Zrozumieć M-wartości
Erik C. Baker, P.E.

Tłumaczenie:
Maciek „Szczęściarz” Curzydło [*]

Dekompresyjny „Haldanowski” model gazu rozpuszczonego opiera się na obliczeniu nasycania gazami oraz M-wartości dla szeregu hipotetycznych tkanek,. Dzięki wykorzystywaniu powszechnie dostępnego oprogramowania komputerowego, nurkowie techniczni powierzają temu modelowi swoje dekompresyjne bezpieczeństwo. Dobre zrozumienie idei M-wartości może pomóc nurkom określić odpowiednie współczynniki konserwatyzmu oraz ocenić przydatność różnych profili dekompresyjnych do poszczególnych nurkowań.

Co to są M-wartości?

Termin M-wartości, „M-value” stworzył w połowie lat 60-tych Robert D. Workman. Prowadził wtedy badania nad dekompresją dla U.S. Navy Experimental Diving Unit (NEDU). Workman był lekarzem w stopniu kapitana w korpusie medycznym U.S.Navy. „M” w słowie M-wartość oznacza „Maksimum”. Dla danego ciśnienia otoczenia M-wartość definiuje się jako maksymalną wartość prężności gazu obojętnego (wyrażoną w ciśnieniu absolutnym) którą może „tolerować” hipotetyczna tkanka „kompartment” bez pojawienia się widocznych objawów choroby dekompresyjnej (DCS). M-wartość określa tolerowane nadciśnienie**[**]** (nadwyżkę ciśnienia) pomiędzy prężnością gazu obojętnego w poszczególnych kompartmentach a ciśnieniem otoczenia. Inne terminy na określenie M-wartości to limit tolerowanego nadciśnienia (limits for tolerated overpressure), krytyczna prężność (critical tensions) i limit przesycenia (supersaturation limits). Termin M-wartość jest popularnie używany przez osoby opracowujące modele dekompresyjne.

Historia

W modelu „haldanowskim” czyli gazu rozpuszczonego wyliczenie nasycenia dla każdej hipotetycznej tkanki (kompartmentu) było porównywane do wartości ograniczającej wynurzanie (ascent limiting criteria) dla określenia bezpiecznego profilu wynurzania. We wczesnych latach modelu włączając w to metodę rozwiniętą przez Johna S. Haldane’a w 1908, wartość ograniczaja wynurzanie (ascent limiting criteria) występowałą w formie współczynnika przesycenia (supersaturation ratios). Na przykład Haldane odkrył, że nurek którego „tkanki” były nasycone podczas oddychania powietrzem na 10 metrach głębokości może bezpośrednio wynurzyć się na powierzchnię (na poziomie morza) bez pojawienia się symptomów DCS. Ponieważ ciśnienie otoczenia na 10 metrach jest dwa razy większe niż na poziomie morza, Haldane wyciągnął wniosek, że współczynnik 2:1 dla tolerowanego nadciśnienia (powyżej ciśnienia otoczenia) może być wykorzystana jak wartość ograniczająca wynurzanie. Ten przybliżony współczynnik był wykorzystywany przez Haldane’a do stworzenia pierwszych tabel dekompresyjnych. W późniejszych latach aż do lat 60-tych inne współczynniki dla kompartmentów o różnych półokresach były wykorzystywane przez projektantów modeli dekompresyjnych. Większość tabel dekompresyjnych U.S.Navy było wyliczanych w oparciu o metodę współczynników przesycenia.

Pojawiły się jednak problemy. Wiele tabel zaprojektowanych zgodnie z tą metodą zawodziło w głębszych lub dłuższych nurkowaniach. Robert Workman systematycznie przeglądał modele dekompresyjne oraz wcześniejsze badania prowadzone przez U.S.Navy. Doszedł do paru ważnych wniosków. Po pierwsze odkrył, że oryginalny Haldanowski współczynnik 2:1 był tak naprawdę współczynnikiem wynoszącym 1,58:1 (dla powietrza) jeżeli wziąć pod uwagę ciśnienie parcjalne gazu obojętnego – azotu. (W tamtym czasie wiedziano, że tlen nie ma dużego wpływu na DCS; winne są gazy obojętne jak azot czy hel). W czasie przeglądania danych Workman odkrył, że współczynniki tkankowe (tissue ratios) dla tolerowanego nadciśnienia są różne dla różnych półokresów i różnych głębokości. Dane pokazywały, że szybsze kompartmenty (o krótszych półokresach) tolerują większy współczynnik nadciśnienia niż kompartmenty wolniejsze. Dodatkowo wszystkie kompartmenty tolerują mniejsze współczynniki wraz z rosnącą głębokością**[***]**. Dlatego zamiast korzystać ze współczynników, Workman opisał maksymalne tolerowane ciśnienie parcjalne azotu i helu dla każdego kompartmentu na każdej głębokości jak M-wartość. Następnie dokonał liniowej projekcji tych M-wartości jako funkcji głębokości i odkrył, że jest to wystarczająco blisko danych doświadczalnych. Stwierdził, że „liniowa projekcja M-wartości jest użyteczna przy programowaniu komputerowym”.

M-wartości Workmana

Przedstawienie przez Workmana M-wartości w postaci równania liniowego było znaczącym krokiem w rozwoju modeli gazu rozpuszczonego. Jego koncepcja przedstawia M-wartości w postaci liniowej zależności ciśnienia na danej głębokości (ciśnienia otoczenia) i tolerowanej prężności gazu

