0,05	1080,0	3,4176	0,08	4	4
48	10,09	1,09	2,71	1,30	0,003	74	20,72	79,05	0,20	0,00	168,0	0,0324	0,23	4	3
49	1615,10	0,12	104,09	0,15	0,001	5	0,34	1,32	1,02	97,14	58,1	0,0510	0,01	4	1
50	162,00	77,30	26,40	37,90	0,061	4381	17,98	79,26	2,13	0,16	5100,0	0,1449	3,02	4	4
51	31,75	0,04	4,41	0,04	0,003	6	20,41	77,03	0,21	2,35	1,8	0,2034	0,00	4	1
52	6,07	0,03	0,73	0,02	0,003	13	20,58	77,79	0,19	1,44	2,2	0,0378	0,03	4	1

Tablica 6.8.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie nie stosowano azotu do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	1111,70	24,52	248,11	2,56	2,170	3933	6,76	56,39	3,53	32,41	3800,0	0,0481	8,18	4	4
54	1218,20	25,26	273,26	2,56	2,310	4131	5,19	53,65	3,90	36,32	3700,0	0,0458	9,03	4	4
55	1210,00	76,10	279,00	4,98	3,090	4159	6,03	57,26	3,75	31,80	5900,0	0,0455	9,14	4	4
56	1160,00	71,60	267,00	4,41	2,280	4190	5,94	56,79	3,84	32,27	5900,0	0,0460	9,11	4	4
57	796,00	1260,00	154,00	218,00	129,000	15689	7,94	78,06	6,32	3,84	20200,0	0,1231	12,75	4	4
58	1200,00	675,00	263,00	78,00	10,100	16476	0,78	51,06	7,28	37,13	18800,0	0,1292	12,75	4	4
59	255,00	167,00	42,80	14,10	1,670	4838	14,16	75,36	1,96	7,45	5400,0	0,0833	5,81	4	4
60	1230,00	651,00	271,00	74,10	9,960	14640	1,71	51,01	6,35	37,57	16700,0	0,1240	11,81	4	4
61	1220,00	538,00	276,00	58,70	9,840	10674	1,12	46,85	5,70	43,71	13400,0	0,0945	11,30	4	4
62	1184,00	441,00	269,00	47,80	10,500	3590	0,76	42,29	5,70	49,24	14600,0	0,0344	10,45	4	4
63	1176,00	472,00	268,00	49,70	11,180	9024	2,25	45,63	5,46	44,44	11200,0	0,0917	9,84	4	4
64	1200,00	407,00	269,00	43,90	7,760	7122	0,86	38,37	5,50	53,65	7200,0	0,0765	9,31	4	4
65	1070,00	350,00	241,00	36,90	7,650	5569	2,51	44,16	4,85	47,25	5000,0	0,0606	9,19	4	4
66	1260,00	272,00	283,00	27,40	5,540	3310	0,53	32,70	4,26	61,85	1400,0	0,0407	8,14	4	4
67	1270,00	298,00	281,00	30,10	4,440	4299	0,78	31,87	4,85	61,66	2200,0	0,0561	7,67	4	4
68	1240,00	267,00	280,00	27,20	5,350	3577	0,93	30,38	4,53	63,48	1400,0	0,0502	7,12	4	4
69	1170,00	247,00	263,00	25,70	4,830	2841	1,75	35,86	4,02	57,79	1200,0	0,0366	7,75	4	4
70	195,00	101,00	41,00	19,90	1,720	5067	4,77	73,60	13,53	7,21	3500,0	0,0344	14,73	4	4
71	191,00	96,90	39,70	18,60	1,610	5268	5,14	73,54	12,81	7,61	3400,0	0,0367	14,35	4	4
72	189,00	99,60	38,90	18,90	1,780	4903	5,42	73,60	12,85	7,26	3400,0	0,0348	14,08	4	4
73	191,00	101,00	38,90	18,40	1,660	4940	6,05	73,84	12,01	7,23	3400,0	0,0365	13,52	4	4
74	227,00	156,00	49,70	28,60	2,550	6045	5,57	73,93	13,03	6,24	5800,0	0,0431	14,02	4	4
75	131,00	66,10	22,70	10,60	1,320	2601	12,23	74,88	6,44	5,98	1900,0	0,0342	7,61	4	4
76	17,50	7,24	4,12	1,54	0,157	908	20,58	78,92	0,38	0,00	263,0	0,2720	0,33	4	4
77	293,00	30,60	65,60	10,80	0,186	21353	11,25	79,30	6,19	0,76	3200,0	0,2187	9,76	4	4
78	525,00	14,30	75,60	9,69	0,078	12890	3,08	64,96	6,99	23,50	1200,0	0,0912	14,13	4	4

W tablicy 6.8.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych, gdzie nie stosowano inertyzacji azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) czwarte kryterium zagrożenia pożarowego, wymagające wszczęcia akcji przeciwpożarowej. Z analizy zaprezentowanej tablicy wynika co następuje.

- W większości rozpatrywanych przypadków można zaobserwować, że poziom zagrożenia pożarem endogenicznym, wyznaczony przez sztuczną sieć neuronową, pokrywał się z poziomem obliczonym przy pomocy wskaźnika Grahama.
- W przedstawionej tablicy 6.8.(a-c) można jednak zaobserwować również takie przypadki, w których sztuczna sieć neuronowa podawała niższy poziom zagrożenia niż wskaźnik Grahama. Zazwyczaj dzieje się to wówczas, gdy próbka powietrza zawiera wysokie stężenia tlenu, które powodują zmniejszenie wartości mianownika wskaźnika Grahama. W analizowanej tablicy 6.8.(a-c), we wszystkich próbkach powietrza – zaliczonych przez sieć neuronową do pierwszej kategorii zagrożenia – mianownik wskaźnika Grahama był mniejszy od 0,2. Zgodnie z wynikami przeprowadzonych analiz wskazuje to na niewiarygodne wartości wskaźnika Grahama, który zawyża poziom zagrożenia w stosunku do rzeczywistych warunków.
- Biorąc pod uwagę stężenia gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) okazało się po raz kolejny, że wskazania sztucznej sieci neuronowej dobrze korelują ze stężeniami gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla. Podczas, gdy w wielu przypadkach wartości wskaźnika Grahama wyraźnie zawyżały stan zagrożenia.
- Powyższe wnioski ponownie wskazują na to, że analizowany model sztucznej sieci neuronowej jest odporny na zakłócenia wynikające z wysokich wartości stężenia tlenu w próbce powietrza, które mogą skutkować niewiarygodnymi wartościami wskaźnika Grahama.

Tablica 6.9.(a) Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
1	84,50	0,75	13,20	0,21	0,004	4500	11,45	82,51	5,25	0,34	870,0	0,0432	10,42	4	4
2	86,20	37,10	18,90	10,10	0,015	4025	12,60	84,00	3,30	0,10	2300,0	0,0417	9,66	4	4
3	101,00	24,80	20,60	11,40	0,393	3600	10,72	82,49	6,78	0,00	690,0	0,0323	11,14	4	4
4	29,30	0,03	1,43	0,02	0,001	7120	9,16	84,25	4,96	0,75	1600,0	0,0541	13,17	4	4
5	366,00	35,00	79,40	13,80	0,434	7000	14,11	84,80	0,52	0,57	5800,0	0,0837	8,36	4	4
6	544,00	37,10	112,00	16,30	1,679	8650	11,62	85,84	0,49	0,78	3300,0	0,0777	11,13	4	4
7	613,16	41,86	125,94	19,43	1,811	9861	9,57	87,84	0,32	0,87	3300,0	0,0719	13,71	4	4
8	461,21	38,81	99,71	17,74	0,191	7900	12,50	84,98	0,48	0,66	5250,0	0,0788	10,02	4	4
9	530,00	33,20	105,00	14,80	1,870	8165	8,99	88,68	0,30	0,90	2460,0	0,0563	14,51	4	4
10	583,87	32,61	113,27	14,91	1,280	7856	6,89	90,92	0,28	1,00	450,0	0,0457	17,20	4	4
11	500,37	25,36	96,66	12,46	2,151	6068	6,47	91,54	0,30	1,01	87,9	0,0341	17,79	4	4
12	503,61	25,83	97,43	12,65	2,173	6365	7,20	90,78	0,31	0,99	144,0	0,0378	16,86	4	4
13	170,00	19,60	33,40	6,01	0,394	3700	11,25	81,94	3,22	3,11	900,0	0,0354	10,46	4	4
14	183,00	19,60	35,70	6,05	0,405	4100	10,30	81,88	3,75	3,54	1000,0	0,0360	11,40	4	4
15	150,00	14,60	29,50	5,85	0,236	3400	12,10	81,75	2,94	2,76	900,0	0,0356	9,56	4	4
16	190,00	20,40	36,90	6,26	0,401	4100	10,87	81,65	3,74	3,68	1000,0	0,0381	10,77	4	4
17	121,00	41,30	31,00	21,40	2,180	1518	16,79	81,85	1,00	0,09	1000,0	0,0310	4,90	4	4
18	485,00	97,00	117,00	58,20	1,470	6197	5,22	91,19	2,20	0,39	3000,0	0,0327	18,95	4	4
19	813,00	182,00	202,00	108,00	2,680	6839	8,28	86,18	2,87	0,76	11000,0	0,0470	14,56	4	4
20	448,27	53,48	74,54	26,01	0,511	13829	3,05	86,29	8,42	0,48	3800,0	0,0698	19,82	4	4
21	371,00	44,30	59,80	17,50	0,270	10005	5,56	86,00	6,84	0,42	1340,0	0,0581	17,23	4	4
22	498,00	61,20	82,20	27,30	0,489	20390	2,21	85,59	9,06	0,48	5580,0	0,0996	20,47	4	4
23	459,00	56,50	75,80	25,20	0,409	17260	4,19	84,99	8,16	0,42	4530,0	0,0942	18,33	4	4
24	299,89	33,55	47,90	13,93	0,068	6282	6,96	87,07	4,98	0,30	660,0	0,0390	16,11	4	4
25	281,13	32,18	45,06	12,89	0,092	6064	8,11	85,99	4,99	0,25	530,0	0,0413	14,68	4	4
26	368,00	41,00	57,10	14,10	0,055	6120	4,32	88,49	6,20	0,33	278,0	0,0320	19,13	4	4

