

# המדריך לצלילה עם NITROX-קס

Edward A. Betts

מהדורה-II

American  
Nitrox  
Divers  
International



## תוכן עיניינים

1	.....הקדמה
2	.....על המתבר
3	.....הכרת תודה
5	.....יחידה 1 - ההיסטוריה ופיתוחו של SafeAir®
16	.....יחידה 2 - החמצן והצולל, הפעילות הפיסיולוגית של החמצן
25	.....יחידה 3 - השימושים של SafeAir®
30	.....יחידה 4 - הטיפול ב-SafeAir® ונוהלי אבחון גז הנשימה

### טבלאות ותרשימים

10	.....זמן מרבי ללא דקומפרסיה	תרשים 1-1
11	.....השוואה בין תערובות נשימה	תרשים 1-2
14	.....השוואת מידות	תרשים 1-4
17,18	.....עליית לחצם החלקי של הגזים בעת העמקה	תרשים 2-1
19	.....הרעלת חמצן - סימני הרעלת מערכת העצבים המרכזית (CNS)	תרשים 2-2
21	.....גבולות החשיפה לחמצן - NOAA	תרשים 2-4
27	.....שווה עומק אוויר (EAD) המבוסס על תערובת SafeAir® 32	תרשים 4-2
28	.....שווה עומק אוויר (EAD) המבוסס על תערובת SafeAir® 36	תרשים 4-6
38	.....מיכלי SafeAir® ומיכלי פוני	תרשים 5-1
39	.....מדבקה היקפית למיכל	תרשים 5-2
40	.....תג תכולת מיכל	תרשים 5-3
41	.....מדבקת ביקורת ויזואלית למיכל	תרשים 5-4
42	.....גליל סימון לוסת	תרשים 5-4 A
43	.....מיני מאבחן חמצן "אנאלייזר"	תרשים 5-5
44	.....התקן דגימת תערובת	תרשים 5-6
45	.....טופס מעקב מילוי	תרשים 5-7
46	.....נספחים	

## על המחבר:

### Ed Betts

Ed Betts יסד את ארגון American Nitrox Divers Int.(ANDI) בשנת 1988. מכהן כנשיא הארגון, מנהל פעילויות צלילה והסמכת מדריכים לצלילה באוויר מועשר ויישומיו.

Ed משמש גם כמנהל הכללי של Island Scuba Centers, מרכז הצלילה הוטיק ביותר בלונג איילנד, הוקם בשנת 1968. כמו כן הנו סגן-המנהל של ISC Management Corp, חברת יעוץ לניהול מערכות.

הוא מעורב בכל תחומי התקנת מערכות מחשבים (Hardware & Software), ניהול עסקים, יעוץ והדרכה. כמו-כן, החברה עוסקת בתכנון והתקנת מערכות הספקת גזים מיוחדים.

ל-Ed ניסיון רב כמהנדס ישומי. בשנות 1987 - 1984 הוא תכנן, יצר והתקין מערכת הספקת גז יבש וטהור במיוחד עבור סין העממית ("PRC"), ששימש לתוכנית החלל האופטית ה-"היי-טק" שלה. בשנת 1986 הפרויקט כלל הדרכה של צוותים טכנים מסין העממית בארה"ב.

ניסיונו בצלילה החל בשנת 1963 והוא מוסמך כיום כמדריך צלילה על ידי:

NAUI (The National Association of Underwater Instructors)

PADI (Professional Association of Diving Instructor)

NASDS (National Association of Scuba Diving Schools)

CURE (Center for Underwater Research)

כמו-כן הוא מדריך צלילה מס. 009 ב-NASDS,

מדריך מס. 002 ב-International Association of Nitrox Divers (IAND),

ומסמך מדריכים מס. 001 ב-American Nitrox Divers International (ANDI).

הוא הפעיל אניית חילוץ וספינת צ'רטר לצלילה במשך 10 שנים.

ל-Ed יומן של יותר מ-3700 צלילות ומעל 3200 שעות זמן תחתית. הוא הסמך אישית מעל 2500 חניכים לדרגות צלילה ספורטיבית שונות והוא מדריך מוסמך לכמעט כל תחום התמחות מתקדם. ל-Ed ניסיון רב בשימוש בגזי נשימה חלופיים ומלמד תוכנית צלילת עומק בתערובת משולשת עבור "חוקרי מעמקים".

## הכרת תודה

Chris J. Lambertsen, MD, Director  
Institute for Environmental Medicine  
University of Pennsylvania  
Philadelphia PA 19104

אשר הציע כבר ב - 1943 להשתמש בתערובות חמצן-חנקן להפחתת דקומפרסיה. היה חלוץ במחקר צלילה זו משך יותר מ - 50 שנה.

J. Morgan Wells, PhD, Director  
NOAA Diving Program - Room 304  
6001 Executive Boulevard  
Rockville MD 20852

הוא החל להחזיר את הרעיון לקהילה המדעית בתחילת שנות ה-70. הוא המיר את מושג ה-EAD לסדרה סטנדרטית של טבלאות דקומפרסיה, הידועות כטבלאות NOAA NITROX I, ופיתח את טבלאות NOAA NITROX II.