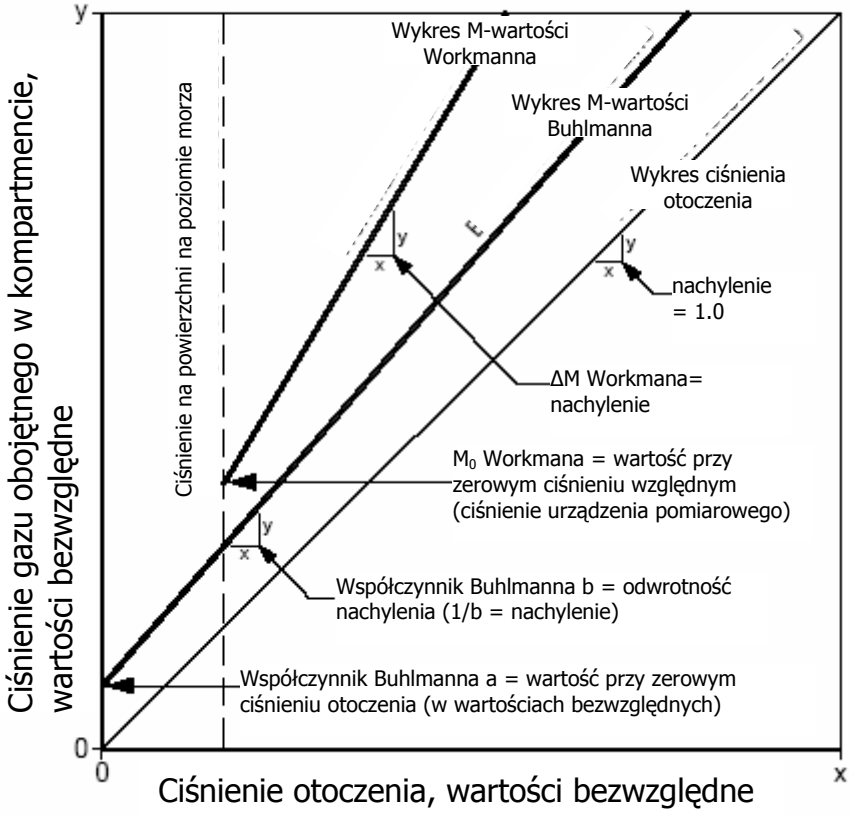
obojętnego w każdym kompartmencie. Ta koncepcja jest ważnym elementem wykorzystywanym przez projektantów dzisiejszych modeli gazu rozpuszczonego. Workman przestawiał swoje M-wartości w formie nachylonej prostej będącego funkcją równania liniowego (zobacz rysunek 1). Jej wartość powierzchniowa została przedstawiona jak M_0 (M-zero). Przedstawiała miejsce przecięcia się funkcji z głębokością zero (powierzchnią) na poziomie morza. Nachylenie prostej zostało nazwane delta M i reprezentowało zmiany w M-wartościach w odniesieniu do zmian głębokości (ciśnienia otoczenia).

M-wartości Buhlmanna

Albert A. Buhlmann Profesor medycyny szpitala uniwersyteckiego w Zurichu rozpoczął swoje badania nad dekompresją w 1959 roku w laboratorium fizjologii hiperbarycznej. Buhlmann kontynuował swoje badania przez ponad trzydzieści lat i wniósł wielki wkład w naukę o dekompresji. W 1983 roku wielki sukces odniosła opublikowana przez niego pierwsza edycja książki „Dekompresja – Choroba dekompresyjna". Angielski tłumaczenie ukazało się w 1984 roku. Podręcznik Buhlmanna był pierwszą szeroko dostępną prawie kompletną publikacją o problemach wyliczenia dekompresji. W rezultacie algorytmy Buhlmannowskie stały się podstawą to tworzenia większości modeli wykorzystywanych w komputerach nurkowych oraz w tworzonych programach komputerowych. W Niemczech ukazały się trzy następne wydania w 1990, 1993 i 1995 roku pod tytułem Tauchmedizin (Medycyna nurkowa) [Wydanie angielskie czwartej edycji z 1995 roku jest w przygotowaniu].

Buhlmannowska metoda liczenia dekompresji jest podobna do tej opisanej przez Workmana. Zawiera M-wartości wyrażające liniowy związek pomiędzy ciśnieniem otoczenia a tolerowaną prężnością gazu obojętnego w hipotetycznej tkance. Podstawowa różnica polega na tym, że M-wartości Workmana odnoszą się do zakresu ciśnień od powierzchni n.p.m. (dla nurkowań na poziomie morza) a M-wartości Buhlmanna odnoszą się do zakresu ciśnień od zera absolutnego (dla nurkowań w górach). Wynika to z faktu, że Workman skupiał się na nurkowaniach wykonywanych przez U.S.Navy (najczęściej wykonywanych na poziomie morza) podczas gdy Buhlmann brał po uwagę nurkowanie w wysokogórskich jeziorach Szwajcarii. Buhlmann opublikował dwa znane w światku nurkowym zestawy M-wartości; ZH-L_{12} (książka z 1983 roku) i ZH-L_{16} (książka z 1990 roku i późniejsze edycje). „ZH" oznacza tu Zurich (jego miasto rodzinne), „L" oznacza linowy a „12" lub „16" odpowiada ilości par współczynników (M-wartości) dla szeregu komparmentów o poszczególnych półokresach dla helu i azotu. Zestaw ZH-L_{12} miał dwanaście par współczynników dla kompartmentów o szesnastu różnych półokresach. Te M-wartości zostały określone eksperymentalnie (czyli podczas rzeczywistych testów dekompresyjnych). Zestaw ZH-L_{16} ma szesnaście par współczynników dla szesnastu kompartmentów. Te M-wartości zostały matematycznie wyprowadzone z półokresów opartych na tolerowanej nadmiarowej objętości i rozpuszczalności gazów obojętnych. Zestaw M-wartości ZH-L_{16} dla azotu jest dodatkowo podzielony na dwa podzestawy B i C ponieważ matematycznie wyprowadzony zestaw A okazał się w praktyce za mało konserwatywny w zakresie środkowych kompartmentów. Zmodyfikowany zestaw B (trochę bardziej konserwatywny) zaleca się do wykorzystywania w liczeniu tabel, a zmodyfikowany zestaw C (trochę bardziej konserwatywny) zaleca się wykorzystywać w komputerach liczących dekompresję w wodzie w czasie rzeczywistym. Podobnie do M-wartości Workmana, M-wartości Buhlmanna są wyrażone w postaci nachylonej prostej będącej wynikiem funkcji liniowej (zobacz rysunek 1). Współczynnik „a" oznacza miejsce przecięcia wykresu M-wartości z osią współrzędnych wyznaczoną przez zero

Wykres ciśnień: Porównanie M-wartości Workmana i M-wartości Buhlmanna



absolutne a współczynnik „b” jest odwrotnością nachylenia wykresu M-wartości. (Uwaga. Współczynnik „a” nie oznacza, że człowiek jest w stanie znieść zerowe ciśnienie otoczenia. Wynika to po prostu z założeń równania. Dolny limit zastosowania M-wartości Buhlmanna wynosi 0,5 atm ciśnienia otoczenia).

