

R. Kłos, M. Konarski

STATYSTYCZNA OCENA BEZPIECZEŃSTWA DEKOMPRESJI

Spotykane są dwa typy modeli matematycznych dekompresji: deterministyczne (przyczynowo-skutkowe) i statystyczne. W artykule zostaną pokrótce omówione przykłady statystycznego podejścia do metod zatwierdzania (walidacji) procesu dekompresji.

WSTĘP

Systematyka i opis zjawisk towarzyszących dekompresji jest sprawą skomplikowaną ze względu na brak precyzyjnych metod pomiarowych monitorujących procesy zachodzące w tkankach żywego organizmu. Matematyczne sposoby opisu dekompresji odzwierciedlają jedynie część zachodzących podczas niej zjawisk. Opis taki polega najczęściej na możliwie jak najdokładniejszym dopasowaniu do danych eksperymentalnych stosunkowo prostej funkcji matematycznej. Takie modele matematyczne należy traktować jedynie jako sposób przewidywania sposobu bezpiecznej dekompresji, nie zaś jako model zachodzących podczas niej procesów fizjologicznych, [4]. Dlatego, wymagają one sprawdzenia (zatwierdzenia), którego ocenę wykonuje się najczęściej metodami statystycznymi.

Porównanie modeli deterministycznych ze statystycznymi

Modele deterministyczne pozwalają na określenie procedury dekompresyjnej przy zdefiniowanych kryteriach brzegowych, nazywanych kryteriami dekompresyjnymi, które nigdy nie mogą być przekroczone. Dla modeli deterministycznych nie określa się jak dalece niebezpieczne jest odejście od kryteriów dekompresyjnych.

Statystyczne modele dekompresyjne, w przeciwieństwie do deterministycznych, oparte są na obliczaniu prawdopodobieństwa ryzyka wystąpienia choroby ciśnieniowej nazywanej dalej w skrócie DCS (od ang. decompression sickness). Statystyczne tabele dekompresji oblicza się dla żądanego poziomu ryzyka. Możliwe jest także obliczenie poziomu ryzyka towarzyszącego odchyleniom od zaproponowanego profilu dekompresji.

Modele deterministyczne są tak skonstruowane, że nie zezwalają na odstępianie od zaproponowanych profili dekompresji zezwalając jedynie na ekspozycje przy różnych, z góry znanych, poziomach ryzyka.

Przy tworzeniu modeli dekompresyjnych wymaga się określenia kinetyki wymiany gazowej oraz wspomnianych już kryteriów dekompresji. Jako kinetykę wymiany gazowej rozumie się funkcję, za pomocą której przelicza się profil nurkowania na zakumulowaną dawkę dekompresyjną, którą często jest prężność gazu rozpuszczonego w tkance teoretycznej, [2]. Prężność gazu w tkance teoretycznej jest funkcją głębokości, czasu, ciśnieniu cząstkowego tlenu, rodzaju gazu inertnego, temperatury wody, poziomu wykonywanego przez nurka wysiłku itp.

Najczęściej stosowaną funkcją modelującą kinetykę wymiany gazowej jest zależność eksponencjalna. Założenia dotyczące kinetyki wymiany gazowej mogą być takie same zarówno dla modeli deterministycznych jak i statystycznych. Różnica pomiędzy tymi

dwoma podejściami leży w przyjęciu kryteriów dekompresji. Pojęcie kryteriów dekompresji wzięło się z faktu, że symptomy DCS nigdy nie występują podczas zanurzania, a objawiają się jako rezultat wynurzenia, tzn. jedynie podczas lub po zmniejszeniu ciśnienia otoczenia, czyli podczas dekompresji.

Ogólnie, kryteria dekompresji ograniczone są, przede wszystkim, wartościami zmiennych określonych przez przyjęty model kinetyki wymiany gazowej, które określają jak należy rozłożyć głębokości i czasy postoju na stacjach dekompresyjnych. Przykładowo, kryteria dekompresji mogą ograniczać maksymalną wartość prężności gazu inertnego w tkance teoretycznej podczas dekompresji.

Deterministyczne kryteria dekompresji zwykle składają się z zestawu wartości maksymalnych kilku krytycznych zmiennych. Każdy program dekompresji, który utrzymuje te wartości poniżej wartości maksymalnej jest dopuszczalny. Ostatecznego wyboru profilu dekompresji dokonuje się poprzez powszechne stosowanie zasady minimalizacji czasu dekompresji.

Statystyczne kryteria dekompresji ograniczone są poprzez dopuszczalny poziom ryzyka dla dowolnego rozkładu dekompresji. Każdy rozkład dekompresji, który nie przekracza określonego poziomu ryzyka jest do zaakceptowania.

Zastosowanie modeli statystycznych opiera się na obliczaniu aktualnego prawdopodobieństwa zaistnienia DCS. Prawdopodobieństwo to nie jest wykorzystywane jedynie do oceny i zatwierdzania modelu, ale także daje ilościową miarę jakości dopasowania matematycznego modelu teoretycznego do danych eksperymentalnych pod względem przewidywania zagrożenia DCS.

Proces zatwierdzania profilu dekompresji

Ogólnie, proces zatwierdzania (walidacji) może być zrealizowany w sposób:

- retrospektywny czyli na podstawie porównania z innymi sprawdzonymi tabelami, lub danych o częstości występowania DCS zebranych podczas stosowania profilu dekompresji,
- prospektywny (przewidywany)
- lub przy użyciu kombinacji tych dwóch metod.

