

Ryszard Kłos

kmdr dr hab. inż. Ryszard Kłos
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
81 – 103 Gdynia 3 ul. Śmidowicza 69
Zakład Technologii Prac Podwodnych
tel. +58 626 27 46 fax.+58 625 38 82
e-mail: skrzyn@wp.pl

REDUKCJA WYMIARU SYTUACJI PROBLEMOWEJ METODĄ ANALIZY CZYNNIKOWEJ

W artykule przedstawiono zastosowanie analizy czynnikowej do analizy porównawczej wybranych parametrów hematologicznych (rozmaz 3-parametryczny, zawartość hematokrytu, C3c, C4, IgG, IgA, IgM, CRP, fibrynogenu oraz czynnik XII układu krzepnięcia) po ekspozycji hiperbarycznej i 24godz po zakończeniu dekompresji oraz technologicznych parametrów produkcji wapna sodowanego.

Słowa kluczowe: analiza czynnikowa

REDUCING THE OVERALL SIZE OF PROBLEMS BY THE USE OF FACTOR ANALYSIS

This paper discusses the application of factor analysis when used to compare the following selected blood parameter properties: A three-parameter smear, hematocrit, C3c, C4, IgG, IgA, IgM, CRP, fibrinogen concentrations, and the level of factor XII), just before, and after exposure to pressure changes, and 24-hours after the completion of decompression and the sodalime production technological process.

Keywords: factorial analysis

WSTĘP

W podejściu klasycznym, modeli matematycznych poszukiwano metodami analitycznymi. W zastosowaniach inżynierskich często poszukuje się ich metodami półempirycznymi. Obecnie obserwuje się także wzrost zainteresowania modelami empirycznymi, poszukiwanymi zazwyczaj statystycznymi metodami eksploracji danych EDA¹ zwanymi także *Data Mining*². Jedną z nich jest *analiza czynnikowa – FA*.

Pod pojęciem *analizy czynnikowej* należy rozumieć trzy metody określone w języku angielskim jako: *factorial analysis*, *factor analysis* oraz *component analysis* [3]. Pierwsza dotyczy planowania eksperymentu, dwie pozostałe dotyczą

¹Exploratory Data Analysis – EDA

²dawniej używano także określeń *Data Digging*

zastępowania zmiennych mniejszą ich liczbą³. Jako *FA* będą tutaj rozważane metody statystyczne służące do zastąpienia zmiennych niezależnych opisujących dany obiekt⁴ nowym ich zestawem, wygodniejszym do praktycznego stosowania⁵. Istnieją także inne metody takiej redukcji. Jedną z szeroko stosowaną w technice⁶ jest półempiryczna metoda *analizy wymiarowej Buginhama* [8].

METODA

Każdy system lub przebiegający w nim proces charakteryzuje się wieloma parametrami technicznymi, ekonomicznymi, estetycznymi itp. Zwykle część z nich jest ze sobą silnie powiązana⁷. Istnieje możliwość określenia jednego parametru zastępczego, opartego na cechach pierwotnych⁸, między którymi występują silne powiązania. Przy wielu zagadnieniach statystycznych dąży się do tego, aby analizowane zmienne były niezależne. W *FA* dążenie to uwidacznia się poprzez poszukanie i zawieranie skorelowanych cech w jednym parametrze uzyskując w ten sposób zestaw cech niezależnych.

Korelacje

Poszukiwanie korelacji pomiędzy cechami pierwotnymi powinno stanowić normę postępowania już dla średnio uwikłanych zagadnień. W wielu metodach analitycznych⁹ występowanie interakcji pomiędzy zmiennymi prowadzi do błędnych wniosków lub komplikuje sytuację problemową do tego stopnia, że nie jest możliwe prawidłowe modelowanie badanych zjawisk [np. 11].

Powszechnie używaną miarą korelacji jest współczynnik korelacji – r , rozumiany tutaj jako *współczynnik korelacji liniowej Pearsona*¹⁰.

Standaryzacja

W celu uniezależnienia zmiennych od ich miana¹¹ wygodnie jest przeprowadzić ich standaryzację polegającą na odjęciu od nich wartości średniej i podzieleniu przez odchylenie standardowe.

Zabieg ten jest także wymagany ze względu na stosowaną metodę wnioskowania, gdyż *FA* opiera się na obracaniu układu współrzędnych. Z matematycznego punktu widzenia polega to na mnożeniu wartości zmiennych przez funkcje trygonometryczne kąta obrotu i dodawaniu ich do siebie¹² [9]. Często dodawanie wartości mianowanych nie ma sensu fizycznego¹³, lecz dla zmiennych standaryzowanych takie niebezpieczeństwo nie istnieje.

³redukcja wymiarowości sytuacji problemowej

⁴np. szereg parametrów technicznych urządzenia

⁵np. pozwalającym na jednoznaczne sklasyfikowanie urządzenia, jako wysokiej czy niskiej klasy – podobnie jak przy analizie wymiarowej, za pomocą liczby Reynoldsa można sklasyfikować rodzaje przepływu na trzy grupy: laminarny, przejściowy i burzliwy

⁶inżynierii chemicznej, procesowej, sanitarnej itp.

⁷np. zużycie paliwa z masą samochodu i uzyskiwanym przyspieszeniem

⁸który pozwalałby, np. na sklasyfikowanie systemu, rozumiane, jako kwestię do rozstrzygnięcia w sytuacji problemowej

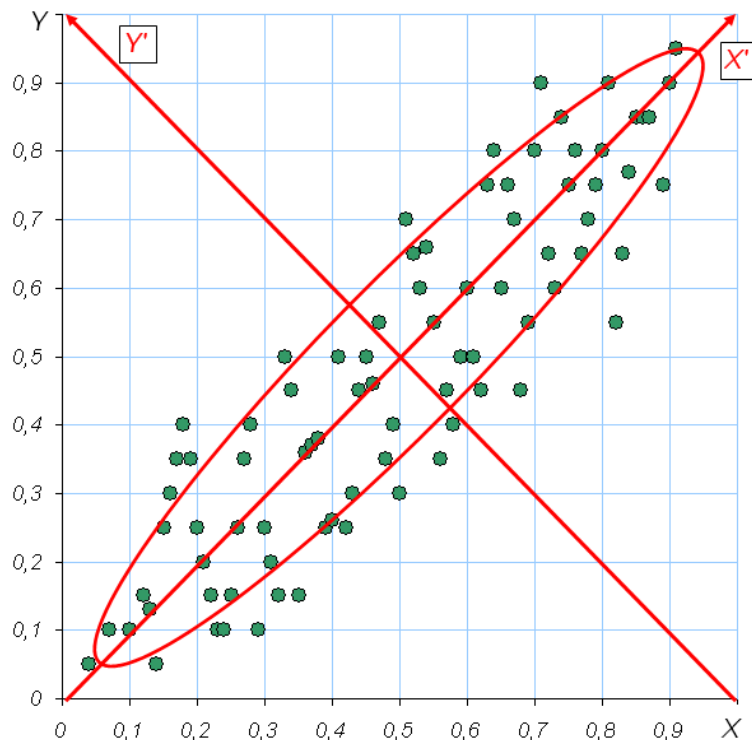
⁹nie tylko statystycznych

¹⁰inną, popularną miarą korelacji jest *współczynnik Spearmana* wykorzystujący tę samą zależność, co współczynnik Pearsona z tą różnicą, że danymi są rangi (wartości porządkowe dla danych) nie zaś otrzymane wyniki. Interpretacja współczynnika Spearmana jest taka sama, lecz nie jest zawężana do regresji liniowej. Współczynnik ten wykorzystywany jest przy testowaniu hipotez nieparametrycznych, określaniu korelacji bez względu na rozkład statystyczny, określaniu regresji dowolnego typu itp.

¹¹wymiaru fizycznego

¹²czyli tworzeniu ich kombinacji liniowych

¹³często nie są one addytywne



Rys.1. Przykładowy wykres rozrzutu z elipsą koncentracji i jej osiami głównymi

Elipsa koncentracji

Gdy istnieje dostatecznie silna korelacja liniowa pomiędzy zmiennymi dwuwymiarowymi, to ułożą się one w postać podobną do elipsy koncentracji przedstawionej na **rys.1**¹⁴. Z rysunku tego wynika, że przedstawione na nim dane są silnie skorelowane, a zastąpienie układu współrzędnych XY przez osie elipsy koncentracji X'Y' daje możliwość charakteryzacji punktów pomiarowych jedynie za pomocą zmiennej X' bez znacznej utraty informacji.

W pokazanym na **rys.1** przypadku redukcja wymiarów będzie wiązała się z obrotem układu współrzędnych o kąt 45°, ustalającego osie układu współrzędnych wzdłuż osi głównych elipsy rozrzutu, powodując diagonalizację macierzy korelacji [2,6]:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{xy} \\ \rho_{xy} & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{obrot o } 45^\circ} \underline{R}' = \begin{bmatrix} a^2 & 0 \\ 0 & b^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

- \underline{R} – macierz korelacji
- ρ – współczynnik korelacji *Pearsona*
- $a^2 \wedge b^2$ – wartości diagonalne macierzy korelacji

Wielkości poza przekątną w macierzy korelacji wskazują, jak dobrze wartości są skorelowane pomiędzy sobą. Dla danych rzeczywistych kąt obrotu może różnić się od 45° a wartości współczynników korelacji utworzą wtedy tzw. *wartości korelacji resztkowej* omówione dalej.