Richard Rutkowski  
Hyperbarics International  
490 Caribbean Drive  
Key Largo FL 33037

על שהביא את טכנולוגיית האוויר המועשר לעולם הצלילה הספורטיבית.

The National Undersea Research Program, NOAA/NURP  
Rockville MD 20852  
David B. Duane, Director  
Elliott Finkle, Past President  
Bill Bush PhD

על תמיכתם והתעניינותם ברעיון, על ידי סדנאות ומחקרי Doppler לאימות תוקף הרעיון.

מחלקת חיל הים של ארה"ב  
Washington DC

על פרסום שיטה זו כבר בשנת 1959 ב-USN Diving Manual לשימוש עם מכשירי ה-M6 שלהם ועבור צוללי החיל שברשותם הטכנולוגיה לשימוש באוויר מועשר.

American Nitrox Divers International  
Freeport, NY 11520

על החדרת הנושא לצלילה הספורטיבית, תוך קביעת תקנים לשימוש באוויר מועשר.

## American Nitrox Divers International

Bill Hamilton Ph. D  
Hamilton Research Ltd  
80 Grove Street  
Tarrytown NY 10591-4138

על תמיכתו ויעוצו.

Stephen Maestro  
NOAA Undersea Research Program  
University of North Carolina at Wilmington  
Wilmington NC 28403

על תמיכתו ברעיון זה מתחילתו, על תרומותיו ובקורתו. NURP/UNCW שיתף פעולה באופן הדוק עם NOAA בישום טכנולוגיה זו.

### **אזהרה ! אזהרה ! אזהרה !**

**המידע וחומר לימודי זה, אינו מכשיר את הצולל לצלילה לעומק העולה על העומק המרבי המותר לו עפ"י דרגת הצלילה הבסיסית שלו, בסביבה מקורה או צלילה לתחומים המחייבים חניות דקומפרסיה (צלילת דקומפרסיה). נדרשת הדרכה נוספת לפני חשיפה לפעולות צלילה אלו.**

## יחידה 1

### ההיסטוריה ופיתוחו של SafeAir®

#### מטרה

בפרק זה נחזור על ההשפעה של רמה גבוהה של חנקן על גוף האדם ונעשה הכרה עם היתרונות וההתפתחות של השימוש בתערובות אוויר מועשר.

#### רקע

כצוללים למדנו על המגבלות החלות עלינו עם הירידה לעומק ושהן כתוצאה מהמבנה הפיזיולוגי של האדם וחוקי הפיזיקה הקשורים לכך. חוקי הפיזיקה אינם משתנים אך הפיזיולוגיה משתנה עם השינוי בתערובת הנשימה. בגלל היותו גז משכר מאוד המתמוסס בקלות ברקמות הגוף, היה מובן תמיד שחנקן הנו בחירה לא מוצלחת כגז דחוס לנשימה, אנו יודעים שהוא הגורם המגביל ביותר את הצלילה. ובכל זאת רוב הצוללים בצלילה ספורטיבית היום, משתמשים באוויר רגיל מכוון שאינם מודעים ליתרונות שבתערובות אחרות. מדריך זה מקנה לך הזדמנות להגביר את הבטיחות ואת ההנאה שבצלילה הספורטיבית על ידי טכניקת השימוש באוויר מועשר.

מחלת הדקומפרסיה (מדקי) נגרמת על ידי כמויות גדולות מדי של חנקן המשתחררות ממצב של מסיסות ברקמות ובדם. הדבר גורם להוצרותן של בועות המתאספות, מתרחבות וגורמות לנזק לרקמה, במיוחד במוח. הדבר אובחן בגוף האדם לראשונה ב-1841, אך יוחס לחנקן רק ב-1878 על ידי Paul Bert. כדי לחקור את גורמי מחלת הדקומפרסיה ולמצוא פתרונות מתאימים, הקים הצי הבריטי המלכותי צוות מחקר אשר בראשו עמד J.S. Haldane בעת ניסויים בעזים, מצא Haldane שרקמות ספוגות בחנקן יכולות לסבול עומס חנקן עד למחצית הלחץ שלהם ללא הופעת תסמונת המחלה.

Haldane פיתח דגם לרקומפרסיה ולדקומפרסיה שהווה את היסוד להבנת המחלה משך רוב המאה הנוכחית.

גופנו במצבו הטבעי רווי בחנקן, כלומר הרקמות אינן מסוגלות לספוג יותר או פחות גזים ברקמה, אלא אם משתנה הלחץ המופעל עליהן.

רוויה, פרושה שהלחץ הפנימי של החנקן ברקמה, שווה ללחצו הסביבתי. בכל לחץ שהוא, מגיעה הרקמה לידי איזון (רוויה) בזמן קבועהביטוי "מפל לחצים" מתייחס להבדל בין הלחץ הפנימי והלחץ החיצוני של כל גז. מפל הלחצים הנו אפס, כאשר הרקמות במצב של רוויה. כאשר הלחץ הפנימי של הגז גדול יותר מלחצו הסביבתי,

נוצר מצב של רווית יתר. J.S. Haldane גילה, שגוף האדם מסוגל לסבול רמה מסוימת של רווית יתר, אחרת היו בני האדם לוקים במחלת הדקומפרסיה כתוצאה מכל שינויי לחץ אטמוספירי קל, כמו נסיעה דרך הרים, או מעבר במנהרה מתחת לנהר בלבד. ההשפעה הפיזיולוגית של עלייה מעומק עלולה

להביא למפל לחצים גדול מדי, שכידוע יגרום לשחרור חנקן מהרקמה בצורת בועות שיביא בכך לנזק רציני לרקמות הגוף. Haldane שיער שרמת הסיבולת של גוף האדם לרוויות-יתר, שווה למפל לחצים קבוע של 2:1 בין הסביבה לרקמה.