Tablica 6.9.(b) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
27	430,76	27,90	78,74	6,56	0,001	10832	3,00	85,89	8,57	1,04	4200,0	0,0548	19,76	4	4
28	767,46	55,37	162,82	19,05	0,001	15727	2,00	83,00	9,30	1,71	24200,0	0,0787	20,00	4	4
29	513,00	38,00	105,00	11,40	0,001	16619	1,08	85,12	9,82	1,09	11600,0	0,0774	21,48	4	4
30	178,00	100,00	33,40	12,50	3,820	8984	7,28	86,21	2,99	2,41	1800,0	0,0577	15,57	4	4
31	140,00	28,90	32,10	12,40	0,961	2970	12,85	85,51	1,11	0,06	1500,0	0,0303	9,81	4	4
32	213,00	46,20	50,80	21,60	1,700	3630	13,56	84,12	1,56	0,14	2200,0	0,0416	8,73	4	4
33	206,00	44,90	49,30	20,90	1,602	4560	13,33	84,29	1,56	0,12	2100,0	0,0506	9,01	4	4
34	44,70	9,01	10,20	4,00	1,497	3920	12,83	85,06	1,41	0,11	1900,0	0,0404	9,71	4	4
35	149,00	32,00	35,70	13,80	0,932	3222	13,47	84,71	1,23	0,09	1550,0	0,0359	8,98	4	4
36	314,00	20,10	62,70	13,50	0,162	16181	6,93	83,35	6,86	1,01	1900,0	0,1068	15,16	4	4
37	244,00	22,20	52,30	8,08	0,150	16458	10,10	81,72	5,47	0,85	1800,0	0,1424	11,56	4	4
38	43,31	6,04	10,43	4,29	0,136	2750	14,76	81,28	3,55	0,07	600,0	0,0406	6,78	4	4
39	1,79	0,47	0,44	0,27	0,008	1357	17,68	81,82	0,36	0,00	8,7	0,0339	4,00	4	3
40	366,00	59,50	77,50	31,90	0,669	6665	9,91	84,02	4,97	0,33	500,0	0,0539	12,36	4	4
41	196,00	31,50	43,40	18,10	0,366	3218	14,59	81,96	2,80	0,26	358,0	0,0451	7,13	4	4
42	535,00	93,30	119,00	50,80	1,220	11575	8,64	83,58	5,66	0,63	2500,0	0,0857	13,51	4	4
43	365,00	59,20	80,10	31,50	0,729	6128	8,45	84,95	5,39	0,46	795,0	0,0436	14,06	4	4
44	1287,00	62,30	207,00	33,10	0,051	6937	5,42	85,62	4,72	3,14	2500,0	0,0402	17,27	4	4
45	593,00	38,10	74,70	13,10	0,207	4950	10,19	83,54	2,44	3,15	1120,0	0,0414	11,95	4	4
46	1450,00	73,70	235,00	37,90	0,081	8450	3,01	86,06	5,88	3,74	2900,0	0,0427	19,80	4	4
47	1200,00	64,30	196,00	32,30	0,122	8000	4,03	88,04	3,14	3,55	2900,0	0,0414	19,30	4	4
48	1240,00	54,70	191,00	30,70	0,045	6200	5,28	85,01	5,53	3,21	2030,0	0,0359	17,25	4	4
49	533,00	51,00	110,00	27,60	0,224	4812	8,86	81,97	7,83	0,41	3720,0	0,0374	12,86	4	4
50	502,00	47,50	109,00	28,60	0,195	3580	10,88	81,81	6,18	0,39	3170,0	0,0331	10,80	4	4
51	305,00	28,70	71,30	18,60	0,121	3300	11,32	83,79	4,04	0,23	2480,0	0,0303	10,88	4	4
52	632,00	21,02	157,70	21,33	0,029	5340	10,72	81,50	3,17	4,10	454,0	0,0491	10,88	4	4

Tablica 6.9.(c) – c.d. Porównanie poziomów zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej – czwarte kryterium wskaźnika Grahama – próbki powietrza pobrane z miejsc, gdzie stosowano azot do inertyzacji

L.p.	Etan [ppm]	Etylen [ppm]	Propan [ppm]	Propylen [ppm]	Acetylen [ppm]	Tlenek węgla [ppm]	Tlen [%]	Azot [%]	Dwutl. węgla [%]	Metan [%]	Wodór [ppm]	Wartość wskaźnika Grahama	Wartość mianownika wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według wskaźnika Grahama	Kryteria zagrożenia według Sztucznej Sieci Neuronowej
53	137,72	26,89	32,23	9,99	0,110	1913	17,49	81,01	0,61	0,51	1760,0	0,0481	3,98	4	4
54	544,23	33,91	133,05	26,31	0,025	5825	11,75	81,78	2,72	3,17	4700,0	0,0587	9,92	4	4
55	532,12	25,65	127,28	22,14	0,027	6305	10,23	81,99	3,23	3,92	2100,0	0,0548	11,50	4	4
56	868,10	79,67	153,96	32,78	0,095	15910	4,40	81,06	7,81	3,91	11140,0	0,0931	17,08	4	4
57	228,40	46,11	48,14	17,31	0,144	3950	14,75	81,63	2,02	1,17	2340,0	0,0574	6,88	4	4
58	519,67	100,19	98,55	37,38	1,781	7520	2,88	87,81	7,31	0,79	3800,0	0,0369	20,39	4	4
59	455,00	126,00	91,70	28,50	2,309	7720	2,47	89,68	7,14	0,71	3870,0	0,0363	21,30	4	4
60	1157,50	159,88	222,87	103,73	2,880	7675	4,25	88,45	4,90	1,11	3600,0	0,0400	19,19	4	4
61	615,00	63,40	143,00	26,70	0,346	6834	4,50	89,08	5,79	0,54	1340,0	0,0358	19,11	4	4
62	535,65	36,96	103,40	30,16	0,243	6380	3,65	88,89	5,99	0,78	2700,0	0,0321	19,91	4	4
63	506,00	45,20	116,00	19,80	0,158	5643	4,97	89,03	4,67	0,49	2140,0	0,0303	18,62	4	4
64	480,00	42,60	110,00	19,10	0,141	5784	5,37	88,75	4,56	0,49	2070,0	0,0319	18,15	4	4
65	420,00	60,00	91,10	26,00	0,799	11870	5,36	85,95	6,60	0,84	5900,0	0,0682	17,42	4	4
66	764,00	72,90	203,00	22,50	0,882	4715	9,83	82,97	2,99	3,65	2990,0	0,0388	12,16	4	4
67	943,00	108,00	259,00	37,90	1,690	5018	9,69	82,45	3,15	3,72	3570,0	0,0413	12,16	4	4
68	513,00	23,50	167,00	19,00	0,011	3173	14,87	82,52	0,72	1,50	1240,0	0,0453	7,00	4	4
69	779,00	50,70	243,00	33,50	0,019	5150	15,08	81,27	0,99	1,73	3000,0	0,0798	6,46	4	4
70	159,00	31,20	33,50	4,75	0,239	6422	12,72	82,77	1,12	2,56	1700,0	0,0697	9,21	4	4
71	1179,90	147,88	285,90	80,71	1,131	18600	1,43	84,88	8,68	1,56	14150,0	0,0883	21,06	4	4
72	478,00	138,00	131,00	55,90	3,520	4408	13,76	84,28	1,55	0,41	4300,0	0,0514	8,57	4	4
73	520,00	140,00	139,00	56,90	2,770	4748	12,73	85,20	1,64	0,43	4450,0	0,0482	9,85	4	4
74	558,00	133,00	150,00	56,80	1,890	5099	10,89	86,89	1,75	0,47	4160,0	0,0420	12,14	4	4
75	790,00	80,80	189,00	70,90	0,591	5748	8,07	86,79	3,65	0,63	1710,0	0,0385	14,93	4	4
76	793,00	81,00	178,00	70,10	0,989	7505	5,39	88,26	4,54	0,70	2430,0	0,0417	18,00	4	4
77	601,00	52,80	137,00	54,00	0,439	5604	7,32	87,58	3,82	0,49	1450,0	0,0353	15,89	4	4
78	594,00	60,00	138,00	55,00	0,495	5900	4,82	89,46	4,46	0,47	1180,0	0,0312	18,89	4	4

W tablicy 6.9.(a-c) przedstawiono 78 losowo wybranych wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza pobranych ze zrobów i zza tam izolacyjnych, gdzie stosowano inertyzację azotem. Wszystkie próbki zamieszczone w tym zestawieniu reprezentowały (według wskaźnika Grahama) czwarte kryterium zagrożenia pożarowego, kiedy to należy wszcząć akcję przeciwpożarową. Z analizy zaprezentowanej tablicy wynika co następuje.

- Prawie wszystkie próbki powietrza zostały przez sztuczną sieć neuronową zakwalifikowane do czwartej kategorii zagrożenia pożarowego – podobnie jak określał to wskaźnik Grahama.
- Stężenia tlenu węgla w przedstawionych przypadkach były na tyle duże, że pomimo podwyższonych stężeń azotu i związanych z tym dużych wartości mianownika wskaźnika Grahama, nadal poziom zagrożenia (określony przez ten wskaźnik) był najwyższy z możliwych.
- Stężenia istotnych gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010) również w tym przypadku dobrze korelowały z poziomem zagrożenia pożarowego określonym przez sztuczną sieć neuronową. Oznacza to, że opracowany model sztucznej sieci neuronowej – także i w tym wypadku – był odporny na zakłócenia wynikające ze zwiększonych wartości stężenia azotu.