¹⁴uogólniając na większą liczbę wymiarów mówi się o hiperelipsie koncentracji

Składowe główne

Po dokonaniu obrotu, z założenia całkowity rozrzut zawarty w danych nie może się zmienić¹⁵, wobec czego: $a^2+b^2=1+1=2$. Nowe zmienne, powstałe ze zmiennych wyjściowych po obrocie układu, noszą nazwę *składowych głównych*. Mają one tę właściwość, że są nieskorelowane, posiadają wartości średnie równe zero, a różnią się jedynie rozrzutem¹⁶. Związek pomiędzy składowymi głównymi, a pierwotnymi cechami można dla konkretnej cechy zapisać, jako:

$$\forall i>2 \quad X_i = a_{i1} \cdot X'_1 + a_{i2} \cdot X'_2 + \dots + a_{ik} \cdot X'_k \quad (2)$$

gdzie:

X'_i – nowa zmienna

X_i – stara zmienna

k – liczba składowych głównych

a_{ik} – ładunki czynnikowe

Przyczynek swoisty i wariancja swoista

Analiza, w której uwzględnia się wszystkie składowe główne nie prowadzi do redukcji wymiarowości sytuacji problemowej. Jeśli natomiast niektóre składowe główne zostają pominięte, to przykładowo przy uwzględnieniu jedynie dwóch wartości, równanie (2) przybierze postać:

$$X_i = a_1 \cdot X'_1 + a_2 \cdot X'_2 + E_i \quad (3)$$

gdzie:

E_i – przyczynek swoisty dla cechy i

Przyczynek swoisty to różnica pomiędzy wartością cechy wyrażoną przez wszystkie nowe zmienne a wartością przy zaniechaniu zmiennych uznanych za mało istotne dla uproszczonego modelu. Wynika stąd, że przyczynek swoisty jest miarą dokładności odwzorowania przy pomocy zredukowanej liczby nowych zmiennych cechy rozpatrywanego systemu. Zmienne X'_1 i X'_2 wygodnie jest poddać standaryzacji, po czym nazywane są one czynnikami. Wariancja zmiennej X_i z (3) wyniesie:

$$V(X_i) = a_1^2 + a_2^2 + V(E_i) \quad (6)$$

gdzie:

$a_1^2 + a_2^2$ – zasoby zmienności wspólnej

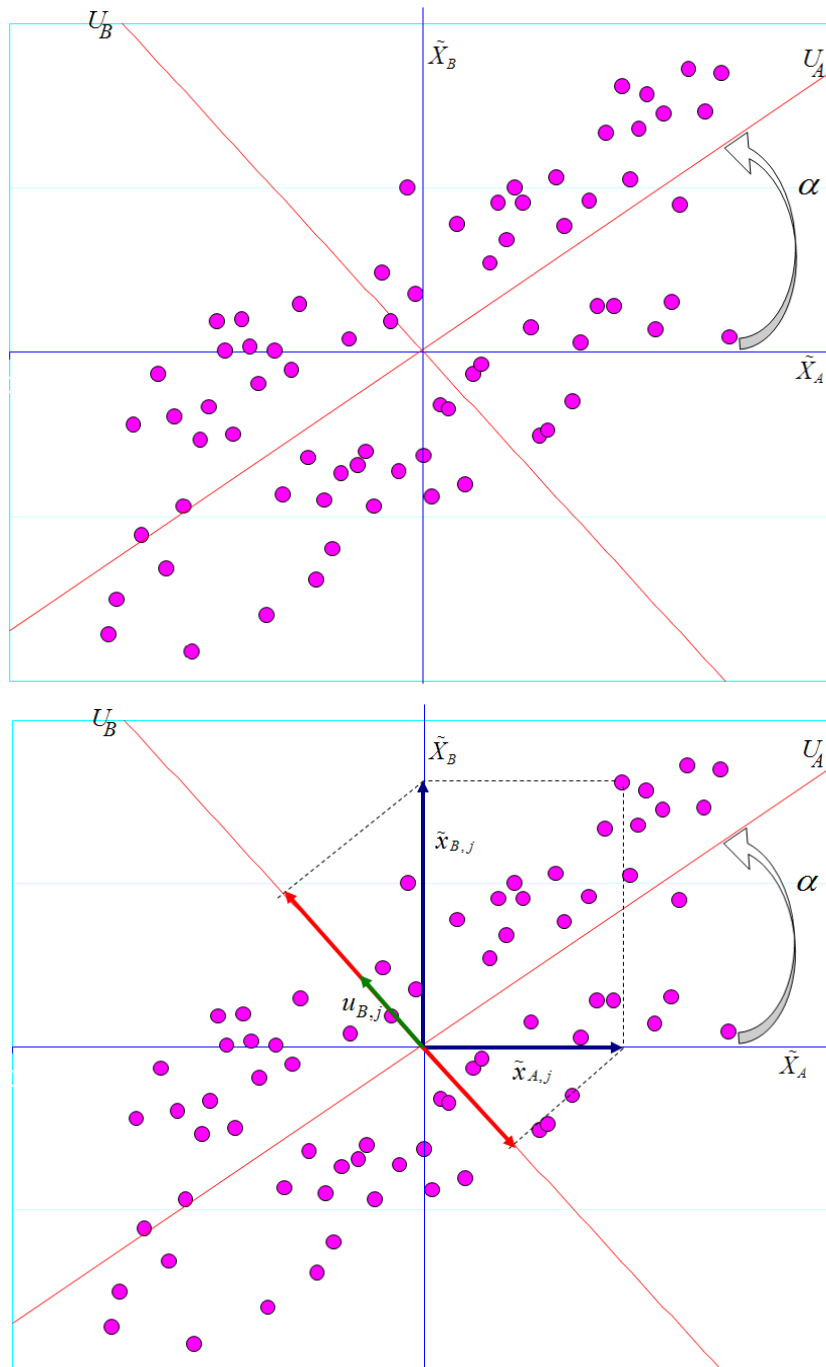
$V(E_i)$ – wariancja swoista

Uproszczenie struktury czynnikowej

Po wykonaniu wyżej opisanych operacji, zależności pomiędzy cechami mierzonymi a czynnikami mogą być nadal trudne do interpretacji. Do ułatwienia ich analizy, opracowano strategię upraszczania struktury czynnikowej. Ładunki czynnikowe można poddać powtórnie jakiemuś obrotowi tak, aby jedne z nich osiągnęły duże a inne bliskie zeru wartości – tworzenie tzw. *struktury prostej*.

¹⁵całkowity rozrzut danych równy jest sumie wszystkich wariancji

¹⁶wariancją



Rys.2. przykładowy wykres N obserwacji dla dwóch zmiennych standardowych

Strategie te wygodnie realizować za pomocą odpowiednich programów komputerowych¹⁷. Najczęściej stosowaną strategią jest rotacja typu *varimax*, polegająca na maksymalizacji wariacji dla poszczególnych cech. Po wykonaniu takiej rotacji wyjściowe zmienne układają się w pobliżu osi wybranych czynników w przestrzeni.

¹⁷np. STATISTICA

Rotacja typu varimax

Dla dwóch zmiennych standardowych na **rys.2** pokazano przykładowe wyniki N obserwacji, przy czym ze względu na zastosowaną standaryzację środek układu współrzędnych został wybrany w punkcie odpowiadającym średnim próbkom. Każdy punkt na tym wykresie oznacza zmierzony w doświadczeniu wektor cech obiektu¹⁸. W takim przypadku można dopasować linię U_A do chmury punktów¹⁹, która wraz z prostopadłą osią U_B utworzy nowy układ współrzędnych obrócony od wyjściowego o kąt α . Należy zwrócić uwagę na fakt, że obrotu układu współrzędnych dokonano tak, aby wzdłuż osi U_A zyskać największą zmienność. Ten typ rotacji nazywa się maksymalizujący wariancję²⁰ przy jednoczesnej minimalizacji tej zmienności wokół osi U_B . Ponieważ układ $U_A \perp U_B$ jest ortogonalny to nowe zmienne stają się niezależne. Związek pomiędzy nowymi i starymi zmiennymi można znaleźć z rzutowania wektorów $\tilde{x}_{A,i}$ oraz $\tilde{x}_{B,i}$ ²¹ na osie U_A i U_B . Będą one tworzyć następujące kombinacje liniowe [9]:

$$\begin{cases} U_A = \tilde{X}_A \cdot \cos \alpha + \tilde{X}_B \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \\ U_B = \tilde{X}_A \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \tilde{X}_B \cdot \cos \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_A = \tilde{X}_A \cdot \cos \alpha + \tilde{X}_B \cdot \sin \alpha \\ U_B = -\tilde{X}_A \cdot \sin \alpha + \tilde{X}_B \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

 \tilde{A}_i – przyczynik swoisty dla cechy i

Korelacja resztkowa

W analizie przestrzennej składowych głównych, po wyodrębnieniu wybranej liczby czynników, pozostaje jeszcze jakaś zmienność wokół osi, wzdłuż której wariancja jest maksymalna. Można ją zaniedbać lub starać się wyodrębnić następną, ortogonalną składową główną. Podstawowym kryterium będzie tutaj procent wytłumaczenia zjawiska. Jak wspomniano wcześniej analiza, w której uwzględnione zostaną wszystkie, możliwe składowe główne nie prowadzi do redukcji wymiarowości sytuacji problemowej. Należy zdecydować, jaka część informacji²² może być utracona bez szkody dla wyjaśnianego problemu badawczego. Nowa struktura zmiennych niezależnych może być dodatkowo upraszczana i optymalizowana. Działania takie powinny być wspomagane komputerowo, gdyż proste w założeniach rachunki algebry liniowej są uciążliwe w wykonaniu.