Metoda retrospektywna używana jest, przede wszystkim, do walidacji modeli deterministycznych. Polega ona na dopasowaniu modelu dekompresji do zestawu odnośnych (referencyjnych) tabel dekompresyjnych. Przykładowo, wiele z systemów dekompresji nitroksowej zostało opracowanych w oparciu o tabele dekompresji powietrznej jako referencyjne. Taki sposób postępowania walidacyjnego opiera się na założeniu, że wykonane nurkowania zgodnie z tym modelem będą tak bezpieczne jak tabele referencyjne. Problemem budzącym niepokój jest fakt, że nie ma pewności czy różniący się od referencyjnych tabel rodzaj nurkowania posiada ekwiwalentny poziom bezpieczeństwa. Przykładowo, istnieje problem dopasowania nurkowania wielopoziomowego („schodkowego”) do tabel dekompresyjnych zaprojektowanych dla nurkowań na jedną głębokość („nurkowania o profilu prostokątnym”). W celu ustalenia jak bezpieczny może być algorytm postępowania, dostępne muszą być wiarygodne informacje dotyczące obserwowanych przypadków DCS podczas faktycznego użytkowania (testowania) tabel referencyjnych. Ograniczeniem tej metody jest to, że nie jest możliwa dla niej modyfikacja parametrów modelu, np.: stałych połowicznego odsycenia dla tkanek teoretycznych, czy nowych kryteriów dekompresji. Wynika stąd, że wszystkie tabele obliczone w ten sposób są pod względem założeń, dokładnie takie same jak tabele referencyjne. Walidacja modeli deterministycznych oparta na porównaniu z tabelami referencyjnymi często nie daje możliwości obliczenia jak niebezpieczne są pośrednie profile dekompresji, gdyż często nieznanym jest sposób obliczania tabel referencyjnych.

Inną retrospektywną metodą walidacji jest gromadzenie danych na temat występowania DCS dla rozpatrywanego profilu dekompresji. Jedynym źródłem tych danych jest testowanie na ludziach interesującego nas profilu dekompresji. Jeśli, znany jest nam model dekompresji możemy spróbować dopasować go do przetestowanych profili na różne sposoby, dopuszczalne przez zastosowany model. Jeżeli jednak nie dysponujemy odpowiednio liczną grupą przetestowanych identycznych profili dekompresyjnych (nazywanych nurkowaniem replikowanymi), które mogą być użyte do oszacowania aktualnego ryzyka DCS dla zastosowanego modelu, to nie ma możliwości obiektywnego określenia na ile jest on niebezpieczny.

Proces walidacji realizowany w sposób prospektywny polega na monitorowaniu aktualnego poziomu występowania DCS. Na podstawie uzyskiwanych na bieżąco danych może być obliczane zagrożenie DCS dla przyszłych nurkowań i dokonane mogą być ewentualne modyfikacje. Dalsze postępowanie może być określone metodami statystycznego planowania eksperymentów.

1. METODY

Deterministyczne modele dekompresji

Z punktu widzenia deterministycznego modelu dekompresji, istniejące w bazie danych profile można podzielić na bezpieczne czyli te, dla których nie zostały one przekroczone i niebezpieczne czyli te, dla których zostały przekroczone kryteria dekompresyjne. Zazwyczaj, w pierwszym kroku model może być ulepszany poprzez modyfikowanie wartości kryteriów dekompresyjnych w oparciu o dane z bazy nurkowań eksperymentalnych lub dane pochodzące ze sprawdzonych referencyjnych tabel dekompresyjnych. Tak otrzymane parametry mogą być dalej modyfikowane, jeśli jest to konieczne podczas procesu prospektywnej walidacji.

Jedyną drogą określenia bezpieczeństwa modelu deterministycznego jest potraktowanie każdego nurkowania dla każdego profilu dekompresji jako zdarzenia niezależnego, którego wynikiem może być zaistnienie DCS lub jego brak. Model deterministyczny nie posiada w swoich założeniach możliwości obliczenia ryzyka a informacje o zagrożeniu powodowanym przez konkretny profil nie zawsze mogą i powinny być wykorzystane do określenia ryzyka dla pozostałych profili otrzymanych na podstawie tego samego modelu dekompresji. Nawet, gdy model deterministyczny daje możliwość wiarygodnego odróżnienia pomiędzy bezpiecznym i niebezpiecznym profilem dekompresji, proces walidacji musi nadal uwzględniać fakt, że każdy profil posiada skończoną wartość ryzyka - prawdopodobieństwa wystąpienia objawów DCS. Każde wystąpienie symptomów DCS jest zdarzeniem losowym z powodu statystycznej zmienności czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Kiedy duża grupa nurków jest wystawiana na dokładnie ten sam profil, DCS może wystąpić u wszystkich, w kilku przypadkach lub nie wystąpić w ogóle. Także, jeśli ten sam nurek jest wystawiony na ten sam profil dekompresji wiele razy, DCS może pojawić się kilka razy, nie pojawić się w trakcie żadnej ekspozycji lub wystąpi we wszystkich przypadkach. Przewidywanie częstości występowania objawów DCS dla procesu losowego przy założeniu, że istnieje skończone prawdopodobieństwo wystąpienia DCS, jest dane przez rozkład binominalny niezależnie od zastosowanego modelu dekompresji. Proste zastosowanie tego rozkładu statystycznego umożliwia obliczenie jak wiele przypadków DCS można się spodziewać, kiedy rzeczywista wartość prawdopodobieństwa wystąpienia DCS jest znana.