מפל לחצים זה של 2:1 היווה את הבסיס המחקרי של טבלאות הדקומפרסיה לאוויר של צי ארה"ב. בהן הזמן המרבי שצולל יכול לשהות בעומק מסוים ולעלות לפני המים ישירות ללא צורך בעצירות דקומפרסיה, מתבסס על הזמן הדרוש לרקמות הגוף השונות להגיע למפל לחצים של 2:1. זה היה הבסיס לתיאורית הדקומפרסיה עד לשנות ה-30. אז Handson Hawkins & Shilling הגיעו במחקרם למסקנה, שרמת הרוויה המותרת אינה יחס קבוע של 2:1, אלא יחס המשתנה בהתאם לעומק וזמן התחתית של הצלילה.

רוב הטבלאות שבשימוש היום מתבססות על יחס של 1.8:1 או פחות. היום אנו יודעים שהגבולות האמיתיים הן קרובות יותר ל- 1.58:1.

בשנת 1976 פרסם ד"ר Merrill Spenser מהמכון לרפואה ופיזיולוגיה של Seattle בארה"ב דו"ח, הממליץ על הפחתת זמני תחתית ללא דקומפרסיה. הדו"ח התבסס על גילוי בועות בעזרת מכשיר אולטרא סאונד (Spenser 1976).

מחקרים נוספים שנעשו על ידי ד"ר Andrew Pilmanis במכון Catalina, מרכז לביולוגיה ימית, תומכים בהמלצה זו. הוא מצא תסחיפי גז בורידיים (VGE) או בועות שקטות ב-100% של החשיפות לעומק 30 מטר למשך 25 דקות!

עלינו אם-כן לתכנן את צלילתנו באופן שמרני, ולהפחית מקדם בטחון (לפחות 5 דקות) ולא "לדחוף" את הזמן המרבי ללא דקומפרסיה עד קצהו. יש לדעת, שבעצם כל צלילה היא "צלילת דקומפרסיה", ועל תכנון צלילה בטוח לכלול זמן עצירה בטחון של 3-5 דקות בעומק רדוד מ-10 מ' כדי להבטיח הפחתת לחץ הדרגתית יותר, זה גם בצלילות שאינן עוברות את הזמן המרבי ללא צורך בדקומפרסיה.

לפי סטטיסטיקות שפורסמו על ידי DAN, בשנת 1988, 58% מאלה שהזדקקו לטיפול דקומפרסיה צללו לפי טבלאות שונות - כולן תקניות.

### גורמי חריגה

אם ברצוננו לתמוך בגישה של "מקדם ביטחון", הבה נדון בכמה גורמים שעלינו לקחת בחשבון. על כל צולל לקחת בחשבון גורמים אלו כדי לקבוע לעצמו מידה סבירה של שמרנות בתכנון הצלילה. הגורמים הבאים עלולים לחשוף את הצולל למדק, הן בביצוע צלילות ללא צורך בדקומפרסיה והן בצלילה המחייבות עצירות דקומפרסיה:

(1) מחזור דם חלש או לא תקין, או כל גורם התורם למצב זה, כגון רמת שומנים גבוהה בדם, משקל יתר, קור, הזדקנות פיזיולוגית הגורמת ליעילות פחותה של פעילות הלב ועורקיו, הלם או פציעה בעבר, או מקרה מדק' בעבר.

(2) הצטברות דו-תחמוצת הפחמן (היפרקאפניה), אף היא גורם שיש לקחת בחשבון. הדבר יכול לנבוע מכושר גופני ירוד, מאמץ יתר, או ציוד נשימה בלתי יעיל או לא מכוון כהלכה.

(3) עבודה פיזית כמו תנועות שרירים ופרקים מאומצות תחת לחץ סביבתי מוגבר.

4) צריכת משקאות אלכוהוליים לפני או אחרי צלילה. המידע העומד לרשותנו היום מוביל למסקנה שאלכוהול מגביר את תופעת היווצרות של תסחיפים ורידיים (VGE), מכיוון שהוא מפחית את מתח פני הדם ואפילו נוכחותו לבדה עלולה לגרום להיווצרות בועות. בהתאם לכך ממליצה ANDI להימנע מצריכת אלכוהול לפחות משך 12 שעות לפני ואחרי כל צלילה.