Podsumowanie

Przykład połączenia silnie skorelowanych zmiennych w jeden czynnik pokazuje ideę minimalizowania liczby analizowanych zmiennych²³ zastępując je analizą składowych głównych. Dodatkowo, składowe główne są ortogonalne a tym samym nieskorelowane i niezależne, posiadają wartość średnią równą zero, a różnią się jedynie rozrzutem, co jest warunkiem podstawowym przy zastosowaniu niektórych metod analizy wyników pomiarów.

¹⁸ czyli wynik pomiaru – np. na **rys.2** przykładowy punkt o współrzędnych $(\tilde{x}_{A,i}; \tilde{x}_{B,i})$

¹⁹ np. metodą regresji liniowej

²⁰ varimax

²¹ dla i -tego pomiaru

²² zmienności

²³ czyli redukcję wymiarowości sytuacji problemowej

DYSKUSJA

Jako przykłady zastosowania FA zostaną tutaj przytoczone badania nad ulepszeniem procesu technologicznego produkcji wapna sodowanego oraz analiza wyników zmian morfologicznych w krwi nurków podczas ekspozycji ciśnieniowych.

Wapno sodowane

Wapno sodowane jest sorbentem ditlenku węgla. Skrócony opis parametrów laboratoryjnego otrzymywania próbek do badań pokazano w **tab.1**. Pełen opis procesu technologicznego podano wcześniej i nie będzie tutaj przytaczany²⁴ [1].

Już dla stosunkowo prostej sytuacji problemowej analiza współczynników korelacji pomiędzy parametrami procesu pokazuje, że kilka z nich jest silnie ze sobą skorelowanych – **tab.2** i **rys.4**²⁵. Trzy pierwsze wartości własne macierzy korelacji zebrano w **tab.3** i **rys.5**²⁶. Wykres przedstawiony na **rys.5** jest pomocniczą metodą oglądową do ustalenia liczby zmiennych, które należy pozostawić²⁷. Korzystając z tego kryterium trudno czasami zdecydować o liczbie zmiennych dla konkretnego przypadku. Innym popularnym sposobem jest tzw. *kryterium Kaisera* [2] – należy pozostawić te składowe główne, które posiadają wartości własne większe lub w pobliżu jedności.

Pozostawiając do dalszej analizy dwa czynniki należy sprawdzić jak odtwarzają one macierz korelacji obliczając *korelacje resztkowe*. Są one różnicą pomiędzy współczynnikami korelacji w macierzy wyjściowej a korelacjami obliczonymi na podstawie wartości czynnikowych – **tab.4**. Widać, że jedynie różnica wynosząca -0,14 odbiega od pozostałych, które są niewielkie – czyli opis jest zadawalający. Struktura czynnikowa jest dość czytelna nawet bez zastosowania dodatkowej rotacji.

Tabela 1

Dane z procesu otrzymywania wapna sodowego

Lp	Nr PP	Zawartość		temperatura gaszenia [°C]	czas stabilizacji [min]	czas ochronny ²⁸ [min]
		NaOH	H ₂ O			
		[% _m]	[% _m]			
1	3	1,6	15,34	95	75	76,03
2	8	1,8	13,35	100	70	77,15
3	9	2,3	15,19	95	70	81,50
4	10	2,9	13,89	90	70	83,03
5	11	3,5	12,57	80	90	70,07
6	12	3,8	15,21	60	120	59,65
7	13	2,6	16,52	95	70	86,22
8	14	2,6	7,8	95	70	48,18
9	15	2,6	11,85	95	70	70,40
10	16	2,6	16,52	95	70	91,45
11	17	2,6	19,76	95	70	77,57
12	18	2,6	25,92	95	70	24,75

²⁴porównaj także **tab.8**

²⁵nie uwzględniono czasu ochronnego działania, gdyż jest on dla tej sytuacji problemowej zmienną zależną

²⁶jest to tzw. „wykres osypiska”

²⁷pozostawia się ich tyle ile znajduje się przed osuwiskiem – poza płaską częścią wykresu

²⁸wg STANAG 1411

Tabela 2

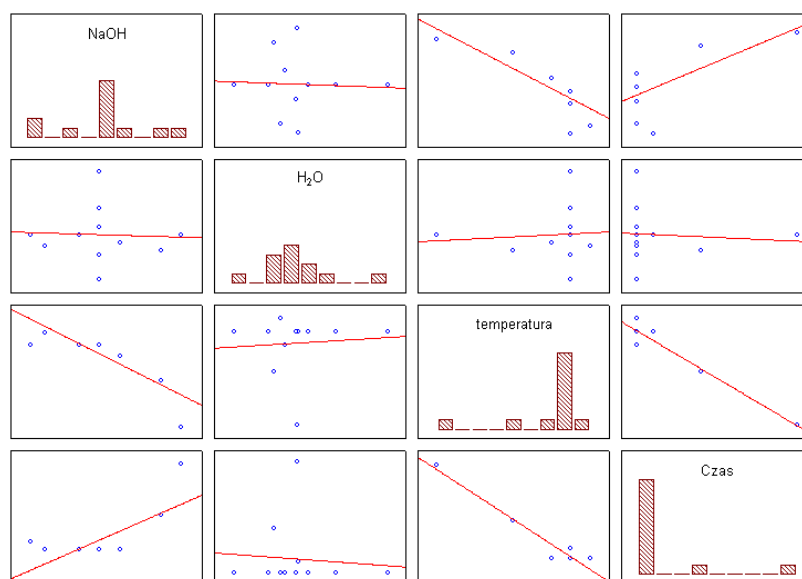
Współczynniki korelacji

Zmienna		Zawartość		temperatura gaszenia [°C]	czas stabilizacji [min]
		NaOH	H ₂ O		
		[% _m]	[% _m]	[°C]	[min]
Zawartość [% _m]	NaOH		-0,05	-0,82	0,71
	H ₂ O			0,08	-0,08
temperatura gaszenia [°C]					-0,98

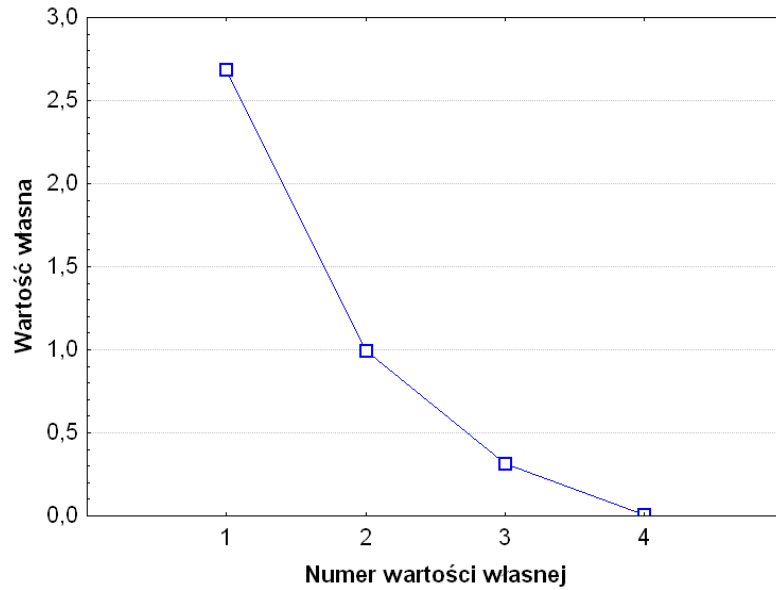
Tabela 3

Wartości własne

Lp	Wartość własna	Udział procentowy w wariancji	Skumulowana wartość własna	Skumulowany udział procentowy
1	2,68866	67,22	2,69	67,22
2	0,99168	24,79	3,68	92,01
3	0,31138	7,78	3,99	99,79



Rys.4. Wyniki analizy korelacji pomiędzy parametrami procesu otrzymywania wapna sodowanego przedstawionych w **tab.2**

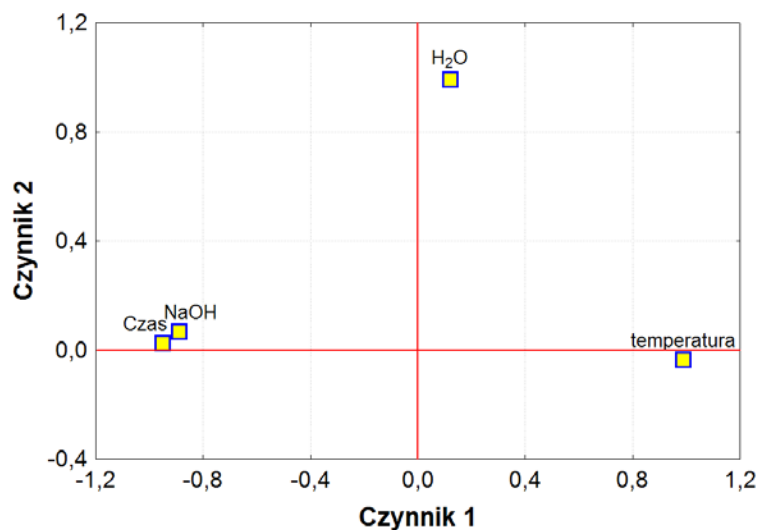


Rys.5. Wykres wartości własnych²⁹ dla danych surowych stanowiący ilustrację do tab.3