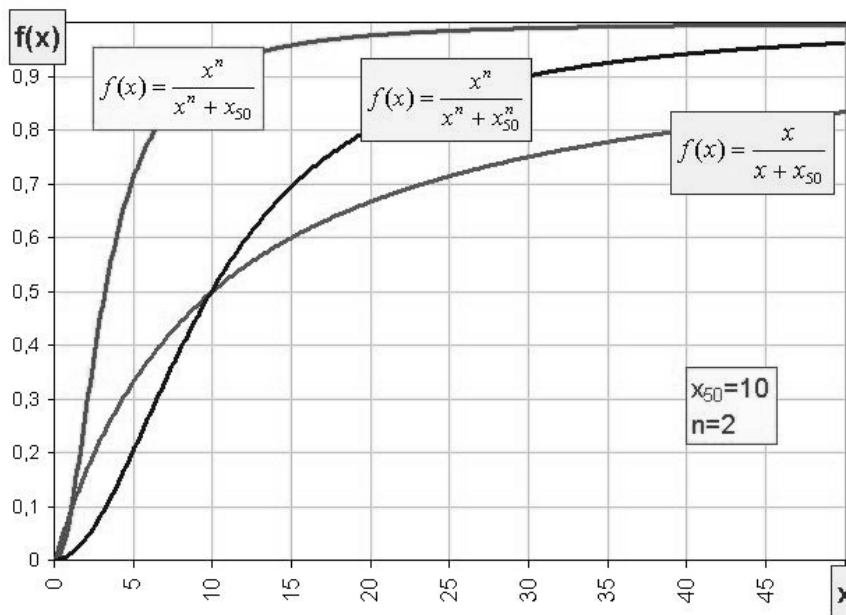
Jeśli dany profil powoduje 500 przypadków DCS podczas 10.000 ekspozycji mówimy, że z dużą pewnością wartość rzeczywista występowania DCS jest na poziomie 5%. Gdy jeden profil nurkowania testowano poprzez 40 nurkowań eksperymentalnych i w tym czasie zaobserwowano 2 przypadki DCS (5% DCS), wtedy można powiedzieć, że

zagrożenie DCS na poziomie ufności $<P>=95\%$ zawiera się w granicach $0,61\% \div 16,91\%$. Oszacowanie zagrożenia DCS, przy założeniu niezależności zdarzeń, dla możliwego do przyjęcia poziomu ufności, wymaga przeprowadzenia dużej ilości identycznych (replikowanych) nurkowań eksperymentalnych. Dla poziomu ufności $<P>=95\%$, wystąpienie 5 przypadków DCS podczas przeprowadzenia 100 nurkowań eksperymentalnych zawęży spodziewane granice zagrożenia DCS do $1,6\% \div 11,3\%$ a 50 przypadków DCS, a dla 1000 nurkowań eksperymentalnych do $3,7\% \div 6,5\%$, [6]. Przeprowadzenie wystarczającej liczby nurkowań replikowanych tak, aby uzyskać dobrą statystyczną miarę zagrożenia DCS dla modelu deterministycznego jest zwykle niemożliwe ze względu na koszty i ograniczony czas. Ten sposób walidacji bazuje na obiektywnych ocenach po wykonaniu eksperymentu a otrzymane w ten sposób tabele są wysoce wiarygodne, stosują go jednak tylko nieliczni.

Statystyczne modele dekompresyjne

Statystyczne modele dekompresji bazują na obliczaniu prawdopodobieństwa wystąpienia DCS dla dowolnego profilu dekompresji, nie są one więc ograniczone do metody walidacji niezależnej (profil po profilu) tak jak dla profili deterministycznych. Metody statystyczne w naturalny sposób służą do oceny bezpieczeństwa dekompresji. Można stosować także metody statystyczne do znajdowania innych, dotychczas niedostępnych parametrów, lecz zaproponowany model musi określać zależność prawdopodobieństwa zajścia dowolnego zdarzenia, a przede wszystkim, możliwość wystąpienia objawów DCS w funkcji istotnych parametrów dekompresji. Przy założeniu, że prawdopodobieństwo wystąpienia DCS jest specyficzną funkcją pewnych charakterystycznych parametrów nurkowania $P(\text{DCS})=f(\text{parametry nurkowania})$, prawdopodobieństwa zajścia pojedynczych zdarzeń są funkcjami parametrów dekompresji, które niejednokrotnie nie są nam znane, lecz można je oszacować poprzez znalezienie maksimum logarytmicznej funkcji prawdopodobieństwa Ψ .

Statystyczne modele matematyczne są często stosowane do określania poziomu zagrożeń w wielu dziedzinach nauki i techniki np. w farmakologii (ocena skuteczności leku), medycynie (ocena przeżycia), teorii bezpieczeństwa systemów (niezawodność konstrukcji). Podczas badań oddziaływania leków czy środków toksycznych na organizmy żywe, często stosuje się model matematyczny typu dawka-reakcja. Wybrany do opisu poprawnej dekompresji model matematyczny powinien zachowywać się poprawnie dla warunków brzegowych oraz posiadać odpowiedni przebieg (charakterystykę). Dla nurkowań z dekompresją zerową, model ten powinien przewidywać zagrożenie DCS na poziomie $p=0$. Dla nurkowań, dla których wymagana jest coraz większa zmiana ciśnienia, funkcja ta powinna rosnać zbliżając się do pewności (przykłady takich funkcji podano na rys.1). W tym celu można zaadoptować do zagadnień dekompresyjnych wspomniane wcześniej modele matematyczne stosowane do określania np. kinetyki działania enzymów według krzywej Michaelisa-Menten (zależność hiperboliczna) czy dla przypadków kinetyki układów dla wielu aktywnych miejsc katalizatora według krzywej Willa, [7].



rys. 1. Niektóre funkcje matematyczne spełniające postawione wymagania funkcji prawdopodobieństwa zaistnienia przypadków DCS

W Tabeli1 pokazano wyniki z przeprowadzonych przez dziesięciu nurków hipotetycznych nurkowań eksperymentalnych. Byli oni eksponowani na ciśnienie powietrza w komorze dekompresyjnej do osiągnięcia stanu saturacji a następnie szybko dekompresowani do powierzchni, [3]. Dla prostego modelu matematycznego uwzględniającego różne głębokości ekspozycji jako dawkę D, lecz nie uwzględniającego czasu ekspozycji (dekompresja następuje po prawie całkowitej saturacji, tak że czas ekspozycji nie odgrywa tu znaczącej roli), zagrożenie DCS można wyrazić wzorem:

$$\rho = \frac{D}{D + D_{50}} \quad (1)$$

gdzie: ρ -prawdopodobieństwo wystąpienia DCS; D- głębokość; D_{50} - głębokość, dla której prawdopodobieństwo wystąpienia objawów DCS wynosi 50%.