5) התייבשות או התייבשות יחסית הנה גורם עיקרי בחשיפת צוללים למדקוי. איבוד נוזלים מהסיבות הבאות הנו מצב חמור ואין להתעלם ממנו:

- \* שהות ארוכה במי ים גורמת להתייבשות על ידי אוסמוזה, גם עם חליפת צלילה. שתן נוצר בכמות מוגברת כתוצאה מלחץ הידרוסטאטי (מים תחת לחץ).
- \* קור גורם לבריחת דם מהפריפריה (הסביבה ההיקפית) אל המרכז ומפחית את זרימת הדם במערכת הפריפריית (ההיקפית), כמו כן תורם להגברת היווצרות השתן.
- \* גם הזעה היא חלק מהגורמים התורמים להתייבשות, כמו התאיידות ונשימת גזים נטולי לחות.
- \* קפאין ואלכוהול, שניהם גם יחד דרך מנגנונים שונים, תורמים להיווצרות שתן מוגברת.
- \* סמים ותרופות עלולים לתרום להתייבשות. על הצולל להתייעץ עם רופא או רוקח בנוגע להשפעת התרופות שהוא נוטל.
- \* מחלת ים גורמת לאיבוד נוזלים, במיוחד כשהיא מלווה בשלשולים. מחלת הים היא חריגה משמעותית ביותר המובילה למדקוי. אין זה מומלץ כלל לצלול אחרי הקאה, אלא אם כן קובעים פרופיל צלילה שמרני מאוד.
- שתיית נוזלים לפני הצלילה היא חיונית ביותר כדי להגיע לפרופיל צלילה בטוח יותר. כדאי לשתות כמויות גדולות של נוזלים כמה שעות לפני הצלילה. הדבר מאפשר לגוף לספוג את הנוזלים במקומות הנחוצים ביותר.
- 6) אי ידיעת אחד או יותר מכל הגורמים האלה, עלולה להביא לחריגה מתחום הכיסוי של הטבלאות, ולסכנת מדקוי. הסיסמה "בטיחות באמצעות העשרת הידע" בהחלט מתאימה כאן.
- לסיכום, אם נקח בחשבון את כל מה שאמרנו עד עכשיו, יהיה זה מובן מאליו, מדוע אנו מעוניינים להפחית מרמת החנקן המתמוסס בגופנו. וכיצד זה יתרום לפרופיל צלילה בטוח יותר.

## ההיסטוריה של אוויר מועשר

זה כבר זמן רב ידוע, שניתן להאריך את הזמן המרבי ללא דקומפרסיה או לקצר עצירות דקומפרסיה, על ידי הפחתת אחוזי החנקן. השימוש בחמצן להפחתת הזמן הנדרש לדקומפרסיה, הוזכר לראשונה בשנת 1878 על ידי Paul Bert. ב-1943 הוסיף Chris Lambertson (USN) חמצן לאוויר, כדי להשיג יתרונות ביצוע ושיפורים פיזיולוגיים. אך כנראה שיש לזקוף את היישום המסחרי הראשון של טכנולוגיה זו לזכותו של Andre Galerne, שהשתמש בתערובת N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 50/50 למבצעי צלילה בצרפת בשנת 1957. עומק הביצוע היה בין 18-20 מטר. חיל הים של ארה"ב משתמש באוויר מועשר מאז 1959.

שימוש קבוע בחיל החל עם מערכת הצלילה MK VI ב-1962. באשר לצלילה הספורטיבית, למעשה, אחד מספרי ההדרכה הראשונים מזכיר במהדורה של 1957 ש"הדרך ההגיונית ביותר לטפל בבעיית חובת הדקומפרסיה, היא להגדיל את אחוזי החמצן", זה ב-1957! אלו הם עם-כן רעיונות ישנים שרק עתה נכנסים ליישום גם בעולם הצלילה הספורטיבית.

ב-1970 החל ד"ר Morgan Wells, Ph.D, קצין צלילה ב-NOAA<sup>1</sup> לערוך ניסויים עם אוויר מועשר בעת מבצעי צלילה. הוא התבסס על תערובת חנקן-חמצן וקרא לה NOAA NITROX I ופיתח בהתאם את טבלאות הצלילה התקניות NITROX I. מאז יצא לאור לראשונה מדריך הצלילה של NOAA ב-1978, שימש NOAA NITROX I לאלפי צלילות. כבר מתחילה הייתה מתוכננת תערובת תקנית שניה, היא קיבלה את השם NOAA NITROX II, והטבלאות עבורה פורסמו על ידי ד"ר Wells ו-NOAA במרס 1990.

Richard Rutkowski שימש כסגן מתאם פעולות לצלילה ועבד תחת ד"ר Morgan Wells. הוא יסד וניהל את המכון של NOAA להדרכת צלילה וטיפול בצוללים בתא לחץ. פרש ב-1985 והיה לראשון שלימד "צלילת ניטרוקס" במסגרת הצלילה הספורטיבית - מאז 1987.

כדי למסד ולהוציא תקנות להדרכת מדריכים והדרכת צוללים ספורטיביים, וכדי לקבוע תקן לשיטות המילוי, הצטרפו Ed Betts ו-Doug Pettit ל-Dick Rutkowski וב-1988 יסדו ביחד את ANDI. הם עשו עבודה קפדנית והרחיבו את התוכנית לכל מדינות ארה"ב. תוכנית ההדרכה הזו וטקסט זה הם התוצאה לעבודתם המשותפת.

<sup>1</sup> National Oceanographic and Atmospheric Administration  
(המנהלה הלאומית לאוקיינוגרפיה ואטמוספירה של ארה"ב)

## מה זה ניטרוקס? (Nitrox)

כל תערובת של חנקן וחמצן היא ניטרוקס. בתחום הצלילה יוחסה לניטרוקס משמעות של **אוויר מועשר בחמצן**. אוויר מועשר, Nitrox, EAN, EANx או ניטרוקס היפר-חמצני, לכל הכינויים האלה כוונה אחת. ב-1989 יצרה ANDI את מטבע הלשון SafeAir® ("אוויר בטוח") שזכות היוצרים שלו שמורה לה.

## מה זה "SafeAir®" ("אוויר בטוח") ?

"SafeAir®" כהגדרת ANDI היא תערובת אוויר עם ריכוז חמצן בין 22% לבין 50%. "SafeAir®" הוא למעשה תקן ANDI ליצור, טיפול ושימוש ההופכים את תערובת ה- ניטרוקס לגז נשימה בטוח יותר. תוכנית הדרכה זו מלמדת את היישומים המעשיים של תערובות "אוויר בטוח" בתחומי הצלילה הספורטיבית. זיכרו "זה אולי ניטרוקס אך אם זה לא תקן ANDI של יצור, טיפול ושימוש זה לא SafeAir® (אוויר בטוח)". כדי להדגיש את חשיבות ההקפדה על התקן הבטוח נמשיך להשתמש בסמל התקן "SafeAir®".

## אוויר הוא ניטרוקס!

אוויר הוא תערובת ניטרוקס שהרכבה:  
78.05% חנקן (N<sub>2</sub>)  
20.95% חמצן (O<sub>2</sub>)  
1.00% עקבות גזים אדישים אחרים.

(הגזים האדישים באטמוספירה המרכיבים את 1% השארית הם: ארגון-ppm 9340 (ppm = חלקים למיליון), דו-תחמוצת הפחמן - ppm 314, ניאון - ppm 18, הליום - ppm 5, קריפטון - ppm 1, קסנון - ppm 0.9).

**NOAA Nitrox I** הנו אוויר שריכוז החמצן בו הועלה ל-32%. התוצאה היא תערובת תקנית המורכבת מ-68% חנקן וגזים (אדישים) אחרים ו-32% חמצן. הסטייה המותרת ברמת החמצן היא ±1%. את קבוצת הגזים האחרים בסך 1% אנו כוללים כחלק מאחוזי החנקן, עיגול זה מוסיף מקדם ביטחון נוסף לחישובי הצלילה על אלו שנלמד בהמשך.

**NOAA Nitrox II** הוא אוויר בו ריכוז החמצן הועלה ל-36%. התוצאה היא תערובת תקנית של 64% חנקן כולל גזים אדישים אחרים ו-36% חמצן. הסטייה המותרת ברמת החמצן תמיד ±1%.

בהגדרת תערובות לנשימה מוזכרים הגזים האדישים (אינרטים) תמיד ראשונים ברשימה. החמצן הוא תמיד המרכיב האחרון. תערובת של 36-64 פרושה שהגזים

האדישים הם 64%. המינוח התקני ליישומינו המיוחד יהיה תערובת חנקן/חמצן (N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Nitrox).

למרות שמינוח תקני זה נמצא בשימוש מזה 60 שנה או יותר. ישנם הטועים וסוטים מנוהל חשוב זה - אנא שימו לב !

### היתרונות של SafeAir®

כדי להבין טוב יותר את ההשפעות והיתרונות של צלילה ב-SafeAir®, הבט בתרשים הבא על היתרונות המותרים בטבלאות הצלילה כתוצאה מהורדת אחוזי החנקן.

### תרשים 1-1

#### זמן מרבי ללא דקומפרסיה אוויר, SafeAir®32, SafeAir®36

זמן מרבי ללא דקומפרסיה

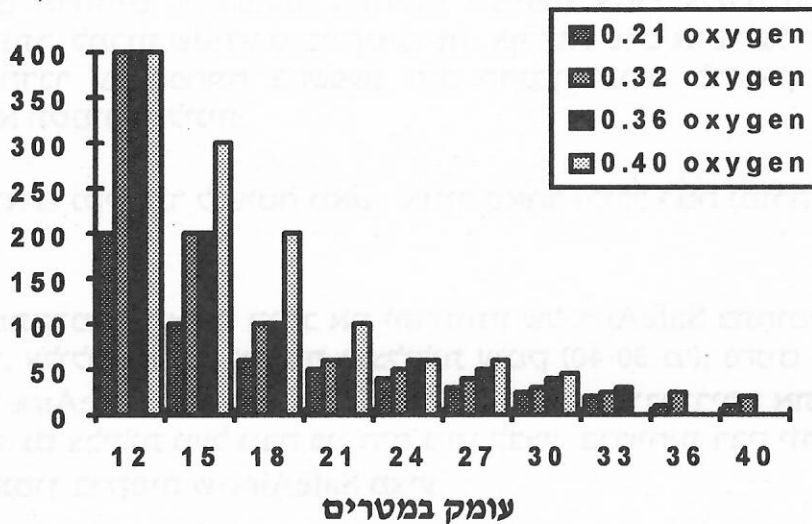
עומק במטרים	אוויר**	SafeAir® 32	SafeAir®36
12	170	400+	400+
15	90	200	200
18	55	100	100
21	45	60	60
24	35	50	60
27	25	40	50
30	22	30	40
33	15	25	30
36	12	25	*
39	8	20	*
40	7	15	*