Tabela 4

Korelacje reszkowe

Zmienna		Zawartość		temperatura gaszenia	czas stabilizacji
		NaOH	H ₂ O		
		[% _m]	[% _m]	[°C]	[min]
Zawartość [% _m]	NaOH		-0,01	0,06	-0,14
	H ₂ O			0,00	0,01
temperatura gaszenia [°C]					-0,03



Rys.6. Struktura czynnikowa przed rotacją

²⁹ tzw. „wykres osuwiska”

Tabela 5

Ładunki czynnikowe przed rotacją

Zmienna		Czynnik 1	Czynnik 2
Zawartość [% _m]	NaOH	-0,888	0,067
	H ₂ O	0,120	0,993
temperatura gaszenia [°C]		0,989	-0,036
czas stabilizacji [min]		-0,952	0,025
wariancja wyjaśniona		2,689	0,992
udział		0,672	0,248

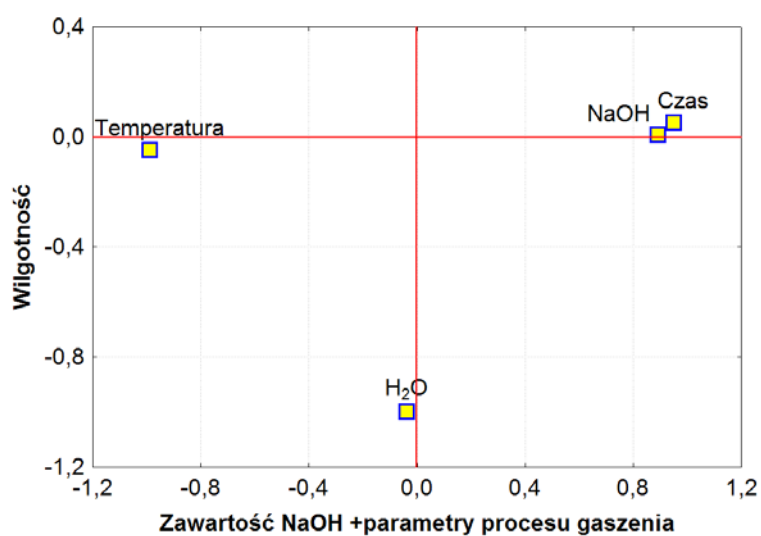
Rys.7. Struktura ładunków czynnikowych po rotacji typu *varimax*

Tabela 6

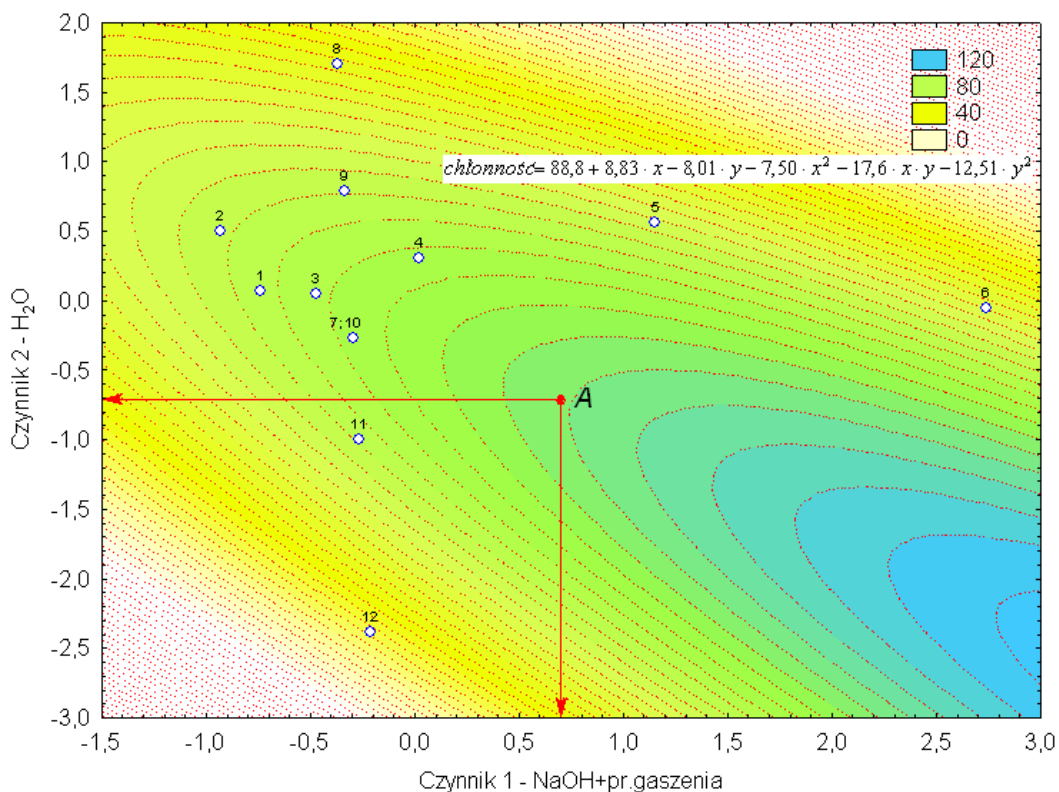
Ładunki czynnikowe po rotacji

Zmienna		Czynniki	
		Zawartość NaOH+ parametry procesu gaszenia	Wilgotność
Zawartość [% _m]	NaOH	0,891	0,007
	H ₂ O	-0,037	-0,999
temperatura gaszenia [°C]		-0,989	-0,046
czas stabilizacji [min]		0,951	0,054
wariancja wyjaśniona		2,677	1,003
udział		0,669	0,251

Pokazano ją na **rys.6** zaś wartości liczbowe ładunków czynnikowych w **tab.5**. Można ją jednak nieznacznie poprawić stosując rotację. Ładunki czynnikowe po rotacji typu *varimax* pokazano na **rys.7** a ich wartości liczbowe w **tab.6**.

Jak widać z **tab.6** i jak zaznaczono na **rys.7** pierwszy z czynników jest silnie związany z zawartością NaOH jako katalizatora reakcji oraz parametrami procesu gaszenia wapna palonego, natomiast drugi jest związany jedynie z zawartością wilgoci. **Rys.8** przedstawia wykres warstwiczny aproksymacji płaszczyzną drugiego stopnia wyników pomiarów³⁰ czasu ochronnego w standaryzowanych współrzędnych czynnikowych przyjętych z **tab.6** po rotacji typu *varimax*. Z analizy wykresu widać, że prawdopodobnie istnieje możliwość zwiększenia wartości czasu ochronnego w kierunku wartości ekstrapolowanych³¹. Dla potwierdzenia wybrano punkt A stosunkowo bliski innym punktom pomiarowym o standardowych współrzędnych czynnikowych A(0,7;-0,7). Przeliczenie współrzędnych czynnikowych na jawne pokazano w **tab.7**. Obliczone współrzędne procesu należy zwalidować poprzez przeprowadzenie eksperymentu, do którego wytyczne podano w **tab.8**.

Innym przykładem zastosowania *FA* będą badania nad bezpieczeństwem dekompresji. Poddając człowieka działaniu zwiększonego ciśnienia³² gazów wchodzących w skład mieszaniny oddechowej narasta wysycenie organizmu tymi gazami, w przybliżeniu proporcjonalnie do wzrostu ciśnienia i czasu ekspozycji. W większości zachodzących zjawisk homeostaza³³ w warunkach hiperbarycznych



Rys.8. Wyniki pomiarów czasu ochronnego vs standaryzowane wartości czynnikowe po rotacji *varimax*

³⁰na wykresie zaznaczono punkty pomiarowe wraz z ich liczbami porządkowymi z **tab.1**

³¹należy być ostrożnym przy wyciąganiu daleko idących wniosków przy wykorzystaniu ekstrapolowanych wartości i nie próbować odchodzić zbyt daleko od wartości zmierzonych

³²ekspozycja hiperbaryczna

³³zdolność żywego organizmu do zachowywania względnie stałego stanu równowagi (np. składu krwi, temperatury ciała) przez odpowiednią koordynację i regulację procesów życiowych

Tabela 7

Obliczenia jawnych współrzędnych procesu dla punktu A na podstawie współrzędnych czynnikowych

Wartości czynnikowe		Zmienna procesu	Współczynniki (wartości) czynnikowe		Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Obliczona wartość standardowa	$x = s \cdot \tilde{x} + \bar{x}$	
NaOH+	H ₂ O		NaOH+	H ₂ O					
					\bar{x}	s	\tilde{x}		
0,7	-0,7	zawartość	NaOH	0,335	-0,040	2,63	0,6077	0,254	2,8 % _m
			H ₂ O	0,039	-1,001	15,33	4,4422	0,528	18,6 % _m
		temperatura		-0,370	0,006	90,83	10,8362	-0,262	88,0°C
		czas		0,355	0,004	76,25	14,9431	0,247	79,9min

jest podobna do mechanizmów zachodzących przy normobarii. Występują jednak pewne fenomeny, ujawniające się w większym stopniu w hiperbarii lub występujące tylko w tych warunkach. Podobnie jak w normobarii, tak i w hiperbarii podstawową rolę w procesach wysycania i desaturacji organizmu odgrywa krew, która za pomocą zjawiska dyfuzji zachodzącego w pęcherzykach płucnych wymienia gazy z otoczeniem, a następnie rozpuszczone fizycznie lub związane chemicznie rozprawdza po całym organizmie i ponownie dzięki zjawisku dyfuzji wymienia ze wszystkimi tkankami.