Metoda największej wiarygodności

Maksymalizacja funkcji prawdopodobieństwa lub logarytmicznej funkcji

Tabela 1

Hipotetyczne wyniki występowania symptomów DCS na skutek dekompresji następującej po 40 godzinnych ekspozycjach powietrznych.

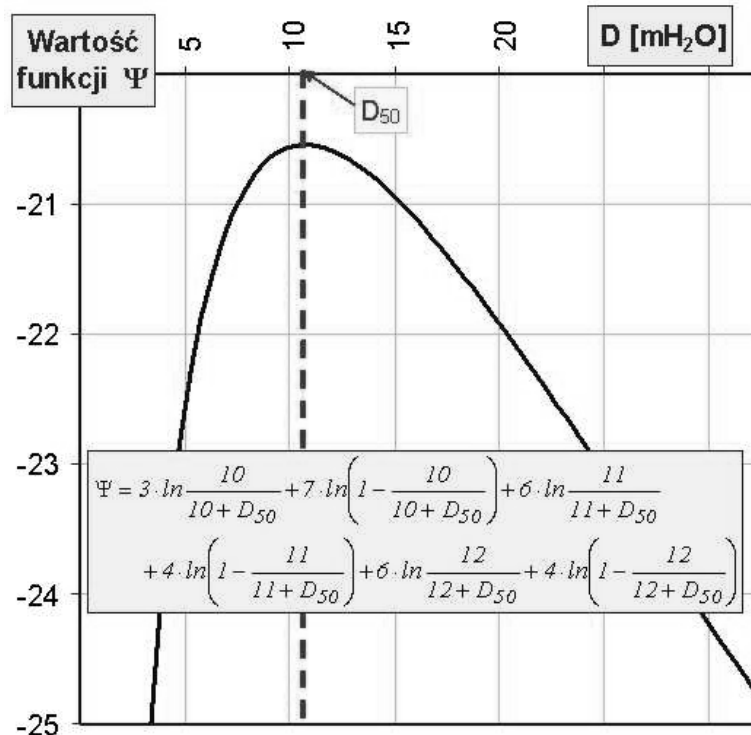
Głębokość [mH ₂ O]	Nurek nr										Suma przypadków DCS
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	N	T	T	N	N	T	N	N	N	N	3
11	N			T	N		N	T	N	T	6
12	N				N		N		N		6
T- wystąpiły symptomy DCS; N- nie wystąpiły symptomy DCS											

prawdopodobieństwa Ψ poprzez porównanie ich pochodnych do zera i w ten sposób obliczenie współczynników regresji nosi nazwę metody największej wiarygodności. Logarytmiczną funkcję prawdopodobieństwa Ψ , dla serii nurkowań opisanych w Tabeli 1 można zapisać jako:

$$\Psi = 3 \cdot \ln \frac{10}{10 + D_{50}} + 7 \cdot \ln \left(1 - \frac{10}{10 + D_{50}} \right) + 6 \cdot \ln \frac{11}{11 + D_{50}} + 4 \cdot \ln \left(1 - \frac{11}{11 + D_{50}} \right) + 6 \cdot \ln \frac{12}{12 + D_{50}} + 4 \cdot \ln \left(1 - \frac{12}{12 + D_{50}} \right) \quad (2)$$

Graficzny obraz funkcji (2) pokazano na rys.2. Maksymalna wartość D_{50} pojawia się dla głębokości ok.11 mH₂O, lecz wyznaczenie dokładnej wartości jest trudne ponieważ maksimum jest szerokie (rozmyte). Przyrównując pochodną funkcji (2) do zera, po przeprowadzeniu obliczeń numerycznie, można otrzymać dokładniejszą wartość $D_{50} \cong 10,97$ mH₂O. Jednak, ze względu na rozmycie maksimum funkcji Ψ wiele innych możliwych wartości D_{50} leżących niedaleko maksimum funkcji Ψ może być wybrane z dużym prawdopodobieństwem.

Do przybliżania danych pochodzących z eksperymentów nurkowych można adaptować także krzywą Hilla, która została pierwszy raz opisana dla kompleksu hemoglobina-tlen, [7]. Może być ona wstępnie zastosowana także do opisu dekompresji (typu dawka-reakcja) z tym, że dawką może być np. maksymalne ciśnienie, na jakie wystawiono nurka podczas ekspozycji lub przesycenie dla tkanki teoretycznej, a odpowiedzią (reakcją) prawdopodobieństwo wystąpienia DCS:



rys. 2. Wykres logarytmicznej funkcji prawdopodobieństwa Ψ vs głębokość D dla wartości eksperymentalnych z Tabeli 1 i zagrożeniem DCS określonym jako (1)

$$\rho = \frac{R^n}{R^n + R_{50}^n} \quad (3)$$

gdzie: R- dawka lub funkcja reprezentująca stres dekompresyjny; R_{50} - dawka, dla której występuje 50% przypadków DCS; n- wykładnik kontrolujący nachylenie środkowej części funkcji.

Funkcję tę nazywa się czasami, od jej charakterystycznego kształtu, krzywą sigmoidalną. Wcześniej analizowana funkcja typu dawka-reakcja była funkcją Hill'a o wykładniku 1 (funkcja Michaelisa-Menten).

Regresja logistyczna

Do klasy funkcji sigmoidalnych należy także funkcja logistyczna. Przy jej pomocy można analizować wpływ różnych parametrów dekompresji na zmienną zależną. Może ona posłużyć np. do powiązania, podobnego do funkcji regresji, prawdopodobieństwa wystąpienia DCS ze zmiennymi niezależnymi. W zastosowaniach do badania bezpieczeństwa dekompresji przedstawia ona zależność prawdopodobieństwa warunkowego □ od zmiennych niezależnych x_i :

$$\rho = P(DCS = 1 | x_1 \dots x_k) = \frac{\exp\left(a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i\right)}{1 + \exp\left(a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i\right)} \quad (4)$$

Wartości x_i mogą być mierzalne lub jakościowe, natomiast a_i są współczynnikami regresji logistycznej. Dla modeli jedno-parametrycznych, jak dla (3), należało zdefiniować funkcję stresu dekompresyjnego R w postaci dawki skumulowanej, inaczej nie jest możliwe uwzględnienie więcej niż jednego parametru wpływającego na bezpieczeństwo dekompresji. Dla funkcji logistycznej, parametry te mogą być podane w formie jawnej.

Jak w każdym modelu regresji, tak i tutaj, poszukiwane jest oszacowanie współczynników w oparciu o dane z eksperymentów. Skuteczność tego postępowania zależy od ilości zmiennych do oszacowania. W związku z faktem częstego znacznego „statystycznego zaszumienia” danych ich ilość musi być większa niż dla typowego rozwiązywania układu równań. Przyjmuje się, że ilość danych l powinna być większa od ilości zmiennych m o ponad rząd wielkości: $l > 10m + 1$.

Do znalezienia współczynników funkcji logistycznej nie można użyć metody najmniejszych kwadratów gdyż wymaga ona założenia stałości wariancji co prowadzi do niezależności jej od zmiennej niezależnej. W przypadku zmiennej dychotomicznej o rozkładzie Bernoulliego taka zależność istnieje. Dlatego w celu znalezienia współczynników regresji logistycznej stosuje się metodę największej wiarygodności. Logarytmiczną funkcję prawdopodobieństwa Ψ , dla funkcji logistycznej (4) można zapisać jako:

$$\nabla_{\chi = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i} \Psi = \ln \left[\left(\frac{e^\chi}{1 + e^\chi} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{e^\chi}{1 + e^\chi} \right)^{N-n} \right] = n \cdot \chi - N \cdot \ln(1 + e^\chi) \quad (5)$$

Tabela 2

Wyniki eksperymentów nad zastosowaniem dekompresji tlenowej z różnych plateau saturacji powietrznej

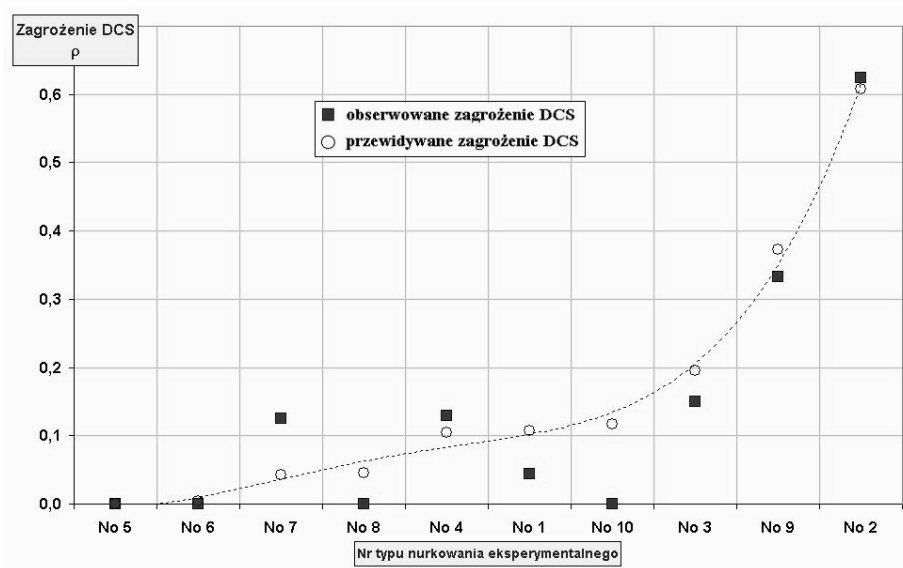
ilość przypadków DCS	ilość prób	azotowa głębokość równoważna plateau saturacji	czas dekompresji tlenowej	czas oddychania tlenem na plateau	całkowity czas dekompresji	Obserwowane zagrożenie DCS	Obliczone zagrożenie DCS	logit $P(DCS=1)$
		x_1	x_2	x_3				
		[ft]	[min]	[min]				
1	23	40	250	0	235	0,043	0,089	-2,328
5	8	50	353	0	328	0,625	0,474	-0,104
3	20	50	472	0	437	0,150	0,238	-1,162
4	31	50	617	0	480	0,129	0,079	-2,451
0	32	50	362	240	480	0,000	0,001	-7,144
0	16	50	347	180	420	0,000	0,005	-5,270
2	16	50	332	120	480	0,125	0,032	-3,397
0	15	60	630	120	600	0,000	0,052	-2,906
2	6	60	620	60	540	0,333	0,254	-1,077
0	8	60	560	120	540	0,000	0,092	-2,284

Rozwiązanie równania (5) można znaleźć numerycznie. Jako przykład takiego postępowania zostanie tutaj przedstawiona analiza dekompresji akcelerowanej [5].

Akceleracja polega na użyciu tlenu podczas dekompresji z plateau saturacji powietrznej z możliwością wykorzystania oddychania nim także na plateau przed rozpoczęciem obniżania ciśnienia. Wyniki badań podano w tab.2. Wynik dopasowania funkcji logistycznej do wartości uzyskanych z eksperymentu pokazano na rys.3.

Transformacja logit i iloraz szans

Transformacja typu *logit* to przekształcenie zdefiniowane jako:



rys. 3. Rezultat dopasowania funkcji logistycznej do wyników eksperymentów zamieszczonych w tab.3 w kolejności rosnącej przewidywanego prawdopodobieństwa wystąpienia DCS

$$\text{logit } P = \ln \frac{\rho}{1-\rho} \quad (6)$$

Stosunek pod logarytmem określa się mianem ilorazu szans i dla zdarzenia dychotomicznego polegającego na wystąpieniu zjawiska DCS lub jego braku określa stosunek prawdopodobieństw zdarzenia do zdarzenia przeciwnego. Transformacja (6) zastosowana do funkcji (4) daje następujące rozwiązanie:

$$\forall \chi = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i \quad \text{logit } P(DCS = 1 | x_1 \dots x_k) = \text{logit } \chi \Rightarrow \frac{\rho}{1-\rho} = e^\chi \quad (7)$$

Obliczona metodą największej wiarygodności funkcję logit można zapisać jako:

$$\text{logit } P(DCS = 1 | x_1 \dots x_k) = -12,665 + 0,314 \cdot x_1 - 0,00889 \cdot x_2 - 0,029 \cdot x_3 \quad (8)$$

gdzie: x_1 - azotowa głębokość równoważna plateau saturacji; x_2 - czas dekompresji tlenowej; x_3 - czas oddychania tlenem na plateau saturacji.

Ujemne szacunki parametrów odpowiadające czasowi oddychania tlenem podczas dekompresji oraz czasowi oddychania tlenem na plateau saturacji wskazują, że wzrost wartości tych wielkości powoduje zmniejszenie się prawdopodobieństwa zaistnienia DCS. Dodatnia wartość oszacowanego parametru dla azotowej głębokości równoważnej

ostrzega, że przy jej wzroście wzrasta zagrożenie DCS. Wyniki te są zgodne z wynikami eksperymentów [5].

W celu ułatwienia analizy wyników eksperymentów należy je uporządkować, np. w kolejności wzrastania zagrożenia DCS. W tab.3 pokazano wyniki obliczeń prawdopodobieństwa wystąpienia DCS. Pogrubione wartości oszacowanego prawdopodobieństwa reprezentują wartości zagrożenia DCS dla przetestowanych profili dekompresji a na polach cieniowanych reprezentują wartości zagrożenia poniżej 1% [1].

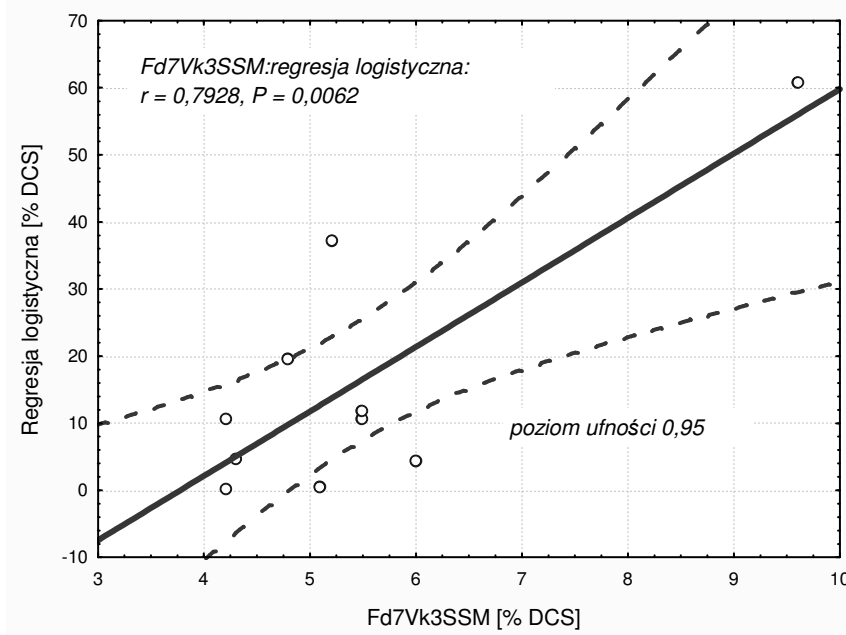
Porównano oszacowanie zagrożenia DCS według US Navy z modelem otrzymanym z regresji logistycznej poprzez wyznaczenie korelacji pomiędzy modelami, [5]. Z rys.4 widać, że istnieje stosunkowo wysoka korelacja ($r \cong 79\%$; $P=0,006$) pomiędzy wynikami według procedury Fd7Vk3SSM US Navy [5], a modelem regresji logistycznej, biorąc pod uwagę stosunkowo małą populację wyników eksperymentów.

Tabela 3

Zagrożenie DCS w funkcji czasu oddychania tlenem na plateau saturacji

Profil	azotowa głębokość równoważna [fsw]	czas dekompresji tlenowej [min]	Zagrożenie DCS otrzymane metodą regresji logistycznej [%]				
			Czas akceleracji [min]				
			0	60	120	180	240
N1	40	235	10,74	2,61	0,60	0,13	0,03
N2	50	328	60,85	25,75	7,18	1,70	0,38
N3	50	437	19,59	5,16	1,20	0,27	0,06
N4-N5	50	480	10,50	2,55	0,58	0,13	0,03
N6	50	420	24,55	6,77	1,59	0,36	0,08
N7	50	360	47,43	16,76	4,30	0,99	0,22
N8	60	600	48,93	17,61	4,55	1,05	0,24
N9-N10	60	540	72,65	37,22	11,68	2,87	0,65

Wartości pogrubione reprezentują testowane profile



rys. 4. Korelacja pomiędzy oceną ryzyka DCS według Fd7Vk3SSM US Navy i modelem regresji logistycznej dla danych z tab.1

Można stąd wnioskować, że regresja logistyczna jest obiecującą metodą predykcji zagrożenia DCS łączącą podejście statystyczne z deterministycznym.

Analiza przeżycia/niezawodności

W technice do określania niezawodności stosowana jest funkcja niezawodności $Q(t)$. Podobna funkcja używana jest w medycynie do określania prawdopodobieństwa przeżycia choroby. Funkcja niezawodności (przeżycia) określa prawdopodobieństwo, że system będzie pracował bezusterkowo przez czas równy przynajmniej t :

$$\forall_{t \geq 0} \quad Q(t) \equiv P(X \geq t) = 1 - F(t) \quad (9)$$

gdzie: $Q(t)$ - funkcja niezawodności; $F(t)$ - oznacza dystrybuantę czasu przeżycia (bezawaryjnej pracy).

Wartością funkcji hazardu (ryzyka śmierci, intensywności uszkodzeń) $R(t)$ w punkcie t jest iloraz gęstości prawdopodobieństwa $L(t)$ czasu pracy elementu w punkcie t przez prawdopodobieństwo tego, że czas pracy elementu jest, co najmniej równy t :

$$\forall_{t \geq 0; Q(t) \geq 0; \frac{\partial L(t)}{\partial t} = \dot{F}(t)} \quad R(t) \equiv \frac{L(t)}{Q(t)} = \frac{\dot{F}(t)}{Q(t)} \quad (10)$$

Korzystając z (9) można obliczyć różniczkę względem czasu:

$$\dot{F}(t) = \frac{\partial [1 - Q(t)]}{\partial t} = -\dot{Q}(t) \quad (11)$$

Co wobec (10) daje:

$$R(t) = -\frac{\dot{Q}(t)}{Q(t)} = -\frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \Rightarrow \int_0^t R(t) \cdot dt = -\int_0^{Q(t)} \frac{dQ(t)}{Q(t)} = -\ln|Q(t)| = -\ln Q(t)$$

$$Q(t) = \exp\left(-\int_0^t R(t) \cdot dt\right) \quad (12)$$

Funkcja niezawodności może doskonale reprezentować prawdopodobieństwo DCS w funkcji czasu. Korzystając z (9) i (12) można zdefiniować prawdopodobieństwo wystąpienia objawów DCS w funkcji czasu $\rho(t)$ poprzez integralną wartość funkcji ryzyka R:

$$\forall \rho(t) \triangleq F(t) \quad \rho(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t R(t) dt\right] \quad (13)$$

Całka funkcji ryzyka od momentu $t=0$ do t określa integralne ryzyko wystąpienia w tym okresie czasu przypadku DCS. Czyli wartość funkcji R z wyrażenia (13) określa wartość ryzyka zaistnienia objawów DCS. Przy wykorzystaniu powyższych funkcji prawdopodobieństwa możemy określić wartości parametrów funkcji ryzyka, poprzez dopasowanie jej do danych eksperymentalnych. Granice całkowania rozciągają się, w tym przypadku, także na kilka godzin po zakończeniu nurkowania. Jako wartość funkcji ryzyka można przyjąć klasyczny model supersaturacji tkanek teoretycznych. Ryzyko DCS może pochodzić, zależnie od przyjętego rozwinięcia, od kilku do kilkunastu tkanek teoretycznych [3]. Oznaczając jako $R_i(t)$ funkcję ryzyka dla i -tej tkanki teoretycznej można formułę (12) zapisać jako:

$$\forall R(t) = \sum_i R_i(t) \quad Q(t) = \prod_i Q_i(t) = \prod_i \exp\left[-\int_0^t R_i(t) dt\right] = \exp\left[-\int_0^t \sum_i R_i(t) dt\right] \quad (14)$$

Przykład zastosowania metody największej wiarygodności w celu dopasowania do danych pomiarowych funkcji (13) podano na prostym przykładzie modelu funkcji ryzyka. Założono, że ryzyko $R(t)$ jest malejącą funkcją eksponentialną w czasie ze stałą wartością c :

$$R(t) = \exp(-ct) \quad (15)$$

Dodatkowo zakładając, że funkcja ta jest ciągła we współrzędnych czasu dla $0 \leq t \leq \infty$, zgodnie z (13) i (15), można obliczyć:

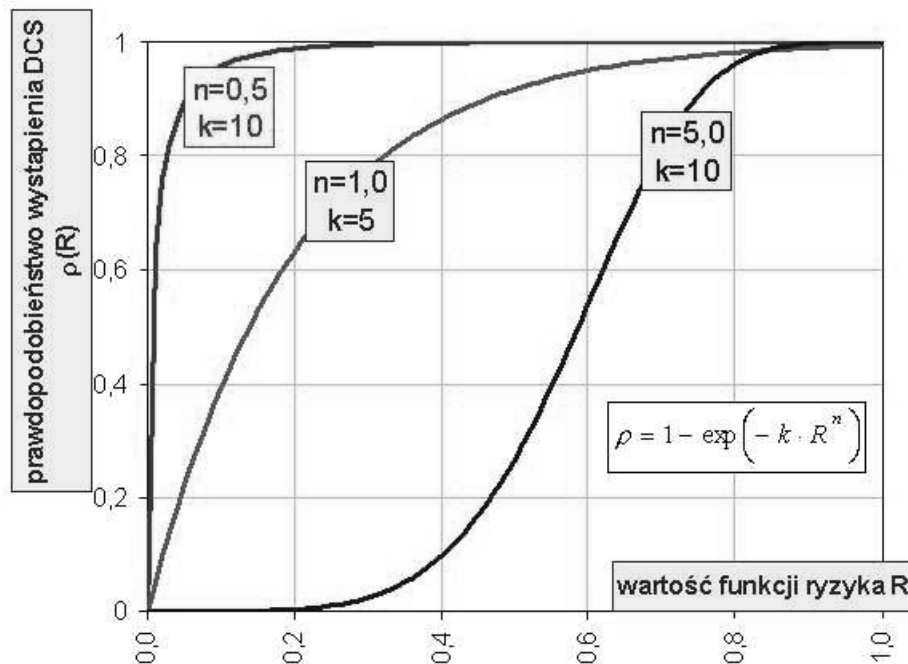
$$\int_0^{\infty} e^{-c \cdot t} dt = -\frac{1}{c} e^{-c \cdot t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{c} \quad \rightarrow \quad \rho(\infty) = 1 - \exp(-c^{-1}) \quad (16)$$

Przy zastosowaniu tego kryterium ryzyka do 10 nurkowań podczas których zaobserwowano 2 przypadki choroby dekompresyjnej i 8 przypadków bez wystąpienia choroby dekompresyjnej:

$$\rho(\infty) = 1 - \exp(-c^{-1}) = 0,2 \quad \Rightarrow \quad c = -\frac{1}{\ln(0,8)} \cong 4,48 \quad (17)$$

W analizie bezpieczeństwa dekompresji prawdopodobieństwo \square często przedstawia się formułą:

$$\rho = 1 - \exp\left(-k \cdot R^n\right) \quad (18)$$



rys. 5. Kształt funkcji ryzyka w zależności od jej parametrów.

W tym przypadku funkcja ryzyka nie jest już funkcją czasu. Należy jednak zauważyć, że taka funkcja doskonale oddaje kształty typowych krzywych reakcji obserwowanych w praktyce, zwłaszcza krzywej sigmoidalnej. Wykresy funkcji (14) dla znormalizowanej do 1 funkcji ryzyka pokazano na rys.5.

2. DYSKUSJA I WNIOSKI

Przedstawione w artykule metody statystycznej walidacji tabel dekompresyjnych nie wyczerpują możliwości zastosowania innych metod. Oprócz opisanych już wcześniej w piśmiennictwie fachowym zastosowania metod: analizy przeżycia i opartych o rozkład binominalny, po raz pierwszy zaproponowano zastosowanie funkcji logistycznej do oceny ryzyka dekompresji. Propozycję zastosowania funkcji logistycznej do oceny bezpieczeństwa dekompresji oparto na analogii do powszechnego wykorzystania innych modeli funkcji bezpieczeństwa tzw. klasy funkcji sigmoidalnych, do których należy także funkcja logistyczna.

Wykonane obliczenia przy wykorzystaniu funkcji logistycznej (tab.3) pokazują, że procedura z 240min akceleracją dla profilu N2 i 180min akceleracją dla profilu N6 stwarzają to samo zagrożenie DCS, lecz profil N6 jest o ponad 30min krótszy.

Zastosowanie funkcji logistycznej daje przesłanki do wzięcia pod uwagę dodatkowego profilu dekompresji N2, z 240min czasem akceleracji (tab.3), jako bardzo przydatnego podczas akcji ratowniczej. Profil ten nie był potwierdzony doświadczalnie. Jeżeli wyniki badań dodatkowych potwierdziłyby niski stopień zagrożenia DCS przy jego zastosowaniu, można byłoby zastosować proponowany profil do przyspieszenia procesu ratowania załóg okrętów podwodnych, na których doszło do podniesienia ciśnienia i wskutek tego saturacji powietrznej załogi.

3. WIADOMOŚCI UZUPEŁNIAJĄCE

Treść jest efektem pracy badawczej prowadzonej na zlecenie Departamentu Polityki Zbrojeniowej MON p.k. ALCZYK oraz pracy własnej pk. WALDEKOM sponsorowanej przez Akademię Marynarki Wojennej.

PIŚMIENNICTWO

1. Huggins K.E.: The Dynamics of Decompression Workbook: The University of Michigan Ann Arbor: Michigan 1992
2. Kenny J.E.: Business of diving. Gulf Publishing: Houston 1972
3. Kłós R.: Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego: KoopGraf Poznań 2000.
4. Nishi R.Y. i Lancner G.R.: Development of the DCIEM 1983 Decompression Model for Compressed Air Diving: Department of National Defence - Canada 1984
5. Report US NEDU TR 11-00: Accelerated decompression using oxygen for submarine rescue – summary report and operational guidance: Panama City 2000
6. Weathersby P.K.: Confidence in Decompression Safety |w:| Lin Y.C. i Shida K.K.: Man in the Sea: tom I: Best Publishing Co. San Pedro 1990
7. Zagórski A., Rondko R.: Obliczenia biochemiczne: PWN Warszawa 1981

Recenzent: dr hab. inż. Z. Korczewski prof. nadzw. AMW

Autorzy:

*dr inż. R. Kłós – Akademia Marynarki Wojennej,
dr med. M. Konarski – Wojskowy Instytut Medyczny.*