M-wartości DCAP i DSAT

Wielu technicznych nurków zna zestaw M-wartości 11F6 wykorzystywanych przez Hamilton Research’s Decompression Computationand Analysis Program (DCAP). Ten zestaw czy zbiór M-wartości został stworzony przez Doktora Billa Hamiltona i współpracowników podczas tworzenia nowych powietrznych tabel dekompresyjnych dla szwedzkiej marynarki wojennej. Ponieważ oprócz powietrza zestaw M-wartości 11F6 dobrze spisuje się podczas nurkowań trimiksowych to stały się one bazą dla wielu tabel stworzonych dla nurków technicznych.
Wielu nurków sportowych zna również tabele RDP dystrybuowane przez PADI (Professional Association of Diving Instructors). M-wartości wykorzystane w tabelach RDP zostały stworzone i przetestowane przez doktora Raymonda E. Rogersa i doktora Michaela R.Powella i współpracowników z DSAT-u (Diving Science and Technology Corp), korporacji afiliowanej przy PADI. M-wartości DSAT-u były intensywnie doświadczalnie weryfikowane poprzez monitorowane Dopplerem rzeczywiste nurkowania testowe.

Porównanie M-wartości.

Tabele 1 do 4 przedstawiają porównania M-wartości dla azotu i helu pomiędzy różnymi omawianymi w tym artykule Haldanowskimi algorytmami dekompresyjnymi. Wszystkie omawiane M-wartości są przedstawione w formacie zaproponowanym przez Workmana. Widać wyraźny rozwój w kierunku delikatnego wzrostu konserwatyzmu od M-wartości zaproponowanych przez Workmana (1965) do M-wartości Bulhmanna (1990). Ten trend jest odbiciem procesu uwiarygodniania modelu (testy praktyczne) oraz ultradźwiękowego testowania obecności oraz ilości mikropęcherzyków (pęcherzyków które są wykrywalne w układzie krążenia ale nie wywołują wyraźnych objawów choroby dekompresyjnej).

Spójność M-wartości.

Kiedy porównujemy M-wartości z różnych algorytmów widać, że nie ma pomiędzy nimi większych różnic. Inaczej mówiąc okazuje się, że istnieje duża zbieżność pomiędzy wartościami określonymi niezależnie przez badaczy w różnych miejscach świata. Jest to dobry znak wskazujący, że udało się określić relatywnie stały próg wywołujący symptomy choroby dekompresyjnej w populacji ludzkiej.

Format M-wartości.

M-wartości są często wyrażane w formie równania liniowego (funkcji liniowej) tak jak przedstawiał je Workmann lub Buhlmann. Jest to format idealny dla programów komputerowych ponieważ umożliwia wyliczanie M-wartości w czasie rzeczywistym. Linearny format pozwala również przedstawiać M-wartości w postaci wykresów. M-wartości mogą być również wyrażone w formie macierzy lub tabel. Jest to bardzo proste kiedy M-wartości dla poszczególnych (różniących się półokresami) kompartmentów i głębokości kolejnych przystanków dekompresyjnych są wcześniej wyliczone i ułożone w postacie tabeli. Taki format jest wygodny dla szczegółowych porównań i analiz. Niektóre wczesne komputery nurkowe i programy dekompresyjne, dla każdego przystanku, pobierały potrzebne do liczenia M-wartości z przygotowanych wcześniej tabel

<u>Definicje Workmanna:</u>

M = tolerowane ciśnienie gazu obojętnego w hipotetycznej tkance
Głębokość = ciśnienie (urządzenia pomiarowego) mierzone od powierzchni (na poziomie morza).
Tolerowana głębokość = tolerowane ciśnienie (urządzenia pomiarowego) mierzone od powierzchni (na poziomie morza).
M_o = M-wartość przy zerowym ciśnieniu względnym (ciśnienie urządzenia pomiarowego); powierzchniowa M-wartość
ΔM = nachylenie wykresu M-wartości

<u>Definicje Buhlmanna:</u>

$P_{t\ tol.}$ i.g. = tolerowane ciśnienie (bezwzględne) gazu obojętnego w hipotetycznej tkance
P_t i.g. = ciśnienie (bezwzględne) gazu obojętnego w hipotetycznej tkance
$P_{amb.}$ = ciśnienie otoczenia (bezwzględne)
$P_{amb.tol.}$ = tolerowane ciśnienie otoczenia (bezwzględne)
a = wartość dla ciśnienia otoczenia równego zero (bezwzględnego)
b = odwrotność nachylenia wykresu M-wartości

Charakterystyka M-wartości.

Zbiory M-wartości mogą być zaliczone do dwóch kategorii, dekompresyjnych i bezdekompresyjnych. M-wartości bezdekompresyjne dotyczą tylko momentu wynurzenia się na powierzchnię. Przykładem są M-wartości DSAT RDP. Profil bezdekompresyjny zakłada, że nasycenie gazem kompartmentów nie przekroczy M-wartości dla

ciśnienia otoczenia na powierzchni (M_0). Pozwala to na bezpośrednie wynurzenie się na powierzchnię w dowolnym momencie nurkowania. Niektóre algorytmy bezdekompresyjne uwzględniają w kalkulacjach tempo zanurzania i wynurzania.