Podsumowując badania, podjęte w celu opracowania i testowania wskazań sztucznej sieci neuronowej, pod kątem jej przydatności do określania stanu zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego, można stwierdzić co następuje.

Jak już wspomniano wcześniej, wskaźnik Grahama jest jedynym wskaźnikiem oceny stanu zagrożenia pożarowego w zrobach ścianowych oraz za tamami izolacyjnymi, który w przepisach górniczych (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016) jest skategoryzowany. W trzecim rozdziale tej rozprawy wykazano jednak, że istnieją przedziały mianownika tego wskaźnika, w których z dużym prawdopodobieństwem można twierdzić, że wskaźnik ten jest niewiarygodny (nie można być wtedy pewnym, że podaje poprawną interpretację stanu zagrożenia) – dzieje się tak, gdy wartość mianownika wskaźnika Grahama jest mniejsza bądź równa 0,2 oraz większa bądź równa 5,7.

W niniejszym rozdziale dowiedziono, że opracowana sztuczna sieć neuronowa charakteryzuje się dobrą jakością estymacji, co pozwala jej na właściwą predykcję stanu zagrożenia pożarowego – zostało to potwierdzone przez wysoką korelację pomiędzy wartościami stężenia gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010), a stanem zagrożenia generowanym na wyjściu sieci. Dzieje się tak dlatego, że utworzona sieć neuronowa korzysta na wejściu z widma składającego się z wielu gazów (takich jak etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla, tlen, azot, dwutlenek węgla i wodór) i dzięki temu jest odporna na zakłócenia związane z podwyższonym stężeniem azotu i/lub metanu w próbce powietrza. Także występowanie zapowietrzonych próbek powietrza, z którymi często można się spotkać w praktyce, nie wywołuje znacznych zakłóceń w predykcji sieci.

W związku z powyższym, wykorzystanie opracowanej sieci neuronowej do wspierania procesu decyzyjnego pracowników zajmujących się zwalczaniem zagrożenia pożarowego w kopalniach jest jak najbardziej uzasadnione. Wyniki uzyskane z predykcji omawianej sieci można by zestawiać z wartościami wskaźnika Grahama w sposób podobny do zaprezentowanego w tablicach 6.2.-6.9. Czyli oprócz całego widma gazowego i wartości

wskaźnika Grahama można by zamieszczać w tablicach informację o tym, czy wskaźnik Grahama zawiera się w przedziale wiarygodnym oraz podawać kategorię zagrożenia pożarowego wyznaczoną przez sztuczną sieć neuronową.

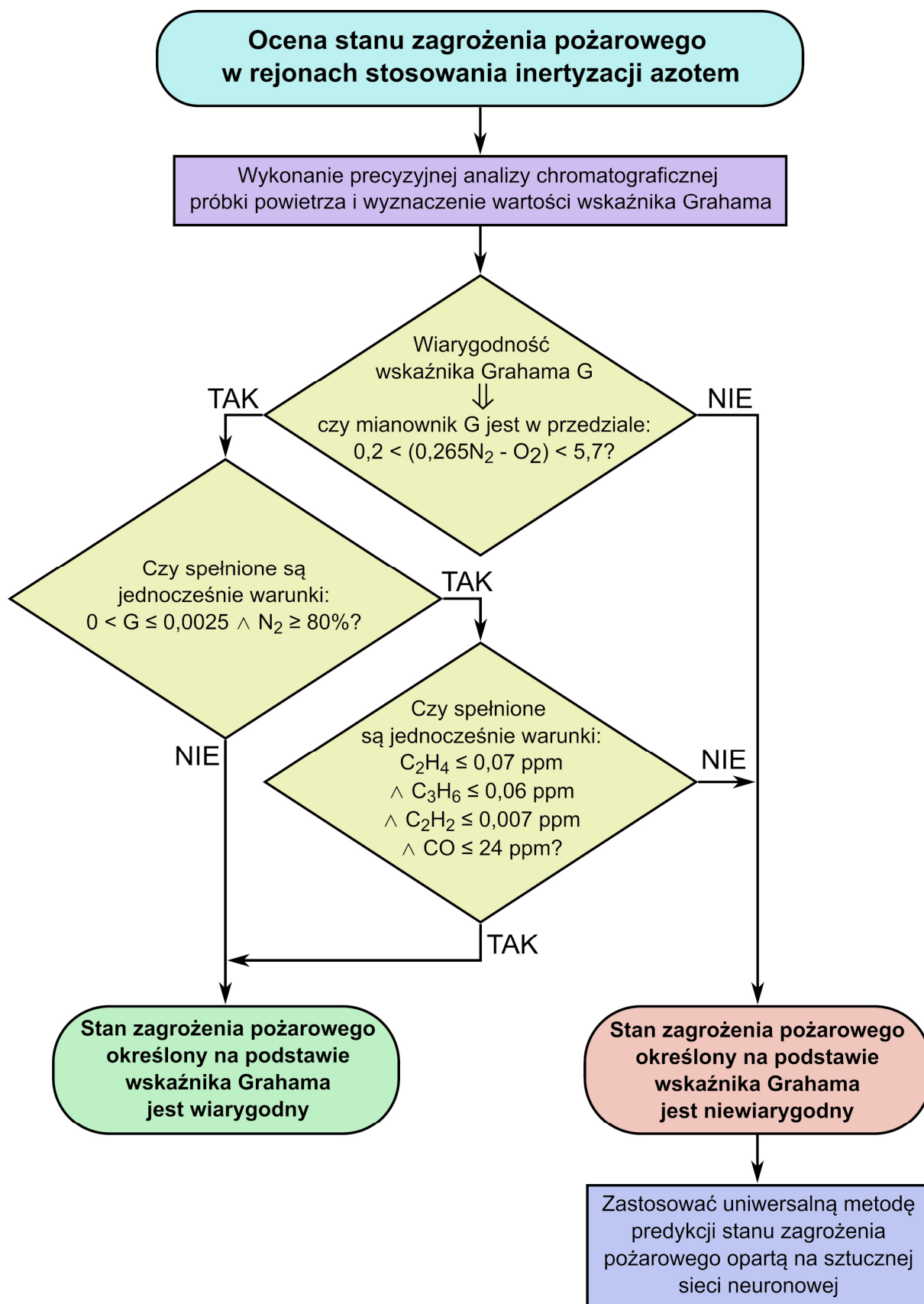
Korzystanie z opracowanej sieci neuronowej jest jak najbardziej uzasadnione w przypadkach, w których wskaźnik Grahama znajduje się poza przedziałem wiarygodności, gdyż zaobserwowano, że w takich sytuacjach może dochodzić do zawyżania lub zaniżania rzeczywistego stanu zagrożenia pożarowego przez ten wskaźnik.

Predykcja stanu zagrożenia pożarowego przez omawianą sieć neuronową może również być bardzo przydatna, gdy z obliczeń uzyskamy ujemną wartość wskaźnika Grahama. Takiego przypadku obowiązujące przepisy górnicze (Rozporządzenie Ministra Energii, 2016) nie uwzględniają, a w praktyce górniczej można go napotkać nader często.

Proponowany sposób określania stanu zagrożenia pożarowego w zrobach ścianowych i za tamami izolacyjnymi przy użyciu wskaźnika Grahama i opracowanej sztucznej sieci neuronowej przedstawiono na rysunku 6.28. Na tym rysunku zawarto wnioski z wszystkich wcześniej przeprowadzonych analiz.

Omawiana sztuczna sieć neuronowa jest w posiadaniu autora niniejszej rozprawy. Ponieważ istnieje ona w postaci wytrenowanego perceptronu wielowarstwowego, dlatego nie da się jej przedstawić w formie pisemnej, np. przy pomocy wzorów matematycznych. W związku z tym, aby móc skorzystać z predykcji opracowanej sieci, napisano program komputerowy, który przy jej użyciu pozwala określać stan zagrożenia pożarowego na podstawie wyników precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza, przeprowadzanych w Zakładzie Aerologii Górniczej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach. Dodatkowo – gdyby zaistniała taka potrzeba – można również przeprowadzać predykcję stanu zagrożenia pożarowego na podstawie gotowych wyników analiz chromatograficznych przesyłanych z kopalń do Zakładu Aerologii Górniczej.

Omawiana sztuczna sieć neuronowa jest obecnie testowana podczas wykonywania prac zleconych, na potrzeby bieżącej oceny stanu zagrożenia pożarowego w różnych rejonach eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego. Jej dotychczasowe wskazania zdecydowanie potwierdzają przydatność tego rozwiązania.



Rys. 6.28. Schemat blokowy algorytmu postępowania przy określaniu stanu zagrożenia pożarowego za pomocą wskaźnika Grahama i sztucznej sieci neuronowej

7. Podsumowanie

Interpretując wyniki wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych w rejonach wydobywczych kopalń węgla kamiennego można napotkać przypadki, w których poprawna ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym w oparciu o wartość wskaźnika Grahama jest utrudniona, a czasem nawet niemożliwa. Bezpośredni wpływ na to ma wartość mianownika tego wskaźnika, która jest uzależniona od stężenia azotu i tlenu w pobranych próbkach powietrza.

Z analizy matematycznej wzoru służącego do wyznaczania wskaźnika Grahama wynika, że podwyższone stężenia azotu mogą powodować obniżanie wartości tego wskaźnika. Sytuacja taka jest bardzo niepożądana, ponieważ może przyczynić się do wyciągnięcia nieprawidłowych wniosków dotyczących sytuacji pożarowej w rozpatrywanym rejonie kopalni. Jednym z najgorszych scenariuszy byłby przypadek, w którym wskaźnik Grahama wskazywałby na sytuację normalną, podczas gdy rzeczywisty stan zagrożenia pożarowego byłby wyższy.

Z przeciwną sytuacją można mieć do czynienia, gdy próbka powietrza zawiera wysokie stężenie tlenu. Mianownik wskaźnika Grahama zbliża się wtedy do zera, co może powodować zawyżanie stanu zagrożenia pożarowego przez ten wskaźnik, w stosunku do rzeczywistości panującej sytuacji.