\* מעבר לעומק שימוש מומלץ לתערובת זאת  
\*\* לפי טבלה ישראלית

## תרשים 1-2

### השוואה בין תערובות נשימה מגבלת זמן חמצן וחנקן - טבלאות צי-ארה"ב וטבלאות NOAA

זמן תחתית



אחרי עיון בתרשימים, היתרונות שבהפחתת החנקן ברורים. הבה נלמד כיצד לנצל יתרונות אלה להארכת זמני תחתית מרביים ללא דקומפרסיה ולהגדלת מקדמי הביטחון בשימוש במחשבים וטבלאות לצלילה באוויר.

SafeAir® מציע יתרונות נוספים. אך תכונת רעילות החמצן בלחץ מוגבר, מהווה מגבלה לעומק ולזמן שמותר לנשום אותו כגז טהור או כמרכיב בתערובת חנקן-חמצן SafeAir®.

היתרונות של תערובת SafeAir® בהשוואה לאוויר הם:

(1) מקדם בטיחות למניעת מדק.

(2) הארכת זמן תחתית מרבי ללא דקו.

(3) הפחתת חוב חנקן בעקבות צלילה, יאריך את הזמן המותר בצלילה חוזרת ו/או יקצר את זמני הפסקה הצלילה הנדרשים עד לצלילה חוזרת.

4) הפחתת ההשפעה המשכרת של החנקן, הבאה לידי ביטוי מיוחד בתחום הצלילה לעומק 30 מטר ויותר.

5) אצל רוב הצוללים צריכת האוויר יורדת. אחדים מדווחים על ירידה ניכרת בצריכת נפח הגז הננשם ואילו צוללים מנוסים מדווחים בדרך כלל על חיסכון של כ-10%.

6) השפעת פגיעות לחץ (כמו מדקי), עשויות להיות פחותות בגלל שיפור מחזור הדם הנימי, העשרת הפלסמה בחמצן והקטנת תכולת הגזים האדישים בבועות שנוצרו (מידע זה נתמך בידע תאורתי וההגיון, אך טרם אושר על ידי מחקר רפואי).

7) רוב הצוללים מדווחים על הפחתה בתחושת העייפות אחרי צלילה ועל צלילה שקטה ורגועה יותר. למרות שמידע סובייקטיבי זה אף הוא טרם אושר על ידי מחקר רפואי, מרמז הדבר על הפחתה בהשפעת חוב החנקן הגורם לדיכאון ולמחלת דקומפרסיה ללא תסמונת קלינית.

8) SafeAir® הוא גז נקי יותר לנשימה מאשר אוויר מאחר וכולל רמה נמוכה יותר של אדי שמן.

כיום, צוללים מתקדמים מנצלים היטב את יתרונותיו של SafeAir® בתחומים רבים. בצלילת מערות, צלילה באניות טבועות ובצלילות עומק (40-30 מ'), נהנים הצוללים מיתרונותיו של SafeAir® בהרחיבם את זמן התחתית המרבי ובהגבירם את בטיחות פרופיל הצלילה. גם צלילות מעל גובה פני הים ניתן לבצע בבטיחות רבה יותר בזכות מפל הלחצים הנמוך ברקמות ש-SafeAir® מציע.

בקרום יהיה SafeAir® גז הנשימה המועדף בתחומים שבין 12 עד 50 מ', יכולתם של מחשבי הצלילה תורחב לצלילה עם תערובות גזים שונות, מחשבים וטבלאות נוספות יפותחו למגוון רחב יותר של תערובות גזים, מרכזי צלילה ומילוי יספקו תערובות SafeAir® שונות. אבחון של תערובות שונות לצלילה יהפוך לשגרה ויוסיף בטיחות ויעילות. יותר ויותר עמדות מילוי ישתמשו במדחסים נטולי שמן או כמעט נטולי שמן לייצור התערובות. ועם הידע והניסיון של שימוש בתערובות גזים לנשימה יפתח חלון לצולל המתקדם: "תערובות משולשות" (Tri-mix - He/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) יחליפו אוויר רגיל לעומקים שמעבר 50 מ'. ההתקדמות הזו תבוא במהירה, אך אם רמת ההוראה, הידע וההקפדה של הצולל על הכללים לא תתקדם אף היא, לא תהינה התוצאות רק חיוביות. טכנולוגיה עלולה להיות מסוכנת אם לא תלווה בידע וביכולת להשתמש בה כהלכה. באמצעות טכנולוגיה זו ויישומיה אנו נכנסים לעידן חדש בצלילה.

### מחשבי צלילה ו"SafeAir®"

הצלילה הספורטיבית זכתה להתקדמות ניכרת עם המצאת סוגים שונים של מחשבי צלילה. רובם אמנם זעירים, אך הם מחשבים במלוא מובן המלה, אשר מבצעים אלפי חישובים מדי צלילה. הם מחשבים את מפל הלחצים של הגז המומס ברקמה בכל עומק, ולא רק בעומק המרבי. הדבר מביא לידי שני יתרונות משמעותיים:

1) עבור פרופיל צלילה זהה, הזמן המרבי המותר ללא דקומפרסיה, בדרך כלל גדול מזה המופיע בטבלאות.

2) קביעת מפל הלחצים ברקמה מדויק יותר.

פרופיל צלילה ממוחשב אינו נחשב אמנם ל**בטוח** יותר מפרופיל צלילה המבוסס על טבלאות הדקומפרסיה, אך המחשבים הפכו לחלק מהמציאות היום. מדריכים רבים מודאגים מכך שהמחשבים בעצם דוחפים את הצולל קרוב יותר למפל הלחצים המרבי המותר ולמרות שכל המחשבים עובדים עם מקדמי ביטחון משלהם, אינם פועלים לפי כללי העיגול הנהוגים בעת השימוש בטבלאות. הדבר מצמצם את מקדמי הביטחון למינימום בהשוואה לכללי השימוש בטבלאות. כפי שעוד נלמד מאוחר יותר בספר זה, הצולל ב-SafeAir® שנעזר במחשב, מוסיף בחזרה מקדמי ביטחון, יותר מאלו שהשימוש במחשב גורע. ברור אם-כן, שהשימוש במחשב צלילה וב-SafeAir® הנה **דרך בטוחה** להגדיל את זמן הצלילה המרבי ללא דקומפרסיה, מעבר לגבולות הרגילים. ואפילו ללא מקדמי הביטחון וכללי העיגול הנהוגים בטבלאות. אם המטרה היחידה לשימוש ב-SafeAir® היא בטיחות גבוה יותר, אז אין דרך טובה יותר להגשים תכנון צלילה נוח ופרופיל צלילה בטוח יותר, מאשר על ידי שימוש במחשב צלילה וב-SafeAir® **גם יחד**.

החל מ-1992 עומדת לרשות הצולל הספורטיבי טכנולוגיה חדישה של מחשבים המתוכנתים גם לתערובות גזים תקניות אחרות ולא רק לאוויר או כאלו הניתנים לכיול למגוון תערובות רב.

חזרה

1. הזכר 6 גורמי חריגה העלולים לחשוף צולל למחלת הדקומפרסיה.
2. מתי השתמשו באוויר מועשר בפעם הראשונה?
3. מה הוא הרכבו של אוויר רגיל?
4. מהו SafeAir® ?
5. הגדר את תערובות הגזים הנמצאות בשימוש היום.
6. מהם יתרונות השימוש ב-SafeAir® (8 יתרונות) ?

תרשים 1-4 השוואת מידות

אטמוספירה	PSI	kPa	עומק ברגל	עומק במטר	PO <sub>2</sub>	בר
1	14.696	101.33	0	0	0.209	0.98692
2	29.392	202.66	33	10.132	0.419	1.97384
3	44.088	303.98	66	20.265	0.628	2.96076

$$1 \text{ מטר} = 3.2568 \div 1 \text{ רגל}$$

$$1 \text{ בר} = 1/10 \text{ מטר}$$

$$1 \text{ מטר} = 3.2568 \times 1 \text{ רגל}$$

$$1 \text{ אט} = 1.01325 \text{ בר}$$

$$1 \text{ kPa} \approx 1/100 \text{ אטמוספירה}$$

$$1 \text{ בר} = \text{PSIA } 14.5037$$

$$33 \text{ רגל} = 10.1326 \text{ מטר עומק}$$

$$1 \text{ מטר} = 0.101 \text{ אט}$$

$$1 \text{ רגל} = 0.3048 \text{ מטר של מרחק}$$

$$1 \text{ מטר} = 3.2568 \text{ רגל של לחץ}$$

$$1 \text{ מטר} = 3.28 \text{ רגל של מרחק}$$

$$1.0 \text{ Cubic ft} = 28.3 \text{ ליטר}$$

$$1 \text{ אטמוספירה} = 760 \text{ מ"מ כספית (Hg)}$$

## בחן יחידה 1

1. רשום 6 מצבים או גורמי חריגה העלולים לחשוף צולל למחלת הדקומפרסיה:

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

5. \_\_\_\_\_

6. \_\_\_\_\_

2. מתי השתמשו בתערובות אוויר מועשר בפעם הראשונה?

3. מהו SafeAir® ?

4. מהו NITROX I ?

5. מהו NITROX II ?

6. מהם יתרונות השימוש ב-SafeAir® ?

א) \_\_\_\_\_

ב) \_\_\_\_\_

ג) \_\_\_\_\_

ד) \_\_\_\_\_

ה) \_\_\_\_\_

ו) \_\_\_\_\_

ז) \_\_\_\_\_

## יחידה 2

### החמצן והצולל

#### הפעילות הפיסיולוגית של החמצן

##### מטרה

להעמיק את הבנת ההשפעה הפיזיולוגית של החמצן על גוף האדם בעת פעילות בסביבת לחץ. כמו-כן רכישת ידע על הדרכים להפחתת הסיכון בצלילה באמצעות השימוש באחוזי חמצן גבוהים.

##### רקע

כל צולל יודע את השפעת החנקן על פעילות הצלילה שלנו. בפרק הקודם דנו בקשר שבין החנקן וחוב הדקומפרסיה. כולנו מבינים שישנו קשר של לחץ/זמן המשפיעה על מגבלת החשיפה המותרת לחנקן. הובכן ישנה גם מגבלת לחץ/זמן בהקשר לחשיפה המותרת לחמצן.

בקורס הצלילה הבסיסי למדנו, שיש להתייחס לעומק של 30 מ' כגבול לצלילה בטוחה. אחדים למדו בודאי שלצוללים מנוסים הגבול הוא בעומק של 40 מ'. אמנם אפשר להתווכח בנוגע להגדרה מי הוא צולל מנוסה, אך למספרים אלה לא הגענו במקרה או באופן שרירותי. הם מבוססים על תגובותיהם הפיזיולוגיות האמיתיות של הצוללים לעומקים אלו. ליתר דיוק, הם נובעים מהשפעת לחצו החלקי של החנקן: כאשר נושמים אוויר, הופך החנקן למשכר בעומק העולה על 30 מ' ובעומק 40 מ', כל צולל יהיה תחת השפעתו.

צוללי עומק רבים טוענים שהם מרגישים מצוין ואינם מרגישים בקשיים מיוחדים בעומק העולה על 40 מטר, 46 מטר או אפילו 60 מטר. יתכן שצוללים אלה דוברים אמת. חוש ההבחנה הוא הראשון שנפגע כתוצאה מהשפעת החנקן ולכן יתכן שאינם מבחינים בהשפעות שליליות כלשהן ומדווחים על כך בדיוקנות. אך בניסויים רפואיים הוכח שכל בני האדם מושפעים במידה נכרת מהשיכרון. חומרת ההשפעה השלילית תלויה במשתנים רבים. משתנים אלה עלולים אף להשתנות מיום ליום אצל אותו אדם. המנגנונים והגורמים המדויקים האחראים לכך, אינם מובנים באופן מלא עד כה. אך אנו כן יודעים שיכולת השיפוט של הצולל, זמן תגובה, ההבחנה החושית (ראייה, קור, כאב וכד') והקאורדינציה, נפגעים באופן משמעותי. אין ספק, ששיכרון עומקים הוא גורם מכריע ברוב התאונות בצלילת עומק. צוללים רבים אשר בדרך כלל אינם מתקשים לבצע בדיוקנות תוכנית צלילה, נוכחים לדעת שהשליטה בעומק ובזמן זה עניין "חמקני" בצלילות עומק. בעת נשימת אוויר רגיל, יש לדבוק בגבולות המוזכרים לעיל.

ידוע לנו היטב שעומקים אלה "לוחצים" את פיזיולוגית האדם עד מאוד. באשר לחסרונות הפיזיולוגיים של האוויר, ידוע לנו זה זמן רב, שאוויר הינו תערובת הגזים הנחותה ביותר לצולל. עתה לומדים הצוללים דרכי התמודדות עם עומקים גדולים יותר או זמני חשיפה ארוכים יותר, על ידי החלפת גזי הנשימה.

**לחץ חלקי** - בתערובת גזים, המולקולות של כל גז מפעילות לחץ ("לחץ חלקי") והלחץ הכולל של התערובת הוא סכום כל הלחצים החלקיים. לאוויר כדוגמה, יש 78 מולקולות של חנקן על 21 מולקולות של חמצן. לשם הפשטה, הבה נתעלם מהגזים האדישים ונוסיף את אחוזם לחנקן. אז נוכל לומר שהלחץ הכללי המופעל על ידי אוויר הינו סכום הלחצים המופעלים על ידי מולקולות החנקן ומולקולות החמצן.

האחוז מהלחץ הכללי המופעל על ידי מולקולות החנקן (כולל הגזים האדישים) הינו 79% (0.79) והאחוז מהלחץ הכללי המופעל על ידי מולקולות החמצן הינו 21% (0.21). זהו חלקו של כל גז בתערובת (fg).

חלקו של כל גז מהלחץ הכללי נקרא **הלחץ החלקי** של הגז. היחס בין הלחץ הכולל והחלקי בתערובת גזים מוגדר על ידי **חוק דלתון** אותו ניתן לבטא באופן מתמטי בדרך הבאה:

$$P = P_1 + P_2 + \text{גזים אחרים}$$

$$P = \text{הלחץ הכללי}$$

$$P_1 = \text{לחץ חלקי של גז 1}$$

$$P_2 = \text{לחץ חלקי של גז 2}$$

## תרשים 1-2 עלית לחצם החלקי של הגזים בעת העמקה

### לחצם החלקי של הגזים באוויר בעומקים שונים

לחץ חלקי של חנקן PN <sub>2</sub>	לחץ חלקי של חמצן PO <sub>2</sub>	עומק במטר	לחץ אטמוספרי מוחלט
0.79	0.21	0	1
1.58	0.42	10	2
2.37	0.63	20	3
3.16	0.84	30	4
*3.95	1.05	40	5
*4.74	1.26	50	6
*5.53	1.47	60	7
*6.00	1.6	66	7.6
*6.32	*1.68	70	8

\* מעבר לתנאי חשיפה מומלצים