Występowanie w warunkach hiperbarii szeregu niebezpiecznych dla życia zjawisk znajduje też swoje odzwierciedlenie w chemizmie³⁴ krwi. Zebrano dotąd

Tabela 8

Opis procesu technologicznego otrzymania próbki do badań

Opis procesu technologicznego otrzymania próbki A do badań						
Do mieszalnika zetowego o pojemności 4 dm ³ zadozować 40 g wodorotlenku sodu rozpuszczonego w 1200 g wody pitnej oraz wsypać porcjami 1000 g wapna niegaszonego mielonego utrzymując temperaturę 88°C. Po zakończeniu procesu gaszenia pastę wodorotlenku wapnia i wodorotlenku sodu sezonować w temperaturze 20°C przez 24 godz, następnie przy pomocy wyłaczarki ślimakowej uformować na wyłoczki o średnicy 2 mm i ułożyć na tacach. Po zakończeniu formowania produkt na tacach umieścić w suszarce elektrycznej i suszyć w temperaturze 140°C przez 50 min. Uzyskany produkt sezonować przez 2 godz i nakropić 150 g wody pitnej w celu uzyskania zawartości wilgoci na poziomie około 18,6% _m .						
MASA NaOH i PARAMETRY PROCESU						
Nr partii	Masa NaOH	Temperatura gaszenia	Czas gaszenia	Czas sezonowania	Temperatura suszenia	Czas suszenia
	[g]	[°C]	[min]	[h]	[°C]	[min]
A	40	88	80	24	140	50

³⁴całokształt właściwości i przemian chemicznych materii

szereg danych na temat zmian zachodzących we krwi, aktywowanych przebywaniem pod zwiększonym ciśnieniem i późniejszą dekompresją. W kraju badaniami tymi zajmowało się kilku autorów. Analiza wyników badań nie ujawniła jednoznacznie mechanizmów zachodzących procesów, koniecznym stało się zastosowanie modeli i metod statystyki matematycznej do oceny istotności wyprowadzanych wniosków. Początkowo starano się dochodzić istotności różnic pomiędzy danymi wyjściowymi a wynikami pomiarów po dekompresji za pomocą wnioskowania statystycznego. Jednakże tak obrany sposób oceny istotności zmian umożliwia jedynie wyizolowaną ocenę wybranego parametru. Podejście takie nie daje obrazu istniejących pomiędzy nimi powiązań. Wygodnym byłoby zastosowanie innej metody analizy efektów przeprowadzonych badań, która dawałaby możliwość w sposób niezależny od intencji opracowującego wyniki określić hierarchię istotności zmian poszczególnych parametrów w wybranym ich zestawie. Dodatkowo, jeżeli metoda ta dawałaby przynajmniej przybliżony obraz powiązań pomiędzy poszczególnymi zmiennymi, to mogłaby się przyczynić do weryfikacji postulowanych mechanizmów biochemicznych. Wydaje się, że zastosowanie FA przyczyniło się do łatwiejszej weryfikacji istotności analizowanych parametrów i ich hierarchizacji [4].

Zmiany hematologiczne indukowane hiperbarycznie

FA poddano dane uzyskane podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych przeprowadzonych w Akademii Marynarki Wojennej.

Wszystkie przedstawione tutaj wyniki badań uzyskano wyłącznie od ochotników, żołnierzy zawodowych z Ośrodka Szkolenia Nurków i Płetwonurków WP, jednostek nurkowych MW RP oraz płetwonurków, zrzeszonych w klubach PTTK i LOK. Badaniami objęto 37 nurków, którzy wykonali łącznie 61 osobo–nurkowań. Wycinek przykładowych wyników pomiarów zamieszczono w **tab.9** – pełne wyniki opublikowano wcześniej [4]. Wszystkie wyniki zestandaryzowano, lecz w analizie czynnikowej uwzględniono jedynie 26 przypadków, dla których dysponowano kompletem wyników³⁵.

Przeprowadzenie oznaczeń laboratoryjnych

W przeprowadzonych badaniach oceniano zmiany w zakresie wybranych parametrów laboratoryjnych. Bezpośrednio przed rozpoczęciem, 1 godz po zakończeniu dekompresji i 24 godz po zakończeniu każdej ekspozycji ciśnieniowej wykonywano następujące oznaczenia: morfologię krwi z automatycznym rozmazem 3–parametrycznym, zawartość hematokrytu, C3c [mg/dl], C4 [mg/dl], IgG [mg/dl], IgA [mg/dl], IgM [mg/dl], CRP [mg/dl], fibrynogenu (FIB) [mg/dl] oraz czynnik XII układu krzepnięcia [%].

Próbki krwi pobierano z żyły łokciowej 3–krotnie, dla każdej osobo–dekompresji. Krew do badań układu krzepnięcia pobierano bezpośrednio do próbówki z polipropylenu napełnionej 3,1% roztworem cytrynianu sodu, w stosunku 9:1³⁶ i odstawiano do chłodziarki o temperaturze ok. +4°C do momentu opracowania³⁷. Krew do oznaczeń białek osocza pobierano na skrzep do szklanej próbówki bez jakichkolwiek dodatków i bezpośrednio po pobraniu odstawiano do łaźni wodnej z lodem, celem zabezpieczenia przed inaktywacją układu dopełniacza. Następnie próbki krwi wirowano z przyspieszeniem 1500 G przez 10 min. Po odwirowaniu, pipetą delikatnie ściągano surowicę i porcjowano do próbek Eppendorfa.

³⁵nie zamieszczono tutaj badań dla grupy porównawczej, gdyż nie jest ona przy tego rodzaju analizie konieczna

³⁶tj. 4,5cm³ krwi na 0,5cm³ cytrynianu sodu

³⁷maksymalnie 2h od momentu pobrania

Dodatkowe 2 cm³ krwi pobierano do typowej probówki na morfologię krwi, opłaszczonej wewnątrz EDTA celem wykonania rutynowych badań morfologicznych.

Do oznaczeń używano surowicy świeżej lub mrożonej³⁸ w temperaturze t=-20°C. Przed badaniem, surowicę mrożoną pozostawiano przez 30 min w temperaturze pokojowej, celem rozmrożenia próbki. Morfologię krwi z rozmazem 3-parametrycznym wykonywano automatycznie na aparacie Cell-Dyn 1600 firmy Abbot. Stężenie immunoglobulin³⁹ oznaczano metodą turbidymetryczną w systemie Behring Turbi Time, używając przeciwciał anti-IgG, anti-IgA i anti-IgM [7]. Stężenie składowych C3c i C4 dopełniacza oceniano metodą turbidymetryczną z użyciem odczynników firmy Behring, w systemie Behring Turbi Time [7]. Surowicę badaną rozcieńczano w stosunku 1 objętość surowicy do 19 objętości 0,85% roztworu NaCl. Do oznaczania składowej C3c pobierano 50 µl tak rozcieńczonej surowicy, a 200 µl do oznaczania składowej C4. Do obu oznaczeń używano po 500 µl przeciwciał, odpowiednio anti-C3c i anti-C4. W analogiczny sposób postępowano z surowicą kontrolną⁴⁰. Pomiaru stężeń obu składowych dopełniacza⁴¹ dokonywano automatycznie na aparacie Turbidimer Behring. Stężenie CRP w surowicy określano metodą jakościową z użyciem lateksu opłaszczonego przeciwciałami anti-CRP, wykorzystując aglutynację cząstek lateksu z surowicą badaną. Dodatni wynik aglutynacji świadczył o stężeniu białka CRP>0,5 mg·dl⁻¹ i powodował jego oznaczenie ilościowe metodą turbidymetryczną. Brak aglutynacji świadczył o prawidłowym stężeniu CRP w surowicy badanej. Pomiaru stężenia⁴² fibrynogenu dokonywano przy pomocy testu diagnostycznego Hemolab Fibrinomat firmy Bio-Merieux, z odczytem na koagulometrze Option-4 tejże firmy. Poziom czynnika XII układu krzepnięcia oznaczano na koagulometrze firmy Behring, przy użyciu zestawów testowych tejże firmy⁴³, metodą chromogenną⁴⁴.

Wszystkie badania laboratoryjne prowadzone były zgodnie z aktualnie obowiązującą metodyką w zakresie medycznej diagnostyki laboratoryjnej. Na przeprowadzenie badań otrzymano zgodę od Terenowej Komisji Etyki Badań Naukowych przy Akademii Medycznej w Gdańsku. Ponadto, poddani badaniom nurkowie zostali poinformowani o celach eksperymentu i wyrazili zgodę na założoną metodykę badań, potwierdzoną podpisem w karcie badania nurka.