M-wartości dekompresyjne charakteryzuje parametr nachylenia funkcji odpowiadający za zmiany M-wartości wraz z zmianami ciśnienia otoczenia. Wartości nachylenia funkcji będą się różniły w zależności od półokresów hipotetycznych tkanek (kompartmentów). Generalnie szybsze tkanki mają większe nachylenie funkcji niż kompartmenty wolniejsze. Wynika to z faktu, że szybsze tkanki tolerują większe przesycenia niż tkanki wolniejsze. Jeżeli współczynnik nachylenia jest większy od 1.0 to wykres M-wartości jest bardziej „stromy" i kompartment toleruje większe nadciśnienie wraz z rosnącą głębokością. Współczynnik nachylenia wynoszący 1.0 oznacza, że kompartment toleruje takie same nadciśnienie niezależnie od głębokości. Niezależnie od sytuacji wartość współczynnika nachylenia nie może być mniejsza od 1.0. W innym przypadku wykres M-wartości przecięła by w pewnym punkcie wykres ciśnienia otoczenia tworząc nielogiczną sytuację kiedy kompartment nie mógł by tolerować nawet wartości ciśnienia otoczenia.

Wykres ciśnienia otoczenia

Wykres ciśnienia otoczenia jest kluczowym punktem odniesienia wykresu ciśnień. Przechodzi przez początek układu współrzędnych mając współczynnik nachylenia 1.0 i reprezentuje zbiór punktów kiedy nasycenie kompartmentu gazami obojętnymi będzie równe ciśnieniu otoczenia. Jest to bardzo ważny punkt odniesienia ponieważ nadciśnienie powstaje wtedy, kiedy nasycenie kompartmentu gazem obojętnym przekroczy na wykresie linię ciśnienia otoczenia. Wykres M-wartości reprezentuje ustalony limit tolerowanej nadwyżki ciśnienia powyżej ciśnienia otoczenia.

Strefa Dekompresji

Obszar na wykresie ciśnień pomiędzy wykresem ciśnienia otoczenia a wykresem M-wartości nazywamy „Strefą dekompresji" (patrz rysunek 3). W kontekście modelu gazu rozpuszczonego jest to strefa w której zachodzi dekompresja. W teorii „dodatnie" nadciśnienie powyżej ciśnienia otoczenia jest pożądane w celu odsycania kompartmentów czyli dekompresji. W niektórych przypadkach kiedy np. wykorzystujemy mieszanki o wysokiej zawartości tlenu kompartment może się odsycać nawet wtedy, kiedy sumaryczna prężność gazów obojętnych jest mniejsza od ciśnienia otoczenia. Kiedy nasycenie gazem kompartmentu kontrolnego jest utrzymywane w strefie dekompresji otrzymujemy skuteczny profil dekompresyjny. W zależności od tego który z kompartmentów o różnych półokresach jest kontrolnym w danym czasie jego wykres nasycenia podczas profilu dekompresyjnego wchodzi lub wychodzi ze strefy dekompresyjnej. Ogólnie najszybsze kompartmenty wchodzą w strefę dekompresji pierwsze i kontrolują nurkowanie (nasycenie najbliższe M-wartościom). Potem kontrolę profilu dekompresyjnego przejmują kolejne coraz wolniejsze kompartmenty.

Nurkowania wielogazowe

Obecne modele gazu rozpuszczonego obejmujące wiele gazów obojętnych opierają się na założeniu, że całkowita prężność gazów obojętnych w hipotetycznej tkance jest sumą prężności (ciśnień parcjalnych) tych gazów obecnych w kompartmencie. Jest to niezależne od tego, że różne gazy obojętne mają różne półokresy dla danego kompartmentu. Wielogazowe algorytmy dekompresyjne muszą brać pod uwagę więcej niż jeden gaz obojętny w mieszankach oddechowych takich jak np. hel i azot w trimiksie. W takiej sytuacji różne algorytmy podchodzą odmiennie do M-wartości. Niektóre wykorzystują takie same M-wartości dla azotu i helu; zwykle oparte na M-wartościach dla azotu. W algorytmie Buhlmannowskim pośrednie M-wartości są wyliczane z osobnych M-wartości dla azotu i helu opierając się na proporcji zawartości tych gazów w kompartmencie. W równaniu liniowym M-wartości współczynnik „a" ($He+N_2$) i współczynnik „b" ($He+N_2$) są wyliczane zgodnie z ciśnieniem parcjalnym helu (P_{He}) i azotu (P_{N2}):

$$\mathbf{a}\ (He+N_2) = [\mathbf{a}(He) \times P_{He} + \mathbf{a}(N_2) \times P_{N2}] / [P_{He}+P_{N2}]$$

$$\mathbf{b}\ (He+N_2) = [\mathbf{b}(He) \times P_{He} + \mathbf{b}(N_2) \times P_{N2}] / [P_{He}+P_{N2}]$$

	Matematyka M-wartości	
Równania liniowe:	format $y = mx + b$	format $x = (y - b) / m$
styl Workmana	$M = \Delta M$ * Głębokość + M_o	Tolerowana Głębokość = $(P - M_o) / \Delta M$
styl Buhlmanna	$P_{t.tol.}$i.g. = $(P_{amb.} / b) + a$	$P_{amb.tol.}$ = $(P_t$.i.g. – a) * b
Workman → Buhlmann $a = M_o - \Delta M * P_{amb.}$ (na poziomie morza) $b = 1/\Delta M$	←Konwersja→	Buhlmann → Workman $M_o = a + P_{amb.}$ (na poziomie morza) / b $\Delta M = 1/b$

Tabela 1: Porównanie M-wartości dla azotu pomiędzy różnymi haldanowskimi algorytmami dekompresyjnymi
Europejski system jednostek miary – metry wody słonej (msw)