W praktyce górniczej można napotkać jeszcze jedną grupę przypadków, kiedy obliczona wartość wskaźnika Grahama jest ujemna. Taki przypadek nie jest uwzględniony w aktualnie obowiązujących przepisach górniczych.

Dla zwiększenia pewności interpretacji zagrożenia pożarowego przy pomocy wskaźnika Grahama, opracowano przedział wiarygodności dla wartości mianownika tego wskaźnika. Przeprowadzone testy wykazały, że jeżeli wartość mianownika wskaźnika Grahama zawiera się w przedziale $0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$, to z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% można twierdzić, że wskaźnik Grahama prawidłowo przedstawia stan zagrożenia pożarowego. Poza tym przedziałem nie można już mieć takiej pewności i powinno się wtedy stosować inne narzędzia do oceny poziomu zagrożenia pożarem endogenicznym, np. metodę gazów istotnych.

Podany przedział wiarygodności wskaźnika Grahama wypełnia założenia pierwszego celu użytecznego niniejszej rozprawy, który mówi o opracowaniu zasad stosowania wskaźnika Grahama dla zwiększenia wiarygodności oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym.

Przeprowadzone analizy wykazały, że w próbkach powietrza pochodzących z rejonów poddawanych inertyzacji azotem średnie stężenia etylenu, propylenu, acetylenu i tlenku węgla były wyższe od ich odpowiedników zawartych w próbkach powietrza pobranych z miejsc, gdzie nie stosowano inertyzacji – pomimo tego, że (według wskaźnika Grahama) wszystkie te próbki pod względem stanu zagrożenia pożarem endogenicznym reprezentowały taki sam poziom zagrożenia (w tym przypadku rozpatrywano sytuację normalną, czyli brak zagrożenia pożarem). Zaobserwowano, że nierówność ta występowała pomimo tego, że wskaźnik Grahama był wiarygodny (mianownik wskaźnika należał do przedziału $0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$). Oznaczało to, że próbki powietrza pobrane z rejonów ścian, w których stosowano azot jako gaz inertny prawdopodobnie reprezentowały wyższy stan zagrożenia, niż wynikało to z wyznaczonych wartości wskaźnika Grahama.

Dla próbek powietrza pochodzących z rejonów wydobywczych, w których stosuje się azot jako gaz inertny należało więc opracować dodatkowe warunki stosowania wskaźnika Grahama. Warunki te sformułowano wykorzystując stężenia gazów istotnych wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla. Posługując się testem t-Studenta wykazano, że jeżeli stężenie etylenu $\leq 0,07$ ppm, propylenu $\leq 0,06$ ppm, acetylenu $\leq 0,007$ ppm i tlenu węgla ≤ 24 ppm, to z prawdopodobieństwem wynoszącym co najmniej 95% można twierdzić, że wskaźnik Grahama poprawnie zalicza próbki powietrza zawierające zwiększoną zawartość azotu do sytuacji normalnej, w której nie występuje zagrożenie pożarem endogenicznym.

Opracowane w ten sposób kryterium wypełnia założenia drugiego celu użytecznego niniejszej rozprawy.

Przeprowadzone analizy pozwoliły na opracowanie następującego algorytmu postępowania podczas określania poziomu zagrożenia pożarem endogenicznym przy pomocy wskaźnika Grahama:

Jeżeli wskaźnik Grahama wyznaczony dla próbki powietrza określa stan zagrożenia pożarem endogenicznym jako sytuację normalną (nie występuje zagrożenie pożarem endogenicznym), a zawartość azotu w tej próbce jest większa bądź równa 80%, to zaleca się następujący tok postępowania.

1. Sprawdzić, czy wskaźnik Grahama jest wiarygodny, czyli czy wartość jego mianownika znajduje się w przedziale $0,2 < (0,265N_2 - O_2) < 5,7$. Jeżeli wartość mianownika jest poza wymienionym zakresem, wtedy należy odrzucić interpretację zagrożenia pożarowego przedstawianą przez ten wskaźnik. Natomiast, gdy wskaźnik Grahama znajduje się w przedziale wiarygodności, to należy przejść do postępowania opisanego w punkcie 2.
2. Sprawdzić, czy spełniony jest warunek stężenia gazów: etylen (C_2H_4) $\leq 0,07$ ppm, propylen (C_3H_6) $\leq 0,06$ ppm, acetylen (C_2H_2) $\leq 0,007$ ppm i tlenek węgla (CO) ≤ 24 ppm. Jeżeli podany warunek jest spełniony, to można z bardzo dużym prawdopodobieństwem twierdzić, że określony, najniższy poziom zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama jest prawidłowy. W przeciwnym razie należy posługiwać się innymi kryteriami oceny stanu zagrożenia pożarem endogenicznym – na przykład metodą gazów istotnych. Podkreślić należy, że im bardziej stężenia wymienionych gazów będą odbiegać od podanych warunków, tym większa będzie pewność, że mamy do czynienia z wyższym stanem zagrożenia pożarowego niż wynika to z wartości wskaźnika Grahama.

Do określania poziomu zagrożenia pożarem endogenicznym w przypadkach, gdy wskaźnik Grahama znajduje się poza przedziałem wiarygodności lub jest ujemny zaproponowano rozwiązanie oparte na sztucznych sieciach neuronowych i uczeniu maszynowym. W tym celu opracowano 24 różne topologie sztucznych sieci neuronowych i poddano je procesowi uczenia na 120 000 wynikach precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza, pobranych ze zrobów ścianowych oraz z za tam izolacyjnych. Następnie wybrano graf najlepiej dopasowany do danych i poddano go szczegółowej analizie.

Wybrana topologia sztucznej sieci neuronowej bardzo dobrze radziła sobie z zakłóceniami wynikającymi ze zwiększonych stężeń azotu, metanu i dwutlenku węgla zawartych w próbkach powietrza. W takich przypadkach mianownik wskaźnika Grahama zazwyczaj przekraczał próg wiarygodności (5,7), co powodowało zaniżanie stanu zagrożenia pożarowego przez ten wskaźnik. Zaś stan zagrożenia określony przez sztuczną sieć neuronową znacznie lepiej korelował ze stężeniami gazów istotnych (Cygankiewicz, 1996; Trenczek, 2003; Trenczek, 2010), a tym samym z rzeczywistym stanem zagrożenia.

W przypadkach, gdy mianownik wskaźnika Grahama przekraczał drugi próg wiarygodności i przyjmował wartości mniejsze lub równe 0,2, poziom zagrożenia pożarowego określony przez sztuczną sieć neuronową również lepiej korelował ze stężeniami gazów wydzielających się w procesie samozagrzewania węgla. A więc przy pomocy opracowanej sztucznej sieci neuronowej można było zinterpretować stan zagrożenia pożarowego z większą pewnością, że nie popełnia się błędu.

W przypadkach, w których z obliczeń uzyskano ujemną wartość wskaźnika Grahama zastosowanie sztucznej sieci neuronowej pozwoliło na dokonanie oceny stanu zagrożenia pożarowego mieszczącej się w kryteriach wskaźnika Grahama.

Powyższe potwierdza więc, że opracowana sztuczna sieć neuronowa jest bardzo uniwersalna i może być stosowana do predykcji stanu zagrożenia pożarowego zarówno dla rejonów ścianowych niepoddawanych jak i poddawanych inertyzacji azotem. W przypadkach, w których wskaźnik Grahama znajduje się poza przedziałem wiarygodności lub przyjmuje wartości ujemne może to być miarodajny wyznacznik rzeczywistego stanu zagrożenia. Natomiast, gdy wskaźnik Grahama jest wiarygodny, interpretacja uzyskana przy pomocy sztucznej sieci neuronowej może być uzupełnieniem dla tego wskaźnika, potwierdzającym stan zagrożenia.

Opracowana uniwersalna metoda predykcji stanu zagrożenia pożarowego, oparta na sztucznej sieci neuronowej, obejmująca rejonu ścian niepoddawane i poddawane inertyzacji azotem wypełnia zatem założenia trzeciego celu użytecznego niniejszej rozprawy.

Uniwersalność perceptronów wielowarstwowych pozwala na zastosowanie dowolnego rodzaju parametrów wejściowych do nauki sieci neuronowej. Dlatego zastosowanie rozwiązań głębokiego uczenia maszynowego do problemu niewiarygodnych wartości wskaźnika Grahama pozwala na to, aby omawiana sztuczna sieć neuronowa została w przyszłości bardziej zindywidualizowana przez dodanie dodatkowych parametrów do procesu jej uczenia. Parametrami tymi mogą być np. dane pochodzące z wygrzewania próbek węglowych, grupy samozapalności węgla, poziomy zalegania pokładów w danym rejonie, stopnie ich uwęglenia, itp.

Powinno to skutkować jeszcze dokładniejszym dopasowaniem predykcji tej sieci do warunków panujących w konkretnym rejonie kopalni.

Poprzez przedział wiarygodności wskaźnika Grahama, warunek sprawdzający, czy brak zagrożenia określony przez ten wskaźnik w rejonie poddanym inertyzacji azotem jest spełniony oraz opracowaną uniwersalną metodę predykcji stanu zagrożenia pożarowego, opartą na sztucznej sieci neuronowej zaproponowano nowy sposób postępowania podczas oceny stanu zagrożenia pożarowego w rejonach niepoddawanych i poddawanych inertyzacji azotem (rysunek 6.28.).

Przeprowadzone analizy potwierdziły, że postępowanie zgodne z przedstawionym algorytmem zapewni znacznie większą pewność interpretacji stanu zagrożenia pożarowego według wskaźnika Grahama niż ma to miejsce obecnie.

8. Literatura

1. *Abadi M. i inni*, 2016 – Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. arXiv preprint arXiv:1603.04467.
2. *Abraham A.*, 2005 – Artificial neural networks. Handbook of measuring system design.
3. *Bajic S., Muller S., Gido M.*, 2020a – Oxygen deficiency in Graham's Ratio evaluation. Proceedings of the 2020 Coal Operators' Conference.
4. *Bajic S., Muller S., Gido M.*, 2020b – Filter requirements for Graham s ratio oxygen deficiency. Proceedings of the 2020 Coal Operators' Conference.
5. *Bahaweres R. B., Agustian F., Hermadi I., Suroso A. I., Arkeman Y.*, 2020 – Software Defect Prediction Using Neural Network Based SMOTE. 7th International Conference on Electrical Engineering, Computer Sciences and Informatics, p. 71-76.
6. *Bessa I., Quito C., Pontes K.*, 2014 - Artificial Neural Networks Structure Selection: the benefits of Cross Validation Method. 4th International Conference on Engineering Optimization.
7. *Bernstein G. M.*, 2010 – Shape measurement biases from underfitting and ellipticity gradients. Monthly Notices Royal Astronomical Society 406, 2793-2804.
8. *Bobkowski Z.*, 2004 – Wybrane metody statystyki opisowej i wnioski statystycznego. Wydawnictwo WWSZiP.
9. *Bock S., Goppold J., Weiß M.*, 2018 – An improvement of the convergence proof of the ADAM-Optimizer. Conference paper at OTH clusterkonferenz 2018.
10. *Boden M.*, 2002 – A guide to recurrent neural networks and backpropagation. The Dallas project, 2(2), 1-10.
11. *Brady D.*, 2007 – The influence analytical techniques and uncertainties in measurement have on the assessment of underground coal mine atmospheres. Proceedings of the Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, p. 1-11.
12. *Brady D.*, 2008 – Problems with Determining Oxygen Deficiencies in Ratios Used for Assessing Spontaneous Combustion Activity. Aziz Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 209-216, Coal 2008.
13. *Budryk W.*, 1956 – Pożary i wybuchy w kopalniach. Górnictwo, tom XI.
14. *Chawla N. V., Hall L. O., Bowyer K. W., Kegelmeyer W. P.*, 2002 – SMOTE: Synthetic Minority Oversampling Technique. Journal of Artificial Intelligence Research 16 p.321-357.
15. *Christopher M. B.*, 2006. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer Science+Business Media, LLC.
16. *Cliff D.*, 2005 – The ability of current gas monitoring techniques to adequately detect spontaneous combustion. Brisbane, QLD, 26 - 28 April 2005. Coal 2005 Conference.
17. *Cygankiewicz J.*, 1996 – Ocena rozwoju ognisk samozagrzewania na podstawie precyzyjnej analizy chemicznej prób powietrza kopalnianego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 14, str. 505-513.
18. *Cygankiewicz J.*, 2011 – Prognozowanie samozagrzewania węgla w zrobach ścian. IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa – Problemy Współczesnego Górnictwa, Jaworze 2011, str. 432-448.
19. *Czajkowski M., Kretowski M.*, 2019 – Decision tree underfitting in mining of gene expression data. An evolutionary multi-test tree approach. Expert Systems With Applications 137 (2019) 392-404.
20. *Dobre G., Grigorescu C., Carstoiu D., Grigorescu S.*, 1970 – Applying SQL techniques on inference mechanisms of expert systems. WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 20.

21. *Dubey S. R., Singh A. K., Chaudhuri B. B., 2022 – Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark. Neurocomputing 503 (2022) 92–108.*
22. *Dudley R. M., 1978 – Central limit theorems for empirical measures. The Annals of Probability, 899-929.*
23. *Erb R. J., 1993 – Introduction to Backpropagation Neural Network Computation. Pharmaceutical Research, Vol. 10, No. 2.*
24. *El-Shahat A., 2019 – Advanced applications for artificial neural networks. INTECH d.o.o.*
25. *Fonseca J., Douzas G., Bacao F., 2021 – Improving imbalanced land cover classification with K-Means SMOTE: Detecting and oversampling distinctive minority spectral signatures. Information, 12(7), 266.*
26. *Gallant S., I., 1990 – Perceptron-Based Learning Algorithms. IEEE Transactions on neural networks vol. 1 No. 2. June 1990.*
27. *Gardner M. W., Dorling S. R., 1998 – Artificial neural networks (the multilayer perceptron) – a review of applications in the atmospheric science. Atmospheric Environment Vol. 32, No. 14/15, pp. 2627-2636.*
28. *Glazkova A., 2020 – A comparison of synthetic oversampling methods for multi-class text classification. arXiv preprint arXiv: 2008.04636.*
29. *Goldsborough P., 2016 – A tour of tensorflow. arXiv preprint arXiv:1610.01178.*
30. *Goodfellow I., Belgio Y., Courville A., 2016 – Deep Learning. MIT Press.*
31. *Graham, I. J., 1921 – The Normal Production of Carbon Monoxide in Coal Mines. Transactions of the Institution of Mining Engineers, Vol. 60, pp. 222-234.*
32. *Gurnej K., 1997 – An introduction to neural networks. UCL Press.*
33. *Hagan M. T., Demuth H. B., Beale, M. H., De Jesús O., 2014 – Neural Network Design. 2nd Edition.*
34. *Hashem S., Schmeiser B., 1995 – Improving model accuracy using optimal linear combinations of trained neural networks. IEEE Transactions on neural networks, 6(3), 792-794.*
35. *Haykin S., 2008 - Neural Networks and Learning Machines. Pearson Prentice Hall.*
36. *Hogg R. V., Tanis E.A., Zimmerman D.L., 2015 - Probability and statistical inference (Ninth Edition).*
37. *Holek S., 1991a – Analiza warunków geologiczno-górnicych mających wpływ na zaistniałe pożary endogeniczne w latach 1971-1990. Cz. I dokumentacji nr 0109030F6, GIG Katowice.*
38. *Holek S., 1991b – Zmodyfikowana metoda wyznaczania wskaźnika oceny zagrożenia pokładu węgla pożarami endogenicznymi. Cz. II dokumentacji nr 0109030F6, GIG Katowice.*
39. *Jaworski S., 1965 – Statystyka matematyczna.*
40. *Jabbar H. K., Khan R. Z., 2015 - Methods to avoid over-fitting and under-fitting in supervised machine learning (comparative study). Computer Science, Communication & Instrumentation Devices.*
41. *Jewtuszenko O., Kuciej M., Trochimeczuk R., 2018 – Bazy danych - MS ACCESS: przykłady i ćwiczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.*
42. *Jishan S. T., Rashu R. I., Haque N., Rahman R. M., 2015 – Improving accuracy of students' final grade prediction model using optimal equal width binning and synthetic minority over-sampling technique. Decision Analytics, 2(1), 1-25.*
43. *Jung A., 2022 – Machine Learning: The Basics. Springer, Singapore.*
44. *Kavzoglu T., 2009 – Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data. Environmental Modelling & Software, 24(7), 850-858.*

45. *Kilian J., Siegelmann H. T.*, 1993 – On the power of sigmoid neural networks. Proceedings of the sixth annual conference on Computational learning theory (p. 137-143).
46. *Kingma D. P., Ba J. L.*, 2015 – ADAM: a method for stochastic optimization. ICLR 2015 – conference paper.
47. *Krenker A., Bešter J., Kos A.*, 2011 – Introduction to the artificial neural networks. Artificial Neural Networks: Methodological Advances and Biomedical Applications. InTech, 1-18.
48. *Kroenke D.*, 1977 – Database processing (No. 04; QA76. 9. D3, K7.). Reading, MA: Science Research Associates.
49. *Krogh A., Vedelsby J.*, 1994 – Neural network ensembles, cross validation, and active learning. Advances in neural information processing systems, 7.
50. *Krogh A.*, 2008 – What are artificial neural networks? Nature biotechnology, 26(2), 195-197.
51. *Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.*, 1999 – Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Wydawnictwo PWN.
52. *Larsen J., Hansen L. K., Svarer C., Ohlsson B. O. M.*, 1996 – Design and regularization of neural networks: the optimal use of a validation set. In Proceedings of Neural Networks for Signal Processing VI, pp. 62-71.
53. *Li F., Yang Y.*, 2003 – A loss function analysis for classification methods in text categorization. In Proceedings of the 20th international conference on machine learning (ICML-03) (pp. 472-479).
54. *Lippmann K.*, 1987 – An introduction to computing with neural nets. IEEE ASSP Magazine, str. 4 - 22.
55. *Luszniewicz A., Słaby T.* 2008 – Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo C.H. Beck.
56. *Łuczak A.*, 1993 – Współczesna Forma Klasycznych Problemów Teorii Prawdopodobieństwa – "Operatorowe" Rozkłady Graniczne. Problemy matematyczne 13. str. 3-12.
57. *Mackenzie-Wood P., Strang J.*, 1990 – Fire gases and their interpretation. The Mining Engineer, June 1990.
58. *Mansourifar H., Shi W.*, 2020 – Deep synthetic minority over-sampling technique. arXiv preprint arXiv: 2003.09788.
59. *Magoulas G. D., Vrahatis M. N., Androulakis G. S.*, 1997 – Effective Backpropagation Training with Variable Stepsize. Neural Networks Vol. 10, No. 1, pp. 69-82.
60. *Major M.*, 2007 – Elementy statystyki. Rachunek prawdopodobieństwa i wnioskowanie statystyczne. Wydawnictwo: Krakowska Szkoła Wyższa im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego.
61. *Malska W.*, 2018 – Opisowe charakterystyki rozkładów cech statystycznych. Edukacja-Technika-Informatyka, 9(3), 321-326.
62. *Menon A., Mehrotra K., Mohan C. K., Ranga S.*, 1996 – Characterization of a class of sigmoid functions with applications to neural networks. Neural networks, 9(5), 819-835.
63. *Mia M. M. A., Biswas S. K., Urmi M. C., Siddique A.*, 2015 – An algorithm for training multilayer perceptron (MLP) for Image reconstruction using neural network without overfitting. International Journal of Scientific & Technology Research, 4(02), p. 271-275.
64. *Mitchell D.W.*, 1996 – Mine Fires: Prevention Detection and Fighting, Third Edition, p. 82-83.
65. *Moraru R., Babut G.*, 2010 – Oxygen deficiencies interpretation for use in ratios assessing spontaneous combustion activity. Revista Minerol nr 3/2010.

66. *Mohammed R., Rawashdeh J., Abdullah M., 2020 – Machine learning with oversampling and undersampling techniques: overview study and experimental results. 11th international conference on information and communication systems (ICICS) (pp. 243-248).*
67. *Muller S., Ryan L., Hollyer J., Bajici S., 2017 – Review of oxygen deficiency requirements for graham's ratio. Proceedings of the 17th Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, p. 382-390.*
68. *Ofek N., Rokach L., Stern R., Shabtai A., 2017 – Fast-CBUS: A fast clustering-based undersampling method for addressing the class imbalance problem. Neurocomputing, 243, 88-102.*
69. *Olmedo M., T., Paegelow M., Mas J. F., Escobar F., 2018 – Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. Springer International Publishing AG.*
70. *Olpiński W., 1958 – Wpływ czynników górniczych na powstawanie pożarów endogenicznych na tle badań pokładu 510. Prace GIG, Komunikat 204, Katowice.*
71. *Paca zbiorowa: Poradnik Górnika t. III, str. 254-257.*
72. *Panigrahi D. C., Bhattacharjee R. M., 2004 – Development of modified gas indices for early detection of spontaneous heating in coal pillars. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 104(7), p. 367-379.*
73. *Plessis M. C., Sugiyama M., 2014 - Semi-supervised learning of class balance under class-prior change by distribution matching. Neural Networks 50, p. 110–119.*
74. *Popescu M. C., Balas V. E., Perescu-Popescu L., Mastorakis N., 2020 – Multilayer Perceptron and Neural Networks. WSEAS Transactions on Circuits and Systems.*
75. *Prechelt L., 1998 – Automatic early stopping using cross validation: quantifying the criteria. Neural networks, 11(4), 761-767.*
76. *Python Programming Language – Official Website: <http://www.python.org/>.*
77. *Rachburee N., Punlumjeak W., 2021 – Oversampling technique in student performance classification from engineering course. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 11(4), 3567.*
78. *Raport roczny (2022) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego.*
79. *Ramchoun H., Idrissi M. A. J., Ghanou Y., Ettaouil M., 2016 – Multilayer Perceptron: Architecture Optimization and Training. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, Vol. 4, N°1.*
80. *Ray S. K., Singh R. P., Sahay N, Varma N. K., 2003. Assessing the status of sealed fire in underground coal mines. Journal of Scientific & Industrial Research, vol. 63, pp. 579-591.*
81. *Rice L., Wong E., Kolter J. Z., 2020 – Overfitting in adversarially robust deep learning. Proceedings of the 37 th International Conference on Machine Learning, Vienna, Austria, PMLR 119.*
82. *Richert W., Coelho L. P., 2013 – Building Machine Learning Systems with Python.*
83. *Rosa J. L. G., 2019 – Artificial Neural Networks. Models and Applications. INTECH d.o.o.*
84. *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.*
85. *Ruder S., 2017 – An overview of gradient descent optimization algorithms. Artykuł dostępny online na stronie: <https://arxiv.org/abs/1609.04747>.*
86. *Ruck D. W., Rogers S. K., Kabrisky M., 1990 - Feature Selection Using a Multilayer Perceptron. Journal of Neural Network Computing, Volume 2, Number 2, 1990, pp 40-48.*
87. *Schaffer C., 1993a – Overfitting Avoidance as Bias. Machine Learning, 10, 153-178.*

88. Schaffer C., 1993b – Selecting a classification method by cross-validation. *Machine learning*, 13(1), 135-143.
89. Sharma S., Sharma S., Athaiya A., 2020 – Activation functions in neural networks. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, Vol. 4, Issue 12, ISSN No. 2455-2143, Pages 310-316.
90. Shi S. M., Da Xu L., Liu B., 1999 – Improving the accuracy of nonlinear combined forecasting using neural networks. *Expert Systems with Applications*, 16(1), 49-54.
91. Singh A. K., Singh R. V. K., Singh M. P., Chandra H., Shukla N. K., 2007 – Mine fire gas indices and their application to Indian underground coal mine fires. *International Journal of coal geology*, 69(3), p. 192-204.
92. Singh N. D., Dhall A., 2018 – Clustering and learning from imbalanced data. arXiv preprint arXiv: 1811.00972.
93. Słowik S., Świerczek L., 2014 – Ujemne i zawyżone wartości wskaźnika Grahama. *Przegląd Górniczy* 12/2014, str. 98-105.
94. Słowik S., Świerczek L., 2015 – Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama. *Przegląd Górniczy* 12/2015, str. 49-61.
95. Słowik S., 2020 – Rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego w rejonach eksploatowanych ścian zawałowych w oparciu o wskaźnik Grahama i WSS. *Przegląd Górniczy* 8/2020, str. 45-53.
96. StatSoft – internetowy podręcznik statystyki.
97. Strumiński A., 1996 – Zwalczanie pożarów w kopalniach głębinowych. *Podręcznik akademicki – wydawnictwo Śląsk*.
98. Sun H., Zhang S., Ren R., Su L., 2022 – Surface Defect Detection of “Yuluxiang” Pear Using Convolutional Neural Network with Class-Balance Loss. *Agronomy* 2022, 12, 2076.
99. Szlązak N., Obracaj D., Piergies K., 2011 – Ogólne zasady inertyzacji azotem zrobów czynnej ściany zawałowej. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 35, Zeszyt 4, str. 131-142.
100. Szlązak N., Szlązak J., 2013 – Wentylacja wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego, w warunkach zagrożeń metanowego i pożarowego. *Górnictwo i Geologia*, Tom 8, zeszyt 2, str. 115 – 131.
101. Szlązak N., Piergies K., 2018 – Inertyzacja zrobów ścian zawałowych. *Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji. Górnictwo – perspektywy i zagrożenia*, Volume 7, issue 1.
102. Świerczek L., 2016 – Wpływ prędkości powietrza przepływającego przez ścianę na przewietrzanie zrobów zawałowych i profilaktykę pożarową. *Przegląd górniczy* 2/2016. str. 34-43.
103. Świerczek L., 2020 – Criteria of Graham’s ratio application in areas subjected to nitrogen inertisation. *Archives of Mining Sciences*, 2020, vol. 65, No 3, p. 627-640.
104. Świerczek L., 2021 – The influence of nitrogen inertisation on graham’s ratio value. *Archives of Mining Sciences*, 2021, vol. 66, No 2, p. 197-211.
105. Tadeusiewicz R., Szaleniec M., 2015 – *Leksykon sieci neuronowych*. Wydawnictwo Fundacji „Projekt Nauka”.
106. Tensorflow (www.tensorflow.org) – strona internetowa wspomagająca budowę sieci neuronowej opartej o platformę firmy Google.
107. Tran D. T., 2022 – *Efficient Design, Training, and Deployment of Artificial Neural Networks*. Tampere University Dissertations.
108. Trenczek S., 2001 – *Prognoza zagrożenia pożarami endogenicznymi ścian zawałowych w kopalniach węgla kamiennego*. Praca doktorska AGH, Kraków.

109. *Trenczek S.*, 2003 – Ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym, na podstawie temperatury zrobów wyznaczonej metodą gazów istotnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt 258, str. 363-375.
110. *Trenczek S.*, 2005 – Uproszczonyj prognoz opasnosti endogennojo požara w zonie ławy. *Tiechnika i Tiechnologija Otkrytoj i Podziemnoj Razrabotki Miestorożdienij*. Naucznyje Soobščzenija Nacionalnogo Naucznojo Centra Gornogo Proizwodstwa Instituta Gornogo Dieła im. A. A. Skoczinskogo No. 331/2005, 198-208
111. *Trenczek S.*, 2010 – Ocena zagrożenia pożarami endogenicznymi pokładów węgla kamiennego i sposoby jego zapobiegania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
112. *Trenczek S.*, 2011 – Zagrożenie pożarowe a działania profilaktyczne w świetle badań. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*. R. 49, nr 1, str. 15-21.
113. *Trenczek S.*, 2013 – Przyrost stężenia tlenu węgla w czasie w zależności od źródła jego pochodzenia. *Górnictwo i Geologia* 2013, tom 8, zeszyt 3, str. 159-172.
114. *Wang, J., Xu, M., Wang, H., & Zhang, J.*, 2006 – Classification of imbalanced data by using the SMOTE algorithm and locally linear embedding. In 2006 8th international Conference on Signal Processing (Vol. 3).
115. *Wang X., Liu B., Cao S., Jing L., Yu J.*, 2020 – Important sampling based active learning for imbalance classification. *Science China Information Sciences*, 63(8), 1-14.
116. *Warsza Z. L., Korczyński M. J.*, 2014 – Statystyki skośności i kurtozy małych próbek pomiarowych z populacji o rozkładzie normalnym i kilku innych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 60(12), 1119-1123.
117. *Wątroba J., Harańczyk G.*, 2007 – Wspomaganie analizy danych za pomocą narzędzi *Statistica*. StatSoft.
118. *Webb A.*, 1999 – A loss function approach to model selection in nonlinear principal components. *Neural Networks*, 12(2), 339-345.
119. *Ying X.*, 2018 – An Overview of Overfitting and its Solutions. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1168.
120. *Zieliński R.*, 1990 – Siedem wykładów wprowadzających do statystyki matematycznej. IMPAN.
121. *Zocca V., Spacagna G., Slater D., Roelants P.*, 2017 – Deep Learning. *Uczenie głębokie z językiem Python. Sztuczna inteligencja i sieci neuronowe*. Wydawnictwo HELION.

**Załącznik nr 1 do rozprawy doktorskiej mgr inż. Lucjana Świerczka zatytułowanej:
„Nowa metoda wykorzystania wskaźnika Grahama do oceny stanu zagrożenia pożarowego w rejonach ścian inertyzowanych azotem”.**

Program służący do tworzenia i szkolenia sztucznej sieci neuronowej przystosowanej do wykorzystania w **Uniwersalnej metodzie oceny predykcji stanu zagrożenia pożarowego, obejmującej rejonu niepoddawane i poddawane inertyzacji azotem.**

```
#Program został napisany w języku Python przez mgr inż. Lucjana Świerczka  
#Program przy pomocy silnika Tensorflow tworzy sieć neuronową z jedną warstwą ukrytą, przeprowadza proces jej uczenia i zapisuje wyuczony model do pliku  
#Postęp uczenia sieci (aktualna epoka) jest wyświetlany w oknie Command Prompt
```

```
#Początek programu  
#Import bibliotek używanych w programie  
import tensorflow as tf  
import matplotlib.pyplot as plt  
import numpy as np  
import pandas as pd  
from sklearn.model_selection import train_test_split  
import subprocess  
from tensorflow.python.tools import freeze_graph  
from tensorflow.python.framework.graph_util import convert_variables_to_constants  
from sklearn.utils import shuffle  
from imblearn.over_sampling import SMOTE  
import msvcrt  
import time
```

```
#Wczytanie danych do nauki sieci neuronowej  
dane_do_nauki = 'Dane_do_nauki_sieci.csv'
```

```
#Ścieżka do zapisu wyuczonego modelu  
model_koncowy_path = 'C:\\Wyniki\\'
```

```
#Dane o modelu sieci neuronowej - wyświetlane podczas nauki w oknie Command Prompt  
nazwa_modelu = 'Sieć oznaczona symbolem: 8-6-4'  
ilosc_warstw = '1 warstwa ukryta'  
ilosc_neuronow = '6 neuronów w warstwie ukrytej'
```

```
# Prędkość uczenia się modelu  
learning_rate = 0.00005
```

```

# Liczba epok treningowych
training_epochs = 1000001

#Krok po którym zostają zapisane pośrednie wyniki z obliczeń
krok_zapisywania_danych = 5000

#Funkcja odczytująca dane do uczenia i testowania
odczytane_dane = pd.read_csv(dane_do_nauki)

#Wydruk danych w oknie Command Prompt - przed Oversamplingiem
print(odczytane_dane['GrupyGrahama'].value_counts())

#Oversampling metodą SMOTE
X_do_SMOTE = odczytane_dane.drop('GrupyGrahama', axis=1)
Y_do_SMOTE = odczytane_dane['GrupyGrahama']
smote = SMOTE(random_state=0)
X_resampled, y_resampled = smote.fit_sample(X_do_SMOTE, Y_do_SMOTE)
X_resampled = pd.DataFrame(X_resampled, columns=X_do_SMOTE.columns)
Dataframe_after_oversampling_SMOTE = pd.concat([pd.DataFrame(X_resampled), pd.DataFrame(y_resampled, columns=['GrupyGrahama'])], axis=1)

#Wydruk danych w oknie Command Prompt - po Oversamplingu
print(Dataframe_after_oversampling_SMOTE['GrupyGrahama'].value_counts())

#Konwersja kolumny 'GrupyGrahama' do typu int64
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['GrupyGrahama'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['GrupyGrahama'].astype(np.int64)

#Konwersja kolumny 'GrupyGrahama' do typu object
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['GrupyGrahama'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['GrupyGrahama'].values.astype(np.object)

#Zaokrąglenie wartości pobranych z kolejnych kolumn do odpowiedniego miejsca po przecinku
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Etylen'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Etylen'].apply(lambda x: round(x, 2))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Propylen'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Propylen'].apply(lambda x: round(x, 2))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Acetylen'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Acetylen'].apply(lambda x: round(x, 3))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Tlenek'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Tlenek'].astype(np.int64)
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Tlen'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Tlen'].apply(lambda x: round(x, 2))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Azot'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Azot'].apply(lambda x: round(x, 2))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Dwutlenek'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Dwutlenek'].apply(lambda x: round(x, 2))
Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Wodor'] = Dataframe_after_oversampling_SMOTE['Wodor'].apply(lambda x: round(x, 1))

```

```

#Mieszanie danych po Oversamplingu, aby poprawić jakość treningu modelu poprzez zapobieganie nadmiernemu dopasowaniu sieci do danych (overfitting)
Dataframe_after_oversampling_SMOTE = shuffle(Dataframe_after_oversampling_SMOTE)

#Wybór danych wejściowych 'x' oraz wyjściowych 'y' do nauki sieci neuronowej
all_x = Dataframe_after_oversampling_SMOTE[['Etylen','Propylen','Acetylen','Tlenek','Tlen','Azot','Dwutlenek','Wodor']]
all_y = pd.get_dummies(Dataframe_after_oversampling_SMOTE.GrupyGrahama)

#Rozmiar tensorów danych wejściowych 'x' oraz wyjściowych 'y' - określenie ilości kolumn
n_x = len(all_x.columns)
n_y = len(all_y.columns)

# Podział danych na zbiór treningowy i testowy - 20 procent danych jest przeznaczane do testowania jakości predykcji sieci
train_x, test_x, train_y, test_y = train_test_split(all_x, all_y, test_size = 0.20, random_state = 100)

#Wyświetlenie danych w oknie Command Prompt po ich podziale na część treningową i testową
print("Wymiar train_x: ", train_x.shape)
print("Wymiar train_y: ", train_y.shape)
print("Wymiar test_x: ", test_x.shape)
print("Wymiar test_y: ", test_y.shape)
print("Czy train_x są puste: ", train_x.isnull().all().all())
print("Czy train_y są puste: ", train_y.isnull().all().all())
print("Czy test_x są puste: ", test_x.isnull().all().all())
print("Czy test_y są puste: ", test_y.isnull().all().all())
time.sleep(10)

#Definicja wejścia do modelu 'x' jako tensora zmiennoprzecinkowego, który będzie miał zmienną liczbę wierszy i n_x kolumn
x = tf.placeholder(tf.float32,[None, n_x], name="my_input")

#Definicja wyjścia y_true z modelu jako tensora zmiennoprzecinkowego, który będzie miał zmienną liczbę wierszy i n_y kolumn
y_true = tf.placeholder(tf.float32,[None, n_y])

#Definicja wagi 'W' jako zmiennej tensorowej, która będzie miała 'n_x' wierszy i 'n_y' kolumn
W = tf.Variable(tf.zeros([n_x, n_y]))

#Definicja biasu 'b' jako zmiennej tensorowej, która będzie miała 'n_y' wierszy
b = tf.Variable(tf.zeros([n_y]))

#Definicja ilości wartsw ukrytych oraz znajdujących się w nich neuronów
n_hidden_1 = 6

```

```

#Definicja modelu sieci neuronowej - funkcja 'multilayer_perceptron' przyjmuje wejście 'x', wagi 'weights' oraz biasy 'biases', i zwraca wartość z ostatniej warstwy sieci
def multilayer_perceptron(x, weights, biases):

    # Definicja pierwszej warstwy ukrytej sieci neuronowej
    layer_1 = tf.add(tf.matmul(x, weights['h1']), biases['b1'])
    layer_1 = tf.nn.sigmoid(layer_1)

    # Definicja wyjściowej warstwy sieci neuronowej
    out_layer = tf.matmul(layer_1, weights['out']) + biases['out']

    return out_layer

#Definicja wag jako słownika zawierającego zmienne tensorowe dla każdej warstwy sieci
weights = {
    'h1': tf.Variable(tf.truncated_normal([n_x, n_hidden_1])),
    'out': tf.Variable(tf.truncated_normal([n_hidden_1, n_y]))
}

#Definicja biasów jako słownika zawierającego zmienne tensorowe dla każdej warstwy sieci
biases = {
    'b1': tf.Variable(tf.truncated_normal([n_hidden_1])),
    'out': tf.Variable(tf.truncated_normal([n_y]))
}

#Definicja obiektu 'Saver', który będzie umożliwiał zapisywanie modelu
saver = tf.train.Saver()

#Wywołanie funkcji tworzącej model - definicja wyjścia z modelu
y_predicted = multilayer_perceptron(x, weights, biases)
tf.identity(y_predicted, name='my_output')

#Definicja funkcji straty (kosztu)
cost_function = tf.reduce_mean(tf.nn.softmax_cross_entropy_with_logits_v2(logits = y_predicted, labels = y_true))

#Definicja kroku treningowego z zastosowaniem optymalizatora ADAM
training_step = tf.train.AdamOptimizer(learning_rate=learning_rate).minimize(cost_function)

```



```

#Deklaracja tablic do zapisywania wyników testów i treningów sieci
accuracy_test_history = []
accuracy_train_history = []
loss_test_history = []
loss_train_history = []
MSE_test_history = []
MSE_train_history = []
epoch_history = []

#Inicjalizacja wszystkich zmiennych globalnych
init = tf.global_variables_initializer()

#Uruchomienie sesji TensorFlow
with tf.Session() as sess:

    #Inicjalizacja zmiennych
    sess.run(init)

    #Pętla trenująca model sieci neuronowej
    for epoch in range(training_epochs):

        #Wciśnięcie klawisza 'ESC' podczas trenowania modelu przerywa pętlę i zapisuje wyniki
        if msvcrt.kbhit():
            if ord(msvcrt.getch()) == 27:
                break

        #Wykonanie jednej iteracji treningowej (uczącej sieć)
        sess.run(training_step, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y})

        #Zapisanie wyników dokładności dla zbioru testowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
        if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
            correct_prediction = tf.equal(tf.argmax(y_predicted, 1), tf.argmax(y_true, 1))
            accuracy = tf.reduce_mean(tf.cast(correct_prediction, tf.float32))
            accuracy = sess.run(accuracy, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y})
            accuracy_test_history.append(round(accuracy, 3))
            epoch_history.append(epoch)

```

```

#Zapisanie wyników dokładności dla zbioru treningowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    correct_prediction = tf.equal(tf.argmax(y_predicted, 1), tf.argmax(y_true, 1))
    accuracy = tf.reduce_mean(tf.cast(correct_prediction, tf.float32))
    accuracy = sess.run(accuracy, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y})
    accuracy_train_history.append(round(accuracy, 3))

#Zapisanie wyników funkcji strat dla zbioru testowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    loss_test_history.append(round(sess.run(cost_function, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y}), 3))

#Zapisanie wyników funkcji strat dla zbioru treningowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    loss_train_history.append(round(sess.run(cost_function, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}), 3))

#Zapisanie wyników MSE dla zbioru testowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    pred_y = sess.run(y_predicted, feed_dict = {x: test_x})
    mse = tf.reduce_mean(tf.square(pred_y - test_y))
    MSE_test_history.append(round(sess.run(mse),3))

#Zapisanie wyników MSE dla zbioru treningowego do odpowiedniej tablicy, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    pred_y = sess.run(y_predicted, feed_dict = {x: train_x})
    mse = tf.reduce_mean(tf.square(pred_y - train_y))
    MSE_train_history.append(round(sess.run(mse),3))

```

```

#Zapisanie pośredniego modelu sieci neuronowej do pliku, po każdej epoce treningowej przypisanej do zmiennej 'krok_zapisywania_danych'
if epoch > 10 and epoch % krok_zapisywania_danych == 0:
    #Konwersja zmiennych na stałe
    minimal_graph = convert_variables_to_constants(sess, sess.graph_def, ["my_output"])
    #Zapis grafu modelu w formacie .pb
    tf.train.write_graph(minimal_graph, '.', model_koncowy_path + nazwa_modelu + '.pb', as_text=False)
    #Zapis stanu modelu do pliku
    save_path = saver.save(sess, model_koncowy_path + nazwa_modelu + '_GrupyGrahama', write_meta_graph=False)
    #Zamrożenie grafu modelu i zapisywanie go do pliku .pb
    freeze_graph.freeze_graph(input_graph=model_koncowy_path + nazwa_modelu + '.pb',
                              input_saver="",
                              input_binary=True,
                              input_checkpoint= model_koncowy_path + nazwa_modelu + '_GrupyGrahama',
                              output_node_names='my_output',
                              restore_op_name='save/restore_all',
                              filename_tensor_name='save/Const:0',
                              output_graph=model_koncowy_path + 'frozen_' + nazwa_modelu + '_epoka_' + str(epoch) + '.pb',
                              clear_devices=True,
                              initializer_nodes=")
    #Obliczenie dokładności predykcji na danych testowych
    correct_prediction = tf.equal(tf.argmax(y_predicted, 1), tf.argmax(y_true, 1))
    accuracy = tf.reduce_mean(tf.cast(correct_prediction, tf.float32))
    pred_y = sess.run(y_predicted, feed_dict = {x: test_x})
    mse = tf.reduce_mean(tf.square(pred_y - test_y))
    #Zapis wyników dopasowania modelu do pliku tekstowego
    text_file = open(model_koncowy_path + 'Dopasowanie_modelu_' + str(epoch) + '_epoka.txt', 'w')
    text_file.write(nazwa_modelu + ' - ' + ilosc_warstw + ' - ' + ilosc_neuronow + '\n\n')
    text_file.write('Dokładność modelu na danych uczących (ACCURACY): %s' % sess.run(accuracy, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}) + '\n')
    text_file.write('Dokładność modelu na danych testowych (ACCURACY): %s' % sess.run(accuracy, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y}) + '\n')
    text_file.write('Średni pierwiatek błędu (MSE): %s' % sess.run(mse) + '\n')
    text_file.write('Strata (LOSS) dla danych uczących: %s' % sess.run(cost_function, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}) + '\n')
    text_file.write('Strata (LOSS) dla danych testowych: %s' % sess.run(cost_function, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y}))
    text_file.close()

```

```

#Wyświetlenie na konsoli Command Prompt informacji o postępie uczenia sieci neuronowej
# Wyczyszczenie konsoli
subprocess.call("cls", shell=True)
#Wyświetlenie nagłówka z informacją o parametrach uczonej sieci
print (*****)
print (*      SIEĆ NEURONOWA (PERCEPTRON WIELOWARSTWOWY)      *)
print (*          + ilosc_warstw + ', ' + ilosc_neuronow + '          *)
print (*****)
print ()
print ()
#Wyświetlenie informacji o postępie uczenia
print (***** POSTĘP UCZENIA *****)
print ()
print (' - ilość wszystkich epok: ', training_epochs)
print ()
print (' - aktualna epoka: ', epoch)
print ()

# ***** Ostateczny zapis grafu sieci neuronowej po zakończeniu obliczeń *****
#Konwersja zmiennych na stałe
minimal_graph = convert_variables_to_constants(sess, sess.graph_def, ["my_output"])
#Zapis grafu modelu w formacie .pb
tf.train.write_graph(minimal_graph, '.', model_koncowy_path + nazwa_modelu + '.pb', as_text=False)
#Zapis stanu modelu do pliku
save_path = saver.save(sess, model_koncowy_path + nazwa_modelu + '_GrupyGrahama', write_meta_graph=False)

#Zamrożenie grafu modelu i zapisywanie go do pliku .pb
freeze_graph.freeze_graph(input_graph=model_koncowy_path + nazwa_modelu + '.pb',
    input_saver="",
    input_binary=True,
    input_checkpoint= model_koncowy_path + nazwa_modelu + '_GrupyGrahama',
    output_node_names='my_output',
    restore_op_name='save/restore_all',
    filename_tensor_name='save/Const:0',
    output_graph=model_koncowy_path + 'frozen_' + nazwa_modelu + '_graf_koncowy.pb',
    clear_devices=True,
    initializer_nodes=")

```

```

#Wypisanie informacji na konsoli Command Prompt o zapisanym modelu
print()
print()
print('Model zapisano w folderze: ', model_koncowy_path)
print()

#Obliczenie wartości predykcji i wyświetlenie ostatecznej dokładności modelu (accuracy) dla danych testowych
correct_prediction = tf.equal(tf.argmax(y_predicted, 1), tf.argmax(y_true, 1))
accuracy = tf.reduce_mean(tf.cast(correct_prediction, tf.float32))
print('Dokładność modelu (accuracy): ', sess.run(accuracy, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y}))

#Obliczenie i wyświetlenie ostatecznego średniego pierwiastka błędu (MSE) dla danych testowych
pred_y = sess.run(y_predicted, feed_dict = {x: test_x})
mse = tf.reduce_mean(tf.square(pred_y - test_y))
print('Średni pierwiatek błędu (MSE): ', sess.run(mse))

#Wyświetlenie ostatecznej wartości funkcji straty (LOSS) dla danych uczących
print('Strata (LOSS): ', sess.run(cost_function, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}))

#Zapisanie ostatecznych wyników do pliku tekstowego
text_file = open(model_koncowy_path + 'Dopasowanie_modelu.txt', 'w')
text_file.write(nazwa_modelu + ' - ' + ilosc_warstw + ' - ' + ilosc_neuronow + '\n\n')
text_file.write('Dokładność modelu na danych uczących (ACCURACY): %s' % sess.run(accuracy, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}) + '\n')
text_file.write('Dokładność modelu na danych testowych (ACCURACY): %s' % sess.run(accuracy, feed_dict = {x: test_x, y_true: test_y}) + '\n')
text_file.write('Średni pierwiatek błędu (MSE): %s' % sess.run(mse) + '\n')
text_file.write('Strata (LOSS): %s' % sess.run(cost_function, feed_dict = {x: train_x, y_true: train_y}))
text_file.close()

#Zapis wykresu dokładności modelu dla danych testowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, accuracy_test_history)
for a, b in zip(epoch_history, accuracy_test_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel('Epochs')
plt.ylabel('Accuracy (TEST)')
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Accuracy_dla_danych_testowych')
plt.close()

```

```
#Zapis wykresu dokładności modelu dla danych treningowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, accuracy_train_history)
for a, b in zip(epoch_history, accuracy_train_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel('Epochs')
plt.ylabel('Accuracy (TRAIN)')
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Accurarcy_dla_danych_uczacych')
plt.close()
```

```
#Zapis wykresu funkcji strat modelu dla danych testowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, loss_test_history)
for a, b in zip(epoch_history, loss_test_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel('Epochs')
plt.ylabel('Loss (TEST)')
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Strata_dla_danych_testowych')
plt.close()
```

```
#Zapis wykresu funkcji strat modelu dla danych treningowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, loss_train_history)
for a, b in zip(epoch_history, loss_train_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel('Epochs')
plt.ylabel('Loss (TRAIN)')
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Strata_dla_danych_uczacych')
plt.close()
```

```
#Zapis wykresu MSE dla danych testowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, MSE_test_history)
for a, b in zip(epoch_history, MSE_test_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel('Epochs')
plt.ylabel('Mean Squared Error (TEST)')
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Sredni_blad_kwadratowy_test')
plt.close()
```

```
#Zapis wykresu MSE dla danych treningowych w zależności od ilości epok
plt.plot(epoch_history, MSE_train_history)
for a, b in zip(epoch_history, MSE_train_history):
    plt.text(a, b, str())
plt.grid()
plt.xlabel("Epochs")
plt.ylabel("Mean Squared Error (TRAIN)")
plt.savefig(model_koncowy_path + 'Sredni_blad_kwadratowy_train')
plt.close()
```

```
#Tworzenie ramki dla wartości pobranych z tabel i ich zapis do pliku CSV
df = pd.DataFrame({
    "Epoki": epoch_history,
    "Accuraccy_test": accuracy_test_history,
    "Accuraccy_train": accuracy_train_history,
    "Loss_test": loss_test_history,
    "Loss_train": loss_train_history,
    "MSE_test": MSE_test_history,
    "MSE_train": MSE_train_history
})
df.to_csv(model_koncowy_path + 'Wartosci_z_tabel.csv', index=False)
```