Analiza wyników

Do analizy przygotowano dane wykorzystując wyniki badań, których wycinek pokazano w **tab.9**. Obliczono różnice pomiędzy wartościami pomiarów otrzymanych po nurkowaniu i przed nurkowaniem oraz wyniki uzyskane 24h godz po nurkowaniu i przed nurkowaniem. Te dwa zestawy danych poddano standaryzacji w sposób opisany wcześniej. Poprzez standaryzację wszystkie dane były uwzględniane w analizie. Jednakże do samej FA użyto jedynie 26 przypadków, dla których dysponowano kompletem wyników pomiarów. Następnie dla tak otrzymanych danych obliczono współczynniki korelacji, które podano w **tab.10-11**. Wskazują one na

³⁸ maksymalnie 7 dni

³⁹ zakresy stężeń prawidłowych: 800–1700 mg/dl dla IgG, 100–490 mg/dl dla IgA i 50–320 mg/dl dla IgM

⁴⁰ N/T Protein Control Serum for Nephelometric/Turbi Time System

⁴¹ zakresy stężeń prawidłowych: 90–180 mg/dl dla C3c i 10–40 mg/dl dla C4

⁴² zakres stężeń prawidłowych: 150–400 mg/dl

⁴³ Factor XII Deficient Plasma

⁴⁴ zakres stężeń prawidłowych: 70–120%

typowe powiązania w obrębie leukocytów⁴⁵ oraz erytrocytów i wielkości z nimi związanymi⁴⁶.

Tabela 9
Wybrane, przykładowe wyniki pomiarów wybranych oznaczeń laboratoryjnych

Nr	WBC [K/ μ l]			LYM [%]			MID [%]			GRAN [%]			RBC [M/ μ l]			HGB [g/dl]			HCT [%]			MCV [fl]			PLT [K/ μ l]					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	6,8	5,1	4,7	34,3	33,4	36,1	4,4	3,5	4,4	61,3	63,1	59,5	5,5	5,7	5,3	7,5	4,8	16	16,9	17,1	14,7	9,4	9,9	46	86	93	84	199	211	200
2	5,5	7	6,2	35	25,3	33,8	4,9	2,7	4,6	60,1	72	61,6	5,6	2,5	4,6	5,6	11,7	17,6	15,7	16,1	15,2	3	47	43,8	93	86	78	196	217	210
3	7,1	6,4	5,6	46	41,7	49,8	5,4	4,6	5,4	48,6	53,7	44,8	5,2	3,5	4,9	5,5	15,5	14,9	14,7	14,6	5,4	3,9	1,8	89	87	79	315	321	278	
4	4,7	5,3	4,7	36,1	28,9	35,3	4,4	3,9	5	59,5	67,2	59,7	5,4	5,2	5,3	5,3	17,1	17,1	17,1	46	46,4	46,4	48	48	84	86	200	178	217	
5	5,6	6,4	5,5	49,8	41,1	48,1	5,4	4,4	5,8	44,8	54,5	46,1	4,9	5,5	4,7	9	14,7	14,8	14,3	39,1	40,4	39,3	79	80	82	278	286	282		
6	6,2	10		33,8	22,8		4,6	2,1		61,6	75,1		5,6	1,5	2,8		16,1	15,2		43,8	41,2		78	78		210	217			
8	5	5,2	4,6	38,1	28,6	25	3,9	4,2	5,1	58	67,2	69,9	5,6	7,5	4,9	5,6	17,3	16,6	16,7	45,4	44,5	46,5	80	81	83	177	184	173		
9	9,5	9,6	6,6	23	16,3	18,2	3,7	3,3	7,3	3,3	7,3	3,8	4,7	8,1	5,4	3	16	16,6	15,4	44,7	45,9	42,9	79	79	79	238	261	219		
11	4,6	6,4	6,5	42,4	37	27,5	3,3	3	5,4	3	60	69	4,2	7,4	2,3	4,2	13,3	13,1	13,1	37,1	36,4	36,5	87	86	87	336	345	325		
12	5,6	5,9		30,9	24		2,9	3,4		66,2	72,6		5,3	1,5	4,9		14,9	15,6		41,9	43,4		79	79		306	334	291		
13	4	3,6	4,1	47,3	40,9	48,4	4,4	9,5	7,4	6,4	7,8	5,3	4	7	5,2	2,5	2,3	5,2	15,9	15,9	16,1	43,8	43,9	44,4	84	84	84	212	226	217
14	6,6	7,5	8	18,2	15,2	12,9	3,7	3,1	2,1	7,8	1,8	1,7	8,5	5,4	3,5	6,4	5,3	15,4	16,1	15,3	42,9	45,1	42,3	79	80	79	219	254	239	
15	5,7	6,2	4,9	38	34,2	36,7	4	3,8	3,9	58	62	59,4	5,9	5,9	5,9	1,6	15,2	15,2	15,6	41,7	42,2	42,8	82	83	83	233	235	225		
16	4,4	5,6	4,4	35	42,6	40,2	4,1	3,7	5	60,9	53,7	54,8	5,2	5,3	5,3	5,3	16,4	16,6	16,4	45,7	46,3	45,6	87	86	86	210	110	193		
17	6,5	6,5	5	27,5	31	33,7	3,5	3,2	3,6	69	65,8	62,7	4,2	4,2	4,2	4,2	13,1	13	12,9	36,5	36,8	36,5	87	86	87	345	374	352		
18	4,9	5,6	6,1	28,8	26,3	19,6	4,4	3,5	3,7	66,8	70,2	76,7	5,4	3,5	3,9	5,1	16,1	16,2	15,6	45,1	44,7	42,7	83	83	83	176	184	195		
19	9,1	9,3	6,6	29,5	25,7	32,8	3,4	3,8	3,9	67,1	70,5	63,3	4,8	5,0	4,9	5,5	15,5	15,7	15,6	43,4	44,1	43,1	89	88	87	249	148	268		
20	4,3	4,5	3,6	36,4	33,8	34,2	2,5	7,5	2,5	5,7	9	61	60,3	4,5	4,5	7,4	4,9	13,3	13,6	13,1	37,4	37,9	37,7	83	83	84	235	263	245	
21	6,2	6,7	5,7	27,9	29,2	27,3	3,6	3,7	4,2	68,5	67,1	68,5	4,7	4,9	4,8	2,4	14	13,9	13,8	38,8	39	39,1	181	181	82	186	190	203		
22	4,5	4,8	3,3	41,9	34,1	39,6	5,4	4,7	5,1	52,7	61,2	55,3	5,3	5,3	5,2	6	15,7	16,1	15,8	44,1	45,3	43,7	83	84	83	219	245	200		
23	3,4	4,9	3,5	47	41,4	52,1	6,1	3,8	4,1	46,9	54,8	43,8	5,0	4,5	2,3	5,0	14,3	14,7	14,2	40,3	41,3	40,2	80	79	80	238	252	230		
24	6,7	7,8	5,9	32,8	29,4	36,7	3,9	3,3	5,3	4,6	3,6	7,1	5,9	4,9	4,9	4,9	15,6	15,5	15,3	43,1	42,6	42,8	87	87	87	268	273	243		
25	3,6	6,1	4,3	34,2	29,3	35,5	4,1	5,1	1,5	9,6	0,3	66	58,8	4,4	4,4	4,4	4,6	13,1	13	13,5	37,7	36,9	38,6	84	83	84	245	256	251	
26	5,7	5,5	4,8	27,3	30,1	32,9	4,2	3,2	4,4	68,5	66,7	62,7	4,7	4,7	4,6	6	13,8	12,8	13,5	39,1	36,7	37,7	82	82	81	203	167	126		
27	4,9	5,5	4,6	29,9	31,2	32,7	3,5	3,9	4,2	66,6	64,9	63,1	5,4	5,4	5,3	5,3	17,2	17,1	16,5	46	46,9	45,1	84	86	85	214	221	183		
28	4,6	5,5	5	26,6	23	26,5	3,6	3,8	3,6	69,8	73,2	69,9	5,2	5,3	5,7	2,7	16,1	16,5	15,9	44,2	45,1	43,7	84	84	83	302	303	273		
29	5	5,4	4,8																	43,7	43,5	44						202		
30	4,6	5,4	5,4	42,7	39,1	37,4	4,4	2,4	9,4	2,5	3,1	56	58,4	5,3	5,6	5,4	15,8	16,5	17,5	45,1	47,6	46,9	85	85	86	193	196	188		
31	8,2	8,3	5,9											5,2	5,2	4,9	16,7	15,8	15,5	48	44,6	44,3	91	91	91	196	162	155		
32	5,9	6,4	7,2											4,8	2,4	6,5	4,7	14,9	14,9	14,6	42,5	41,9	42,8	92	90	91	244	240	259	
33	6,4	7,1	5,9											5	4,7	14,6	8	15,5	14,8	14,5	45,5	42,9	41,7	91	91	89	248	242	242	
34	5	6,3	5,9											5	5,2	2,5	2,5	15,1	15,4	15	42	43,3	44,6	84	83	85	198	217	210	
35	6,7	6,6	6,2											5,9	5,7	2,5	5,4	16,9	16,6	15,5	49	46,9	46	83	82	83	278	277	244	
36	5,7	6,5												4,5	8,4	7,5		13,9	14		41,2	42,8		90	90		224	235		
37	5,9	7,4												4,8	9,5	4,2		15,2	15,7		43	47,2		88	87		227	262		
38	5	5,6												4,7	5,4	8,3		14,7	14,3		41,8	42,5		88	88		294	330		