Workman M-wartości (1965)				Bühlmann ZH-L_{12} M-wartości (1983)				DSAT RDP M-wartości1987)			DCAP MM11F6 M-wartości (1988)				Bühlmann ZH-L16 M-wartości (1990)					
																	A	B	C	
Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M_O msw	Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M_O msw	M_O msw	M_O msw	ΔM slope
				1	2.65	34.2	1.2195													
															1	4.0	32.4	32.4	32.4	1.9082
1	5	31.7	1.8					1	5	30.42	1	5	31.90	1.30	1b	5.0	29.6	29.6	29.6	1.7928
2	10	26.8	1.6	2	7.94	27.2	1.2195	2	10	25.37	2	10	24.65	1.05	2	8.0	25.4	25.4	25.4	1.5352
				3	12.2	22.9	1.2121								3	12.5	22.5	22.5	22.5	1.3847
3	20	21.9	1.5	4	18.5	21.0	1.1976	3	20	20.54					4	18.5	20.3	20.3	20.3	1.2780
				5	26.5	19.3	1.1834	4	30	18.34	3	25	19.04	1.08	5	27.0	19.0	19.0	18.5	1.2306
4	40	17.0	1.4	6	37	17.4	1.1628	5	40	17.11					6	38.3	17.8	17.5	16.9	1.1857
				7	53	16.2	1.1494	6	60	15.79	4	55	14.78	1.06	7	54.3	16.8	16.5	15.9	1.1504
5	80	16.4	1.3	8	79	15.8	1.1236	7	80	15.11					8	77.0	15.9	15.7	15.2	1.1223
								8	100	14.69	5	95	13.92	1.04	9	109	15.2	15.2	14.7	1.0999
6	120	15.8	1.2	9	114	15.8	1.1236	9	120	14.41										
7	160	15.5	1.15	10	146	15.3	1.0707	10	160	14.06	6	145	13.66	1.02	10	146	14.6	14.6	14.3	1.0844
8	200	15.5	1.1	11	185	15.3	1.0707	11	200	13.84	7	200	13.53	1.01	11	187	14.2	14.2	14.0	1.0731
9	240	15.2	1.1	12	238	14.4	1.0593	12	240	13.69					12	239	13.9	13.9	13.7	1.0635
				13	304	12.9	1.0395				8	285	13.50	1.0	13	305	13.5	13.4	13.4	1.0552
				14	397	12.9	1.0395	13	360	13.45	9	385	13.50	1.0	14	390	13.2	13.2	13.1	1.0478
				15	503	12.9	1.0395	14	480	13.33	10	520	13.40	1.0	15	498	12.9	12.9	12.9	1.0414
				16	635	12.9	1.0395								16	635	12.7	12.7	12.7	1.0359
											11	670	13.30	1.0						

Cpt = kompartment HT = półokres M_O =powierzchniowa M-wartość(10 msw = 1.0 bar) ΔM = nachylenie wykrsu M-wartości

Tabela 2: Porównanie M-wartości dla helu pomiędzy różnymi haldanowskimi algorytmami dekompresyjnymi
Europejski system jednostek miary – metry słonej wody (msw)

Workman M-wartości (1965)				Bühlmann ZH-L_{12} M-wartości (1983)				Bühlmann ZH-L16A M-wartości (1990)			
Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope	Cpt No.	HT min	M_O msw	ΔM slope
				1	1.0	34.2	1.2195	1	1.51	41.0	2.3557
								1b	1.88	37.2	2.0964
				2	3.0	27.2	1.2195	2	3.02	31.2	1.7400
1	5	26.2	1.5	3	4.6	22.9	1.2121	3	4.72	27.2	1.5321
				4	7.0	21.0	1.1976	4	6.99	24.3	1.3845
2	10	22.5	1.4	5	10	19.3	1.1834	5	10.21	22.4	1.3189
				6	14	17.4	1.1628	6	14.48	20.8	1.2568
3	20	20.1	1.3	7	20	16.2	1.1494	7	20.53	19.4	1.2079
				8	30	15.8	1.1236	8	29.11	18.2	1.1692
4	40	18.3	1.2	9	43	15.8	1.1236	9	41.20	17.4	1.1419
				10	55	15.9	1.0799	10	55.19	16.8	1.1232
5	80	17.0	1.2	11	70	15.9	1.0799	11	70.69	16.4	1.1115
				12	90	15.9	1.0799	12	90.34	16.2	1.1022
6	120	16.4	1.2	13	115	15.9	1.0799	13	115.29	16.1	1.0963
7	160	16.4	1.1	14	150	15.9	1.0799	14	147.42	16.1	1.0904
8	200	16.1	1.0	15	190	15.9	1.0799	15	188.24	16.0	1.0850
9	240	16.1	1.0	16	240	15.9	1.0799	16	240.03	15.9	1.0791

Cpt = kompartment HT = półokres ΔM = nachylenie wykresu M-wartości
M_O = M-wartość na powierzchni = 10 msw = 1.0 bar)

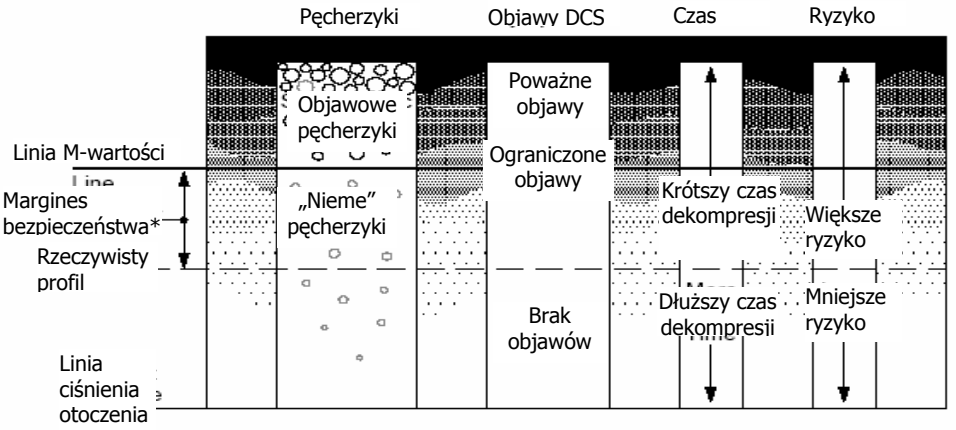
Czemu odpowiadają M-wartości?

Wśród nurków spotyka się błędną koncepcję, że M-wartości pokazują wyraźną granicę pomiędzy „dostanę” lub „nie dostanę” choroby dekompresyjnej. Wyjaśnia to dlaczego niektórzy nurkowie rutynowo przekraczają limity swoich tabel lub komputerów nurkowych. Doświadczenia medycyny nurkowej pokazują, że ustalone limity (M-wartości) są czasami niewystarczające. Stopień niedoskonałości wydaje się różnić w zależności od osoby i sytuacji. Dlatego bardziej prawidłowo można by określić M-wartości jako „wyraźną linię pociągniętą przez zamazaną, szarą strefę” (zobacz rysunek 2). Ten brak możliwości ścisłego zdefiniowania wynika ze złożoności ludzkiej fizjologii, zróżnicowania poszczególnych nurków oraz zróżnicowania czynników wpływających na chorobę dekompresyjną.

Mimo tego modele gazu rozpuszczonego są z pożytkiem wykorzystywane przez nurków a ich podstawy teoretyczne stale się rozwijają. Na przykład kiedyś przypuszczano, że cały gaz obojętny pozostaje rozpuszczony w roztworze a jakiekolwiek pęcherzyki świadczą o DCS-ie. Jednak my wiemy, że nieme pęcherzyki występują po nurkowaniach nie dających objawów DCS-u. W rzeczywistości mamy do czynienia z kombinacją dwóch stanów

podczas nurkowania – większość gazu obojętnego jest przypuszczalnie w stanie rozpuszczonym a pewna jego część w postaci pęcherzyków. Wynika z tego, że M-wartości reprezentują nie tylko tolerowalną nadwyżkę ciśnienia ale również tolerowalną ilość pęcherzyków. M-wartości są weryfikowane empirycznie co oznacza, że dekompresyjne próby są przeprowadzane na ludziach. Testy te, prowadzone na relatywnie małej próbie powinny odpowiadać szerokiej populacji nurków. Jednak nawet jeżeli otrzymane w ten sposób dane prawidłowo opisują przybliżony próg symptomów choroby dekompresyjnej (M-wartości), to metoda nie może dokładnie przewidzieć lub gwarantować niepodważalnego dla wszystkich progu. Wiemy również z doświadczenia, że pewne czynniki predysponują do choroby dekompresyjnej: zła kondycja fizyczna, nadwaga, zmęczenie, lekarstwa/alkohol, odwodnienie, przemęczenie, bardzo zimna woda, przetrwały otwór owalny (PFO), itp. Indywidualna podatność może się zmieniać z dnia na dzień.

Koncepcja M-wartości: gruba linia oddzielająca szarą strefę reprezentuje próg poza którym, większość nurków odczuwa symptomy choroby dekompresyjnej



*różny w zależności od indywidualnych predyspozycji, warunków fizycznych, akceptowanego ryzyka, itd.

M-wartości i konserwatyzm

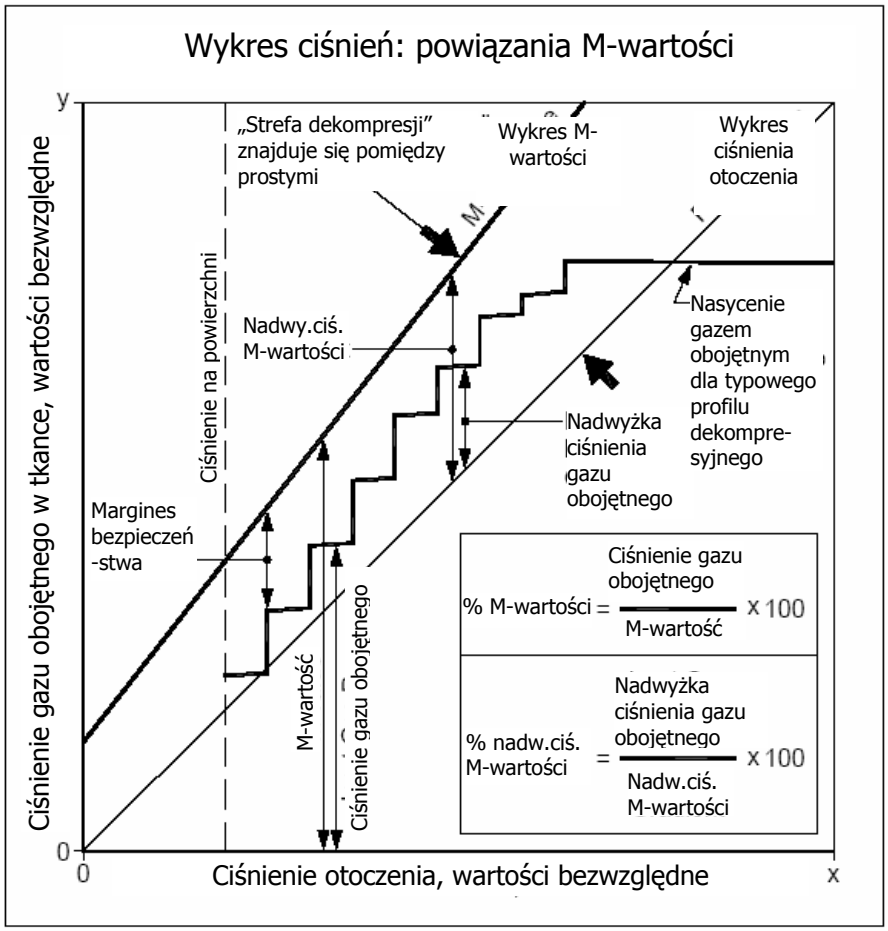
M-wartości są powiązane z ograniczeniem występowania symptomów oraz niskim poziomem ryzyka. Jednak te kryteria mogą być nie do zaakceptowania przez wszystkich nurków. Wielu nurków chciało by wybrać „brak symptomów" i „bardzo niski poziom ryzyka" podczas swoich profili dekompresyjnych. Na szczęście programiści i twórcy modeli dekompresyjnych dobrze rozumieją, że kalkulacje oparte tylko o ustalone M-wartości nie mogą stworzyć wystarczających, wiarygodnych tabel dekompresyjnych dla wszystkich osób w różnych warunkach. Dlatego programy dekompresyjne umożliwiają wprowadzanie do kalkulacji konserwatyzmów. Niektóre modele pozwalają wprowadzać do kalkulacji większą frakcję gazu obojętnego, stosują współczynnik bezpieczeństwa polegający na zwiększeniu rzeczywistej głębokości czy czasu nurkowania lub ustawiają asymetryczne (wolniejsze) półokresy podczas odsycania. Niektóre programy wykorzystują więcej niż jedną z powyższych metod. Metodyka wprowadzania konserwatyzmów jest efektywna kiedy jest odpowiednio zastosowana. Stopień efektywności jest zwykle mierzony przez nurków poprzez określenie o ile dłuższe i głębsze stają się profile dekompresyjne, oraz poprzez indywidualne doświadczenie z wygenerowanymi profilami.

Powiązania M-wartości.

Niektóre zasadnicze relacje związane z M-wartościami oraz liczeniem dekompresji przedstawione są na wykresie (rysunek 3). Wyliczenie procentu M-wartości było wykorzystywane od dawna przez różnych projektantów modeli dekompresyjnych. Na przykład profesor Buhlmann oceniał wiele swoich dekompresyjnych testów na podstawie procentu M-wartości i w takiej postaci przedstawiał je w swoich książkach. Wyliczenie procentowe nadwyżki ciśnienia M-wartości umożliwia określenie jak bardzo profil dekompresyjny wszedł w „strefę dekompresji". 0% nadwyżka ciśnienia M-wartości leży na linii wykresu ciśnienia otoczenia i stanowi dolną granicę strefy dekompresji. Natomiast leżąca na linii wykresu M-wartości, 100% nadwyżka ciśnienia M-wartości reprezentuje górną granicę strefy dekompresji.

Analiza profili

Wielu nurków chciało by dokładnie wiedzieć jaki jest efekt współczynników konserwatyzmu w ich programach komputerowych. Mają świadomość, że dłuższe i głębsze profile są generowane poprzez wykorzystanie rosnącego konserwatyzmu ale chcieli by otrzymać więcej podstawowych informacji. Zarówno procent M-wartości jak i procent nadwyżki ciśnienia M-wartości są wygodne do analizowania profili dekompresyjnych.



Wykorzystując te standardowe narzędzia do analizy M-wartości, różne profile mogą być oceniane w oparciu o jednolitą podstawę. Umożliwia to porównywanie profili generowanych przez zupełnie różne programy, algorytmy i modele dekompresyjne.

Uniwersalność wartości

M-wartości Buhlmannowskiego ZH-L16 są wykorzystywane w większości jeżeli nie we wszystkich dekompresyjnych programach komputerowych wykorzystywanych przez nurków technicznych. Te M-wartości rozwijano i testowano w szerokim zakresie ciśnień otoczenia; od nurkowań wysokogórskich po głębokie nurkowania morskie. Jeżeli korzysta się z nich przy odpowiednim konserwatyzmie, wydają się być wiarygodne do technicznego nurkowania (jeżeli możemy powiedzieć, że coś jest wiarygodne w tej nieprecyzyjnej nauce). Stały się tak naprawdę światowym standardem który może być wykorzystywany jako uniwersalny punkt odniesienia do porównywania i oceny profili dekompresyjnych. Włączenie do wyliczania profili dekompresyjnych wyliczenia w skrótowej formie procentu M-wartości i procentu nadwyżki ciśnienia M-wartości jest relatywnie łatwe dla programistów. Tabela 5 pokazuje przykładowe wyliczenie wpływu współczynników konserwatyzmu wykorzystanych w dostępnym komercyjnie programie komputerowym. Przy 0% współczynniku konserwatyzmu, profil dekompresyjny poprowadzony jest w zakresie 90% M-wartości i wchodzi 70% w strefę dekompresji (70% nadwyżki ciśnienia M-wartości). Jest to jasne, że ten program wykorzystuje pewien podstawowy konserwatyzm ponieważ żadna wartość nie osiąga 100%. Przy 50% współczynniku konserwatyzmu (który jest zalecany przez instrukcję) profil osiąga 85% M-wartości i wchodzi w 40-50% w strefę dekompresji. 100% współczynnik konserwatyzmu wprowadza profil w zakres 77% M-wartości i około 20-35% w strefę dekompresji. Zauważmy, że wartości przedstawione w tabeli 5 dotyczą momentu przybycia na poszczególne przystanki czyli najmniej korzystnego momentu. Widać korelację ze schodkowym profilem nasycania na wykresie ciśnień (rysunek 3). Najwyższe wartości w całym profilu są wyliczone dla momentu przybycia na powierzchnię co pokazuje dlaczego bardzo rozważnie jest wolne wynurzenie z ostatniego przystanku dekompresyjnego na powierzchnię.

Margines bezpieczeństwa

Wykorzystując narzędzia do analizy M-wartości oraz standardowy zbiór M-wartości, nurkowie mogą określić osobiste limity dekompresyjne które będą miały solidne podstawy jak i będą możliwe do przenoszenia. Wybrany margines bezpieczeństwa zależy od indywidualnego podejścia i wcześniejszych doświadczeń nurkowych. Zawsze potrzebna jest rzetelna ocena przygotowania do nurkowania dekompresyjnego. Na przykład nurek/autor tego artykułu (pracownik biura) wybrał dla typowego nurkowania trimksowego osobiste limity w postaci 85% M-wartości i 50-60% nadwyżki ciśnienia M-wartości. Aby ustalić właściwy margines bezpieczeństwa profil dekompresyjny może być wyliczany precyzyjnie do założonej procentowo nadwyżki ciśnienia M-wartości. Takie podejście umożliwia uzyskanie konsekwentnych wyników w całym zakresie ciśnienia otoczenia oraz precyzyjną kontrolę nad uzyskanymi wynikami.

Tabela 3: Efekt konserwatyzmów w programie dekompresyjnym przy zbiorze M-wartości Buhlmanna ZH-L16 (ZH-L16A dla helu, ZH-L1B dla azotu)

Nurkowanie trimix 15/40, 250 fws 30 min. Gazy dekompresyjne – Nitrox 36 na 110 fsw, Tlen 20 fsw

0% konserwatyzm				50% konserwatyzm				100% konserwatyzm			
Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maks.* % M-wartości (Cpt No.)	Maks.* % nadw.ciś. M-wartości (Cpt No.)	Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maks.* % M-wartości (Cpt No.)	Maks.* % nadw.ciś. M-wartości (Cpt No.)	Deco Stop (fsw)	Run Time (min)	Maks.* % M-wartości (Cpt No.)	Maks.* % nadw.ciś. M-wartości (Cpt No.)
								140	35	74.3% (4)	29.3% (3)
								130	37	76.0% (4)	31.0% (3)
				120	35	81.6% (4)	47.0% (3)	120	40	77.4% (4)	33.9% (4)
110	36	85.8% (4)	59.4% (4)	110	38	84.5% (4)	55.7% (4)	110	43	77.6% (4)	35.5% (4)
				100	39	79.0% (5)	39.4% (4)	100	45	75.4% (5)	22.6% (4)
90	38	89.0% (4)	69.3% (4)	90	41	82.1% (5)	46.0% (4)	90	49	76.5% (6)	26.3% (5)
80	41	89.5% (5)	69.1% (4)	80	45	83.2% (5)	49.1% (5)	80	53	76.3% (6)	20.3% (5)
70	44	88.3% (5)	65.6% (5)	70	49	82.2% (6)	42.5% (5)	70	58	77.0% (6)	22.1% (6)
60	48	89.8% (6)	67.2% (6)	60	55	83.2% (6)	45.1% (6)	60	68	78.2% (7)	24.9% (6)
50	55	91.1% (6)	72.2% (6)	50	64	83.1% (7)	44.1% (6)	50	78	76.9% (7)	17.6% (7)
40	64	90.3% (7)	67.7% (7)	40	75	83.1% (7)	42.8% (7)	40	96	78.4% (8)	22.5% (7)
30	79	90.7% (7)	70.7% (7)	30	95	84.5% (8)	46.0% (7)	30	124	78.3% (8)	22.4% (8)
20	94	90.9% (8)	70.7% (8)	20	113	84.2% (9)	47.1% (8)	20	147	78.9% (9)	24.4% (9)
10	119	91.1% (9)	72.2% (9)	10	144	85.8% (10)	51.7% (10)	10	189	81.2% (11)	32.6% (10)
0	120	93.6% (11)	80.2% (11)	0	145	88.6% (12)	62.6% (12)	0	190	84.9% (13)	46.6% (13)

*Po wejściu na przystanek

O autorze:

Eric C. Baker jest inżynierem elektrykiem w inżynieryjnej firmie doradczej na Florydzie. Jako hobby prowadził badania nad dekompresją i fizjologią nurkowania oraz rozwinął liczne programy komputerowa w Fortranie do analiz i liczenia dekompresji. Eric jest certyfikowanym nurkiem jaskiniowym i trimiksowym

Bibliografia:

Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. The Physiology and Medicine of Diving. London: WB Saunders.

Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS. 1908. The prevention of compressed air illness. J Hyg (London) 8:342-443.

Bühlmann, AA. 1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag.

Bühlmann, AA. 1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag.

Hamilton RW, Muren A, Röckert H, Örnhagen H. 1988. Proposed new Swedish air decompression tables. In:
Shields TG, ed. XIVth Annual Meeting of the EUBS. European Undersea Biomedical Society.
Aberdeen: National Hyperbaric Center.

Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD. 1994. Development and validation of no-stop decompression
procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and
Technology Corp.

Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen CJ, ed.
Underwater Physiology IV. New York: Academic Press.

Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and application. Flagstaff, AZ: Best.

Wienke BR. 1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogenoxygen and helium-oxygen dives.
Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

Workman RD. 1969. American decompression theory and practice. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. The
physiology and medicine of diving and compressed air work. London: Baillière, Tindall & Cassell.

[*] Tłumaczenie było mocno dyskutowane i poprawiane przez:
Kingę Sorkowską – instruktora i autorkę napisanego przez nią w ramach pracy magisterskiej w roku 2002 opartego na Buhlmannie planera wielogazowego
Karolinę Zawadę – astronoma ☺. To ona narzuciła termin „nadwyżka”.
Michała Zawadę – fizyka. Negacja określenia gradienty itp.
Olafa Bara – fizyka. Negacja określenia gradienty itp.
Cabernet Czarnogórski rocznik 2004 - wyśmienity. Muza.

[**] W oryginale w tym jak i wielu innych miejscach używane jest określenie „gradient” tłumaczone bardzo często na język polski jako „gradient”. Jednak jest to podobno nieścisłe ☺. Gradient dotyczy ciągłych zmian ciśnienia – takie zachodzą w prawdziwych tkankach. W modelu teoretycznym w kompartmentach analizujemy tylko różnice ciśnień, które można określić jako nadwyżkę ciśnienia lub nadciśnienie.
Ze względu na to, że jest to tłumaczenie wypadało by zostawić określenie gradient. Jednak określenie to zaburza zrozumienie wprowadzonych potem określeń. Trzeba by konsekwentnie używać

określenia „procent gradientu M-wartości” które absolutnie już nic nie oznacza. Wprowadzenie określenia nadciśnienie i nadwyżka ciśnienia pozwala wykorzystywać określanie „procent nadwyżki ciśnienia M-wartości”.

Proszę mi wybaczyć pewne nieścisłości powyższego wytłumaczenia ale fachowcy wytłumaczyli mi tak, że nic z tego nie zrozumiałem. Cytuję:
„Pamiętać należy, że gradient z pola skalarnego jest wektorem. O polach w których rotacja z gradientu znika mówimy, że są potencjalne.
Gradient jest operatorem różniczkowym działającym na pola skalarne.”

[***] Tu w oryginale jest nieścisłość. Wraz z rosnącą głębokością tak jak jest to pokazane na wykresach i opisane w dalszej części tekstu, kompartmenty tolerują większe współczynniki nadciśnienia.