

## Κεφάλαιο: Θεωρία Αποσυμπίεσης

Μέρος 1°

Σημειώσεις για την  
Φυσική και Φυσιολογία των Καταδύσεων



---

# **Σημειώσεις για την Φυσική και Φυσιολογία των Καταδύσεων**

Κείμενο:  
**Νίκος Καρατζάς**

Φωτογραφίες:  
**Αρετή Κομηνού**

Επιμέλεια Κειμένου:  
**Γιάννης Περαντωνάκης**

Ευχαριστώ τους **Δρόσο Βενετούλη**, **Διονύση Πατίρη** και **Βασίλη Μαύρο** για την συμβολή τους.



[www.aquatec.gr](http://www.aquatec.gr)

## **Εισαγωγή**

Η Φυσική και Φυσιολογία των Καταδύσεων αποτελεί την πρώτη ενότητα του κεφαλαίου Θεωρίας Αποσυμπίεσης.

Το υλικό όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω σελίδες σχετικά με την φυσική και φυσιολογία των καταδύσεων δεν αποτελεί διδακτική ύλη για κανένα Οργανισμό Εκπαίδευσης και Πιστοποίησης Αυτοδυτών. Ως εκ τούτου δεν μπορεί να θεωρηθεί εγχειρίδιο κατάδυσης ή οδηγός κατάδυσης.

Οι σημειώσεις αυτές όπως παρουσιάζονται χρήζουν περεταίρω διευκρινιστικές εξηγήσεις από τον εκπαιδευτή οι οποίες δίνονται στην διάρκεια των θεωρητικών μαθημάτων.

Το υλικό αυτό δημιουργήθηκε σαν συμπληρωματική ύλη για τους εκπαιδευόμενους του καταδυτικού κέντρου AquaTec με σκοπό να εμπλουτίσουν τις γνώσεις τους στην Θεωρία Αποσυμπίεσης και συγκεκριμένα στην ενότητα Φυσική και Φυσιολογία των Καταδύσεων.

Η χρήση των πληροφοριών που εμπεριέχονται στις σημειώσεις αυτές από άτομα χωρίς την κατάλληλη εκπαίδευση, θεωρητικές γνώσεις και καταδυτική εμπειρία μπορεί να προκαλέσουν επιπλοκές και σοβαρά ατυχήματα.

## **Περιεχόμενα**

**Πίεση - Pressure (P)**

**Υδροστατική πίεση**

**Υδροστατική πίεση και προσανατολισμός**

**Υδροστατική πίεση και βάθος**

**Υδροστατική πίεση και υγρά**

**Όγκος - Volume (V)**

**Θερμοκρασία - Temperature (T)**

**Πυκνότητα - Density ( $\rho$ )**

**Νόμοι των Αερίων**

**Νόμος του Robert Boyle**

**Νόμος του Charles**

**Νόμος του Gay-Lussac**

**Καταδυτικά Αέρια**

**Ατμοσφαιρικός Αέρας**

**Οξυγόνο -  $O_2$**

**Άζωτο -  $N$**

**Ήλιο -  $He$**

**Διοξείδιο του Άνθρακα -  $CO_2$**

**Θεματολογία NITROX**

**Βασικές Αρχές Μεταφοράς Αερίων**

**Διάχυση**

**Διαλυτότητα**

**Μεταφορά αερίων στο αίμα στη 1 ATM**

**Εισαγωγή στη Θεωρία αποσυμπίεσης**

**Βασικές Έννοιες και Αρχές**

**Χρόνος Ημιζωής του ιστού**

**Κορεσμός - Υπερκορεσμός**

**Εγγενής Υποκορεσμοός**

**Μηχανική φυσαλίδας**

**Επιφανειακή τάση**

**Δυναμική Φυσαλίδας**

**Χρήση Αερίου Αποσυμπίεσης**

## Βασικές έννοιες και αρχές

Τα υγρά θεωρούνται ασυμπίεστα και όποια πίεση εφαρμοστεί σε αυτά δεν προκαλεί μεταβολή του όγκου. Η εξωτερική πίεση που ασκείται σε έναν όγκο υγρού μεταδίδεται αυτούσια σε όλα τα σημεία του. Αυτό διατυπώθηκε από τον Γάλλο φυσικομαθηματικό **Blaise Pascal** (1623-1662). Η Αρχή του Pascal είναι ένας από του βασικούς νόμους της Υδροστατικής.

Τα υγρά είναι πολύ λιγότερο συμπιεστά σε αντιθέση με τα αέρια. Το νερό θεωρείται πρακτικά ασυμπίεστο για τις εφαρμογές της μηχανικής. Απαιτούνται 200 atm για να μειωθεί ο όγκος του κατά 1%.

Το ανθρώπινο σώμα θεωρείται σύστημα υγρών. Έτσι, κατά τη βύθιση του σώματος στο νερό η πίεση που ασκείται είναι παντού η ίδια.

Δεν συμβαίνει το ίδιο και με τα αέρια. Οι μεταβολές από τις αλλαγές της πίεσης και της θερμοκρασίας επηρεάζουν και μεταβάλλουν τον όγκο τους.

Οι όποιες μεταβολές που παρουσιάζονται διέπονται από τους νόμους των αερίων και συνδέουν τις μακροσκοπικές μεταβλητές των αερίων \_ πίεση, όγκο, θερμοκρασία.

## Πίεση - Όγκος - Θερμοκρασία

### Πίεση - Pressure (P)

Η Πίεση είναι η δύναμη που ασκείται στη μονάδα της επιφάνειας ενός υλικού και ορίζεται ως το πηλίκο της ασκούμενης δύναμης στην επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας αυτής.

$$P=F/S \quad (F=\text{δύναμη}, S=\text{επιφάνεια}).$$

Η πίεση του ιδανικού αερίου κατά την κινητική θεωρία οφείλεται στις κρούσεις των μορίων του με τα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει.

Στο επίπεδο της θάλασσας η ατμοσφαιρική πίεση ισούται με 1029 mb ή 1.03 kg/cm<sup>2</sup> ή 1 atm. Αυτή είναι και η μέγιστη τιμή ατμοσφαιρικής πίεσης διότι ο αέρας που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της Γης συμπιέζεται από τη μάζα του αέρα που βρίσκεται ψηλότερα.

**Η απόλυτη πίεση – Atmosphere Absolute (ATA)** είναι το άθροισμα της υδροστατικής και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

### Υδροστατική πίεση

Η υδροστατική πίεση βασίζεται στη βαρύτητα. Ένα υγρό που βρίσκεται σε ένα δοχείο ασκεί δύναμη στα τοιχώματα του δοχείου. Η δύναμη που ασκεί το υγρό στον πυθμένα του δοχείου ισούται με το βάρος του. Τα όργανα μέτρησης της υδροστατικής πίεσης ονομάζονται μανόμετρα. Η υδροστατική πίεση συνδέεται και με άλλα φυσικά μεγέθη.

### Υδροστατική πίεση και προσανατολισμός

Τα υγρά ασκούν πίεση προς κάθε κατεύθυνση. Η πίεση που ασκείται σ' ένα σώμα βυθισμένο σε ορισμένο βάθος, είτε αυτό βρίσκεται σε οριζόντια είτε σε κατακόρυφη θέση, δεν μεταβάλλεται. Συμπεραίνουμε ότι η πίεση είναι ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό του σώματος.

### Υδροστατική πίεση και βάθος

Στη διάρκεια της κατάδυσης διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνεται το βάθος τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης η οποία γίνεται αισθητή στην τυμπανική μεμβράνη του αφτιού. Αυτό συμβαίνει επειδή η υδροστατική πίεση αυξάνεται ανάλογα με το βάθος.

### Υδροστατική πίεση και υγρά

Η υδροστατική πίεση είναι ανάλογη με την πυκνότητα του υγρού.

Αν μετρήσουμε την υδροστατική πίεση πραγματοποιώντας δυο καταδύσεις σε βάθος 20 μέτρων, η μία σε θαλασσινό νερό με πυκνότητα  $\rho=1.030\text{kg/m}^3$  και η άλλη σε γλυκό νερό (λίμνη) με πυκνότητα  $\rho=1.000\text{kg/m}^3$  θα διαπιστώσουμε ότι η πίεση στο θαλασσινό νερό είναι μεγαλύτερη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υδροστατική πίεση δεν εξαρτάται από τον όγκο του υγρού. Αυτό σημαίνει ότι σε βάθος 2 μέτρων, παραδείγματος χάριν, αισθανόμαστε την ίδια πίεση είτε σε πισίνα με θαλασσινό νερό είτε στη θάλασσα.

## Όγκος – Volume (V)

Όγκος, είναι μια ένδειξη ποσότητας του χώρου που καταλαμβάνει ένα αντικείμενο. Μονάδα μέτρησης είναι το κυβικό μέτρο ( $m^3$ ). Στη μέτρηση του όγκου των ρευστών σαν μονάδα μέτρησης αναφέρεται το λίτρο (L).

*Ειδικό βάρος ενός αερίου στο μετρικό σύστημα είναι το βάρος σε kg που έχει  $1m^3$  του αερίου.*

*Ειδικός όγκος ενός αερίου στο μετρικό σύστημα είναι ο όγκος σε  $m^3$  που καταλαμβάνει 1 kg βάρους του.*

Το ειδικό βάρος και ο ειδικός όγκος των αερίων δεν είναι σταθερά όπως συμβαίνει στα στερεά και υγρά σώματα. Μεταβάλλονται και εξαρτώνται πάντοτε από τη πίεση και τη θερμοκρασία.

Ο ειδικός όγκος προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο:  $v = 1 / \gamma$ .

Όπου,

$$\begin{aligned} v & \text{ ο ειδικός του όγκος} \\ \gamma & \text{ το ειδικό του βάρος.} \end{aligned}$$

**Στη καταδυτική ορολογία ο όγκος καταδυτικής φιάλης αναφέρεται σαν χωριτικότητα φιάλης.**

## Θερμοκρασία – Temperature (T)

Η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος που συνδέεται με τη μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού. Δηλαδή πόση ενέργεια έχει ένα σωματίδιο στο αέριο. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι σε οποιαδήποτε μεταβολή ενός ιδανικού αερίου, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αερίου συνεπάγεται ότι η εσωτερική ενέργεια του αερίου αυξάνεται και το αντίστροφο. Σε υπολογισμούς που σχετίζονται με τους νόμους των αερίων η θερμοκρασία πρέπει να είναι εκπεφρασμένη σε απόλυτους βαθμούς Κέλβιν (K) που είναι και η μονάδα μέτρησης της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων Φυσικών Σταθερών (S.I.). Σε θερμοκρασία Κέλβιν  $273^\circ C$ , δηλαδή στο απόλυτο μηδέν, δεν υπάρχει κίνηση μορίων. Για να μετατρέψουμε τους βαθμούς Κελσίου σε Κέλβιν απλώς προσθέτουμε 273.

## Εφαρμογή

Οι 32 βαθμοί Κελσίου πόσα K είναι;  
 $32^\circ + 273 = 305\text{ K}$

## Πυκνότητα - Density ( $\rho$ )

Η πυκνότητα είναι φυσικό μέγεθος και ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του ανά μονάδα όγκου  $\rho=m/V$

Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το  $1\text{ kgr}/m^3$ . Στα αέρια η πυκνότητα μεταβάλλεται όταν αλλάζει η πίεση ή/και η θερμοκρασία. Καθώς καταδυόμαστε η πίεση και η πυκνότητα είναι ανάλογες.



Καθώς αυξάνεται η πίεση, αυξάνεται εκθετικά και η πυκνότητα του αερίου που αναπνέουμε.

Η υψηλή πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα ως αναπνεύσιμο αέριο (οξυγόνο-άζωτο) σε συνδυασμό με την αύξηση της απόλυτης πίεσης (βαθιά κατάδυση), αυξάνει τη δαπάνη έργου που απαιτείται για την αναπνοή και τον πλήρη αερισμό των πνευμόνων.

1ATA	Επιφάνεια
2ATA	10μέτρα
3ATA	20μέτρα
4ATA	30μέτρα
5ATA	40μέτρα
6ATA	50μέτρα
7ATA	60μέτρα

## Nόμοι των Αερίων

"Αέριο ορίζεται το ρευστό εκείνο το οποίο δεν έχει δικό του σχήμα ούτε όγκο αλλά καταλαμβάνει το σχήμα και τον όγκο του δοχείου στο οποίο περιέχεται."

## Nόμος του Robert Boyle

Για μια ορισμένη μάζα αερίου σε σταθερή θερμοκρασία, ο όγκος είναι αντιστρόφως ανάλογος με την πίεση που ασκείται στο αέριο αυτό.

$$\text{PV=σταθερό για } T \text{ σταθερό}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

## Εφαρμογή

Έστω ότι έχουμε σε ασκό  $V=8\text{L}$  αερίου στην επιφάνεια  $P=1\text{atm}$ . Πόσο πρέπει να βυθίστει ο ασκός ώστε να έχει όγκο αερίου  $V=3\text{L}$ ;

Από τον τύπο έχουμε:

$$(1\text{atm}) X (8\text{ L}) = (x \text{ atm}) X (3\text{L})$$

Λύνουμε ως προς  $X \text{ atm}$ :

$$X \text{ atm} = (1\text{atm}) X (8\text{L}) \div (3\text{L}) =$$

$$2.6 \text{ atm} = 16 \text{ μέτρα.}$$

## Nόμος του Charles - Nόμος ισόχωρης μεταβολής

Για συγκεκριμένη μάζα αερίου, όπου η πίεση παραμένει σταθερή, ο όγκος είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία του.

$$V \div T = \text{σταθ. για } P = \text{σταθ.}$$

$$V_1 / T_1 = V_2 / T_2$$

Ο νόμος του Charles περιγράφει τη σχέση θερμοκρασίας-όγκου.

Με τον παραπάνω τύπο γίνεται κατανοητό γιατί όταν αυξηθεί η θερμοκρασία αυξάνεται και ο όγκος.

Σε φιάλη της οποίας το σχήμα δεν μεταβάλλεται, η πίεση θα είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία.

## Εφαρμογή

Έστω σε φιάλη έχουμε  $1250\text{L}$  ατμοσφαιρικού αέρα και θερμοκρασία  $21^\circ \text{C}$  Κελσίου. Ποιος θα είναι ο όγκος του αερίου στη φιάλη αν η θερμοκρασία αυξηθεί στους  $40^\circ \text{C}$  Κελσίου;

Μετατροπή τους βαθμούς Κελσίου σε Κέλβιν.  $21^\circ \text{C} + 273 = 294 \text{ K}$  και  $40^\circ \text{C} + 273 = 313 \text{ K}$

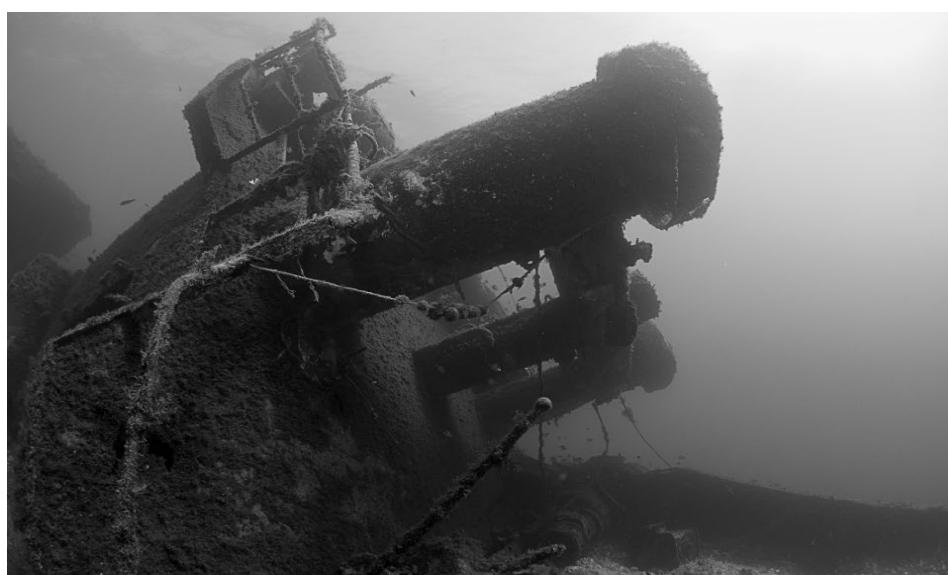
Από τον τύπο έχουμε:

$$1250\text{L} \div 294\text{K} = x\text{L} \div 313\text{K}$$

Λύνουμε ως προς  $x\text{L}$

$$x\text{L} = \frac{1250\text{L}}{294\text{K}} \times 313\text{K} = 1330\text{L}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν η θερμοκρασία αυξηθεί στους  $40^\circ \text{C}$ , ο όγκος του αερίου στη φιάλη θα αυξηθεί στα  $1330\text{L}$ .



"Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου ο όγκος διατηρείται σταθερός είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου."

$$P \div T = \text{σταθερό για } V = \text{σταθερό}$$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2$$

### Εφαρμογή

Η θερμοκρασία φιάλης με πίεση 210bar και 22° Κελσίου, μετά από επαφή με νερό (θάλασσα) μειώνεται στους 16° Κελσίου.  
Ποια θα είναι η πίεση της φιάλης μετά την αλλαγή της θερμοκρασίας;  
Μετατροπή των βαθμών Κελσίου σε Κέλβιν.  
 $22^{\circ}\text{C} + 273\text{K} = 295\text{K}$     $16^{\circ}\text{C} + 273\text{K} = 289\text{K}$

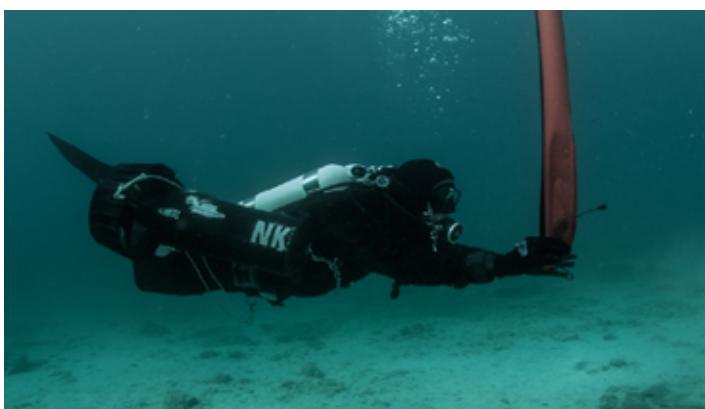
Από τον τύπο έχουμε:

$$210\text{bar} \div 295\text{K} = P_2 \div 289\text{K}$$

Λύνουμε ως προς  $P_2$

$$P_2 = \frac{210\text{bar}}{295\text{K}} \times 289\text{K} = 205,7\text{bar}$$

Άρα η πίεση της φιάλης θα μειωθεί στα 205,7 bar.