1- pomiary przed nurkowaniem; 2-pomiary 1h po nurkowaniu; 3-pomiary 24h po nurkowaniu

⁴⁵liczby limfocytów *LYM* i granulocytów *GRA*

⁴⁶liczby krwinek czerwonych *RBC*, zawartości hemoglobiny *HGB*, wskaźnika hematokrytu *HCT*, objętości krwinki czerwonej *MCV*

Tabela 10

Współczynniki korelacji pomiędzy pomiarami laboratoryjnymi dla różnic pomiędzy ich wartościami przed i 1 godz po dekompresji

	IgA	IgM	C3c	C4	CRP	WBC	LYM	MID	GRAN	RBC	HGB	HCT	MCV	PLT	FIB	cz.XII	
IgG	0,23	0,24	0,49	0,65	0,12	-0,11	0,15	0,33	-0,20	0,34	0,53	0,48	0,35	0,14	0,19	0,31	
IgA		-0,02	0,44	0,36	0,25	0,18	0,04	-0,26	0,01	0,25	0,20	0,23	0,07	0,01	-0,09	-0,07	
IgM			-0,11	0,10	0,02	0,04	0,06	-0,03	-0,05	0,08	0,09	0,09	0,08	0,58	-0,18	0,27	
C3c				0,40	-0,10	-0,15	-0,08	0,33	0,02	0,55	0,40	0,40	-0,02	-0,11	0,19	0,00	
C4					0,13	0,11	0,12	-0,05	-0,10	0,34	0,34	0,34	0,14	-0,12	0,15	0,39	
CRP						0,45	-0,21	-0,13	0,22	-0,18	-0,09	-0,07	0,10	0,08	0,13	-0,09	
WBC							-0,31	-0,46	0,37	-0,04	-0,32	-0,29	-0,41	-0,02	0,07	0,04	
LYM								0,26	-0,98	0,11	0,19	0,22	0,18	-0,41	-0,04	0,13	
MID									-0,43	0,42	0,43	0,51	0,26	-0,15	0,06	0,15	
GRAN										-0,18	-0,26	-0,30	-0,22	0,41	0,03	-0,15	
RBC											0,71	0,74	-0,03	-0,01	0,08	0,30	
HGB												0,95	0,62	0,06	0,11	0,28	
HCT													0,65	0,03	0,11	0,30	
MCV														0,09	0,08	0,12	
PLT															-0,06	0,16	
FIB																	0,12

Tabela 11

Współczynniki korelacji pomiędzy pomiarami laboratoryjnymi dla różnic pomiędzy ich wartościami przed i 24 godz po dekompresji

	IgA	IgM	C3c	C4	CRP	WBC	LYM	MID	GRAN	RBC	HGB	HCT	MCV	PLT	FIB	cz.XII	
IgG	0,22	0,23	0,46	0,41	-0,32	0,31	-0,13	0,07	0,12	0,08	0,24	0,46	0,48	-0,09	0,33	-0,05	
IgA		0,19	0,42	0,62	-0,16	0,17	0,18	-0,40	-0,13	0,21	0,16	0,33	0,28	-0,27	-0,08	-0,38	
IgM			-0,06	0,17	-0,36	0,34	-0,08	-0,06	0,09	-0,07	0,00	0,04	0,09	-0,07	-0,07	-0,30	
C3c				0,59	0,10	0,25	-0,11	-0,11	0,12	0,28	0,23	0,44	0,38	0,04	0,49	0,18	
C4					-0,17	0,24	0,13	-0,15	-0,11	0,33	0,20	0,36	0,26	-0,03	0,56	-0,07	
CRP						-0,50	0,04	0,35	-0,08	0,08	0,01	-0,08	-0,14	-0,12	-0,13	-0,03	
WBC							-0,44	-0,23	0,47	0,16	-0,01	0,08	0,04	0,21	0,10	-0,08	
LYM								-0,06	-0,99	0,18	0,04	-0,11	-0,22	-0,29	0,03	-0,09	
MID									-0,06	0,06	-0,02	0,15	0,14	-0,12	-0,07	-0,18	
GRAN										-0,18	-0,03	0,09	0,20	0,30	-0,02	0,11	
RBC											0,55	0,49	0,12	0,23	0,07	-0,21	
HGB												0,60	0,43	0,12	0,06	0,02	
HCT													0,92	0,14	0,20	-0,15	
MCV														0,07	0,20	-0,09	
PLT															0,36	0,35	
FIB																	0,58

Tabela 12
Wartości własne macierzy korelacji po poddaniu jej diagonalizacji zawężone do 12 wartości własnych

Nr	dla różnic wartości 1 godz po nurkowaniu i przed nurkowaniem			dla różnic wartości 24 godz po nurkowaniu i przed nurkowaniem		
	Wartość własna	Udział procentowy w wartości ogólnej	Skumulowany udział procentowy	Wartość własna	Udział procentowy w wartości ogólnej	Skumulowany udział procentowy
1	4,68	27,53	27,53	4,06	23,89	23,89
2	2,58	15,21	42,73	2,69	15,81	39,70
3	1,88	11,08	53,81	2,17	12,79	52,49
4	1,59	9,33	63,14	1,97	11,60	64,09
5	1,34	7,86	71,00	1,35	7,93	72,03
6	1,23	7,25	78,25	1,20	7,07	79,10
7	0,91	5,37	83,62	0,99	5,83	84,93
8	0,83	4,87	88,49	0,66	3,87	88,80
9	0,68	3,99	92,49	0,60	3,55	92,35
10	0,45	2,66	95,15	0,38	2,26	94,61
11	0,29	1,68	96,83	0,34	1,99	96,60
12	0,27	1,59	98,42	0,22	1,27	97,86

Jednocześnie w zmianach tych zależności zarysowują się pewne tendencje zależne od czasu, który upłynął od zakończenia dekompresji. Zaobserwować też można słabe tendencje do łączenia się niektórych białek z elementami morfotycznymi krwi w kompleksy, zachodzące w krótkim czasie po dekompresji⁴⁷. Później efekt ten zanikał a zachodził po 24 godz dla innych układów⁴⁸. Zaobserwować też można późniejszą tendencję do występowania korelacji pomiędzy niektórymi białkami⁴⁹, gdy początkowo tendencja ta nie miała miejsca.

Niektóre współczynniki korelacji zapisane w **tab.10–11** posiadają na tyle duże wartości, że należy oczekiwać silnych wzajemnych powiązań. Oznacza to, że niesiona informacja posiada cechy redundantne⁵⁰ i można spróbować dokonać uproszczeń pomijając niektóre mniej znaczące cechy poprzez obrót hiperukładu współrzędnych, w którym zostały one odłożone. W tym celu macierz korelacji należy zdiagonalizować – wartości własne dla zdiagonalizowanej macierzy korelacji podano w **tab.12**. Według kryterium Kaisera należy pozostawić składowe nr 1–6 z **tab.12**. Te sześć pierwszych wartości własnych tłumaczy ok.78–79% zjawiska. Wartości korelacji resztkowej są małe⁵¹, co dowodzi, że opis przy pomocy sześciu składowych można uznać za zadawalający.

W celu polepszenia struktury czynników dokonano rotacji typu *varimax* dla zawężonej do sześciu liczby wartości własnych zdiagonalizowanej macierzy korelacji i obliczono ładunki czynnikowe. Wyniki tych obliczeń pokazują zmienne mające istotny wpływ na opis indukowanych hiperbarycznie zmian zachodzących we krwi – **tab.13**. Oprócz tego można ustalić zależności⁵² zachodzące w obrębie

⁴⁷ np. C3c z krwinkami czerwonymi czy immunoglobuliny IgM z płytkami krwi

⁴⁸ np. C4 czy czynnika XII (cz.XII) z fibrynogenem FIB

⁴⁹ np. IgA i C4

⁵⁰ cecha wiadomości zawierającej więcej informacji, niż to jest istotnie niezbędne