### Ατμοσφαιρικός Αέρας

Η Γη περιβάλλεται από ένα στρώμα αερίων, μίγμα αερίων που ονομάζουμε ατμόσφαιρα και το οποίο συγκρατείται λόγω βαρύτητας. Τα μίγματα των αερίων παρουσιάζουν ομοιόμορφη συγκέντρωση σε όλο τον όγκο στον οποίο περιλαμβάνονται. Η σύσταση της ατμόσφαιρας δεν είναι σταθερή, ποικίλει σε σύνθεση ανάλογα με τη γεωγραφική συνθήκη (Θερμοκρασία, υψόμετρο, εκπομπές ρύπων).

Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει άζωτο, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, νέον, αργό και ίχνη άλλων αέριων σε μικρότερες ποσότητες. Η αναλογία των αερίων αυτών σε ξηρή (χωρίς υδρατμούς) ατμόσφαιρα παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

### Σύσταση Ατμοσφαιρικού Αέρα

Αέριο	Εκατοστιαία συγκέντρωση (%)
Άζωτο ( $\text{N}_2$ )	78.084
Οξυγόνο ( $\text{O}_2$ )	20.946
Διοξείδιο του Άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )	0.033
Αργό (Ar)	0.934
Άλλα αέρια	0.01

Ο ατμοσφαιρικός αέρας σαν καταδυτικό αναπνεύσιμο αέριο δημιουργεί προβλήματα όταν γίνεται χρήση του σε βάθη πέραν των 40 μέτρων. Η αυξημένη πυκνότητα του αερίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του έργου αναπνοής με συνέπεια τη μείωση ροής του αέρα στους αεραγωγούς, άρα και τον ανεπαρκή αερισμό των πνευμόνων.

Οργανισμοί όπως ο *Compressed Gas Association* (CGA) έχουν θεσπίσει προδιαγραφές ποιότητας για τον συμπιεσμένο ατμοσφαιρικό αέρα που χρησιμοποιούμε σαν αναπνεύσιμο αέριο στις καταδύσεις.

Η κλάση E για καταδυτική χρήση έχει τα ακόλουθα κριτήρια καθαρότητας-προδιαγραφές:

Οξυγόνο	20-21%
Υδρατμοί	128 ppm
Υγροποιημένοι υδρογονάνθρακες	0,1 mg /m <sup>3</sup>
Σύνολο υδρογονανθράκων	25
Στερεά σωματίδια	<2 μm
Μονοξείδιο του άνθρακα	10 ppm
Διοξείδιο του άνθρακα	500 ppm
Οσμή	Καμία

## Οξυγόνο - $O_2$

Διαλυτότητα = 0.11

Σχετική ατομική μάζα = 15.9 g/mol

Πυκνότητα = 0,0014 g/cm<sup>3</sup> (0 °C)

Σχετική πυκνότητα, αέριο: 1,1 (αέρας=1)



Το οξυγόνο είναι απαραίτητο για τη ζωή.

Οι περισσότεροι οργανισμοί προσλαμβάνουν οξυγόνο για τη λειτουργία της κυτταρικής αναπνοής.

Το οξυγόνο της ατμόσφαιρας που αναπνέουμε είναι σε μορφή μορίων. Το μόριο του Οξυγόνου είναι διατομικό, δηλαδή αποτελείται από δύο άτομα ( $O_2$ ). Είναι το πιο διαδεδομένο χημικό στοιχείο αφού αποτελεί το 21% του ατμοσφαιρικού αέρα.

Το 1774 ο Άγγλος κληρικός και χημικός **Joseph Priestley** δημοσίευσε πρώτος την ανακάλυψη του οξυγόνου ενώ το όνομα «Οξυγόνο – Οξύ + γενώ» οφείλεται στον ο Γάλλο χημικό **Antoine Laurent Lavoisier**.

**Στην κατάδυση, όταν το οξυγόνο εισπνέεται σε μεγάλες πιέσεις με αυξημένη μερική πίεση, μπορεί να προκαλέσει τοξικά συμπτώματα στο κεντρικό νευρικό σύστημα.**

**Είναι απαραίτητο στοιχείο για την καύση. Δεν είναι εύφλεκτο. Έχει την ικανότητα να προκαλεί έκρηξη σε συγκεκριμένες συνθήκες.**

Το οξυγόνο είναι αέριο άχρωμο, άοσμο και άγευστο. Αναλόγως του ποσοστού οξυγόνου το περιβάλλον χαρακτηρίζεται σε:

- Νορμοξικό – Οξυγόνο σε ποσοστό 18%-21%
- Υπεροξικό - Οξυγόνο σε ποσοστό  $\geq 23\%$
- Υποξικό - Οξυγόνο σε ποσοστό  $<18\%$
- Ανοξικό - Περιβάλλον χωρίς Οξυγόνο

## Άζωτο - $N_2$

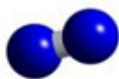
Διαλυτότητα στο νερό=0.0132ml ml-1

Ναρκωτική δράση = 1

Πυκνότητα = 1.250 kg/m<sup>3</sup>

Μοριακή μάζα = 28

Σχετική πυκνότητα, αέριο: 0,9



Το άζωτο είναι αέριο, άχρωμο, άοσμο και άγευστο. Η συγκέντρωσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι 78,084%. Το άζωτο είναι απαραίτητο συστατικό όλων των ζωντανών οργανισμών.

Βασικός ρόλος του άζωτου στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι να διατηρεί σχετικά χαμηλή τη συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνοντας έτσι τη δραστικότητά του.

Αποτέλεσμα: όλες οι οξειδώσεις στη φύση, η καύση και η σήψη να προχωρούν με τη γνωστή φυσική τους ταχύτητα.

Το άζωτο δεν είναι δηλητηριώδες αέριο αλλά μπορεί να προκαλέσει ασφυξία.

Σε κανονικές συνθήκες το εισπνεόμενο από τον άνθρωπο άζωτο διαλύεται ελάχιστα στο αίμα. Υπό αυξημένη πίεση, όπως συμβαίνει στην κατάδυση, η διαλυτότητά του αυξάνεται. Έτσι, με την απότομη μείωση της πίεσης, όπως μπορεί να συμβεί σε μια γρήγορη ανάδυση, μειώνεται η διαλυτότητα με αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αζώτου στο αίμα οι οποίες ευθύνονται για την εμφάνιση της νόσου.

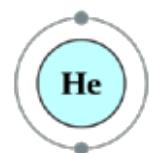
## Ηλιο - $He$

Διαλυτότητα στο νερό=0.00849ml ml-1

Ναρκωτική δράση = 5

Μοριακή μάζα = 4

Σχετική πυκνότητα, αέριο: 0,14 (αέρας=1)



Το πρώτο αέριο του Περιοδικού Συστήματος της ομάδας των ευγενών αερίων. Το ήλιο είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη-τοξικό. Είναι το πιο αδρανές χημικό στοιχείο.

Το ήλιο είναι εξαιρετικά ελαφρύ και δεν μπορεί να συγκρατηθεί από το βαρυτικό πεδίο της Γης. Στην ατμόσφαιρα το βρίσκουμε μόνο σε ίχνη (5,24 ppm). Το ήλιο είναι το χημικό στοιχείο που ανακαλύφθηκε πρώτο εκτός γηίνης ατμόσφαιρας. Έχει τη μικρότερη διαλυτότητα στο νερό από κάθε άλλο γνωστό αέριο.

Στη Γη το ήλιο υπάρχει σε μικρές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα. Σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, που φτάνουν μέχρι και το 7%, ανευρίσκεται στο φυσικό αέριο από το οποίο και παράγεται με κλασματική απόσταξη.

Λόγω της πολύ μικρής διαλυτότητάς του στο νερό και την μη ναρκωτική του δράση χρησιμοποιείται για να μειώσει το ποσοστό του αζώτου σε καταδυτικά μίγματα.

Το ήλιο έχει την ιδιότητα να περνάει εύκολα τα πολύ λεπτά τριχοειδή αγγεία. Έχει τεράστια θερμική αγωγιμότητα η οποία είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους αποφεύγουμε την πλήρωση της στεγανής στολής με μίγματα που περιέχουν ήλιο.

Αναφορικά με τους αριθμούς που παρουσιάζονται στη ναρκωτική δράση, όσο μικρότερος αριθμός τόσο μεγαλύτερη η ναρκωτική δράση του αερίου.

## Διοξείδιο του Άνθρακα - CO<sub>2</sub>

Πυκνότητα: 1.977 g/L (αέριο 1 Atm, 0 °C)

Διαλυτότητα στο νερό: 1.45 g/L

Μοριακή μάζα: 44.01



Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα φυσικό υποπροϊόν του μεταβολισμού που αποβάλλεται από τον οργανισμό μέσω της αναπνευστικής λειτουργίας. Είναι 1,5 φορά πυκνότερο του αέρα καθώς και 130 φορές πιο ναρκωτικό σε σύγκριση με το άζωτο. Θεωρείται πρόξενος του Deep water black out. Τα επίπεδα Διοξειδίου CO<sub>2</sub> ρυθμίζουν τη συχνότητα αναπνών.

Δεν θεωρείται δηλητηριώδες, παρόλα αυτά η μεγάλη ναρκωτική του δράση αυξάνει το φυσιολογικό στρες και σε κρίσιμες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπλοκές.

Το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται βιολογικά "ενεργό" και επηρεάζει άμεσα το επίπεδο pH του αίματος. Το pH αποτελεί το μέτρο οξύτητας ή αλκαλικότητας μιας χημικής ουσίας.

\*1. ΣΠρόσφατα ομάδα επιστημόνων ανακάλυψε ότι ρόλο-κλειδί σε αυτήν τη διαδικασία κατέχει η πρωτεΐνη ASIC1a που υπάρχει στην αμυγδαλή, μια περιοχή του εγκεφάλου η οποία, μαζί με άλλες εγκεφαλικές δομές, συναποτελεί το μεταχιμιακό σύστημα του εγκεφάλου, έναν από τους βασικούς ρυθμιστές ανώτερων ψυχικών λειτουργιών όπως τα συναισθήματα και η συμπεριφορά. Κάνοντας πειράματα με ποντικούς, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι όταν το εγκεφαλικό περιβάλλον γινόταν πιο όξινο η παραγωγή της πρωτεΐνης ASIC1a αυξανόταν στην αμυγδαλή, προκαλώντας συμπεριφορές με τυπικά φοβικά χαρακτηριστικά. Αντίθετα, όταν εξουδετερωνόταν η δράση της συγκεκριμένης πρωτεΐνης, οι συμπεριφορές αυτές δεν εκδηλώνονταν. Δεδομένου ότι μία από τις βασικές συνέπειες της εισπνοής διοξειδίου του άνθρακα είναι η αύξηση της οξίνισης του εγκεφαλικού περιβάλλοντος, και συνεπώς η άμεση παραγωγή της πρωτεΐνης ASIC1a, οι ερευνητές συμπέραναν ότι για τις κρίσιμες πανικού που συνοδεύουν την εισπνοή μεγάλης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα θα πρέπει να ευθύνεται η υψηλή συγκέντρωση της συγκεκριμένης πρωτεΐνης. \*

Η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται αυξανομένης της πίεσης. Τα αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα δυνητικά αυξάνουν τις πιθανότητες τοξικότητας Οξυγόνου καθώς και το ενδεχόμενο εμφάνισης νόσου.

Για πολλά καταδυτικά ατυχήματα υπαίτιο θεωρείται το CO<sub>2</sub>.

## Θεματολογία NITROX

Το 1804 ο Άγγλος χημικός John Dalton (1792-1844) διατυπώνει τον Νόμο των Μερικών Πιέσεων ή Νόμο Dalton. Με αυτόν ο John Dalton εισάγει την έννοια «μερική πίεση αερίου».

Σύμφωνα με τον νόμο του Dalton, η ολική πίεση ενός μίγματος αερίων είναι ίση με το άθροισμα των μερικών πιέσεων των επιμέρους αερίων του μίγματος.

$$P_{\text{ολ}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

Όπου  $P_1 \dots$  η επιμέρους πίεση του κάθε αερίου.

Από τον νόμο του Dalton απορρέουν τρεις τύποι βασικοί για τον υπολογισμό της μερικής πίεσης, του ποσοστού (συγκέντρωση) κάθε αερίου που περιέχει το μίγμα κατάδυσης σε σχέση με το βάθος κατάδυσης.

$$PO_2$$

$$FO_2$$

Βάθος σε  
ATA - MOD

Καθορισμός του ποσοστού οξυγόνου στο μίγμα

$$FO_2 = PO_2 \div \text{βάθος σε ATA}$$

Προγραμματίζουμε κατάδυση στα 35 μέτρα. Ποιο πρέπει να είναι το ποσοστό οξυγόνου ώστε η μερική πίεση O<sub>2</sub> να μην υπερβεί το PO<sub>2</sub> 1.4;

$$FO_2 = PO_2 \div \text{βάθος σε ATA}$$
$$FO_2 = 1.4 \div 4.5 \text{ ATA} = 0.31 \sim 31\%$$

Μέγιστο Λειτουργικό Βάθος  
MOD - Maximum operating depth

$$MOD = PO_2 \div FO_2$$

Ποιο είναι το μέγιστο βάθος στο οποίο μπορούμε να καταδυθούμε έχοντας EAN36 χωρίς να ξεπεράσουμε το PO<sub>2</sub> 1.4;

$$MOD = PO_2 \div FO_2$$
$$MOD = 1.4 \div 0.36 = 3.8 \text{ ATA} \sim 28m$$

## Υπολογισμός Μερικής Πίεσης Οξυγόνου

$$\text{PO}_2 = \text{FO}_2 * \text{βάθος σε ATA}$$

Ποια η Μερική Πίεση Οξυγόνου σε βάθος 42 μέτρων και με περιεκτικότητα οξυγόνου στο μίγμα 30%;

$$\begin{aligned}\text{PO}_2 &= \text{FO}_2 \times \text{βάθος σε ATA} \\ \text{PO}_2 &= 0.30 \times 5.2\text{ATA} = 1.56\end{aligned}$$

## Ισοδύναμο Βάθος Αέρα - Equivalent Air Depth EAD

$$\text{EAD} = [(FN \div 0.79) \times (\text{βάθος} + 10)] - 10$$

Σε κατάδυση σε βάθος 27 μέτρων με EAN32, ποιο θα είναι το Ισοδύναμο Βάθος Αέρα;

$$\text{EAD} = [(0.68 \div 0.79) \times (27 + 10)] - 10 = 21.8\text{m}$$

- Μέγιστη μερική πίεση οξυγόνου για το μίγμα βυθού (Bottom mix) recreational dive **PO<sub>2</sub> 1.4**
- Μέγιστη μερική πίεση οξυγόνου για το μίγμα βυθού (Bottom mix) Technical dive **PO<sub>2</sub> 1.2**
- Μέγιστη μερική πίεση οξυγόνου για τα αέρια αποσυμπίεσης (deco mix) **PO<sub>2</sub> 1.6**

## Έκθεση Οξυγόνου - %K.N.S-Κεντρικό Νευρικό Συστημα % CNS - Central Nervous System

Το ποσοστό έκθεσης Οξυγόνου απεικονίζεται σε ποσοστό επί %.

Το συσσωρευμένο ποσοστό οξυγόνου μειώνεται στο μισό μετά από διάλειμμα επιφανείας 90 λεπτών.

Ακολούθως αναφέρεται ο τρόπος για την εύρεση του ποσοστού έκθεσης.

Σαν παράδειγμα η μερική πίεση οξυγόνου είναι PO<sub>2</sub> 1.2

Από τον πίνακα "Ορια Οξυγόνου για Μίγματα Βυθού" βλέπουμε ότι η PO<sub>2</sub> 1.2 αντιστοιχεί σε 210 λεπτά μεμονωμένης έκθεσης.

Χρόνος στο βάθος

$$\text{CNS\%} = \frac{\text{Χρόνος στο βάθος}}{\text{Χρόνος μεμονωμένης έκθεσης (NOAA)}} \times 100$$

Ποιο θα είναι το ποσοστό CNS% σε PO<sub>2</sub> 1.2 και χρόνο 85 λεπτών;

$$\begin{aligned}\text{CNS} &= (85 \div 210) \times 100 = 40\% \\ &\quad \text{ή} \\ &85 \div 210 = 0.40 \text{ ή } 40\% \text{ CNS}\end{aligned}$$

Σε καταδύσεις όπου κατά την αποσυμπίεση χρησιμοποιούμε μίγματα με υψηλό ποσοστό οξυγόνου η συσσωρευμένη έκθεση οξυγόνου στις στάσεις αποσυμπίεσης πρέπει να υπολογίζεται.

Το άθροισμα των τιμών (μίγμα βυθού+μίγματα αποσυμπίεσης) είναι το συνολικό ποσοστό έκθεσης οξυγόνου για τη συγκεκριμένη κατάδυση.

Το ελάχιστο απαιτούμενο διάλειμμα επιφανείας είναι 2 ώρες.

Οι περισσότεροι καταδυτικοί οργανισμοί καθορίζουν τις διαδικασίες και τα όρια της χρήσης του οξυγόνου βάσει των πινάκων National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

### Όρια Οξυγόνου για Μίγματα Αποσυμπίεσης (σε λεπτά)

PO2	Μεμονωμένη έκθεση	Μέγιστο για 24 ώρες
1.6	45	150
1.5	120	180

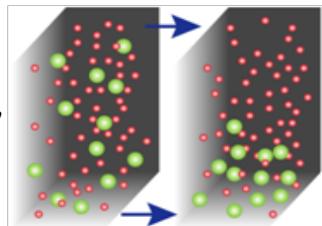
### Όρια Οξυγόνου για Μίγματα Βυθού (σε λεπτά)

PO2	Μεμονωμένη έκθεση	Μέγιστο για 24 ώρες
1.4	150	180
1.3	180	210
1.2	210	240
1.1	240	270
1.0	300	300
0.9	360	360
0.8	450	450
0.7	570	570
0.6	720	720

## Βασικές Αρχές Μεταφοράς Αερίων

### Διάχυση

Διάχυση ή Παθητική μεταφορά χαρακτηρίζει την μετακίνηση των ατόμων ή μορίων μιας ουσίας από περιοχές υψηλής



συγκέντρωσης προς περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης. Στη δημιουργία μίγματος κατάδυσης που προκύπτει από την ανάμιξη δύο ή περισσότερων αερίων η διαφορά πίεσης μεταξύ των φιαλών είναι αυτή που προκαλεί τη μεταφορά μορίων του αερίου, αέριας μάζας από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης. Αποτέλεσμα είναι ένα μίγμα με ομοιογενή συγκέντρωση.

Αυτό δεν συμβαίνει κατά τη διάχυση αερίου σε έναν ιστό. Η διάχυση ενός αερίου σε ιστό εξαρτάται μόνο από τη διάφορα των μερικών πιέσεων του συγκεκριμένου αερίου και δεν επηρεάζεται από τα άλλα αέρια που βρίσκονται διαλυμένα στον ιστό. Τα μόρια ή τα άτομα ενός αερίου δεν εμποδίζουν την κίνηση των μορίων άλλων αερίων προς ή από τον ιστό.

Η διάχυση των αερίων δια της τριχοειδούς ψελιδικής μεμβράνης είναι παθητική και διέπεται από το νόμο του Fick. Σύμφωνα με αυτόν, η ταχύτητα μεταφοράς ενός αερίου μέσα από ένα στρώμα ιστού είναι ανάλογη προς την έκταση της επιφάνειας του στρώματος και τη διαφορά των μερικών πιέσεων του αερίου που υπάρχει στις δύο πλευρές της επιφάνειας και αντιστρόφως ανάλογη προς το πάχος του ιστού.



Οι μερικές πιέσεις των ιστών εκφράζονται σε χιλιοστά στήλης υδραργύρου (mmHg), ή απόλυτες ατμόσφαιρες (ATA).

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι μετά την πάροδο ορισμένου χρόνου X, με τη διαδικασία της διάχυσης τα μόρια των αερίων που βρίσκονται στο αίμα θα κινηθούν προς τον ιστό όπου υπάρχει μικρότερη συγκέντρωση μέχρι να επέλθει ισορροπία στις συγκεντρώσεις (μερικές πιέσεις) των αερίων ήλιου και αζώτου.

Κατά την διαδικασία της διάχυσης η συνολική εξωτερική υδροστατική πίεση δεν επηρεάζει την κίνηση των μορίων.

### Διαλυτότητα

Η διαλυτότητα ενός αερίου χαρακτηρίζει την ικανότητα διάλυσης του μέσα σε μια ουσία. Η διαλυτότητα ενός αερίου είναι κατά προσέγγιση ανάλογη προς την ασκούμενη πίεση και αντιστρόφως ανάλογη προς την θερμοκρασία. Όσο η πίεση αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαλυτότητα του αερίου στο αίμα (υγρό) με αποτέλεσμα όσο πιο διαλυτό είναι ένα αέριο τόσο να αυξάνεται η συγκέντρωση του μέσα στον ιστό. Ο συντελεστής διαλυτότητας ενός αερίου θεωρείται βασικός παράγοντας για τη συγκέντρωση του αερίου στον ιστό.

Η ποσότητα του αερίου που θα διαλυθεί σε ένα υγρό εξαρτάται, εκτός από τον συντελεστή διαλυτότητας του αερίου, από το είδος του υγρού που θα διαλυθεί καθώς και από τη θερμοκρασία.

Έχοντας τη μερική πίεση περιβάλλοντος ενός αερίου (p) και της διαλυτότητάς του (K) σε ένα υγρό της σχετικής συγκέντρωσης το ποσοστό του αερίου (c) που διαλύεται δίνεται από το Νόμο του J.William Henry (1774-1836) :  $c=K^*p$

### Διαλυτότητα αζώτου και ηλίου στο αίμα

Σύμφωνα με τον Νόμο του Henry :

Καερίου = (S) Καερίου X PPαερίου

Όπου:

- Καερίου είναι η συγκέντρωση των μορίων του αερίου μέσα στο υγρό.
- Συντελεστής ή παράγοντας K είναι ο συντελεστής διαλυτότητας του αερίου στο υγρό.

Όσο μεγαλύτερός ο συντελεστής τόσο περισσότερο αέριο θα διαλυθεί μέσα στο υγρό.

- PPαερίου είναι η πίεση του αερίου στο υγρό με το οποίο έρχεται σε επαφή. PP (Partial Pressure)-Μερική πίεση

Ο συντελεστής διαλυτότητας του αζώτου στο νερό είναι 0.0132ml ml-1ενώ στο λίπος είναι 0.0615ml ml-1.

Ο συντελεστής διαλυτότητας του ηλίου στο νερό είναι 0.00849ml ml-1ενώ στο λίπος είναι 0.0150ml ml-1

Το αίμα μεταφέρει τα αέρια (αδρανή) στους διάφορους ιστούς του σώματος. Η αιματική ροή και η συγκέντρωση (μερική πίεση) του διαλυμένου αερίου θα καθορίσουν και την ποσότητα μεταφοράς του αερίου από το αίμα σε ένα βιολογικό ιστό.

## Παράδειγμα διαλυτότητας 1

Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται σε βαθιά κατάδυση χωρίς τη χρήση ηλίου στο αναπνεύσιμο μίγμα.

Το αίμα θεωρείται υδατικός ιστός. Ο συντελεστής διαλυτότητας του αζώτου στο νερό είναι  $K=0.0132 \text{ ml}$  στην 1 ατμόσφαιρα και θερμοκρασία  $37^\circ\text{C}$ .

Η συνολική ποσότητα αίματος στο ανθρώπινο σώμα είναι περίπου 5 λίτρα.

Σε κατάδυση στα 60 μέτρα με ατμοσφαιρικό αέρα η συγκέντρωση αζώτου θα είναι:

$$0.0132 \times 7 \text{ ATA} \times 0.79 = 0.073 \text{ N}_2/\text{ml} \text{ ιστού.}$$

$$\text{Για το αίμα θα είναι: } 0.073 \times 5000 \text{ ml} = 365 \text{ ml/N}_2$$

Η ποσότητα αυτή είναι ικανή για τη δημιουργία μεγάλου αριθμού φυσαλίδων στη ροή του αίματος κατά την ανάδυση. Θα χρειαστεί μεγάλης διάρκειας αποσυμπίεση για την ασφαλή ανάδυση στην επιφάνεια.

## Παράδειγμα διαλυτότητας 2

Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται σε βαθιά κατάδυση με τη χρήση ηλίου στο αναπνεύσιμο μίγμα.

Για το ήλιο ο συντελεστής διαλυτότητας στο νερό είναι  $K=0.00849 \text{ ml/He}$  στην 1ATA σε θερμοκρασία  $37^\circ\text{C}$ .

Για την ίδια κατάδυση χρησιμοποιούμε μίγμα 18/45. Το ποσοστό αζώτου στο αναπνεύσιμο μίγμα θα είναι:  
 $100 - (18+45) = 37\% \text{ ή } 0.37$

$$\text{He } 0.00849 \times 7 \text{ ATA} \times 0.45 = 0.026 \text{ ml/He}$$

$$\text{Για το αίμα θα είναι: } 0.026 \times 5000 = 130 \text{ ml/He}$$

$$N_2 \quad 0.0132 \times 7 \text{ ATA} \times 0.37 = 0.034 \text{ ml/N}_2 \text{ ιστού}$$

$$\text{Για το αίμα θα είναι: } 0.034 \times 5000 \text{ ml} = 170 \text{ ml/N}_2$$

Το άθροισμα συγκέντρωσης των αδρανών αερίων θα είναι:

$$130 \text{ ml/He} + 170 \text{ ml/N}_2 = 300 \text{ ml}$$

Αν και το άθροισμα των μερικών πίεσεων αδρανών αερίων στο παράδειγμα 2 θα είναι μεγαλύτερο

$$\text{PP} = 0.82 \times 7 \text{ ATA} = 5.74$$

$$(\text{άζωτο } 0.37 + \text{ ήλιο } 0.45 = 0.82)$$

συγκριτικά με το παράδειγμα 1, (κατάδυση με ατμοσφαιρικό αέρα) όπου η μερική πίεση του αζώτου στα 60 μέτρα είναι:  $\text{PN}_2 = 0.79 \times 7 = 5.53$  παρατηρούμε μικρότερη ποσότητα αδρανών αερίων.

Αυτό οφείλεται στη διαλυτότητα του ηλίου η οποία είναι μικρότερη από τον αζώτον. Έτσι θα υπάρξει μικρότερη ποσότητα αδρανών αερίων στο σώμα.

## Βασικές Αρχές Μεταφοράς Αερίων

Οι διαφορές μερικών πιέσεων των αερίων είναι αυτές που καθορίζουν την κίνηση των μορίων μεταξύ πνευμόνων και ιστών.

Ένα αέριο σε διάλυση δεν μπορεί να ασκεί πίεση σαν να ήταν ελεύθερο μέσα σε ένα δοχείο. Ένα αέριο δεν ασκεί υδροστατική πίεση όπως στην ελεύθερη κατάσταση διότι τα μόριά του δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα όπως στην αέρια κατάσταση.

Ένα αέριο διαλυμένο σε υγρό μοιάζει με στερεό διαλυμένο στο νερό, όπως το διάλυμα ζάχαρης στον καφέ όπου μόνο τα μόρια της ζάχαρης καθιστούν αισθητή την παρουσία της.

Η μερική πίεση ενός αερίου μέσα σε έναν ιστό είναι απλώς μια ένδειξη ποσότητας του αερίου που βρίσκεται μέσα σε αυτόν.

Οι ιστοί θεωρούνται υγρά και η μερική πίεση ενός αερίου που βρίσκεται διαλυμένο μέσα σε ένα υγρό ορίζεται σαν τη μερική πίεση που θα ασκούσε το αέριο εάν η αέρια κατάσταση βρισκόταν σε ισορροπία με το υγρό.

Η συνολική ποσότητα του αερίου στον ιστό εξαρτάται και από τη διαλυτότητά του και διαφέρει ανάλογα με την αιμάτωση και τη σύσταση του ιστού, το είδος του αέριου και τη θερμοκρασία. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαλυτότητα του αερίου τόσο ο ιστός θα απορροφά μεγαλύτερο όγκο αερίου. Όσο πιο μεγάλη η σταθερά διαλυτότητας του ιστού τόσο πιο μεγάλη ποσότητα αδρανών αερίων θα περιέχει.

Η μερική πίεση ενός αερίου δεν είναι η πραγματική μερική πίεση αερίου σε αέρια φάση, διότι το αέριο από τη στιγμή που “μπήκε” στο υγρό χάνει την ιδιότητά του με συνέπεια η μερική πίεση να αποτελεί απλώς μια ένδειξη του αερίου που βρίσκεται διαλυμένο στο ιστό.

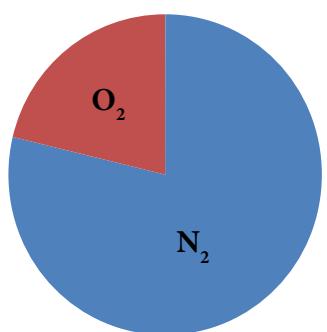
## Μεταφορά αερίων στο αίμα στη 1 ATM

Το αίμα διαβρέχει τους πνεύμονες, απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και προσλαμβάνει οξυγόνο. Κατά την αναπνοή μας στην επιφάνεια (1atm) ο αέρας κινείται μέσω της τραχείας στις κυψελίδες του πνεύμονα οι οποίες αποτελούν και τις μονάδες όπου γίνεται η ανταλλαγή αερίων. Κατά την εισπνοή ο αέρας εμπλουτίζεται με υδρατμούς οι οποίοι διατηρούν το εισπνεόμενο αέριο στη θερμοκρασία του σώματος. Η ενυδάτωση του εισπνεόμενου αέρα είναι πολύ σημαντική για τη σωστή λειτουργία των κυψελίδων.

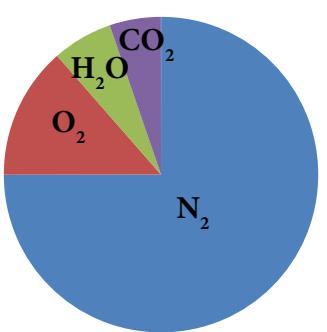
Στους 37°C βαθμούς Κελσίου η μερική πίεση των υδρατμών είναι 47mmHg. Οι υδρατμοί αυτοί θα αραιώσουν το εισπνεόμενο αέριο.

Η μερική πίεση του οξυγόνου μέσα στις κυψελίδες ελαττώνεται ακόμα περισσότερο επειδή το οξυγόνο απορροφάται από το αίμα ενώ διοξείδιο του άνθρακα προστίθεται στις κυψελίδες προερχόμενο από το αίμα.

### Αναπνεύσιμο αέριο



### Κυψελιδικός αέρας



**Σύνολο:** 760mmHg = 1atm (ατμόσφαιρα)

Στις κυψελίδες η συνολική μερική πίεση των αερίων πρέπει να είναι ίση με την πίεση του περιβάλλοντος. Όμως, στο αίμα που έρχεται σε επαφή με τις κυψελίδες μέσω των τριχοειδών, το άθροισμα των μερικών πιέσεων μπορεί να είναι μικρότερο από τη πίεση του περιβάλλοντος. Αν θερμοκρασία και αναλογία μίγματος είναι σταθερές η μερική πίεση θα εξαρτηθεί από τη διαλυτότητα του αερίου.

Στην 1 ατμόσφαιρα η ποσοστιαία αναλογία αζώτου είναι περίπου 79% και δεν υπάρχει μεταβολή στην μερική πίεση. Αέρια όπως το άζωτο και το ήλιο δεν συμμετέχουν στο μεταβολισμό και μεταφέρονται από το αίμα στους ιστούς μόνο διαλυμένα. Η μερική πίεσή τους στο αίμα εξαρτάται από τη μερική πίεση και τη διαλυτότητά τους.

Για το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα ο μηχανισμός μεταφοράς είναι διαφορετικός σε σχέση με τα αδρανή αέρια. Η αιμοσφαιρίνη (Hb) είναι ο βασικός μεταφορέας οξυγόνου στα ερυθρά αιμοσφαιρία, τα οποία με τη σειρά τους μεταφέρουν το οξυγόνο στους ιστούς.

Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα θεωρούνται μεταβολικά αέρια.

*To διοξείδιο του άνθρακα είναι το τελικό προϊόν των μεταβολικών οξειδωτικών αντιδράσεων.*

Η μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου μεταφέρεται στο αίμα δεσμευμένη από την αιμοσφαιρίνη. Ένα μικρό ποσοστό οξυγόνου μεταφέρεται διαλυμένο στο πλάσμα. Το ποσοστό που είναι δεσμευμένο από την αιμοσφαιρίνη δεν μπορεί να βρίσκεται σε διάλυση στο αίμα, άρα δεν συνεισφέρει καθόλου στη μερική πίεση. Έτσι, με την αύξηση του ποσοστού κορεσμού της αιμοσφαιρίνης δεν παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση της μερικής πίεσης οξυγόνου. Η αιμοσφαιρίνη μέσω του αρτηριακού αίματος μεταφέρεται στους ιστούς όπου το οξυγόνο ελευθερώνεται και τους οξυγονώνει. Το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα θα περάσει στο αίμα και μέσω της φλεβικής κυκλοφορίας θα επιστρέψει στους πνεύμονες. Έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος.

*Καθώς η μερική πίεση του οξυγόνου μειώνεται η συνολική πίεση των αερίων δεν είναι 1 Ατμόσφαιρα 760mmHg, αλλά λιγότερο. Αυτή είναι και μια από τις έννοιες του "παράθυρου οξυγόνου" - Oxygen window.*

## Μεταφορά οξυγόνου στο αίμα

### Διενκρινήσεις

Το O<sub>2</sub> διανύει τη 'διαδρομή' από την ατμόσφαιρα μέχρι τα μιτοχόνδρια προωθούμενο,

1. Με την ενδοπνευμονική ροή του αέρα και την ενδαγγειακή ροή του αίματος.
2. Με την παθητική μετατόπισή του από περιοχές στις οποίες βρίσκεται υπό υψηλή μερική πίεση (μεγάλη συγκέντρωση) προς περιοχές με χαμηλότερη μερική πίεση.

Το ποσό του O<sub>2</sub> που μεταφέρεται στα πνευμονικά τριχοειδή και από αυτά στους περιφερικούς ιστούς εξαρτάται από :

1. Τη συγκέντρωση του εισπνεόμενου μίγματος και το μέτρο της μερικής πίεσης.
2. Τα χαρακτηριστικά της διαχυτικής ικανότητας της κυψελιδοτριχοειδικής μεμβράνης.
3. Τη συγκέντρωση και τη συγγένεια της αιμοσφαιρίνης με το O<sub>2</sub>.

Στο επίπεδο της θάλασσας, η βαρομετρική πίεση είναι 760 mmHg. Στη διαμόρφωση της βαρομετρικής πίεσεως, κάθε αέριο συμμετέχει ανάλογα με τη συγκέντρωσή του. Η μερική πίεση του O<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι:

$$760 \times 0.2093 = 159.07 \text{ mmHg.}$$

Καθώς ο αέρας εισέρχεται στους ανώτερους αεραγωγούς, υφίσταται θερμική εξισορρόπηση και κορένυται με υδρατμούς προερχόμενους από το βλεννογόνο, των οποίων η μερική πίεση είναι 47 mmHg. Στους κυψελιδικούς αεροχώρους διενεργείται απαγωγή O<sub>2</sub> προς, και προσαγωγή CO<sub>2</sub> από, τα πνευμονικά τριχοειδή. Η PAO<sub>2</sub>, επομένως, μειώνεται περαιτέρω, ανάλογα με την ενδοκυψελιδική αύξηση της συγκεντρώσεως του CO<sub>2</sub>, δηλαδή αύξηση της PAO<sub>2</sub>. Εάν, όση ποσότητα O<sub>2</sub> απαγόταν από τις κυψελίδες, τόση ποσότητα CO<sub>2</sub> εισερχόταν σ' αυτές (R=1) η σχέση των δύο αερίων στο κυψελιδικό χώρο θα ήταν:

$$\text{PiO}_2 = \text{PAo}_2 + \text{PACO}_2$$

όπου PiO<sub>2</sub>, η μερική πίεση του O<sub>2</sub> στο εισπνεόμενο μίγμα, που στην περίπτωση του αιμοσφαιρικού αέρα είναι:

$$(760-47) \times 0.2093 = 149 \text{ mmHg}$$

Κάθε γραμμάριο αιμοσφαιρίνης μπορεί να συνδέσει 1.34 ml O<sub>2</sub>.

Φυσιολογικά, το αίμα περιέχει 15 grHb /100 ml αίματος. Επομένως, η ικανότητα μεταφοράς της Hb είναι:

$$15 \times 1.34 = 20 \text{ ml O}_2 / 100 \text{ ml αίματος.}$$

Σημειώνεται ότι τόσο η ικανότητα μεταφοράς O<sub>2</sub>, όσο και η περιεκτικότητα O<sub>2</sub> στο αίμα εξαρτάται από τη συγκέντρωση της αιμοσφαιρίνης και εκφράζεται ως όγκος O<sub>2</sub> ανά μονάδα όγκου αίματος (vol%).

Ο κορεσμός αιμοσφαιρίνης, SaO<sub>2</sub> και η περιεκτικότητα O<sub>2</sub> δεν είναι ταυτόσημες έννοιες και δεν μπορεί η μια να αντικαταστήσει την άλλη.

### Αιμοσφαιρίνη

Η αιμοσφαιρίνη (Hb) είναι το κύριο συστατικό των ερυθροκυττάρων και η οξυγονωμένη της μορφή ευθύνεται για το ζωηρό κόκκινο χρώμα του αρτηριακού αίματος. Κάθε ερυθροκύτταρο περιέχει περίπου 280 εκατομμύρια μόρια αιμοσφαιρίνης, καθένα από τα οποία περιέχει 4 άτομα σιδήρου που είναι απαραίτητα για τη μεταφορά του O<sub>2</sub>. Είναι σύμπλοκη πρωτεΐνη, μεγάλου μοριακού βάρους.

Η μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου (98-99%) μεταφέρεται στο αίμα συνδεδεμένο με την αιμοσφαιρίνη, ενώ μια πολύ μικρή ποσότητα (1-2%) μεταφέρεται φυσικώς διαλυμένο στο πλάσμα.

Κάθε gram αιμοσφαιρίνης μπορεί να συνδέσει μεταφέρει 1.31 ml O<sub>2</sub> έαν είναι πλήρως κορεσμένη. Υπό φυσιολογική PaO<sub>2</sub> και αναπνοή αιμοσφαιρικού αέρα (FiO<sub>2</sub> = 0.21) στο αίμα διαλύονται το 1 % του συνολικά μεταφερόμενου O<sub>2</sub> ή 0.25 ml / 100 ml.

Με την χρήση 100% O<sub>2</sub>, το με φυσική διάλυση μεταφερόμενο με το αίμα O<sub>2</sub> είναι περίπου 2ml/100 ml αίματος.

Αναπνέοντας, όμως, 100% υπό πίεση 3 atm, το ποσό του φυσικώς διαλυμένου O<sub>2</sub> ανέρχεται σε 6ml/100ml αίματος ή 300 ml O<sub>2</sub>, ποσότητα, που είναι αρκετή για τη διατήρηση του αερόβιου μεταβολισμού.

Επομένως, κάθε λίτρο αίματος με περιεκτικότητα σε αιμοσφαιρίνη 15 g.dL<sup>-1</sup> μπορεί να μεταφέρει περίπου 200 ml O<sub>2</sub>, έαν είναι πλήρως κορεσμένη (:PO<sub>2</sub>=100 mmHg).

Υπό αυτή τη μερική πίεση, μόνο 3 ml οξυγόνου μπορεί να μεταφέρεται ως φυσικώς διαλυμένο στο πλάσμα).

## Σημειώσεις

## Εισαγωγή στη θεωρία αποσυμπίεσης

Η ανταλλαγή αερίου, ο σχηματισμός και η αποβολή φυσαλίδων, η συμπίεση-αποσυμπίεση και οι ιστοί χαρακτηρίζονται από παράγοντες όπως η διάχυση, η διαλυτότητα, η φάση διάλυσης, οι πυρήνες αερίου και οι συνδυασμοί αυτών.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των βιολογικών συστημάτων, το πλήθος των ιστών και του μεγάλου αριθμού φυσαλίδων που προσκρούουν στους φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς, είναι δύσκολο να λυθεί το πρόβλημα της αποσυμπίεσης.

Σήμερα τα καταδυτικά μοντέλα είναι αυτά που καθορίζουν-υπολογίζουν τα όρια αποσυμπίεσης, το πλάνο αποσυμπίεσης και το επίπεδο κορεσμού. Αυτά είναι και τα μοντέλα που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταδυτικοί υπολογιστές Dive Computers (DC). Η λειτουργία τους έχει βασιστεί σε μοντέλα αποσυμπίεσης τα οποία υπολογίζουν την ποσότητα και το επίπεδο κορεσμού των ιστών καθώς αναπνέουμε μίγματα αερίων υπό πίεση.

Μετέπειτα ερευνητές όπως ο **Robert D. Workman**, χρησιμοποιώντας στοιχεία του US Navy, μελέτησε τα όρια ανάμεσα στις πιέσεις περιβάλλοντος και διαμερισμάτων. Ήταν αυτός που επινόησε και ανέπτυξε τον όρο **M-Value** (1960), που μέχρι τότε ήταν γνωστός ως “*Κριτήρια Περιορισμού Ανάδυσης*” τα οποία βασίζονται στην μερική πίεση αδρανούς αερίου.

Ο R.D. Workman ήταν αυτός που τροποποίησε τα Haldanean μοντέλα. Έλαβε υπόψη στους υπολογισμούς του ότι κάθε ιστός μπορεί να ανεχτεί διαφορετικό όγκο αδρανούς αερίου ο οποίος μεταβάλλεται με την αλλαγή του βάθους.

Με τον όρο M-Value υποδεικνύει τη μέγιστη ανοχή των ιστών σε αδρανές αέριο χωρίς να παρουσιαστούν συμπτώματα DCS (Decompression Sickness). Ο R.D. Workman πρόσθεσε επίσης τρεις υποθετικούς αργούς ιστούς-διαμερίσματα με χρόνους 160, 200, 240 λεπτά. Ήταν από τους πρώτους που αναγνώρισε τον ρόλο και αξία που μπορεί να έχουν οι καταδυτικοί υπολογιστές στον υπολογισμό αλλά και στο πλάνο της αποσυμπίεσης.



Η ανάπτυξη της θεωρίας αποσυμπίεσης ξεκίνησε στις αρχές του περασμένου αιώνα από τον **John Scott Haldane** (1860-1936), ο οποίος θεωρείται από πολλούς ο πατέρας της θεωρίας αποσυμπίεσης. Ο Haldane διαπίστωσε ότι οι ιστοί του σώματος προσλαμβάνουν άζωτο σε διαφορετικό βαθμό, ο οποίος εξαρτάται από την αγγείωση και τη σύσταση του ιστού. Έτσι, καθιέρωσε την έννοια των διαφόρων υποθετικών διαμερισμάτων-ιστών στο ανθρώπινο σώμα. Η απορρόφηση ή εξάλειψη του αερίου σε κάθε συγκεκριμένο ιστό πραγματοποιείται με εκθετική μορφή.

Το 1907, ο John Scott Haldane πραγματοποίησε τον διαχωρισμό των ιστών σε 5 υποθετικά διαμερίσματα (compartments).

Ο καθηγητής **Albert Buhlmann** (1923-1994), ξεκίνησε την έρευνα σχετικά με την αποσυμπίεση στο Πανεπιστημιακό Νοσοκομείο Ζυρίχης το 1959. Αύξησε σε 16 τους υποθετικούς τύπους ιστών-διαμερίσματα στο ανθρώπινο σώμα.

Η μέθοδος υπολογισμού αποσυμπίεσης που χρησιμοποίησε ο A. Buhlmann ήταν παρόμοια με αυτή του R.D. Workman. Η μεγαλύτερη διαφορά στην υπολογιστική προσέγγιση ήταν ότι ο R.D. Workman λαμβάνει στους υπολογισμούς του τα M-Value συμφώνα με την πίεση βάθους ενώ ο Buhlmann σύμφωνα με την απόλυτη πίεση.

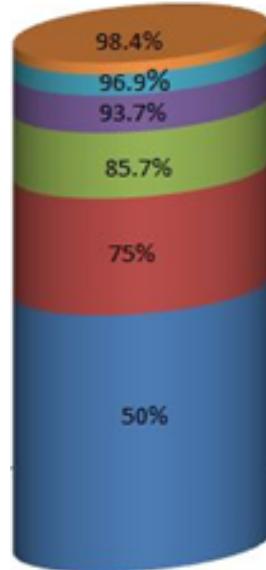
Ο A. Buhlmann δημιούργησε τους πίνακες καταδύσεων καθώς και πίνακες για καταδύσεις σε υψόμετρο. Πάνω στα μοντέλα του πολλοί ερευνητές επεξεργάστηκαν, τροποποίησαν και δημιούργησαν πιο εξελιγμένα μοντέλα αποσυμπίεσης.

## Χρόνος Ημιζωής του ιστού - Tissue Half Times

Όπως προαναφέρθηκε, ο A. Bühlmann διαχώρισε το ανθρώπινο σώμα σε 16 υποθετικούς ιστούς-διαμερίσματα για τους οποίους έθεσε κάποια χρονικά όρια. Κάθε διαμέρισμα χαρακτηρίζεται από μια μεταβλητή την οποία ονομάζουμε half times. Τα half times συνιστούν το μέτρο για την απορρόφηση του αδρανούς αερίου και το καθένα είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο ιστός για να δεσμεύσει το 50% του συνολικού όγκου αερίου που μπορεί να δεχθεί μέχρι τον κορεσμό. Σημαντικό είναι να θυμόμαστε ότι οι ιστοί δεν αντιστοιχούν σε υπαρκτό βιολογικό υλικό και τα half times επιλέγονται απλώς ως ενδείξεις πιθανών τιμών.

Οι χρόνοι ημιζωής των ιστών υποδεικνύουν την ταχύτητα απορρόφησης αδρανών αερίων ( $\text{He}-\text{N}_2$ ) από τους ιστούς.

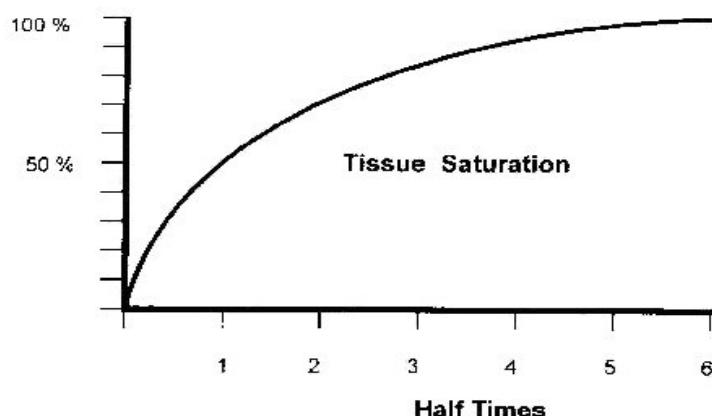
Σε ιστούς εκτιθέμενους σε υψηλή πίεση αδρανούς αερίου υπάρχει ροή του αερίου. Μετά από το 1ο half time η πίεση του αερίου στους ιστούς θα βρίσκεται 50% του συνολικού χώρου που χρειάζεται για την εξισορρόπηση της εξωτερικής πίεσης του αερίου. Μετά το πέρας και του 2ου half time η πίεση του αερίου στους ιστούς θα έχει καλύψει το ήμισυ του υπολειπόμενου χώρου, φτάνοντας το 75%. Μετά και το 3ο half time η κάλυψη θα φτάσει το 87,5% του απαιτούμενου για την εξισορρόπηση της εξωτερικής πίεσης του αερίου χώρου. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια φθίνουσα λογαριθμική σχέση. Μετά από 60 half time, το οποίο ισούται με κάλυψη 98,4%, ο ιστός τείνει στον κορεσμό. Στο σημείο αυτό θα υπάρξει διάχυση του αερίου στους ιστούς σε ποσοστό ίδιο με αυτό που διαχέεται και έξω από αυτούς. Στους ιστούς δεν θα υπάρχει περαιτέρω αλλαγή στο φορτίο του αερίου.



Αν φανταστούμε έναν ιστό σαν μια δεξαμενή παρατηρούμε ότι μετά το πέρας του πρώτου half time θα έχει καλυφθεί με το 50% της χωρητικότητας. Μετά το δεύτερο half time με το 75%.

Μετά από 60 half-time, το οποίο ισούται με κάλυψη 98,4%, ο ιστός τείνει στον κορεσμό.

Half Times 5min	% Κορεσμός
5min	50%
10min	75%
15min	87,5%
20min	93,7%
25min	96,9%
30min	98,4%



Στο γράφημα παρουσιάζεται το ποσοστό κορεσμού του ιστού σε σχέση με τον χρόνο (half times) που απαιτείται ώστε ο ιστός να δεσμεύσει τον συνολικό όγκο του αερίου μέχρι τον κορεσμό.

Αν αυξηθεί ή μειωθεί η πίεση περιβάλλοντος ο ιστός θα ξαναβρεθεί αντιστοίχως στη φάση φόρτισης - on gassing ή αποβολής - off gassing.

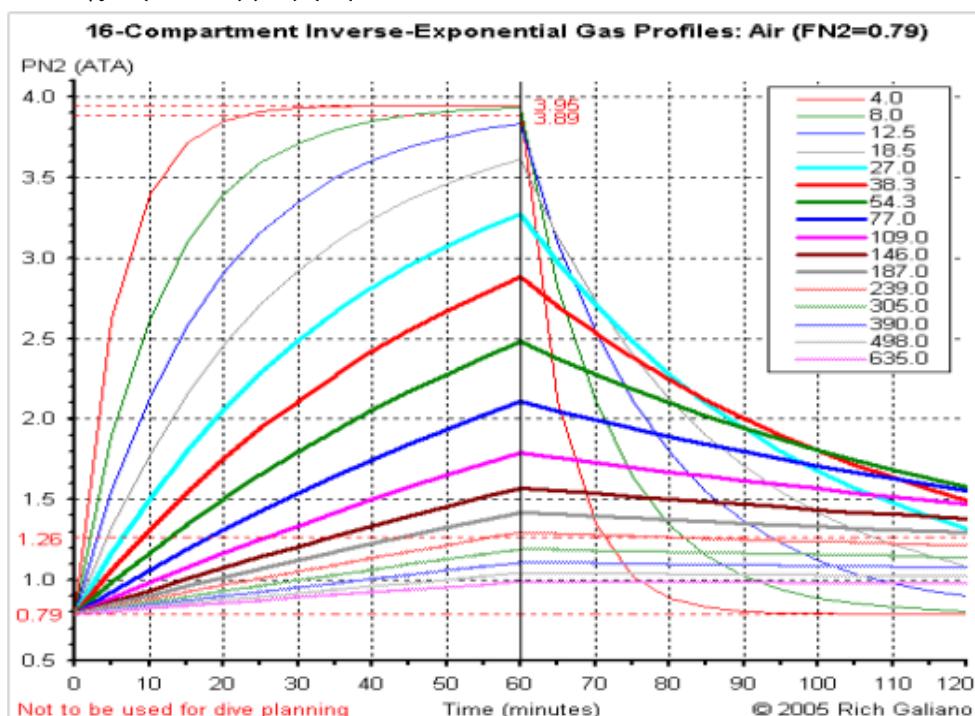
Κάθε ιστός έχει διαφορετικά half times τα οποία ποικίλλουν για τα διάφορα αέρια δεδομένου ότι για κάθε αέριο υπάρχει διαφορετική τιμή διάχυσης.

Για τους ανθρώπινους ιστούς οι χρόνοι ημιζωής του αζώτου ποικίλλουν από μερικά δευτερόλεπτα (αίμα) μέχρι πολλές ώρες.

Πα το ήλιο οι χρόνοι ημιζωής είναι περίπου 2,65 μικρότεροι από το άζωτο δεδομένου ότι το ήλιο έχει μεγαλύτερη τιμή διάχυσης.

Αν η μείωση της πίεσης σε έναν ιστό υπερβεί κάποια ώρια, το αέριο δεν θα μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή διάχυσης, κυκλοφορία αίματος» πνεύμονες με αποτέλεσμα τον σχηματισμό φυσαλίδων. Μέχρι σήμερα πολλά ερωτήματα παραμένουν αναπάντητα για το τι ακριβώς συμβαίνει κατά τη διάρκεια του κορεσμού και της αποσυμπίεσης ενώ αρκετές θεωρίες έχουν βασιστεί σε εμπειρικές προσεγγίσεις.

Ταχύτητα απορρόφησης αζώτου στους 16 υποθετικούς ιστούς.



Τα αδρανή αέρια διαλύονται στους διάφορους ιστούς με διαφορετικές ταχύτητες. Οι ιστοί με μεγάλη αμάτωση (fast tissues) θα εκτεθούν αμέσως στην υψηλή πίεση των αδρανών αερίων, ενώ οι αργοί ιστοί θα περιμένουν να γίνει αυτό μέσω της διάχυσης (diffusion) από τους περιβάλλοντες ιστούς. Παρατηρούμε ότι στους γρήγορους ιστούς η συσσώρευση αδρανών αερίου θα πραγματοποιηθεί πιο γρήγορα (on-gassing) όταν αυξηθεί η μερική πίεση. Οι ίδιοι ιστοί μπορούν να αποβάλουν το αδρανές αέριο πιο γρήγορα από τους αργούς όταν η πίεση ελαττώνεται όπως συμβαίνει κατά τη φάση της ανάδυσης.

Πίνακας τιμών Half times αζώτου και ηλίου για τα 16 υποθετικά διαμερίσματα Buhlmann's ZHL-16A.

Διαμερίσματα ιστών	Half times Αζώτου	Half times Ηλίου
1	4	1.5
2	8	3
3	12.5	4.7
4	18.5	7
5	27	10.2
6	38.3	14.5
7	54.3	20.5
8	77	29.1
9	109	41.1
10	146	55.1
11	187	70.6
12	239	90.2
13	305	115.1
14	390	147.2
15	498	187.9
16	635	239.6

## Κορεσμός - Υπερκορεσμός

Κατά την εισπνοή το αναπνεύσιμο αέριο περιέχει αδρανή αέρια (αέρια τα οποία δεν συμμετέχουν στον μεταβολισμό) όπως άζωτο, ήλιο.

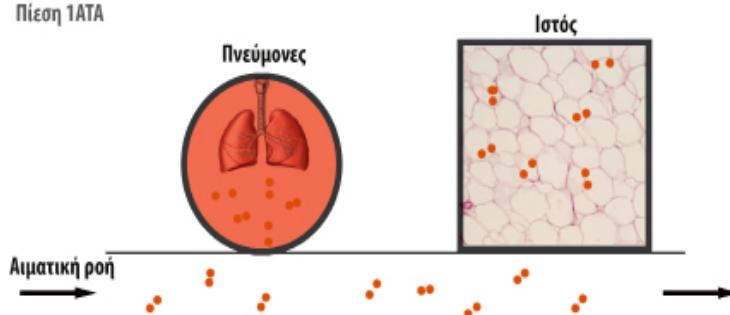
Τα αέρια διαλύονται στο αίμα με συνέπεια την ανταλλαγή αερίων στους πνεύμονες. Το αίμα μεταφέρει το διαλυόμενο αέριο στους ιστούς, οι οποίοι το απορροφούν.

Το αέριο συνεχίζει να διαλύεται στο αίμα και στους ιστούς ώσπου η μερική πίεση του διαλυόμενου αερίου να ισορροπήσει με τη μερική πίεση του αναπνεύσιμου αερίου σε κάθε σημείο του σώματος. Αυτό καλείται κορεσμός. Ο βαθμός κορεσμού διαφέρει στα διάφορα σημεία του σώματος και εξαρτάται από τη σύσταση και την αιμάτωση τους. Οι ιστοί έχουν διαφορετική αιμάτωση άρα και διαφορετικό βαθμό κορεσμού. Το κεντρικό νευρικό σύστημα, η σπονδυλική στήλη, επέρχονται σε κορεσμό πολύ ταχύτερα από ιστούς όπως το δέρμα, τα κόκαλα, λιπώδεις ιστοί οι οποίοι οπανία φθάνουν σε κορεσμό κατά τη διάρκεια των καταδύσεων αναψυχής.

Καθώς αναπνέουμε στην επιφάνεια, στο σώμα μας επέρχεται κορεσμός αζώτου, αφού το 79% του ατμοσφαιρικού αέρα περιέχει άζωτο.

## Σχήμα 2

Πίεση 1ATA



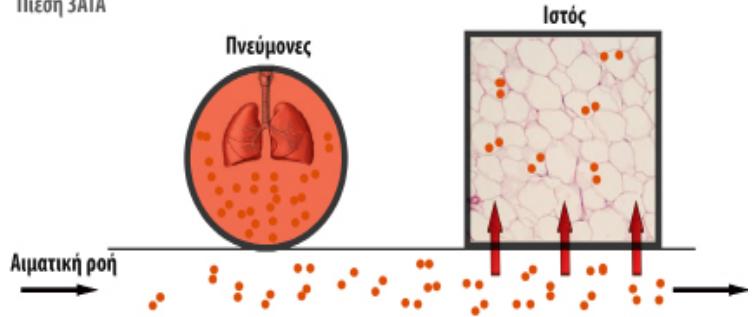
Στην επιφάνεια της θάλασσας η ατμοσφαιρική πίεση είναι 1ATA. Άρα η μερική πίεση του διαλυόμενου αζώτου είναι:

$$1\text{bar} \times 0.79 = 0.79 \text{ bar.}$$

Στη πραγματικότητα είναι λίγο μικρότερη (0.76 bar), αφού το εισπνεόμενο αέριο αραιώνεται λόγω των υδρατμών ( $H_2O$ ).

Στη διάρκεια της κατάδυσης πραγματοποιείται φόρτιση αδρανών αερίων στους ιστούς.

Πίεση 3ATA



Αν καταδυθούμε στα 20 μέτρα αναπνέουμε ατμοσφαιρικό αέρα σε πίεση 3ATA.

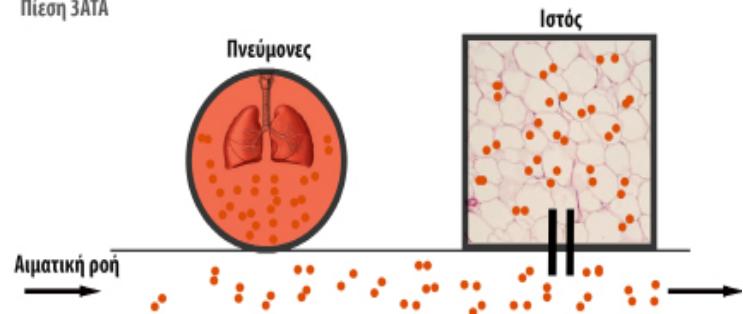
Η μερική πίεση αζώτου στο βάθος αυτό θα είναι:

$$3 \times 0.79 = 2.37\text{bar}$$

Αν παραμείνουμε στο βάθος αυτό για αρκετό χρόνο στο σώμα μας θα υπάρξει κορεσμός αζώτου με μερική πίεση 2.37bar.

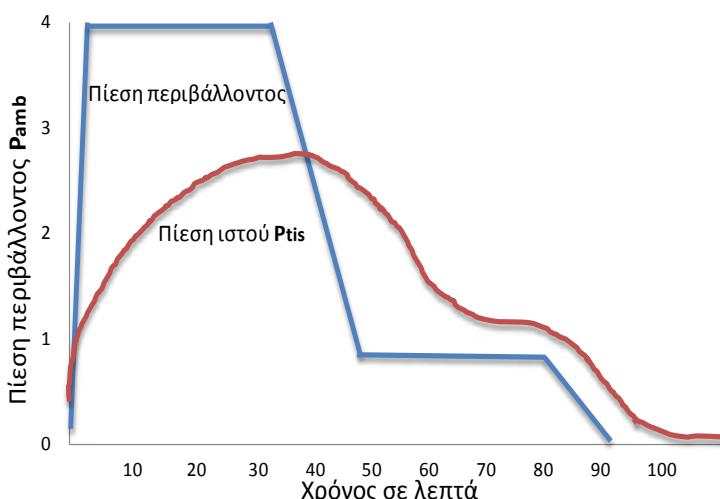
Στους γρήγορους ιστούς θα επέλθει κορεσμός σε 25 λεπτά, ενώ οι αργοί ιστοί χρειάζονται αρκετές ώρες.

Πίεση 3ATA



Αν στη φάση αυτή επιστρέψουμε στην επιφάνεια, όπου η μερική πίεση του αζώτου είναι 0,79, στο σώμα μας θα επέλθει υπερκορεσμός. Το άζωτο που έχει διαλυθεί στους ιστούς και στο αίμα θα επιστρέψει στην ελεύθερη φάση (free phase) προκειμένου να εξισορροπήσει την πίεση.

Το άζωτο στη φάση αυτή θα δημιουργήσει μικρόφυσαλίδες (micro-bubbles) οι οποίες καθώς μεταφέρονται από το αίμα αναπτύσσονται και σχηματίζουν φυσαλίδες. Αυτές μέσω κάποιων διεργασιών ενδέχεται να προκαλέσουν δυσλειτουργία στη ροή του αίματος, στα αιμοφόρα αγγεία και στις αρτηρίες με αποτέλεσμα την εμφάνιση της νόσου (DCS).



Στα γραφήματα παρουσιάζεται η πίεση του ιστού με half times 8min.

Κατάδυση στο βάθος των 30 μέτρων με πίεση περιβάλλοντος  $P_{amb}$  4ATA και χρόνο βυθού 40 λεπτών.

### Deep Stops - Βαθιές στάσεις

Τα deep stops προτάθηκαν από τον Brian Hills και πλέον αποτελεί μια μέθοδος αποδεκτή από όλους τους εκπαιδευτικούς οργανισμούς κατάδυσης.

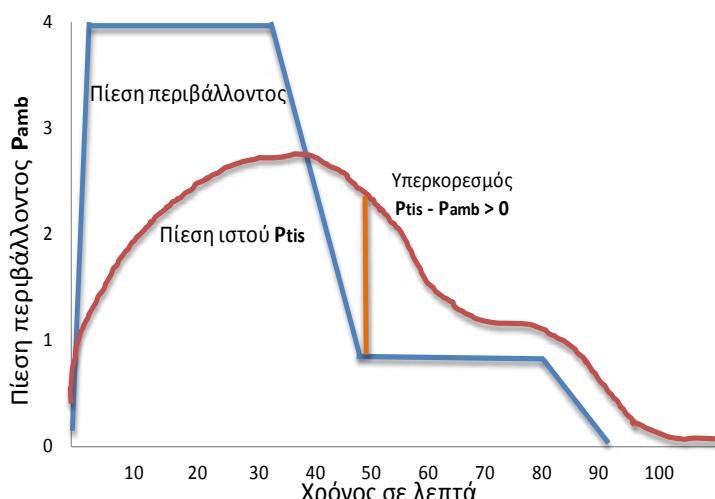
Η DAN προτείνει τις βαθιές στάσεις σαν “προσθήκη” στις καθιερωμένες στάσεις ασφαλείας σαν βελτίωση της ποιότητας αποσυμπίεσης, την αύξηση της ασφάλειας και του συντηρητισμού.

Τα deep stops στο γενικό προφίλ κατάδυσης προσθέτουν στάσεις βαθύτερα ώστε να μειώσουν τον υπερκορεσμό. Το βάθος της 1ης στάσης να καθορίζεται από το μέγιστο βάθος της κατάδυσης, επιτρέποντας έτσι στα διαμερίσματα των ιστών με μικρούς χρόνους ημιζωής να αρχίζουν νωρίτερα (βαθύτερα) την αποβολή των αδρανών αερίων.

Η πρώτη στάση αναγράφεται στο λογισμικό κατάδυσης Deco planner σαν *Max Stop Depth*.

*To Max Stop Depth αφορά το βάθος στο οποίο το πρώτο διαμέρισμα ιστών αρχίζει να αποφορτίζεται.*

Επιπλέον, οι βαθιές στάσεις θα δώσουν χρόνο στο αίμα να μεταφέρει τις φυσαλίδες στους πνεύμονες. Η χρονική διάρκεια των βαθιών στάσεων και ο ρυθμός ανάδυσης εξαρτούνται από τον χρόνο βυθού, το βάθος κατάδυσης καθώς από τα μίγματα κατάδυσης και αποσυμπίεσης.



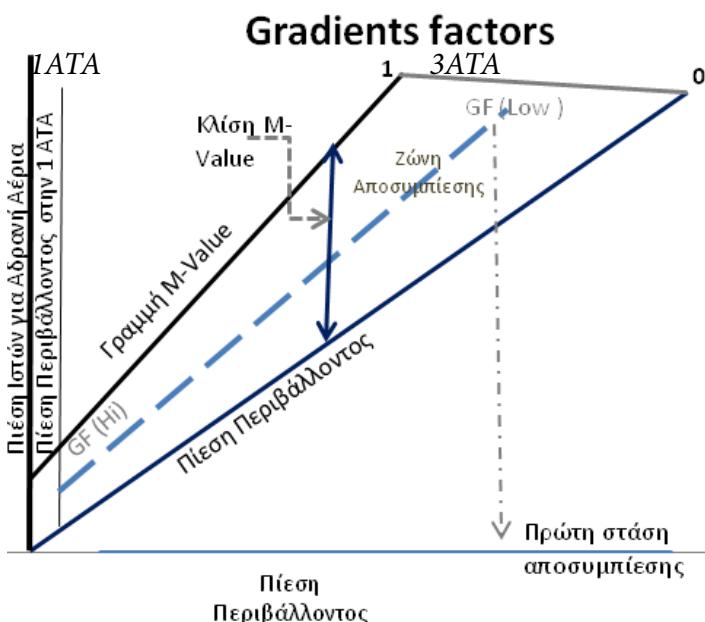
Πραγματοποιώντας γρήγορη ανάδυση η πίεση του ιστού θα είναι μεγαλύτερη από την πίεση περιβάλλοντος. Υπερκορεσμός είναι η κατάσταση στην οποία η πίεση του ιστού μείων την πίεση περιβάλλοντος θα είναι μεγαλύτερη από το μηδέν.

$$P_{tis} - P_{amb} > 0$$

Ο ιστός δεν έχει τον χρόνο να εξισορροπήσει την απότομη μεταβολή της πίεσης με συνέπεια να επέλθει υπερκορεσμός.

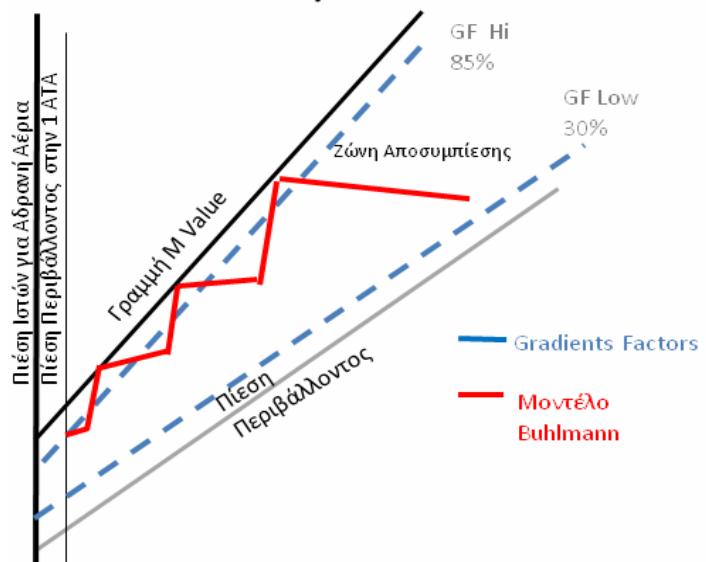
## Gradient factors

Tα Gradient factors βασίζονται στο μοντέλο A.Buhlmann. Τροποποιώντας το αρχικό μοντέλο εισάγουν στάσεις κατά τη διάρκεια της ανάδυσης αποσκοπώντας την διαχείριση των φυσαλίδων. Τα Gradient factors αντιπροσωπεύουν ποσοστιαία την ζώνη αποσυμπίεσης και το πόσο κοντά θα επιτρέψουμε στους ιστούς να φτάσουν την μέγιστη τιμή ανοχής (M-Values).



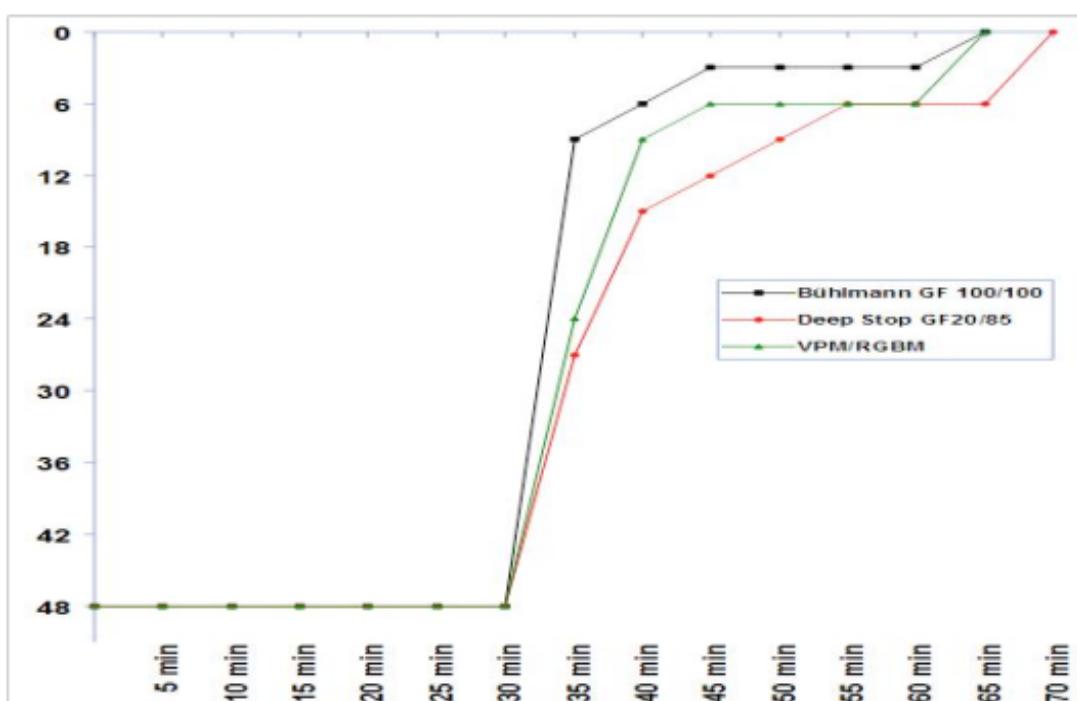
Tα Gradient factors οριοθετούν την ζώνη αποσυμπίεσης η οποία βρίσκεται μεταξύ 0 και 1. Τροποποίησαν την αρχική εξίσωση των M-Value ώστε να προστεθούν πιο συντηρητικά όρια.

**GF 30 / 85**



To GF Low καθορίζει το βάθος της πρώτης στάσης αποσυμπίεσης για να πραγματοποιηθεί το πρώτο Deep stop.

To GF Hi καθορίζει την διάρκεια της τελευταίας στάσης πριν την ανάδυση στην επιφάνεια.



## Εγγενής υποκορεσμός - Inherent Unsaturation

Στην καταδυτική βιβλιογραφία ο εγγενής υποκορεσμός αναφέρεται συχνά σαν "παράθυρο οξυγόνου". Υπάρχουν διάφορες αναφορές και εκδοχές σχετικές με το "παράθυρο οξυγόνου". Μια από τις εκδοχές αυτές (#1) βασίζεται στη διαφορά που προκύπτει από το άθροισμα των μερικών πιέσεων στους ιστούς και της πίεσης περιβάλλοντος.

*Η διαφορά που προκύπτει από το άθροισμα των μερικών πιέσεων στους ιστούς όταν αυτό είναι μικρότερο από την πίεση περιβάλλοντος καλείται "παράθυρο οξυγόνου".*

Μια άλλη εκδοχή αναφέρεται στις διαφορές πιέσεων αρτηριακού και φλεβικού αίματος.

*Όταν το οξυγόνο που απομακρύνεται από την αρτηριακή κυκλοφορία δεν αντικαθίσταται πλήρως με διοξείδιο του άνθρακα στη φλεβική κυκλοφορία, τότε θεωρούμε το παράθυρο οξυγόνου «ανοικτό».*

Ο μεταβολισμός του οξυγόνου έχει σαν συνέπεια την διαφοροποίηση των πιέσεων μεταξύ αρτηριακής και φλεβικής.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας που εισπνέουμε στη 1atm αναμιγνύεται με υδρατμούς.

Στις κυψελίδες καταναλώνεται οξυγόνο, άρα μειώνεται η μερική πίεση του οξυγόνου και αυξάνεται η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα. Καθώς η αναπνευστική οδός μένει ανοιχτή η ολική πίεση παραμένει στα 760mmHg. Εντός των τριχοειδών αγγείων του πνεύμονα υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στο αίμα και τον κυψελιδικό αέρα. Παρόλα αυτά, μια μικρή ποσότητα μη οξυγονωμένου αίματος από τη φλεβική κυκλοφορία αναμιγνύεται με οξυγονωμένο αίμα με αποτέλεσμα η μερική πίεση του οξυγόνου στο αρτηριακό αίμα να είναι μικρότερη από την μερική πίεση οξυγόνου στον κυψελιδικό αέρα.

Η μερική πίεση του οξυγόνου μέσα στις κυψελίδες ελαττώνεται ακόμα περισσότερο καθώς το οξυγόνο απορροφάται από το αίμα ενώ προστίθεται διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από το αίμα.

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το τελικό προϊόν των μεταβολικών οξειδωτικών αντιδράσεων. Έτσι, καθώς το αίμα περνά μέσα από τα τριχοειδή αγγεία μεταβολίζει το οξυγόνο και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα.

Η αύξηση της μερικής πίεσης του διοξειδίου είναι μικρότερη από τη μείωση της μερικής πίεσης του οξυγόνου.

Γνωρίζουμε από το νόμο του Henry ότι τα αέρια με υψηλή διαλυτότητα δημιουργούν χαμηλότερη μερική πίεση αν όγκος τους απορροφηθεί από ένα υγρό. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι συγκριτικά με το οξυγόνο 20 φορές πιο διαλυτό στο αίμα. Για τον λόγο αυτό η μερική πίεση του οξυγόνου μειώνεται κατά 54mmHg ενώ η μερική πίεση του διοξειδίου αυξάνεται μόλις κατά 6mmHg.

## Αρτηριακό αίμα



N<sub>2</sub> 573mmHg

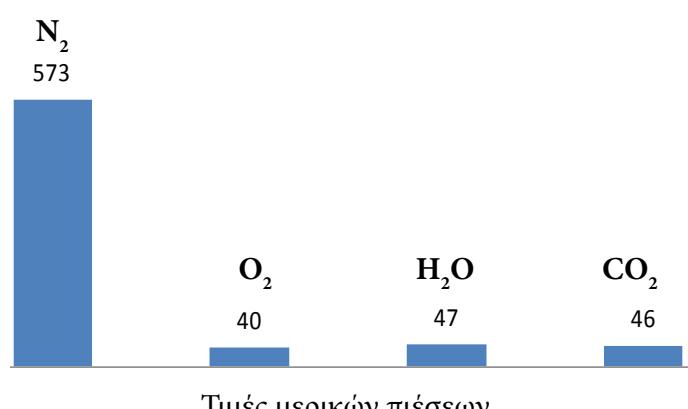
O<sub>2</sub> 90mmHg

H<sub>2</sub>O 47mmHg

CO<sub>2</sub> 40mmHg

Σύνολο 750mmHg

## Φλεβικό αίμα



N<sub>2</sub> 573mmHg

O<sub>2</sub> 40mmHg

H<sub>2</sub>O 47mmHg

CO<sub>2</sub> 46mmHg

Σύνολο 706mmHg

**Το αρτηριακό αίμα είναι κορεσμένο όχι όμως και το φλεβικό αίμα.**

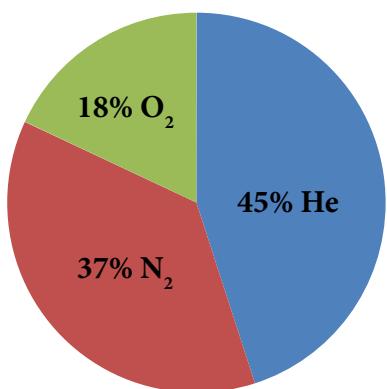
Η ολική πίεση των αερίων στο φλεβικό αίμα είναι μικρότερη από την πίεση του περιβάλλοντος και συνεπώς το φλεβικό αίμα είναι ακόρεστο. Η πίεση του περιβάλλοντος μεταδίδεται στη φυσαλίδα μέσω των μαλακών ιστών. Έτσι η φυσαλίδα τείνει να διαλυθεί εντός του ακόρεστου φλεβικού αίματος. Το παράθυρο οξυγόνου επιταχύνεται με τη χρήση οξυγόνου. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται ταχύτερη αποβολή αδρανών αερίων από τους ιστούς και ταυτόχρονα ελάττωση αδρανών αερίων στο φλεβικό αίμα.

### #1

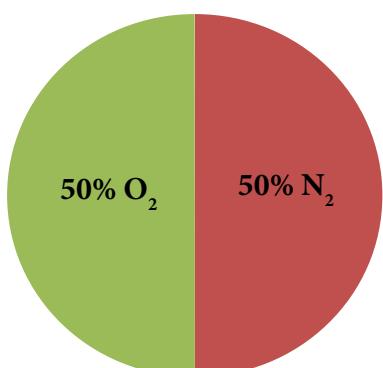
Η δεύτερη εκδοχή σχετικά με το παράθυρο οξυγόνου αναφέρεται στην κλίση των αδρανών αερίων. Με την αλλαγή σε μίγμα αποσυμπίεσης μειώνουμε το ποσοστό αδρανών αερίων. Συνέπεια της αλλαγής είναι η αύξηση της κλίσης των αδρανών αερίων. Η διαφορά της κλίσης αυτής είναι το παράθυρο οξυγόνου.

Σε μίγμα TRIMIX 18/45 το ποσοστό των αδρανών αερίων είναι:

$$45\% \text{ He} + 37\% \text{ N}_2 = 82\%$$



Μετά την αλλαγή σε μίγμα αποσυμπίεσης EAN50 το ποσοστό των αδρανών αερίων στο αναπνεύσιμο μίγμα θα είναι 50% N<sub>2</sub>.



Το παράθυρο οξυγόνου και ο βαθμός των ενδεχόμενων ευεργετικών αποτελεσμάτων της αποσυμπίεσης για τον δύτη συναρτάται μόνο με τη μερική πίεση του οξυγόνου. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε τα ίδια πλεονεκτήματα όσον αφορά το παράθυρο οξυγόνου είτε χρησιμοποιούμε EAN50 στα 21 μέτρα είτε 100% O<sub>2</sub> στα 6 μέτρα. Και στις δύο περιπτώσεις η μερική πίεση του οξυγόνου είναι 1.6bar.

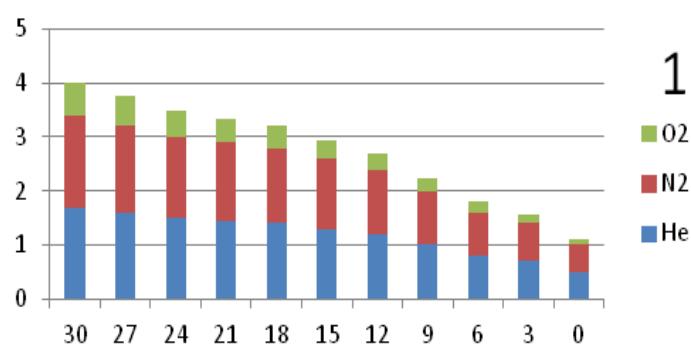
Το παράθυρο οξυγόνου έχει διαφορετικούς ορισμούς και διαφορετικές εκδοχές.

- Μειώνει τη μερική πίεση μεταξύ αρτηριακής και φλεβικής κυκλοφορίας. Άρα, μειώνει τον αριθμό των φυσαλίδων.
- Μειώνει την πίεση των αναπνεύσιμων αδρανών αερίων. Μεγαλύτερη κλίση αδρανών αερίων ισοδυναμεί με ταχύτερη αποφόρτιση των ιστών.

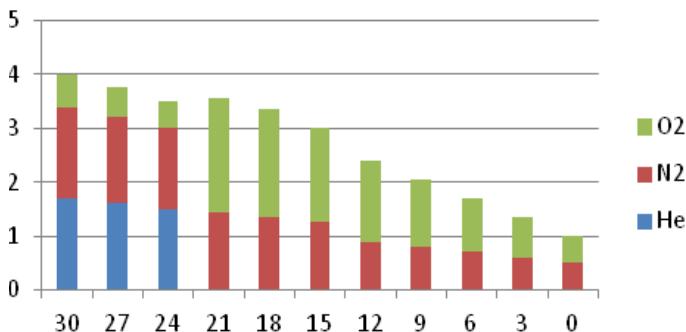
Ο απώτερος σκοπός είναι η επίτευξη της αποσυμπίεσης αυξάνοντας τον ρυθμό αποβολής αδρανών αερίων από τις φυσαλίδες του σώματος.

Η αυξημένη μερική πίεση οξυγόνου δημιουργεί σημαντικά προβλήματα. Εκτός από την τοξικότητα του κεντρικού νευρικού συστήματος, προκαλεί αγγειοσυστολή με ενδεχόμενο τον περιορισμό της μεταφόρας αίματος. Συνεκδοχικά, θα προκύψει ανεπαρκής αιμάτωση των ιστών. Η αυξημένη μερική πίεση οξυγόνου μπορεί επίσης να μειώσει την ικανότητα ανταλλαγής αερίων στους πνεύμονες και τη διαδικασία της αποβολής τους.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η αποφόρτιση ιστού στη φάση της αποσυμπίεσης χωρίς τη χρήση EAN50. Η αποσυμπίεση πραγματοποιείται με μίγμα βυθού TRIMIX το οποίο περιέχει δύο αδρανή αέρια, ήλιο και άζωτο.



Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η αποφόρτιση ιστού στη φάση της αποσυμπίεσης με τη χρήση αναπνεύσιμου μίγματος EAN50.



Παρατηρούμε την αύξηση της μερικής πίεσης οξυγόνου στα 21 μέτρα και ταυτόχρονα τη μείωση του ηλίου.

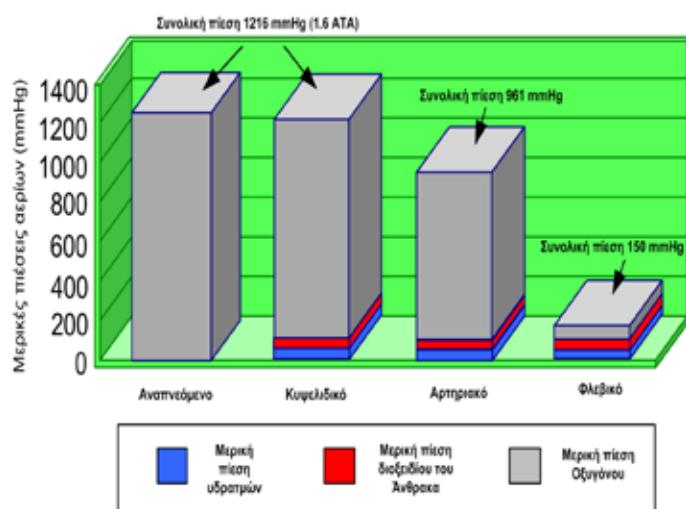
### Η επίδραση του υπερβαρικού περιβάλλοντος στο παράθυρο Οξυγόνου.

Από το άρθρο του Βασίλη Μαύρου O2 windows

Η αναπνοή Οξυγόνου στα 6 μέτρα (1.6 ATA=1216 mmHg), όπως και στην περίπτωση αναπνοής στην 1 ATA θα εξεταστεί με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλα αδρανή αέρια μέσα στον οργανισμό.

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3, υπάρχει μία σταδιακή πτώση του συνόλου των μερικών πίεσεων από τις κυψελίδες έως το φλεβικό αίμα.

### Αναπνέοντας Οξυγόνο στην 1.6 ATA

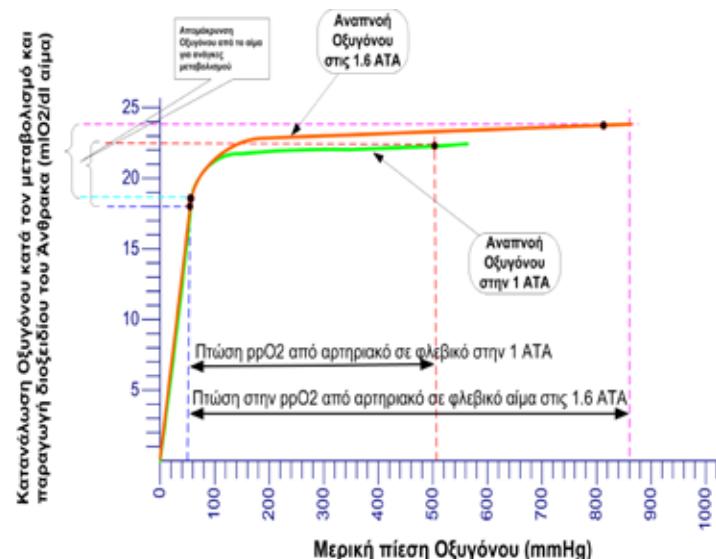


Διάγραμμα 3

Στο διάγραμμα 4 φαίνεται η σχέση μεταξύ παραγόμενου διοξειδίου του Άνθρακα και της πτώσης των μερικών πιέσεων του Οξυγόνου, για τις περιπτώσεις αναπνοής Οξυγόνου στην 1 ATA και στις 1.6 ATA. Η γενική παρατήρηση είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις η διαφορά του παραγόμενου διοξειδίου του Άνθρακα μεταξύ του αρτηριακού και του φλεβικού αίματος παραμένει σταθερή στα 4.5 ml O<sub>2</sub>/dl αίματος.

Οι μερικές πιέσεις του Οξυγόνου τώρα πια έχουν αυξηθεί πάρα πολύ. Όπως και στην περίπτωση αναπνοής Οξυγόνου στην 1 ATA, έτσι και στην περίπτωση των 1.6 ATA, η αιμοσφαιρίνη δεν μπορεί πλέον να απορροφήσει όλο το διαθέσιμο Οξυγόνο. Αυτό λοιπόν θα πρέπει να βρει κάποιους άλλους τρόπους να μεταφερθεί μέσα στο αίμα. Πέρα λοιπόν από το όριο κορεσμού της αιμοσφαιρίνης, το Οξυγόνο μεταφέρεται όπως και τα αδρανή αέρια υπό μορφή διαλυμένου στο αίμα αερίου και όχι πλέον δεσμευμένου από την αιμοσφαιρίνη. Σε αυτή την κατάσταση θα λειτουργήσει ο Νόμος του Henry και οι μερικές πιέσεις του αερίου θα αυξηθούν ανάλογα με την μερική του πίεση στο αναπνεύσιμο μίγμα και την διαλυτότητά του στο αίμα. Τώρα πια λοιπόν, οι μερικές πιέσεις αυτού μπορούν να αυξηθούν δραστικά και να φτάσουν ακόμα και τα 960 mmHg στο αρτηριακό αίμα.

Οι ιστοί προτιμούν πολύ περισσότερο να δεσμεύσουν το διαλυμένο στο αίμα Οξυγόνο, παρά να μπουν στην διαδικασία των χημικών μηχανισμών της αιμοσφαιρίνης.



Διάγραμμα 4

Μία προσεκτική παρατήρηση της καμπύλης του διαγράμματος 4 θα δείξει ότι για την δέσμευση της ίδιας ποσότητας Οξυγόνου από τον οργανισμό, η πτώση της μερικής πίεσης του Οξυγόνου από τη αρτηριακή στην φλεβική κυκλοφορία είναι πιο μεγάλη στην περίπτωση του Οξυγόνου στις 1.6 ATA, από ότι στην 1 ATA. Η μεγάλη πτώση της μερικής πίεσης του Οξυγόνου οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις περιπτώσεις οι ιστοί μας δεσμεύουν το διαλυμένο Οξυγόνο που έχει την δυνατότητα να συνεισφέρει στην μερική πίεση. Η αιμοσφαιρινή παραμένει κορεσμένη.

Οι μεγάλη πτώση της μερικής πίεσης του Οξυγόνου στις παραπάνω περιπτώσεις θα δημιουργήσει και μεγάλα παράθυρα Οξυγόνου. Ενώ λοιπόν στην περίπτωση της αναπνοής Οξυγόνου στην 1 ATA έχουμε ένα παράθυρο Οξυγόνου της τάξεως των 618 mmHg, ενώ στην περίπτωση αναπνοής Οξυγόνου στις 1.6 ATA το παράθυρο Οξυγόνου μπορεί να φτάσει και τα 1066 mmHg.

Θα ήταν χρήσιμο να δούμε τι συμβαίνει στο παράθυρο Οξυγόνου όταν το αναπνέουμε στα 3 μέτρα και στα 6 μέτρα.

Η αύξηση του παράθυρου Οξυγόνου από τα 3 μέτρα στα 6 μέτρα σημαίνει ότι αναπνέοντας Οξυγόνο στα 6 μέτρα υπάρχει μεγαλύτερο κενό μερικής πίεσης που μπορεί να “γεμίσει” με κάποιο αδρανές αέριο που θα χρειαστεί να αποβάλουν οι ιστοί.

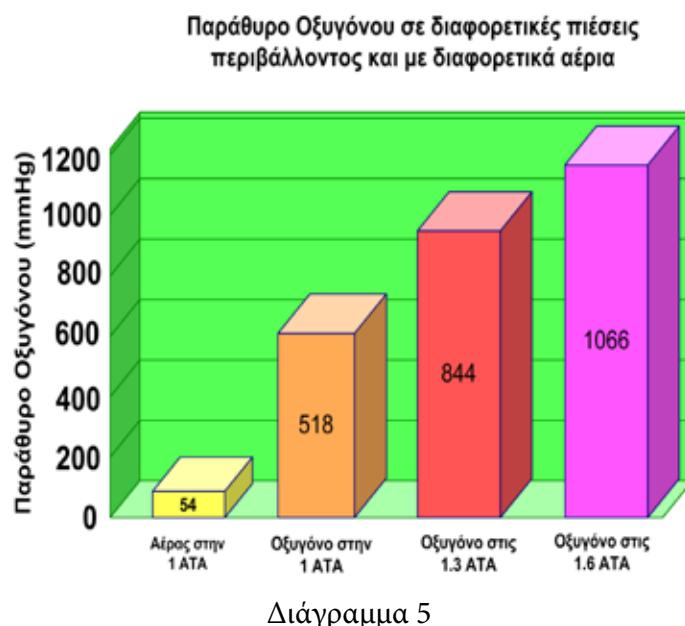
Επιπλέον θα πρέπει να κατανοήσουμε ότι στην περίπτωση που αναπνέουμε καθαρό Οξυγόνο, η αποβολή των αδρανών αερίων από τους ιστούς είναι ανεξάρτητη του βάθους.

Την τάση για κίνηση των αδρανών αερίων από τους ιστούς στο φλεβικό αίμα δεν καθορίζεται από την πίεση του περιβάλλοντος (βάθος), αλλά από την διαφορά των μερικών πιέσεων του αερίου στον ιστό και στο αρτηριακό αίμα. Στην περίπτωση αναπνοής Οξυγόνου η μερική πίεση των αδρανών αερίων στην αρτηριακή κυκλοφορία είναι μηδέν και συνεπώς η τάση για αποβολή των αδρανών από τους ιστούς έχει την μέγιστη τιμή της.

Για παράδειγμα εάν ένας ιστός κατά την αποσυμπίεση έχει μερική πίεση Αζώτου  $\text{ppN}_2 = 2$  ATA και επιθυμούμε να αναπνεύσουμε Οξυγόνο για την αποβολή του αδρανούς αερίου, δεν θα έχει διαφορά εάν μείνουμε στα 9 μέτρα, στα 6 μέτρα ή στα 3 μέτρα. Η τάση για αποβολή του αδρανούς αερίου θα είναι ίδια σε όλα αυτά τα βάθη.

Η αναπνοή του Οξυγόνου όμως σε μεγαλύτερο βάθος έχει το πλεονέκτημα ότι η υψηλότερη υδροστατική πίεση θα διατηρήσει το αποβαλλόμενο αδρανές αέριο σε διαλυμένη κατάσταση μέσα στο αίμα και θα περιορίσει την τάση του να δημιουργήσει φυσαλίδες.

Εάν ένα αναπνεύσιμο μίγμα είναι λιγότερο από 100% καθαρό Οξυγόνο, τότε κάποιο μέρος από το παράθυρο Οξυγόνου θα το καταλάβει το αδρανές αέριο που αυτό θα περιέχει. Εάν για παράδειγμα, αναπνεύσουμε ένα Nitrox 50 ή ένα Nitrox 80 στα 6 μέτρα, τότε το Άζωτο θα καταλάβει κάποια από την μερική πίεση του διαθέσιμου παράθυρου Οξυγόνου, ώστε αυτή δεν θα είναι πλέον διαθέσιμη για να καταληφθεί από τα αποβαλλόμενα από τους ιστούς αδρανή αέρια.



Το διάγραμμα 5 δείχνει το παράθυρο Οξυγόνου σε διαφορετικές περιπτώσεις. Αυτό που φαίνεται καθαρά είναι ότι όσο πιο βαθιά αναπνέουμε το Οξυγόνο, (μέσα στα όρια της τοξικότητας), τόσο περισσότερο μεγαλώνει το παράθυρο Οξυγόνου.

Πόσο σημαντικό είναι το παράθυρο Οξυγόνου?

Είναι προφανές ότι η απομάκρυνση ενός αδρανούς αερίου από τους ιστούς μπορεί να επιταχυνθεί ελαττώντας απλά το περιεχόμενο των αδρανών αερίων από το αναπνεύσιμο μίγμα.

Εάν η αρτηριακή μερική πίεση ενός αερίου είναι μηδέν, τότε το αδρανές δεν θα διαχυθεί μέσα στον ιστό, ενόσω τα αδρανή αέρια αποβάλλονται μέσα από αυτόν. Όταν τα αέρια βρίσκονται διαλυμένα μέσα σε ένα υγρό, η διάχυση του ενός αερίου δεν επηρεάζεται από την παρουσία κάποιου άλλου αδρανούς αερίου.

Στα εμπορικά προγράμματα που διαχειρίζονται σχεδιασμό αποσυμπίεσης και που χρησιμοποιούν το μοντέλο του Bulthmann παρατηρούμε ότι οι ήμιζωές του Ήλιου και του Αζώτου δίδονται ανεξάρτητα του ενός από το άλλο. Έτσι λοιπόν, η παρουσία ή απουσία του Αζώτου δεν θα επηρεάσει την ταχύτητα αποβολής του Ήλιου ή αντίστροφα.

Θεωρητικά η αποβολή του Ήλιου από τους ιστούς, έπειτα από μία κατάδυση με Ήλιο δεν θα μεταβληθεί εάν αναπνεύσουμε αέρα, Nitrox 50, ή καθαρό Οξυγόνο σαν μίγματα αποσυμπίεσης.

Μετρήσεις που έγιναν για την αποβολή του Ήλιου μετά από κατάδυση και αποσυμπίεση με αέρα και καθαρό Οξυγόνο έδειξαν ότι το αέριο αποσυμπίεσης δεν επηρέασε την ταχύτητα και τον όγκο αποβολής του αδρανούς αερίου. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής συμφωνούν με την φυσική της διάχυσης των αερίων που είναι διαλυμένα μέσα σε υγρά, κατά την οποία η παρουσία ενός δεύτερου μη μεταβολικού αερίου δεν ελαττώνει την ταχύτητα διάχυσης του πρώτου αδρανούς αερίου.

Η αποσυμπίεση από μία κατάδυση στην οποία χρησιμοποιείται το Αζώτο σαν αδρανές αέριο, θα είναι μεγαλύτερη, εάν χρησιμοποιηθούν αέρια αποσυμπίεσης που περιέχουν και αυτά Αζώτο, διότι κάποια ποσότητα Αζώτου θα διαχέεται συνέχεια μέσα στους ιστούς κατά την διάρκεια της αποσυμπίεσης.

Η αποσυμπίεση από μία κατάδυση με Trimix, όπου χρησιμοποιούνται αέρια αποσυμπίεσης που περιέχουν Άζωτο μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε χρόνο διότι κατά την διάρκεια της αποβολής του Ήλιου κάποια ποσότητα Αζώτου θα διαχέεται μέσα στους ιστούς.

Η υποχρέωση ενός ιστού για αποσυμπίεση εξαρτάται από το άθροισμα των μερικών πιέσεων των αδρανών αερίων μέσα στον ιστό. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένας ιστός επιφορτίζεται με Άζωτο κατά την διάρκεια αποβολής του Ήλιου, ο ιστός αυτός θα αποκτήσει μεγαλύτερη υποχρέωση για αποσυμπίεση από ότι στην περίπτωση που δεν θα επιφορτίζόταν με Άζωτο κατά την αποβολή του Ήλιου.

Αν και η διαπλάτυνση του παράθυρου Οξυγόνου δεν θα επηρεάσει άμεσα την αποβολή των αδρανών αερίων από τους ιστούς, θα επηρεάσει ούμως άμεσα την επιφόρτιση των ιστών κατά την αποσυμπίεση και κατά συνέπεια θα επηρεάσει τον χρόνο που θα χρειαστεί ο ιστός να αποσυμπιεσεί.

Θα μπορούσε κάποιος με απλό τρόπο να καταλάβει την χρησιμότητα του παράθυρου Οξυγόνου θεωρώντας την έννοια του Ισοδύναμου βάθους αέρα (Equivalent Air Depth, EAD).

Θα θυμηθούμε και πάλι ότι για να χρησιμοποιήσουμε μίγματα Nitrox με την χρήση πινάκων αέρα θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την έννοια του Ισοδύναμου Βάθους Αέρα. Αυτό είναι απλά ένα προσαρμοσμένο βάθος στο οποίο η μερική πίεση του Αζώτου στο μίγμα Nitrox θα είναι ίση με την μερική πίεση του Αζώτου που θα έχει ο αέρας σε κάποιο ρηχότερο βάθος. Για παράδειγμα η χρήση Nitrox 50 στα 21 μέτρα θα έχει την ίδια μερική πίεση Αζώτου με την χρήση αέρα στα 9 μέτρα. Αυτό σημαίνει με απλά λόγια ότι το σώμα του αυτοδύτη θα αποβάλει Άζωτο σαν να ήταν στα 9 μέτρα αλλά τώρα δεν χρειάζεται να πάει τόσο ρηχά και να διακινδυνεύσει την δημιουργία φυσαλίδων αλλά μπορεί να μείνει περίπου 12 μέτρα βαθύτερα με πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Το μεγαλύτερο παράθυρο Οξυγόνου προέρχεται από την χρήση καθαρού Οξυγόνου. Το μεγαλύτερο βάθος που αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίχως να διατρέχουμε κίνδυνο τοξικότητας του κεντρικού νευρικού συστήματος είναι τα 6 μέτρα.

Εάν υπολογίσουμε ούμως το Ισοδύναμο Βάθος Αέρα (EAD), του Οξυγόνου, θα δούμε ότι σε οποιοδήποτε βάθος αυτό θα είναι -10 μέτρα. Αυτό είναι ένα βάθος αδύνατον να επιτευχθεί με αέρα εκτός και εάν πετάξουμε πολύ ψηλά σχεδόν έξω από την ατμόσφαιρα σε τέτοιο ύψος όπου η πίεση να είναι αντίστοιχη των -10 μέτρων.

$$\text{EAD} = [(FN \div 0.79) \times (\beta\text{άθος} + 10)] - 10$$

$$\text{EAD} = [(0.0 \div 0.79) \times (5+10)] - 10 = -10 \text{ m}$$

$$\text{EAD} = [(0.0 \div 0.79) \times (6+10)] - 10 = -10 \text{ m}$$

$$\text{EAD} = [(0.0 \div 0.79) \times (3+10)] - 10 = -10 \text{ m}$$

$$\text{EAD} = [(0.0 \div 0.79) \times (12+10)] - 10 = -10 \text{ m}$$

Αυτό σημαίνει ότι αναπνέοντας Οξυγόνο στα 6 μέτρα, η αποβολή του Αζώτου θα γίνει γρηγορότερα από ότι εάν είμαστε στην επιφάνεια.  
Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε όλα τα παραπάνω ως εξής:

Το άθροισμα των μερικών πιέσεων όλων των αερίων στο φλεβικό αίμα είναι λιγότερο από την πίεση του περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι το φλεβικό αίμα έχει κάποιο “κενό”, ή κάποια “έλλειψη” στην συνολική πίεση των αερίων σε σχέση με την πίεση περιβάλλοντος. Το “κενό” αυτό ονομάζεται “Παράθυρο Οξυγόνου”.

Όταν το φλεβικό αίμα με “ανοικτό” παράθυρο Οξυγόνου περάσει από τους ιστούς για να παραλάβει τα αδρανή τους αέρια και να τα επιστρέψει στους πνεύμονες, οι ιστοί θα “δουν” το φλεβικό αίμα με ελαττωμένα αδρανή αέρια, μία συνθήκη ικανή να ενεργοποιήσει την αποβολή των αερίων από αυτούς. (Τα αέρια οδηγούνται από περιοχές υψηλής μερικής πίεσης σε περιοχές χαμηλής μερικής πίεσης).

Το παράθυρο Οξυγόνου αναφέρεται σε μία μέθοδο αποσυμπίεσης των ιστών δίχως να έχουν δημιουργηθεί συνθήκες υπερκορεσμού (η αποβολή των αδρανών αερίων μπορεί να επιτευχθεί δίχως την ελάττωση βάθους που είναι αναγκαία για την δημιουργία υπερκορεσμού). Έτσι ο αυτοδύτης μπορεί να παραμείνει βαθύτερα για να αποσυμπίεσει δίχως να χρειαστεί να αναδυθεί πολύ για να δημιουργήσει συνθήκες υπερκορεσμού. Η βαθύτερη παραμονή του αυτοδύτη είναι ευεργετική για την καταστολή των φυσαλίδων και την αποβολή των αδρανών αερίων σε μορφή διάλυσης.

Το μεγαλύτερο παράθυρο Οξυγόνου επιτυγχάνεται με την χρήση καθαρού Οξυγόνου. Η προσθήκη ενός μη μεταβολικού αερίου σε αυτό θα είχε αρνητικά αποτελέσματα στην αποτελεσματικότητά του.

Η αύξηση του παράθυρου Οξυγόνου κατά την αποσυμπίεση θα έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίσει τον υπερκορεσμό του φλεβικού αίματος ελαττώντας τα αδρανή αέρια μέσα σε αυτό. Τα ελαττωμένα αδρανή στο φλεβικό αίμα θα βοηθήσουν στην μείωση της δημιουργίας φυσαλίδων σε αυτό μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης συμπτωμάτων νόσου.



Η φυσιολογία του ανθρώπινου οργανισμού κατά την αποσυμπίεση δεν είναι πλήρως κατανοητή και τα διάφορα μοντέλα αποσυμπίεσης στην καλύτερη περίπτωση είναι απλά μία προσέγγιση της πραγματικότητας. Σίγουρα, όλες οι περιπτώσεις νόσου δεν μπορούν να προβλεφθούν ούτε και να προληφθούν. Παρόλα αυτά, η σοφή χρήση των μοντέλων αποσυμπίεσης σε συνδυασμό με μία προσεκτική καταδυτική τεχνική θα μπορούσαν ίσως να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο της νόσου.

Ελαττώνοντας τα αδρανή αέρια στο αναπνεύσιμο μίγμα και ταυτόχρονα ελαττώνοντας την επιφόρτιση των ιστών, θα μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε το παράθυρο Οξυγόνου με σκοπό την αύξηση της αποβολής των αδρανών αερίων κατά την αποσυμπίεση.

Η πρακτική εμπειρία έχει δείξει ότι η χρήση υπεροξυγονωμένων μιγμάτων ή καθαρού Οξυγόνου κατά την αποσυμπίεση μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά για την μείωση του χρόνου αποσυμπίεσης και πιθανότατα την αποφυγή εμφάνισης συμπτωμάτων νόσου.

Η χρήση όμως αναπνεύσιμων μιγμάτων πλούσιων σε Οξυγόνο χρειάζεται προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση καθώς επίσης και ιδιαίτερη προσοχή. Ο αυτοδύτης θα πρέπει να λάβει μεταξύ άλλων υπόψη του, όχι μόνο τον κίνδυνο της τοξικότητας του κεντρικού νευρικού συστήματος αλλά και την αντιστάθμιση της ευεργετικής εφαρμογής του Οξυγόνου με τις αρνητικές επιδράσεις που έχει η συστολή των αγγείων που προκαλείται από την παρατεταμένη χρήση αυτού.

## Μηχανική φυσαλίδας

### Επιφανειακή Τάση - Surface Tension

Με τον όρο επιφανειακή τάση χαρακτηρίζεται η δύναμη που παρατηρείται ως φυσικό φαινόμενο στην επιφάνεια των υγρών.

Στη διεπιφάνεια ανάμεσα σε δύο μη-αναμίξιμα ρευστά δημιουργείται πάντα μια μεμβράνη (Film) οφειλόμενη στις ελκτικές δυνάμεις συνοχής και συνάφειας ανάμεσα στα μόρια των ρευστών εκατέρωθεν της διεπιφάνειας.

Τα μόρια του ρευστού στη διεπιφάνεια βρίσκονται υπό τάση που τείνει να τα απομακρύνει προς το εσωτερικό του ρευστού.

Συνεπώς, ως επιφανειακή τάση ορίζεται η δύναμη που απαιτείται για τη μεταφορά των μορίων στην επιφάνεια ώστε να σχηματιστεί η μεμβράνη.

### Διευκρίνηση

Όπως διαπιστώνουμε η σχέση της επιφανειακής τάσης ( $\gamma$ ) σε συνάρτηση με την ακτίνα μιας φυσαλίδας ( $R$ ) υπακούει στη σχέση:

$$\gamma = \Delta P / 4 * R$$

όπου  $\Delta P$  είναι η μεταβολή της πίεσης.

Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι η επιφανειακή τάση είναι ανάλογη της ακτίνας.

Η επιφανειακή τάση είναι δύναμη, ενώ εμείς αναφερόμαστε σε πιέσεις ( $P_{st}$ )

$$P = F/S$$

οπότε,

$$P_{st} * S = \Delta P / 4 * R$$

Αν υποθέσουμε ότι η φυσαλίδα είναι σφαιρική η επιφάνειά της είναι:

$$S = 2\pi R^2$$

Άρα η πίεση ( $P_{st}$ ) που οφείλεται στην επιφανειακή τάση, μετά την αντικατάσταση και κάποιες πράξεις θα είναι:

$$P_{st} = (\Delta P / 8\pi) * 1/R$$

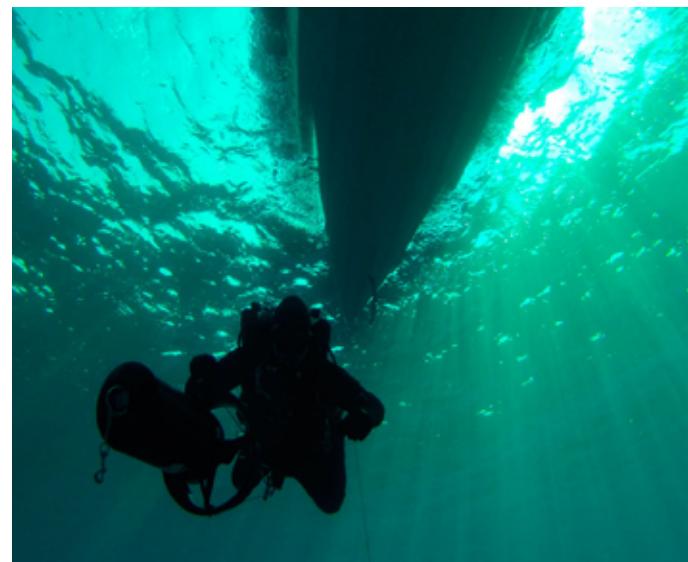
Σημαντικές παρατηρήσεις

1. Η μικρή φυσαλίδα λόγω επιφανειακής τάσης θα έχει μεγάλυτερη πίεση και αντίστροφα.

2. Η επιφανεική τάση είναι ΜΗΔΕΝ εαν δεν υπάρξει διαφορά πίεσης.

Δηλαδή δύτης σε σταθερό βάθος π.χ 20 μέτρα με κορεσμένους ιστούς η πίεση στους ιστούς θα είναι 3bar.

Η πίεση στο εσωτερικό της φυσαλίδας θα είναι επίσης 3bar (3+0)bar καθώς  $P_{st}=0$ .



### Μηχανική φυσαλίδας

Αν η πίεση του αδρανούς αερίου μέσα στη φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση του αδρανούς αερίου που διαλύεται στον περιβάλλοντα ιστό τότε το αδρανές αέριο μέσα στη φυσαλίδα θα διαχυθεί στον περιβάλλοντα ιστό με αποτέλεσμα η φυσαλίδα να μικρύνει.

Η συνολική πίεση που δέχεται η φυσαλίδα ( $P_B$ ) είναι το άθροισμα της πίεσης του περιβάλλοντος (AP) και επιφανειακής τάσης της φυσαλίδας ( $P_{\gamma}$ ).

Αν η πίεση περιβάλλοντος είναι 3ATA η πίεση στη φυσαλίδα θα είναι 3bar συν την επιφανειακή τάση. Φυσαλίδα στο μέγεθος ενός κυττάρου π.χ. 4μμ radius έχει επιφανειακή τάση 0.5 bar.

Άρα η συνολική πίεση της φυσαλίδας θα είναι:

$$P_B = AP + P_{\gamma} \Rightarrow 3bar + 0.5bar = 3.5bar.$$

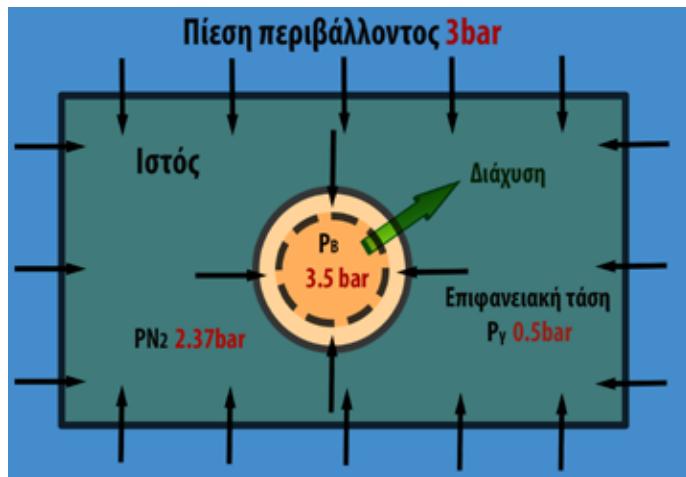
Σε πίεση 3ATA η μερική πίεση αζώτου στους περιβάλλοντες ιστούς θα είναι:

$$PN_2 = 0.79 \times 3ATA = 2.37bar$$



Στην περίπτωση αυτή το αέριο μέσω διάχυσης θα μειώσει τον όγκο της φυσαλίδας. (Σχήμα5)

## Σχήμα5



Φυσαλίδα σε μέγεθος κυττάρου π.χ. ακτίνας 4μητ έχει επιφανειακή τάση 0.5 bar.

Σε αντίθετη περίπτωση που η πίεση του διαλυόμενου αερίου στους ιστούς είναι μεγαλύτερη η φυσαλίδα θα μεγαλώσει. Αυτό μπορεί να συμβεί αν, για παράδειγμα, πραγματοποιήσουμε γρήγορη ανάδυση στα 20 μέτρα ενώ βρισκόμαστε στα 50 μέτρα όπου η πίεση είναι 6 ATA. Αν υπάρχει κορεσμός στα 50 μέτρα η τάση αδρανούς αερίου στους ιστούς είναι:  $PN_2 = 0.79 \times 6ATA = 4.74bar$

Αν πραγματοποιήσουμε γρήγορη ανάδυση οι ιστοί δεν θα έχουν τον χρόνο να εξισορροπήσουν την απότομη μεταβολή της πίεσης με συνέπεια να επέλθει υπερκορεσμός.

Η τάση των ιστών θα παραμείνει στα 4,74bar ενώ η πίεση περιβάλλοντος θα είναι 3bar.

Στην περίπτωση αυτή το αέριο μέσω διάχυσης θα αυξήσει τον όγκο της φυσαλίδας. (Σχήμα 6)

## Δυναμική φυσαλίδας

Ο σχηματισμός φυσαλίδας δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητός. Γνωρίζουμε ότι οι δύο βασικές αρχές για τη δημιουργία φυσαλίδας είναι ο σχηματισμός από πυρήνες αερίου και ο σχηματισμός De Novo (εκ νέου).

Στη διάρκεια της αποσυμπίεσης σκοπός του δύτη είναι να διατηρεί τις φυσαλίδες σε όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος. Το μέγεθος της αρχικής φυσαλίδας είναι αυτό που θα καθορίσει την μετέπειτα αύξηση ή μείωση του όγκου της.

Για να υπάρξει και να διατηρηθεί μια φυσαλίδα ως οντότητα πρέπει η πίεση των αερίων εντός της φυσαλίδας να μπορεί να υπερνικήσει τις εξωτερικές πιέσεις που δέχεται και οι οποίες τείνουν να την συνθλίψουν. Οι πιέσεις προέρχονται από την ελαστικότητα του ιστού, την πίεση στην περιβάλλουσα τη φυσαλίδα μεμβράνη και την υδροστατική πίεση.

Η πίεση των ιστών είναι προϊόν της κατασκευής και της οσμωτικής ισορροπίας τους.

Η διεύρυνση ή συρρίκνωση της φυσαλίδας εξαρτάται από την τάση των αερίων στους περιβάλλοντες ιστούς.

*Αν η τάση των αερίων στους ιστούς είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική πίεση των αερίων μέσα στη φυσαλίδα, τότε τα αέρια μέσω διάχυσης θα εισχωρήσουν στη φυσαλίδα με αποτέλεσμα να αυξηθεί το μέγεθός της.*

*Αν η τάση των αερίων στους ιστούς είναι μικρότερη από την εσωτερική πίεση των αερίων μέσα στη φυσαλίδα τότε τα αέρια μέσω διάχυσης θα οδηγηθούν στους ιστούς με αποτέλεσμα το μέγεθος της φυσαλίδας να μειωθεί.*

## Σχήμα 6



Κατά τη φάση της ανάδυσης χρειάζεται ορισμένος χρόνος για να επέλθει ισορροπία μεταξύ πίεσης αδρανών αερίων στους ιστούς και πίεσης περιβάλλοντος.

Η μερική πίεση αδρανών αερίων για κάποιους ιστούς θα είναι μεγαλύτερη από την πίεση περιβάλλοντος.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται υποθετικά η σχέση φυσαλίδων με διαφορετικό μέγεθος.

Στο ακόλουθο παράδειγμα η πίεση περιβάλλοντος είναι 3ATA, με αέριο κατάδυσης ατμοσφαιρικό αέρα και επίπεδο κορεσμού 3.7bar.

Η επιφανειακή τάση στη φυσαλίδα μεγάλου όγκου είναι 0,5bar.

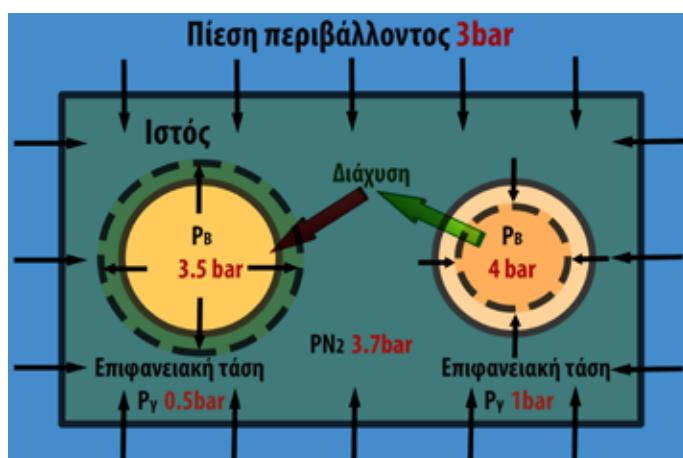
Το σύνολο της εσωτερικής πίεσης θα είναι:

$$3 + 0,5 = 3,5\text{bar}$$

Στην ίδια πίεση περιβάλλοντος η φυσαλίδα με μικρότερο μέγεθος θα έχει επιφανειακή τάση 1bar.

Το σύνολο της εσωτερικής πίεσης θα είναι:

$$3 + 1 = 4\text{bar.}$$



Σε κατάσταση υπερκορεσμού στη μικρή φυσαλίδα το μέγεθος θα ελαττώνεται ενώ στην μεγάλη θα αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο αυξάνεται ο όγκος της φυσαλίδας τόσο μειώνεται η επιφανειακή τάση.

Παρατηρούμε ότι κάποιοι ιστοί βρίσκονται σε κορεσμό με μερική πίεση αέρων  $\text{PN}_2$  3.7bar. Η μικρή φυσαλίδα έχει εσωτερική πίεση 4bar με την τάση των αδρανών αερίων στους περιβάλλοντες ιστούς να είναι 3.7bar. Τα αδρανή αέρια θα περνούν μέσω διάχυσης στον περιβάλλοντα ιστό ώσπου να επέλθει ισορροπία πίεσης με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση της φυσαλίδας.

Στη φυσαλίδα με το μεγαλύτερο μέγεθος τα αποτελέσματα είναι αντίθετα.

Με εσωτερική πίεση 3.5bar και τάση αδρανών αερίων στους περιβάλλοντες ιστούς 3.7 bar, τα αδρανή αέρια θα περάσουν μέσω διάχυσης στη φυσαλίδα μέχρι οι πιέσεις να εξισορροπήσουν με αποτέλεσμα να αυξηθεί το μέγεθος της φυσαλίδας.

### Δυναμική Φυσαλίδας\_Χρήση αερίου αποσυμπίεσης

Για πιο αποτελεσματική διαχείριση της φυσαλίδας υπάρχει ανάγκη για διαφορετικά αναπνεύσιμα μίγματα κατά τη φάση της αποσυμπίεσης.

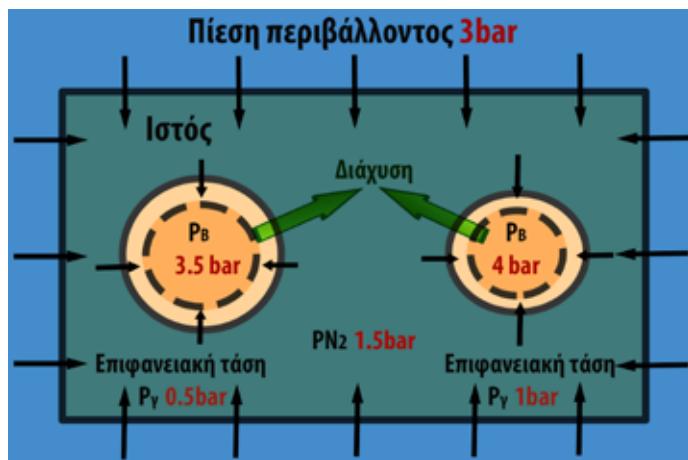
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης αερίου αποσυμπίεσης είναι η μείωση του συνολικού χρόνου αποσυμπίεσης. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται αυξάνοντας την κλίση των αδρανών αερίων με επακόλουθο την αποφόρτιση των ιστών.

Τα μοντέλα αποσυμπίεσης RGBM - VPM, γνωστά σαν "δυαδικά μοντέλα αποσυμπίεσης", Bubble models ή Two face model είναι εξελιγμένες προσεγγίσεις οι οποίες προέκυψαν από μελέτες δεκαετιών πάνω στη δημιουργία και τον μηχανισμό της φυσαλίδας κατά την διάρκεια της ανάδυσης-αποσυμπίεσης, με σκοπό να υπολογίζεται και να ελέγχεται ο όγκος των αδρανών αερίων που αποβάλλεται από τους ιστούς με τη μορφή φυσαλίδων. Εκτός από τα αέρια που διαλύονται στο σώμα μας (θεωρία Haldane) τα μοντέλα προσεγγίζουν υπολογιστικά και την ελεύθερη φάση των αερίων\_φυσαλίδες.

Για τα μοντέλα αυτά αν η κλίση των αδρανών αερίων και η ταχύτητα αποφόρτισης των ιστών αυξάνεται, η πίεση του διαλυόμενου αέριου στους ιστούς θα ελαττώνεται.



Με τη χρήση μίγματος αποσυμπίεσης EAN50 θα δούμε ποια μπορεί να είναι η συμπεριφορά και τα προτερήματα.



Όπως παρατηρούμε στο σχήμα, μετά την αλλαγή σε μίγμα αποσυμπίεσης θα υπάρξει σημαντική μεταβολή στη κλίση\* (μερική πίεση) του αδρανούς αερίου με αποτέλεσμα την ταχύτερη αποφόρτιση και την συρρίκνωση των φυσαλίδων καθώς σημειώνεται μείωση 2.2bar.

$$(PN_2 3.7 \text{ bar} - PN_2 1.5 \text{ bar})$$

Η μικρή φυσαλίδα έχει εσωτερική πίεση 4 bar και η μεγάλη 3.5bar. Η τάση των αδρανών αερίων στους περιβάλλοντες ιστούς είναι 1.5bar. Τα αδρανή αέρια θα περάσουν μέσω διάχυσης στον περιβάλλοντα ιστό μέχρι να εξισορροπηθούν οι πιέσεις.

Αποτέλεσμα θα είναι η συρρίκνωση των φυσαλίδων. Η επιλογή του μίγματος καθώς και το βάθος που θα πραγματοποιηθεί η αλλαγή είναι ουσιώδης. Αν η αλλαγή πραγματοποιηθεί σε μικρότερο βάθος δεν θα έχουμε το όφελος της μείωσης του υπερκορεσμού που, όπως είδαμε, συνδέεται με την αύξηση της περιβαλλοντικής πίεσης.

Γι αυτόν τον λόγο είναι διαδεδομένη η χρήση του EAN50 στα 21 μέτρα. Το συγκεκριμένο μίγμα αποσυμπίεσης συνδυάζει υψηλή πίεση περιβάλλοντος και μείωση του επιπέδου υπερκορεσμού.

## Χρήση υλικού

Αυτό το υλικό χορηγείται με άδεια Creative Commons Αναφορά Δημιουργού  
Μη Εμπορική Χρήση-Όχι Παράγωγα Έργα 3.0 Ελλάδα.

Μπορείτε να:

- Μοιραστείτε — αντιγράψετε και αναδιανείμετε το υλικό με κάθε μέσο και τρόπο υπό τους ακόλουθους όρους:
  - Αναφορά Δημιουργού — Πρέπει να δώσετε την κατάλληλη αναγνώριση/ credit, να γίνει αναφορά του συνδέσμου/link για την άδεια, και να υποδείξετε αν έγιναν αλλαγές. Αυτό μπορείτε να το κάνετε με οποιονδήποτε εύλογο τρόπο, αλλά με κανέναν τρόπο που να υποδεικνύει ότι ο πάροχος της αδείας/ licensor εγκρίνει εσάς ή τη χρήση σας.
  - Μη Εμπορική Χρήση — Δε μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το υλικό για εμπορικούς σκοπούς.
  - Μη παραγόμενα — Αν αναμείξετε, τροποποιήσετε, ή δημιουργήσετε πάνω στο υλικό, δεν μπορείτε να διανείμετε το τροποποιημένο υλικό.

## Πηγές - Αναφορές

\* Εκτενής αναφορά για την κλίση των αδρανών αερίων γίνεται στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου Θεωρία Αποσυμπίεσης

\*[1wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

Οι σελίδες 24-27 προέρχονται από το άρθρο του Βασίλη Μαύρου Το «Παράθυρο Οξυγόνου» στην Τεχνική κατάδυση.

Οι διευκρινήσεις της σελ. 12, προέρχονται από το ΠΝΕΥΜΟΝΟΛΟΓΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΘΗΝΩΝ

## Βιβλιογραφία - Παραπομπές

Πολεμικό Ναυτικό, Εγχειρίδιο Καταδυτικής Ιατρικής.

ΠΝΕΥΜΟΝΟΛΟΓΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΘΗΝΩΝ, **Γεώργιος Α. Μαθιουδάκης MD, PhD**

Handbook of Chemistry and Physics. Cleveland, Ohio: Chemical Rubber Publishing Co.. 1943

Το «Παράθυρο Οξυγόνου» στην Τεχνική κατάδυση, VPM, **Βασίλης Μαύρος**

Calculation of air saturation decompression tables. **Workman, Robert D.**

Stabilized bubbles in the body. **Hugh D. Van Liew and Soumya Raychaudhuri**

**Kindwall, E.P.** Measurement of helium elimination from man during decompression breathing air or oxygen. Undersea Biomedical Research. 2:277-284, 1975.5

**Jonny E. Brian, Jr., M.D.**, Gas Exchange, Partial Pressure Gradients and Oxygen Window

**Bruce R. Wienke**, Basic Decompression, Theory and Application, Best Publishing Company

**Robert W Hamilton και Edward D Thalmann**, Decompression Practice. The role of oxygen in diving , Physiology and Medicine of Diving, έκδοση 5η, 485

**Behnke AR.** The isobaric (oxygen window) principle of decompression. Third annual conference of Marine Technology Society. Marine Technology Society., 1967, 213-28

**Lategola, M. T.** Measurement of total pressure of dissolved gas in mammalian tissue in vivo. J. Appl. Physiology. 19:322-324, 1964.7

**Yount DE, Lally DA.** On the use of oxygen to facilitate decompression. Aviat. Space Environ. Medicine. 1980 ; 51 :544-50

**Peter Tikuisis & Wayne A. Gerth** , Decompression Theory, Physiology and Medicine of Diving, έκδοση 5η,

**Aksnes, E., & H. Rahn.** Measurement of total gas pressure in blood. J. Appl. Physiology. 10: 173-178, 1957.2.

## Σημειώσεις

## Σημειώσεις



*Diving Training & Equipment Solutions*