⁵¹ w większości ok.0,1

⁵² ładunki czynnikowe

wytypowanego zestawu badanych parametrów. Można postulować, że na opis zmian

Tabela 13

Ładunki czynnikowe po rotacji varimax

Zmienna	dla różnic wartości 1 godz po nurkowaniu i przed nurkowaniem						dla różnic wartości 24 godz po nurkowaniu i przed nurkowaniem					
	C3c+ RBC	CRP	IgM	LYM+ GRAN	MCV	FIB	MCV+ IgG	LYM+ GRAN	FIB+ cz.XII	IgA+C4+ C3c	RBC+ HGB	CRP
IgG	0,55	0,24	0,32	0,15	0,34	0,24	0,64	0,06	0,11	0,38	-0,04	0,36
IgA	0,51	0,59	-0,13	0,03	0,03	-0,45	-0,04	-0,10	-0,41	0,79	0,15	0,17
IgM	-0,02	0,03	0,85	-0,01	0,07	-0,22	0,14	0,04	-0,27	0,03	-0,09	0,69
C3c	0,84	-0,03	-0,23	-0,11	0,03	0,01	0,26	0,18	0,26	0,79	0,13	-0,17
C4	0,59	0,46	0,23	0,25	-0,02	0,22	0,17	-0,14	0,14	0,82	0,14	0,17
CRP	-0,15	0,75	-0,04	-0,17	0,16	0,17	0,00	-0,01	-0,14	-0,03	0,00	-0,89
WBC	-0,01	0,57	0,09	-0,19	-0,53	0,14	-0,12	0,54	0,01	0,27	0,11	0,57
LYM	0,01	-0,09	0,03	0,96	0,14	-0,07	-0,15	-0,97	-0,03	0,08	0,07	-0,02
MID	0,29	-0,52	-0,05	0,21	0,41	0,25	0,59	-0,06	-0,12	-0,39	-0,08	-0,34
GRAN	-0,06	0,18	-0,02	-0,94	-0,20	0,02	0,07	0,98	0,05	-0,03	-0,06	0,06
RBC	0,85	-0,23	0,12	0,05	0,06	0,03	-0,01	-0,11	-0,07	0,21	0,85	-0,07
HGB	0,62	-0,10	0,13	0,09	0,66	0,06	0,30	-0,05	0,02	0,08	0,76	0,00
HCT	0,63	-0,10	0,12	0,12	0,67	0,06	0,69	0,09	-0,03	0,26	0,60	0,03
MCV	-0,03	0,12	0,07	0,11	0,93	0,05	0,79	0,17	0,00	0,20	0,31	0,09
PLT	-0,08	-0,01	0,66	-0,56	0,19	-0,18	-0,17	0,34	0,56	-0,21	0,47	0,11
FIB	0,10	0,11	-0,15	-0,08	0,07	0,79	0,21	-0,08	0,83	0,37	0,01	0,07
cz.XII	0,24	-0,05	0,64	0,20	-0,04	0,41	-0,10	0,06	0,87	-0,06	-0,10	-0,12
wariancja	3,32	1,93	1,88	2,40	2,47	1,31	2,19	2,43	2,15	2,63	2,07	1,98
udział	0,20	0,11	0,11	0,14	0,15	0,08	0,13	0,14	0,13	0,15	0,12	0,12

indukowanych hiperbarycznie w 1 godz po ekspozycji największy wpływ ma obecność składowej dopełniacza C3c w kompleksie z erytrocytami⁵³. Innymi ważnymi czynnikami w opisie zjawisk zachodzących w 1 godz po dekompresji są zmiany stężenia białka ostrej fazy CRP, immunoglobuliny IgM, limfocytów LYM w korelacji z granulocytami GRA, fibrynogenu FIB, a dodatkowo wpływ na opis zjawiska mają zmiany średniej objętości krwinki czerwonej MCV. Inne parametry są do pominięcia, pod warunkiem przyjęcia ok. 78% dokładności opisu zjawiska.

Na opis zmian indukowanych hiperbarycznie 24 godz po ekspozycji największy wpływ ma zmiana poziomu stężeń immunoglobuliny IgA oraz składowych dopełniacza C3c i C4. Należy zwrócić uwagę, że tym razem składowa C3c występuje w formie niezwiązanej. Innymi ważnymi czynnikami w opisie zjawisk zachodzących 24 godz po dekompresji są zmiany stężenia limfocytów LYM w korelacji z granulocytami GRA, erytrocytów poprzez zmiany objętości krwinki czerwonej MCV, zmiany poziomu hematokrytu HCT skorelowane z immunoglobuliną IgG, fibrynogenu FIB w kompleksie z czynnikiem XII kaskady krzepnięcia, erytrocytów RBC w korelacji z zawartością hemoglobiny HGB oraz białka ostrej fazy CRP. Inne są do pominięcia pod warunkiem przyjęcia ok. 79% dokładności opisu zjawiska.

WIADOMOŚCI UZUPEŁNIAJĄCE

Przedstawione w artykule wyniki pochodzą z przeprowadzonych w Akademii Marynarki Wojennej badań w ramach projektów pt.: Walidacja tabel dekompresyjnych⁵⁴ oraz Metodyka nurkowań saturowanych⁵⁵.

⁵³RBC

⁵⁴projekt badawczy MNiSzW nr T00B 004 31/1146

⁵⁵projekt badawczy wdrożeniowy MNiSzW nr R00-O0014/3

PODSUMOWANIE

Dzięki zastosowaniu *FA* z pozornego chaosu otrzymanych wyników pomiarów można wyłonić obraz pokazujący, które zmiany wartości zestawu mierzonych czynników mają najistotniejszy wpływ na opis analizowanej sytuacji problemowej.

W badaniach procesu technologicznego produkcji wapna sodowanego pokazano, że w stosunkowo niewielkim zestawie parametrów mogą istnieć tak silne powiązania, że nie jest możliwe ich oddzielne rozpatrywanie.

Przy badaniu efektów indukowanych hiperbarycznie we krwi stało się możliwe poszukiwanie ewentualnych mechanizmów interakcji, zachodzących w obrębie przyjętej do analizy grupy czynników. Dokonano tego jedynie na drodze opisu matematycznego, w sposób obiektywny, bo niezależny od woli eksperymentatora. Większość z odkrytych efektów była badana oddzielnie przez wielu naukowców a przy zastosowaniu *FA* udało się je wykazać w jednym cyklu doświadczeń i stosunkowo prostej analizie⁵⁶.

Zastosowania *FA* można znaleźć także w innych publikacjach autora, np. do analizy działania katalizatora [5–6].

Przytoczone przykłady pokazują, że istnieje możliwość zagubienia ważnych informacji⁵⁷ lub otrzymanie niezgodnego opisu rzeczywistości⁵⁸ bez fazy wstępnej analizy danych przy wykorzystaniu *FA*. Istnieje zgodność, że otrzymane dane⁵⁹ należy poddać wstępnemu sprawdzeniu⁶⁰ [6]. Następnie, jeśli to konieczne, należy je przygotować do analizy⁶¹. W tym etapie sprawdza się rozkłady zmiennych oraz przeprowadza ocenę wariancji. Jednak nie mniej ważnym jest sprawdzenie występowania interakcji, które mogą zakłócić lub uniemożliwić proces poprawnej analizy danych. Ten etap, nazywany preprocesingiem, przez wielu badaczy jest pomijany⁶². Pokazane przykłady pokazują, że badanie występujących interakcji powinno być zawsze obowiązkowe⁶³.

PIŚMIENNICTWO

1. Chemisorpcja ditlenku węgla w zastosowaniach wojskowych, praca zbiorowa pod red. Kłós R. i Momot S., Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia, 2005
2. Dąbrowski J., O problemie redukcji wymiarów, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, 2000
3. Dobosz M., Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001
4. Kłós R., Konarski M., Olszański R., The implementation of factor analysis for the evaluation of selected blood parameter changes induced by hyperbaric exposure, *International Maritime Health* **55**(2004)87–101
5. Kłós R., Modelowanie procesów wentylacji obiektów hiper- i normobarycznych, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia, 2005

⁵⁶wyczerpujący opis porównawczy stanowiący walidację tej metody podano wcześniej [4] i nie będzie on tutaj przytaczany

⁵⁷jak w przypadku analizy indukowanych hiperbarycznie zmian we krwi

⁵⁸jak przy opisie wpływu parametrów produkcji wapna sodowanego

⁵⁹najlepiej drogą świadomego projektu badań

⁶⁰celem wykrycia ich poprawności, braków danych, występowania punktów odstających itp.

⁶¹np. poprzez uporządkowanie jednostek, transformację, grupowanie itp.

⁶²istnieje przekonanie, że należy go prowadzić jedynie, jeśli jest to niezbędne

⁶³nawet jeśli sytuacja problemowa wydaje się stosunkowo prosta

6. Kłos R., Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej – skrypt, Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, Gdynia, 2007
7. Metzmann E., Protein quantitation on both branches of the meidelberger curve by monitoring the kinetic of immunoprecipitation, Behring Inst. Mitt. **78**(1985)167–175
8. Pikoń J., Aparatura chemiczna, Państwowe wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1983
9. Pogorzelski W., Geometria analityczna, Spółdzielnia Wydawniczo–Oświatowa „CZYTELNIK“, Warszawa, 1949
10. STANAG 1411, Standard to Qualify the Characteristics of Carbon Dioxide Absorbent Material for Diving, Submarine and Marine Applications, NATO Standardization Agency 2006
11. Wątroba J., Pomiar rozwijanej mocy a czas trwania wysiłku na przykładzie wyciskania sztangi w pozycji leżącej, [w:] STATISTICA 6 w twoim mieście, Ogólnopolski cykl prezentacji nowej generacji oprogramowania, StatSoft Kraków, październik 2001

Autor:

kmdr dr hab. inż. Ryszard Kłos

Zajmuje się projektowaniem, budową i eksploatacją hiperbarycznych systemów zachowania życia oraz załogowymi technologiami prac podwodnych. Od 1988r. jest pracownikiem Zakładu Technologii Prac Podwodnych. Obecnie pełni funkcję prodziekana do spraw rozwoju na Wydziale Mechaniczno–Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni.