

# 2

## Εφαρμοσμένη φυσιολογία αναπνευστικού συστήματος

ΜΕΛΠΟΜΕΝΗ ΡΕΪΖΟΓΛΟΥ-ΖΑΒΙΤΣΑΝΑΚΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	30
ΑΕΡΟΦΟΡΟΣ ΟΔΟΣ .....	31
ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ .....	33
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΟΓΚΟΙ ΠΝΕΥΜΟΝΟΣ .....	34
Ευεन्दότητα (Compliance) .....	34
Όγκοι πνεύμονος .....	35
Σύγκλειση αεραγωγών (Airway closure) .....	36
Επιφανειοδραστικός παράγων (Surfactant) .....	38
Ροή αερίων – Αντίσταση .....	38
ΑΕΡΙΣΜΟΣ .....	39
Όγκοι αερισμού .....	39
Κατανομή αερισμού .....	40
Κατανομή αιματώσεως .....	41
ΣΧΕΣΗ ΑΕΡΙΣΜΟΥ-ΑΙΜΑΤΩΣΕΩΣ .....	41
Αντανακλαστικό υποξικής πνευμονικής αγγειοσύσπασης .....	42
Shunt .....	43
ΔΙΑΧΥΣΗ .....	44
Καταρράκτης οξυγόνου .....	45
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΟΞΥΓΟΝΟΥ .....	46
Αποθέματα – Αποθήκες O <sub>2</sub> .....	48
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΟΣ .....	49
Αρτηριακό αίμα .....	49
Φλεβικό αίμα .....	49
ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΠΝΟΗΣ .....	49
Ύπνος .....	51
Αφύπνιση (Arousal) .....	51
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	51
Ρύθμιση της αναπνοής .....	52
Μηχανική του αναπνευστικού συστήματος – Σχήμα θώρακος .....	52
Σχέση αερισμού-αιματώσεως .....	52
Ανταλλαγή αερίων – Μεταφορά οξυγόνου .....	53
Κατανάλωση οξυγόνου .....	53
ΜΗ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ .....	54
Ρύθμιση της οξεοβασικής ισορροπίας .....	54

Ο πνεύμονας ως ηθμός κατακρατήσεως σωματιδίων .....	54
Αμυντικός μηχανισμός των πνευμόνων .....	54
Μεταβολική λειτουργία .....	54
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	55

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος παρουσιάζει πολυπλοκότητα, η οποία γίνεται μεγαλύτερη κατά τη χορήγηση γενικής αναισθησίας. Υπό το πρίσμα αυτό θα αναπτυχθούν εν συντομία οι γενικές αρχές φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος και θα δοθεί έμφαση σε σημεία ευρύτερου πρακτικού και κλινικού ενδιαφέροντος για τον φοιτητή/φοιτήτρια.

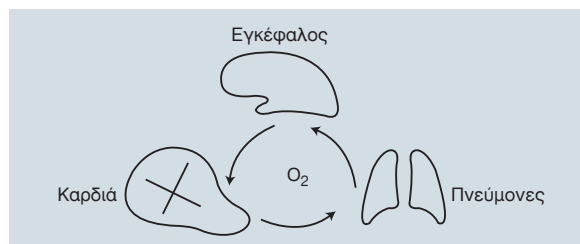
Στην ανάπτυξη του θέματος, σκοπίμως, χρησιμοποιήθηκε γλώσσα τείνουσα προς την απλή καθαρεύουσα από πεποίθηση ότι επιτυγχάνεται περισσότερη ακρίβεια και σαφήνεια του λόγου, αλλά και από ενδιαφέρον προς την «Ελληνική Γλωσσική Κληρονομιά». Η γλώσσα μας, σε όλο της το φάσμα (αρχαία – απλή καθαρεύουσα – δημοτική), πρέπει να κρατηθεί ζωντανή για πολλούς λόγους, τουλάχιστον από τα άτομα που στοχεύουν και πιστεύουν στη μορφωτική αξία της ανώτατης εκπαίδευσης. Οι σημερινοί νέοι με τη φιλομάθεια, φιλοπονία και πολυγλωσσία που διαθέτουν είναι ικανοί να αντεπεξέλθουν τον λίγο επιπλέον φόρτο. Σε αντιστάθμισμα καταβλήθηκε προσπάθεια να δοθεί με όσο το δυνατόν πιο κατανοητό τρόπο το περιεχόμενο.

Για διευκόλυνση πρόσβασης και στη διεθνή βιβλιογραφία δίδεται στο κείμενο και η αγγλοσαξωνική ορολογία των βασικών παραμέτρων της φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος.

Προς τους νέους θεράποντες του Ιπποκράτη και του Γαληνού εκφράζεται η ευχή «οι νέοι να γίνουν καλύτεροι από τους παλιούς». Το αξίζουν και αυτοί και η χώρα.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οξυγόνο ( $O_2$ ) αποτελεί πρωταρχικό στοιχείο για την παραγωγή ενέργειας και την επιβίωση όλων των αεροβίων κυττάρων, συνεπώς και της ανθρώπινης ζωής. Η ίδια η φύση το προσφέρει απλόχερα ως φυσικό συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρος. Πρώτος ο Pristley το 1775 διαπιστώνει τον



**Σχήμα 2.1.** Κύρια όργανα συμμετέχοντα στην πρόσληψη και μεταφορά  $O_2$ .

ενεργειακό του ρόλο και παράλληλα επισημαίνει την πιθανή τοξικότητα της εισπνοής αμιγούς  $O_2$ .

Για την πρόσληψη και μεταφορά της αναγκαίας ποσότητας  $O_2$  στο επίπεδο του κυττάρου είναι απαραίτητη η φυσιολογική λειτουργία τριών ζωικών συστημάτων του οργανισμού: του νευρικού, του κυκλοφορικού και του αναπνευστικού συστήματος (σχ. 2.1).

Η λειτουργία των τριών αυτών συστημάτων είναι άκρως αλληλοεξαρτώμενη. Ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες σε δεδομένη στιγμή και προκειμένου να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν άριστη πρόσληψη, μεταφορά και απόδοση  $O_2$  στο κύτταρο (**οξυγόνωση**), όπως και η άριστη απομάκρυνση του προϊόντος μεταβολισμού, του διοξειδίου του άνθρακος ( $CO_2$ ), αναπτύσσονται αντιρροπιστικοί μηχανισμοί οι οποίοι διέπουν τη λειτουργία ενός εκάστου συστήματος μεμονωμένα.

Από πλευράς σπουδαιότητας, όσον αφορά την οξυγόνωση των ιστών, πέραν της βασικής και απαραίτητης προϋπόθεσης της φυσιολογικής συγκέντρωσης  $O_2$  στο εισπνεόμενο μίγμα αέρος ( **$FiO_2$** ), εξίσου σημαντική είναι η φυσιολογική λειτουργία και των τριών πρωταγωνιστών συστημάτων ως συνόλου, ήτοι:

**Νευρικό σύστημα:** Εγκέφαλος, νωτιαίος μυελός, περιφερικά νεύρα.

**Αναπνευστικό σύστημα:** Ανώτερη και κατώτερη αναπνευστική οδός, πνεύμονες, θωρακικός κλωβός, αναπνευστικοί μύες, διάφραγμα.

**Κυκλοφορικό σύστημα:** Καρδιά, μικρή και μεγάλη

κυκλοφορία, όγκος αίματος, συγκέντρωση αιμοσφαιρίνης.

Το νευρικό σύστημα καθορίζει τον αερισμό των πνευμόνων ( $\dot{V}$ ) ρυθμίζοντας τη συχνότητα των αναπνοών (Rr), τον τύπο της αναπνοής και τον όγκο του αναπνεόμενου αέρος ( $V_t$ ) και εν πολλοίς συμμετέχει στη διατήρηση της βατότητας της αεροφόρου οδού.

Το αναπνευστικό σύστημα έχει την αμεσότερη σχέση με την οξυγόνωση των ιστών.

Η ελεύθερη αεροφόρος οδός επιτρέπει την απρόσκοπτη είσοδο αέρος στις κυψελίδες.

Ο θωρακικός κλωβός με το διάφραγμα και τους μεσοπλευρίους μύες, υπό τον έλεγχο του νευρικού συστήματος, λειτουργεί ως αντλία αρνητικής πίεσεως εξασφαλίζοντας τον **αερισμό των πνευμόνων** ( $\dot{V}$ ).

Οι πνεύμονες πρέπει να θεωρηθούν ως η σκηνή-πεδίο όπου διαδραματίζεται η **αναπνοή**, η βασική λειτουργία του συστήματος, η οποία αποσκοπεί στην **ανταλλαγή των αερίων**. Το υγιές πνευμονικό παρέγχυμα, με την αρτιότητα της **κυψελιδοτριχοειδικής μεμβράνης** και την καλή σχέση αερισμού-αιματώσεως ( $\dot{V}/Q$ ), διασφαλίζει τη **διάχυση** και την ανταλλαγή του  $O_2$  και  $CO_2$ .

Το κυκλοφορικό σύστημα με την καρδιά ως αντλία θετικής πίεσεως και με τη συγκέντρωση της αιμοσφαιρίνης (**Hb**) στο αίμα ρυθμίζει την αιμάτωση της πνευμονικής και συστηματικής κυκλοφορίας και καθορίζει το ποσόν του **μεταφερομένου  $O_2$  ( $DO_2$ )**.

Το αλληλένδετο των τριών συστημάτων καταδεικνύεται από τη μελέτη σειράς διαγραμματικών απεικονίσεων και εξισώσεων, χαρακτηριστικό παράδειγμα των οποίων αποτελεί η εξίσωση υπολογισμού του μεταφερομένου οξυγόνου ( $DO_2$ ):

$$DO_2 = CO \cdot [(SaO_2 \cdot Hb \cdot 1,34) + (PaO_2 \cdot 0,003)]$$

όπου

$DO_2$  : Μεταφερόμενο  $O_2$

$CO$  : Καρδιακή παροχή (κυκλοφορικό σύστημα,  $CO = SV \cdot Hr$ )

$SaO_2$  : Κορεσμός αιμοσφαιρίνης (αναπνευστικό σύστημα, εξάρτηση από  $PaO_2$ )

$PaO_2$  : Μερική πίεση  $O_2$  αρτηριακού αίματος (αναπνευστικό σύστημα, εξάρτηση από  $FiO_2$  και αερισμό ( $\dot{V}$ ))

**Hb** : Συγκέντρωση **Hb** στο αίμα (κυκλοφορικό σύστημα)

Συνοπτικά, στην επιτέλεση της λειτουργίας της **αναπνοής** συγκαταλέγονται τέσσερις λειτουργικές ενότητες του αναπνευστικού συστήματος:

- Αναπνευστικός κύκλος. Μηχανική αναπνευστικού συστήματος
- Αερισμός. Σχέση αερισμού-αιματώσεως
- Διάχυση. Μεταφορά οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακος
- Ρύθμιση αναπνοής.

Το αναπνευστικό σύστημα εκτός από την πρωταρχική του λειτουργία, της αναπνοής, έχει ως δευτερεύοντα ρόλο τη συμμετοχή του στον έλεγχο της οξεοβασιικής ισορροπίας, στην ανάπτυξη της άμυνας του οργανισμού, στη σύνθεση και στον μεταβολισμό διαφόρων ενδοκρινικών ουσιών και στην απομάκρυνση ξένων σωματιδίων από το εισπνεόμενο μίγμα αερίων.

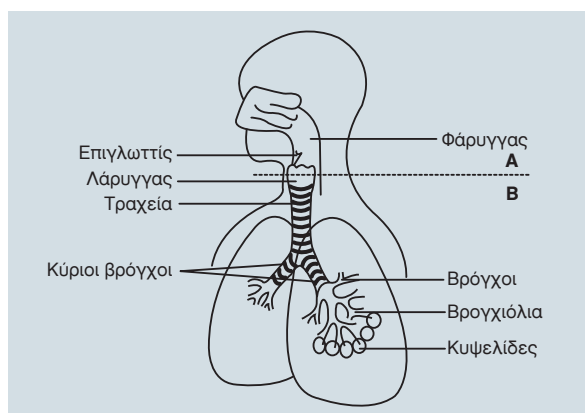
Στη λειτουργία του πνεύμονος ως ενδοκρινούς αδένος εντάσσεται και η απάντησή του στην επίδραση ενδογενούς ή εξωγενούς βλαπτικού παράγοντος. Η βλάβη της κυψελιδοτριχοειδικής μεμβράνης αποτελεί την απαρχή για την ανάπτυξη της όλης χαώδους **παθοφυσιολογίας του βαρέως πάσχοντος ασθενούς (Pathophysiology of critically ill patient)**, η οποία από μόνη της αποτελεί εκτενές κεφάλαιο.

## ΑΕΡΟΦΟΡΟΣ ΟΛΟΣ

Κατά τη χορήγηση γενικής αναισθησίας ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος. Τα χορηγούμενα αναισθητικά φάρμακα επηρεάζουν τόσο τους όγκους των πνευμόνων όσο και την κινητικότητα του θωρακικού κλωβού, παραμέτρους οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τον αερισμό, δηλαδή την ανταλλαγή των αερίων  $O_2$  και  $CO_2$  και την οξυγόνωση-μεταφορά  $O_2$  στους ιστούς.

Για την κατανόηση της φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος και της φαρμακοκινητικής των αερίων και πτητικών αναισθητικών βασική προϋπόθεση αποτελεί η κατοχή λεπτομερών γνώσεων της ανατομικής της αεροφόρου οδού.

Επιπλέον, οι ανατομικές γνώσεις του αναπνευστικού συστήματος από κλινικής πλευράς είναι ζωτικής σημασίας για την άσκηση της Αναπνευστικής φυσιολογίας. Ο χειρισμός της ανώτερης αεροφόρου οδού και η διατήρηση της βατότητάς της αποτελούν



**Σχήμα 2.2.** Σχηματική απεικόνιση αεροφόρου οδού. **A:** Ανώτερη αεροφόρος οδός. **B:** Κατώτερη αεροφόρος οδός.

καθημερινότητα η οποία συχνά δημιουργεί ιδιαίτερα σοβαρά κλινικά προβλήματα με δυσμενείς επιπτώσεις, ακόμη και με απώλεια της ζωής του ασθενούς.

Η αεροφόρος οδός αρχίζει από τη μύτη και το στόμα και καταλήγει στις κυψελίδες. Διαιρείται σε ανώτερη και κατώτερη αεροφόρο οδό, με διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο το επίπεδο των φωνητικών χορδών (σχ. 2.2).

Η ανώτερη αεροφόρος οδός περιλαμβάνει τη ρινική και στοματική κοιλότητα, τον φάρυγγα και το τμήμα του λάρυγγος άνωθεν των φωνητικών χορδών.

Η κατώτερη αεροφόρος οδός, ονομαζόμενη και αεραγωγοί, περιλαμβάνει την υπογλωττιδική περιοχή του λάρυγγος, την τραχεία και το βρογχικό δένδρο και καταλήγει στις κυψελίδες.

Βρογχικό δένδρο είναι το σύνολο των σωληναρίων τα οποία προκύπτουν από τις 23 διαδοχικές υποδιαίρέσεις, γενεές, της τραχείας εντός των πνευμόνων: ήτοι των δύο κυρίων βρόγχων (1η γενεά), των δευτερευόντων βρόγχων, των βρογχιολίων, των τελικών βρογχιολίων (16η γενεά), των αναπνευστικών βρογχιολίων, των αναπνευστικών πόρων και των αναπνευστικών ασκών (23η γενεά), οι οποίοι απολήγουν στις κυψελίδες.

Η επιφάνεια διατομής των αεραγωγών στο επίπεδο της τραχείας είναι 3-5 τ.εκ., στο επίπεδο της 16ης γενεάς 100 τ.εκ. και στην 23η γενεά η συνολική επιφάνεια ανέρχεται σε 10.000 τ.εκ.

Το τοίχωμα των βρόγχων και των υποδιαίρέσεων αυτών μέχρι τα βρογχιόλια διαμέτρου 0,6 χιλ. υποστηρίζεται από χονδρογενείς πλάκες. Η δομή

αυτή εξασφαλίζει τη διατήρηση της διαμέτρου του αυλού των αεραγωγών. Το τοίχωμα των κυψελίδων είναι λεπτό και σε ορισμένα σημεία είναι μόνο 0,2 μm, καίτοι διατηρεί τέσσερα στρώματα διακριτά με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο: το κυψελιδικό επιθήλιο, την κυψελιδική βασική μεμβράνη, την τριχοειδική βασική μεμβράνη και το ενδοθήλιο των τριχοειδών. Στο κυψελιδικό επιθήλιο υπάρχουν τα επιθηλιακά **κύτταρα τύπου I**, διαμέσου των οποίων γίνεται η ανταλλαγή των αερίων, και τα **κύτταρα τύπου II**, τα οποία παράγουν τον επιφανειοδραστικό παράγοντα (surfactant), ο οποίος σταθεροποιεί τη δομή της κυψελίδας, μειώνοντας τις δυνάμεις επιφανειακής τάσεως των τοιχωμάτων.

Η κατώτερη αεροφόρος οδός μέχρι τα τελικά βρογχιόλια (16η γενεά) χρησιμεύει μόνο ως αγωγός για τη διέλευση του αέρος (**conducting airway**), χωρίς να συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων. Το τμήμα αυτό μαζί με την ανώτερη αεροφόρο οδό, η οποία επίσης δεν συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων, αποτελούν τον ονομαζόμενο **ανατομικό νεκρό χώρο (anatomical dead space)** της φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος. Ο όγκος του χώρου αυτού για τον μέσο ενήλικα ανέρχεται σε 150 κ.εκ.

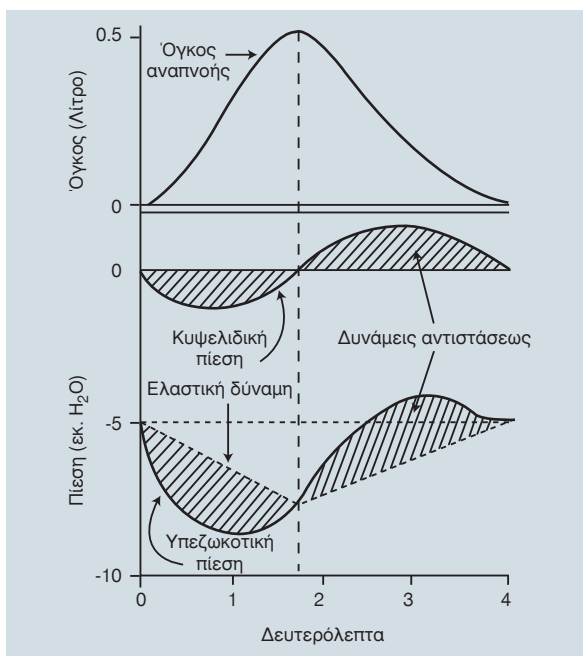
Το τμήμα των τελευταίων **7 γενεών** του βρογχικού δένδρου (αναπνευστικά βρογχιόλια, αναπνευστικοί πόροι και αναπνευστικοί ασκοί) αποτελεί την **αναπνευστική ζώνη του πνεύμονος**, η οποία φέρει και τις κυψελίδες. Μερικές κυψελίδες βρίσκονται σε αμεσότητα με το τοίχωμα των αναπνευστικών σωληναρίων, ενώ ο μεγάλος αριθμός αυτών αποτελεί τη συνέχεια των αναπνευστικών πόρων και ασκών (περίπου 17 κυψελίδες σε κάθε ασκό). Το περιφερικό τμήμα του πνευμονικού παρεγχύματος, μετά τη διαίρεση ενός τελικού βρογχιολίου, παριστά λειτουργική αναπνευστική μονάδα και ονομάζεται **λοβίο**. Ο διαχωρισμός αυτός έχει λειτουργική σημασία, διότι η κατώτερη αεροφόρος οδός μέχρι τα τελικά βρογχιόλια αιματώνεται από τις βρογχικές αρτηρίες (συστηματική κυκλοφορία), ενώ η αναπνευστική ζώνη από κλάδους της πνευμονικής αρτηρίας. Η απόσταση μεταξύ του τελικού βρογχιολίου και της κυψελίδας είναι μόνο 5 χιλ. Ο όγκος της αναπνευστικής ζώνης είναι περίπου 3.000 κ.εκ.

## ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

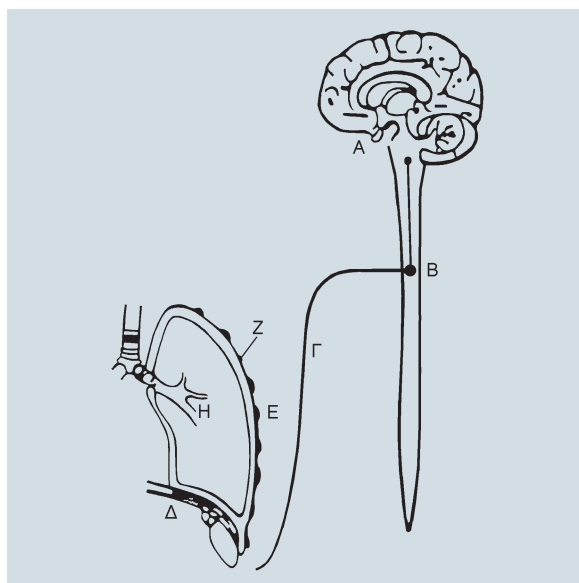
Το μηχανικό έργο της αναπνοής επιτελείται σε δύο φάσεις: την **εισπνοή**, κατά την οποία έχουμε είσοδο αέρος στους πνεύμονες ( $V_I$ ), και την **εκπνοή**, κατά την οποία έχουμε έξοδο αέρος από τους πνεύμονες. Οι φάσεις συνοδεύονται με κινητικότητα του θωρακικού κλωβού και μεταβολή του όγκου των πνευμόνων ως αποτέλεσμα της διεγέρσεως των αναπνευστικών μυών.

Κατά την εισπνευστική φάση ο εισπνεόμενος αέρας βαθμιαία αυξάνει τον όγκο του πνεύμονος. Στην κορυφή της εισπνοής ο όγκος του πνεύμονος προς στιγμήν είναι σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι η ροή αέρος και η διαφορά πιέσεως μεταξύ κυψελίδων και εισόδου της αεροφόρου οδού την ίδια στιγμή είναι μηδέν (σχ. 2.3).

Κατά την εισπνοή ο όγκος του πνεύμονος αυξάνει ταχύτερα από ό,τι εισέρχεται ο αέρας εντός των πνευμόνων. Η μειωμένη ροή αέρος συντελεί στη δημιουργία αρνητικής πιέσεως στις κυψελίδες (πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής) και κατ' ακολουθία διαφορά πιέσεως μεταξύ κυψελίδων και ατμόσφαιρας, γεγονός το οποίο προκαλεί εισροή αέρος εντός της αεροφόρου οδού. Η εισροή συνεχίζεται, έως ότου εξαφανισθεί η διαφορά πιέσεως στο τέλος της εισπνοής. Κατά τη φάση της εκπνοής, με τη χάλαση των εισπνευστικών μυών, οι



Σχήμα 2.3. Αναπνευστικός κύκλος<sup>3</sup>.



Σχήμα 2.4. Αναπνευστικό σύστημα. Α: Αναπνευστικό κέντρο. Β: Νωτιαίος μυελός. Γ: Κινητικά νεύρα. Δ: Νευρομυϊκή σύναψη. Ε: Θωρακικός κλωβός. Ζ: Υπεζωκός. Η: Πνεύμονες, αεροφόροι οδοί, πνευμονική κυκλοφορία.

ελαστικές δυνάμεις του πνεύμονος συμπιέζουν τις κυψελίδες, αυξάνουν την πίεση εντός αυτών και δημιουργούν διαφορά πιέσεως η οποία προκαλεί την έξοδο αέρος από τους πνεύμονες.

Η έναρξη της φάσεως της εισπνοής γίνεται με την **ενεργοποίηση των εισπνευστικών νευρώνων**, γνωστών και ως **κέντρο αναπνοής**, οι οποίοι βρίσκονται στο έδαφος της τετάρτης κοιλίας (σχ. 2.4). Απαγωγή νευρικά ερεθίσματα των νευρώνων αυτών διαμέσου του κατιόντος κινητικού σκέλους του νωπιαίου μυελού και των περιφερικών νευρών προκαλούν ταυτόχρονη σύσπαση των αναπνευστικών μυών με αντίστοιχα αποτελέσματα ως ακολούθως.

### Σύσπαση του διαφράγματος

Η σύσπαση των ινών του διαφράγματος, το οποίο αποτελεί τον κύριο αναπνευστικό μυ, προκαλεί κατάσπαση αυτού με επακόλουθο τη μείωση της υπεζωκοτικής πιέσεως (PPL).

### Σύσπαση των μυών της ανώτερης αναπνευστικής οδού

Η σύσπαση των μυών αυτών δρα διασταλτικά προκαλώντας αύξηση της διαμέτρου της αεροφόρου οδού και αποφυγή της συμπίεσης των τοιχωμάτων αυτής ως συνέπεια αναπύξεως υπο-ατμοσφαιρικής πιέσεως.

### Σύσπαση του μυώδους πλατύσματος και των μεσοπλευρίων μυών

Η σύσπαση των μυών αυτών σταθεροποιεί το ανώτερο τμήμα του θωρακικού κλωβού και βοηθά στην έκπτυξη του κατώτερου τμήματος αυτού.

Η αύξηση της αρνητικής υπεζωκοτικής πίεσεως και η μεταβολή του σχήματος του θωρακικού κλωβού οδηγεί σε διαστολή των ενδοθωρακικών αεροφόρων οδών και έκπτυξη του πνεύμονος, ο οποίος στη δομή του είναι ένα άκρως ελαστικό όργανο, το οποίο κινείται ελεύθερα εντός της θωρακικής κοιλότητας.

Με την πρόοδο της εισπνευστικής φάσεως (έκπτυξη του πνεύμονος) αυξανόμενα προσαγωγά νευρικά ερεθίσματα από υποδοχείς διατάσεως των πνευμόνων, των πλευρών και των μυών (**Hering-Breuer Reflex**), συνδυαζόμενα και με ερεθίσματα από τους ίδιους τους εισπνευστικούς νευρώνες, αναστέλλουν, τελικά, τη δράση των εισπνευστικών νευρώνων, διακόπτεται η φάση της εισπνοής και ακολουθεί η φάση της εκπνοής.

Η φάση της εκπνοής γίνεται παθητικά. Η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος παρέχει τη δύναμη για την υπερνίκηση της αντιστάσεως, η οποία προβάλλεται στη ροή του αέρος διαμέσου των κατωτέρων και ανωτέρων αναπνευστικών οδών. Τελικά, όταν με την έξοδο του αέρος ο όγκος του πνεύμονος περιορισθεί στον όγκο της λειτουργικής υπολειπομένης χωρητικότητας (Functional Residual Capacity – FRC), τότε διακόπτεται η ανασταλτική δράση των προσαγωγών νευρικών ερεθισμάτων επί των εισπνευστικών νευρώνων, οι οποίοι και επαναδραστηριοποιούνται για έναρξη του επόμενου αναπνευστικού κύκλου.

### ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΟΓΚΟΙ ΠΝΕΥΜΟΝΟΣ

Το αναπνευστικό σύστημα είναι δυνατόν να θεωρηθεί ως ένας συμπιεστός **ελαστικός σάκκος** (οι πνεύμονες), ο οποίος περιβάλλεται από έναν ημίσκληρο κλωβό (τον θώρακα), με ένα έμβολο εκτονώσεως στο ένα άκρο του (το διάφραγμα) και ο οποίος σάκκος τροφοδοτείται με αέρα διαμέσου ενός διακλαδίζόμενου συστήματος ημισκλήρων σωλήνων (η ανώτερη αεροφόρος οδός και το βρογχικό δένδρο).

Το όλο αυτό σύστημα φυσιολογικά λειτουργεί ως μία **αντλία αρνητικής πίεσεως**, η οποία κατά την εισπνευστική φάση της αναπνοής επιτρέπει την είσοδο αέρος εντός των πνευμόνων και την έκπτυξη αυτών, κατά δε την εκπνευστική φάση προωθεί την έξοδο αέρος διαμέσου της αεροφόρου οδού, διασφαλίζοντας τη μη σύμπτωση των τοιχωμάτων του πνεύμονος με την εξισορρόπηση αντιθέτων δυνάμεων: της θέσεως του διαφράγματος, της τάσεως των τοιχωμάτων του πνεύμονος να συμπέσουν (Lung recoil) και της τάσεως του θωρακικού κλωβού να εκπτυχθεί.

Η μηχανική του αναπνευστικού συστήματος και ο όγκος των πνευμόνων σχετίζονται με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις-πίεσεις εντός και εκτός του αναπνευστικού συστήματος.

### Ευενδοτότητα (Compliance)

Η έκπτυξη και των δύο πνευμόνων απαιτεί μία διατατική δύναμη, η οποία εκφράζεται ως αλλαγή όγκου ανά μονάδα διατατικής πίεσεως (κυβ. εκ./εκ. H<sub>2</sub>O).

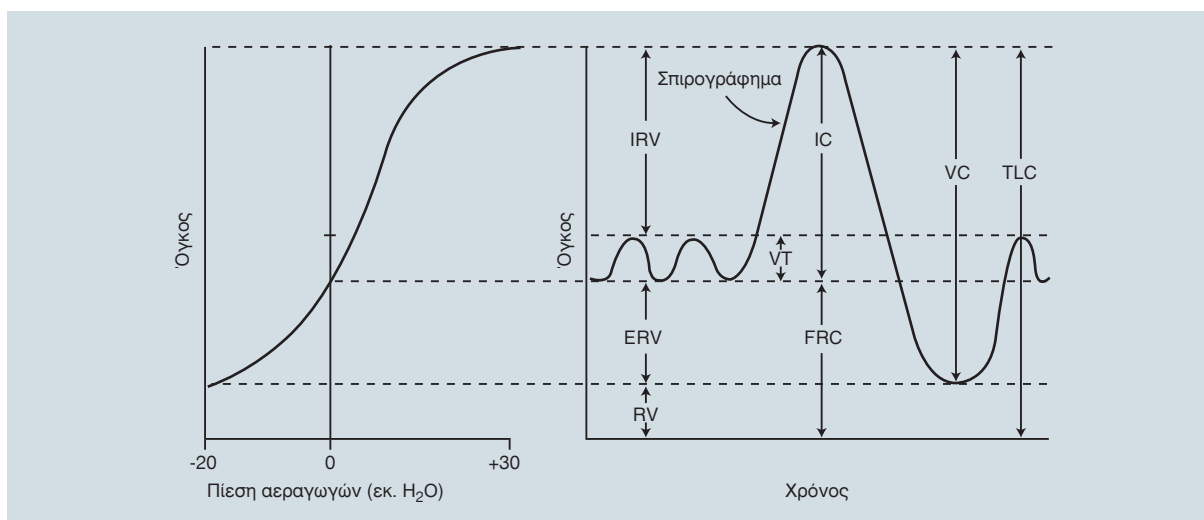
Η σχέση μεταξύ όγκου και πίεσης του φυσιολογικού αναπνευστικού συστήματος παρίσταται γραμμικά με την **καμπύλη πίεσεως-όγκου (P-V)** (σχ. 2.5), η οποία απεικονίζει την ευενδοτότητα (**Compliance**) των πνευμόνων. Η ευενδοτότητα είναι σχεδόν γραμμική σε όλη την έκταση της καμπύλης, αλλά είναι χαμηλή όταν ο πνεύμονας είναι μικρός, προφανώς λόγω της ηυξημένης επιφανειακής τάσης και όταν είναι σχεδόν πλήρως εκπτυγμένος, διότι οι ελαστικές ίνες βρίσκονται περίπου στο όριο της διατάσεώς τους.

$$\text{Ευενδοτότητα} = \frac{\text{Μεταβολή όγκου (κυβ. εκ.)}}{\text{Μεταβολή πίεσεως (εκ. H}_2\text{O)}}$$

Υψηλή ευενδοτότητα σημαίνει μειωμένη ελαστική αντίσταση των πνευμόνων στη φάση της εισπνοής.

Μείωση της ευενδοτότητας παρατηρείται σε πνευμονική ίνωση, πνευμονικό οίδημα, θλάση του πνεύμονος, πνευμοθώρακα, αιμοθώρακα, όπως και σε αύξηση της ενδοκοιλιακής πίεσεως.

Η παρουσία του surfactant στις κυψελίδες αυξάνει την ευενδοτότητα των πνευμόνων μειώνοντας την επιφανειακή τάση.



**Σχήμα 2.5.** Αριστερά: Καμπύλη πίεσης-όγκου του αναπνευστικού συστήματος. Δεξιά: Σπυρογραφική καταγραφή των όγκων και χωρητικότητας των πνευμόνων. IRV: εισπνευστικός εφεδρικός όγκος, ERV: εκπνευστικός εφεδρικός όγκος, RV: υπολειπόμενος όγκος, VT: όγκος αναπνοής, IC: εισπνευστική χωρητικότητα, FRC: λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα, VC: ζωτική χωρητικότητα, TLC: ολική χωρητικότητα των πνευμόνων<sup>3</sup>.

## Όγκοι πνεύμονος

Ο μεγαλύτερος όγκος του αναπνευστικού συστήματος, στις υψηλές διαστατικές πιέσεις, παριστά την **ολική χωρητικότητα των πνευμόνων (Total Lung Capacity – TLC)** και το μέγεθός του καθορίζεται από την ευενδοτότητα (Compliance – C) του συστήματος και την ισχύ των εισπνευστικών μυών.

Η ολική χωρητικότητα των πνευμόνων για τον μέσο ενήλικα ανέρχεται σε 5.000-6.500 κ.εκ. και συσχετίζεται περισσότερο με το ύψος παρά με το βάρος του ατόμου.

Ο μικρότερος όγκος του αναπνευστικού συστήματος, στις αρνητικές πιέσεις, παριστά τον **Υπολειπόμενο Όγκο (Residual Volume – RV)**. Το μέγεθος του όγκου αυτού καθορίζεται από την ισχύ των εκπνευστικών μυών και την κινητικότητα του θωρακικού κλωβού.

Ο όγκος του αναπνευστικού συστήματος, ο οποίος επιτυγχάνεται σε ενδοπνευμονική πίεση 0 (μηδέν), παριστά τη **Λειτουργική Υπολειπόμενη Χωρητικότητα (Functional Residual Capacity – FRC)**. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στον όγκο του συστήματος, όταν αυτό είναι «εν αναπαύσει», οι αεροφόροι οδοί είναι ελεύθεροι και οι αναπνευστικοί μύες είναι εν χαλάρει, δηλαδή αντιστοιχεί στη χωρητικότητα του συστήματος στη **θέση ισορροπίας μεταξύ των δυνάμεων εκπτώξεως και συμ-**

**πτώξεως του πνεύμονος.** Εν κατακλείδι, είναι ο όγκος του αναπνευστικού συστήματος στο τέλος μιας φυσιολογικής εκπνοής. Η FRC έχει ιδιαίτερο λειτουργικό ενδιαφέρον. Επιτρέπει την ανταλλαγή των αερίων και κατά τη διάρκεια της εκπνοής και σε αυτήν οφείλεται η μεγάλη πτώση του  $PO_2$  στις κυψελίδες ( $P_{A}O_2$  100 χιλ. Hg) από την αρχική υψηλή τιμή των 150 χιλ. Hg στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Βάσει σπυρομετρικών μετρήσεων, υπό συνθήκες βραδείας-ήρεμης αναπνοής, ο όγκος αέρος της ολικής χωρητικότητας των πνευμόνων επιμερίζεται σε όγκους (σχ. 2.5) οι οποίοι αντιστοιχούν σε διάφορες θέσεις κινητικότητας του θωρακικού κλωβού και οι οποίοι συνοπτικά έχουν ως εξής:

### 1. Ζωτική χωρητικότητα (Vital Capacity – VC)

Είναι ο μέγιστος όγκος αέρος ο οποίος εκπνέεται μετά από μία βαθειά εισπνοή και παρατεταμένη εκπνοή.

Υπολογίζεται σε 65-75 κ.εκ./Χγρ. β.σ.

Τιμή μικρότερη των 15 κ.εκ./Χγρ. β.σ. είναι ενδεικτική αναπνευστικής ανεπάρκειας.

### 2. Λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα (Functional Residual Capacity – FRC)

Είναι ο όγκος αέρος ο οποίος παραμένει στους πνεύμονες μετά από μία φυσιολογική εκπνοή.

Ανέρχεται σε 2.300-2.600 κ.εκ. για τον μέσο ενήλικα.

### 3. Εισπνευστική χωρητικότητα (Inspiratory Capacity – IC)

Είναι ο μέγιστος όγκος αέρος ο οποίος εισπνέεται μετά από μία φυσιολογική εκπνοή.

Ισούται με το άθροισμα:

Όγκος αναπνοής + Εισπνευστικός εφεδρικός όγκος

### 4. Όγκος αναπνοής (Tidal Volume – $V_T$ )

Είναι ο όγκος αέρος ο οποίος εισπνέεται ή εκπνέεται σε κάθε ήρεμη αναπνοή.

Υπολογίζεται σε 7 κ.εκ./Χγρ. β.σ. ή σε 350-450 κ.εκ. για τις γυναίκες και 500-600 κ.εκ. για τους άνδρες.

### 5. Εισπνευστικός εφεδρικός όγκος (Inspiratory Reserve Volume – IRV)

Είναι ο μέγιστος όγκος αέρος ο οποίος εισπνέεται, εάν συνεχισθεί η φυσιολογική αναπνοή.

Ανέρχεται σε 2.000 κ.εκ. για τις γυναίκες και σε 3.300 κ.εκ. για τους άνδρες.

### 6. Εκπνευστικός εφεδρικός όγκος (Expiratory reserve volume – ERV)

Είναι ο μέγιστος όγκος αέρος ο οποίος εκπνέεται, εάν παραταθεί η φυσιολογική εκπνοή.

Ανέρχεται σε 750 κ.εκ. για τις γυναίκες και σε 1.000 κ.εκ. για τους άνδρες.

### 7. Υπολειπόμενος όγκος (Residual Volume – RV)

Είναι ο όγκος αέρος ο οποίος παραμένει στους πνεύμονες μετά από παρατεταμένη εκπνοή.

Ανέρχεται σε 1.100 κ.εκ. για τις γυναίκες και 1.200 κ.εκ. για νέους άνδρες.

Σε άτομα ηλικίας άνω των 50 ετών αυξάνεται σε 2.500 κ.εκ. κατά μέσο όρο.

Για την κλινική εκτίμηση της μηχανικής του αναπνευστικού συστήματος λαμβάνονται υπ' όψη οι παράμετροι **δυναμική ζωτική χωρητικότητα (Forced Vital Capacity – FVC)** και **μέγιστος εκπνευστικός όγκος του πρώτου δευτερολέπτου (First second Forced Expiratory Volume – FEV<sub>1</sub>)**.

**Δυναμική ζωτική χωρητικότητα** είναι η μέτρηση της ζωτικής χωρητικότητας υπό συνθήκες ταχύτητας στο μέγιστον εκπνοής.

**Μέγιστος εκπνευστικός όγκος** του πρώτου δευτερολέπτου είναι ο όγκος του εκπνεομένου αέρος στο πρώτο δευτερόλεπτο μέτρησης της FVC. Φυσιολογικά ανέρχεται στο 80% της FVC. Ο λόγος

των δύο αυτών παραμέτρων, FEV<sub>1</sub>/FVC, είναι ανάλογος του βαθμού αποφράξεως των αεροφόρων οδών. Φυσιολογικά το πηλίκον FEV<sub>1</sub>/FVC είναι ίσον ή > 80%.

Οι όγκοι της ζωτικής χωρητικότητας (VC) και του υπολειπόμενου όγκου (RV) επηρεάζονται ελάχιστα από τη θέση του σώματος, σε αντίθεση με τον όγκο της λειτουργικής υπολειπομένης χωρητικότητας (FRC), η οποία εμφανίζει αξιόλογες μεταβολές. Η μεγαλύτερη λειτουργική υπολειπομένη χωρητικότητα υπάρχει στην όρθια θέση και η μικρότερη σε κατακεκλιμένη με το κεφάλι χαμηλότερα του σώματος (θέση Trendelenburg). Οι μεταβολές αυτές οφείλονται σε μετακίνηση του διαφράγματος.

*Παράγοντες οι οποίοι μειώνουν την FRC:*

- Προχωρημένη ηλικία
- Υπτία θέση με το κεφάλι προς τα κάτω (θέση Trendelenburg)
- Αναισθησία διεγχειρητικά (επίδραση φαρμάκων-χειρουργική θέση)
- Θωρακικές και κοιλιακές επεμβάσεις μετεγχειρητικά
- Πνευμονική ίνωση
- Πνευμονικό οίδημα
- Παχυσαρκία
- Διόγκωση κοιλίας, κύηση, όγκος, ασκίτης
- Παραμόρφωση θωρακικού κλωβού
- Μείωση της μυϊκής ισχύος.

*Παράγοντες οι οποίοι αυξάνουν την FRC:*

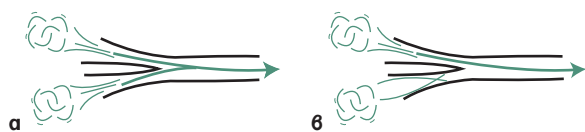
- Αύξηση ενδοθωρακικής πίεσεως – PEEP, CPAP (τύποι τεχνητού αερισμού)
- Εμφύσημα
- Άσθμα.

Σε ακραίες ηλικίες (νεογνά – ηλικιωμένοι) είναι δυνατόν κατά την εκπνευστική φάση να συμβεί σύγκλειση μικρών αεροφόρων οδών ως συνέπεια συμπτώσεως των τοιχωμάτων αυτών. Αποτέλεσμα της συγκλείσεως αυτής είναι ότι ορισμένες περιοχές του πνεύμονος δεν αερίζονται προκαλώντας υποξαιμία.

### Σύγκλειση αεραγωγών (Airway closure)

Κατά την πλήρη έκπτυξη του πνεύμονος όλοι οι κατώτεροι αεραγωγοί (βρογχιόλια) είναι ανοικτοί. Κατά τη μείωση του όγκου του πνεύμονος, σε κά-





**Σχήμα 2.6.** α. Φυσιολογικός αεραγωγός. β. Σύγκλειση αεραγωγών.

ποιο σημείο της εκπνοής προ του πέρατος αυτής, μερικοί από τους μικρότερους αεραγωγούς, κυρίως περιοχών του πνεύμονος εξαρτωμένων από τη βαρύτητα, αρχίζουν να συγκλείνουν, εγκλωβίζοντας εντός αυτών εκπνευστικό αέρα (σχ. 2.6).

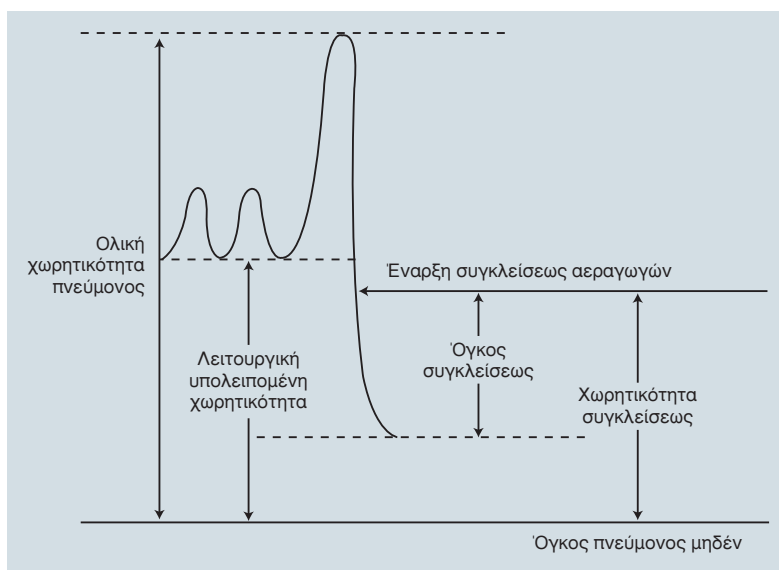
Σπειρομετρικά, το σημείο του όγκου του πνεύμονος στο οποίο λαμβάνει χώρα σύγκλειση μικρών αεραγωγών ονομάζεται όγκος σύγκλεισεως (closing volume). Ο όγκος του πνεύμονος στον οποίον αρχίζει η σύγκλειση των μικρών αεραγωγών ονομάζεται χωρητικότητα σύγκλεισεως (closing capacity – CC) (σχ. 2.7).

Αποτέλεσμα της σύγκλεισεως των αεραγωγών είναι ότι δημιουργούνται εντός του πνευμονικού παρεγχύματος περιοχές οι οποίες αιματώνονται, αλλά δεν αερίζονται καλά. Εφ’ όσον οι περιοχές αυτές είναι συνεχώς κλειστές (ατελεκτασίες), το διερχόμενο από αυτές αίμα δεν οξυγονώνεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται **shunt**.

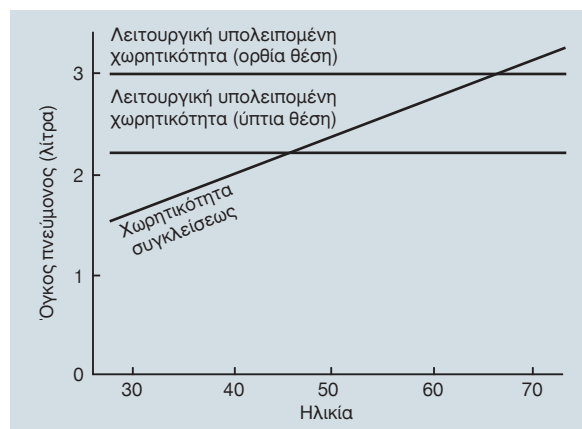
Η σχέση της χωρητικότητας σύγκλεισεως (CC) και της λειτουργικής υπολειπομένης χωρητικότητας (FRC) ποικίλλει με την ηλικία, τη θέση και την κατασκευή του σώματος. Νεογνά και ηλικιωμένοι έχουν μεγαλύτερη CC απ’ ό,τι FRC, ενώ νεαρά άτομα και μεσήλικες έχουν μεγαλύτερη FRC απ’ ό,τι CC. Μεσήλικες άνω των 45 χρόνων σε υπτία θέση έχουν μεγαλύτερη CC από ό,τι FRC (σχ. 2.8). Ηυξημένη CC παρατηρείται και σε παχυσάρκους.

Η σύγκλειση των αεραγωγών είναι συχνή σε νεογνά, σε ηλικιωμένους και σε μεσήλικες άνω

**Σχήμα 2.7.** Η σχέση μεταξύ λειτουργικής υπολειπομένης χωρητικότητας, όγκου σύγκλεισεως και χωρητικότητας σύγκλεισεως<sup>7</sup>.



**Σχήμα 2.8.** Η επίπτωση της ηλικίας στη χωρητικότητα σύγκλεισεως και η σχέση της με τη λειτουργική υπολειπομένη χωρητικότητα<sup>7</sup>.



των 45 χρόνων σε υπτία θέση.

Κατά τη διάρκεια της αναισθησίας η μείωση της λειτουργικής υπολειπομένης χωρητικότητας ευνοεί τη σύγκλιση μικρών αεραγωγών στη φάση της εισπνοής και εκπνοής.

### Επιφανειοδραστικός παράγων (Surfactant)

Η επιφανειακή τάση των κυψελίδων δεν είναι γνωστή. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι είναι χαμηλότερη, όταν οι όγκοι του πνεύμονος είναι μικροί, παρά όταν είναι υψηλοί, γεγονός που αντιτίθεται στον νόμο του Laplace:

$$P = \frac{2T}{R}$$

όπου P: πίεση εντός της κυψελίδος, T: επιφανειακή τάση, R: ακτίνα.

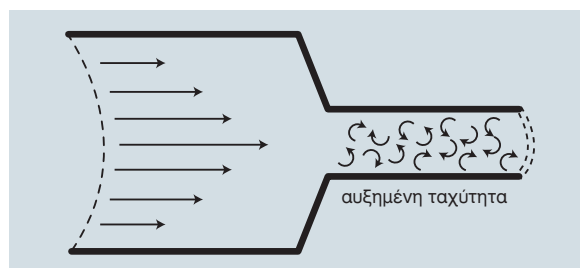
Η μείωση της τάσεως οφείλεται στην επικαλυπτική ουσία των πνευμόνων η οποία επαλείφει το τοίχωμα των κυψελίδων (Pulmonary Surfactant – PS) και αποδίδεται στο γεγονός ότι όταν ελαττώνεται το μέγεθος της κυψελίδος, αυξάνεται το πάχος επικάλυψης με surfactant του τοιχώματος της κυψελίδος, επομένως και η δράση της surfactant.

Η surfactant ή επιφανειοδραστικός παράγων των κυψελίδων είναι μίγμα φωσφολιπιδίων, χολοστερόλης και ειδικής πρωτεΐνης. Σε μεγαλύτερη αναλογία βρίσκεται το φωσφολιπίδιο διπαλμική λεκιθίνη το οποίο εκκρίνεται από τα τύπου II κυψελιδικά κύτταρα.

Η PS αντικαθιστώντας μόρια H<sub>2</sub>O με συμπλέγματα λιποπρωτεΐνης μειώνει την επιφανειακή τάση των κυψελίδων. Η μείωση σταθεροποιεί το τοίχωμα των κυψελίδων, αυξάνει την Compliance των πνευμόνων και μειώνει το έργο της αναπνοής.

### Ροή αερίων – Αντίσταση

Ο ατμοσφαιρικός αέρας και τα αέρια αναισθητικά εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα, περνούν στο αίμα και φθάνουν στους ιστούς ακολουθώντας όλους τους νόμους της φυσικής των αερίων περί ροής, κατανομής, διαχύσεως, διαλυτότητας κ.λπ. Όσον αφορά τη ροή, ο εισπνεόμενος αέρας εισέρχεται στην αεροφόρο οδό και φθάνει στα αναπνευστικά σωληνάκια με την αρνητική πίεση, η οποία δημιουργείται εντός αυτής κατά την εισπνευστική φάση της αναπνοής. Ο εκπνεόμενος αέρας εξέρχεται προς την ατμόσφαιρα παθητικά (όπως αναλυτικά αναφέρεται στην ανάπτυξη του



Σχήμα 2.9. Απεικόνιση μετάπτωσης φυλλώδους ροής αερίου σε στροβιλώδη ροή<sup>6</sup>.

αναπνευστικού κύκλου) συναντώντας αντιστάσεις τριβής. Οι αντιστάσεις έχουν σχέση περισσότερο με το εύρος των αεραγωγών και λιγότερο με τα φυσικά χαρακτηριστικά του αερίου ή το μήκος των αεραγωγών. Η παρουσιαζόμενη **αντίσταση (Resistance – R)** εξαρτάται από τον τύπο της ροής των αερίων. Η **φυλλώδης ροή (Laminar Flow)** παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση και συμβαίνει σε χαμηλές τιμές ροής του αερίου, όπως στους μικρότερους βρόγχους και στα τελικά βρογχιόλια. Στην τραχεία, στους κύριους βρόγχους και στους στελεχιαίους βρόγχους η ροή είναι **στροβιλώδης (Turbulent Flow)** ή μεταπίπτει από τον έναν τύπο στον άλλο, δημιουργώντας και στις δύο αυτές μορφές μεγάλη αντίσταση (σχ. 2.9).

Στα αναπνευστικά βρογχιόλια η ροή και η αντίσταση είναι πολύ χαμηλές. Η διαφορά μεταξύ τραχείας και τελικών βρογχιολίων έγκειται στο ότι τα περίπου 65.000 παράλληλα βρογχιόλια παρουσιάζουν πολύ μεγάλη συνολική επιφάνεια διατομής.

Η φυλλώδης ροή πρέπει να νοηθεί ότι συνίσταται από ρέοντες ομόκεντρους αέρινους κυλίνδρους, η ταχύτητα ροής των οποίων μειούται από το κέντρο προς το τοίχωμα των αεραγωγών, όπου σχεδόν μηδενίζεται.

Η αντίσταση στη ροή των αερίων αποκτά, κυρίως, σημασία στην παιδιατρική αναισθησία, όπου η διάμετρος των αεραγωγών είναι πολύ μικρή, όπως και σε παθολογικές καταστάσεις ενηλίκων, όπου τα μικρότερα βρογχιόλια πρώτον λόγω μεγέθους φράσσονται εύκολα και δεύτερον συσπώνται εύκολα λόγω του ότι έχουν μεγαλύτερη αναλογία λείων μυϊκών ινών στο τοίχωμά τους.

Κατά τη φυλλώδη ροή, η ροή του αερίου δίδεται από την **εξίσωση των Hagen-Poiseuille**:

$$\dot{Q} = \frac{P\pi r^4}{8\eta L}$$

και η αντίσταση βάσει της εξισώσεως:

$$R = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{8 \cdot L \cdot n}{\pi \cdot r^4}$$

όπου

$\dot{Q}$  : Η ροή διαμέσου του σωλήνος

P : Η διαφορά πιέσεως μεταξύ των δύο άκρων του σωλήνος

r : Η ακτίνα του σωλήνος

n : Η γλοιότητα του αερίου

L : Το μήκος του σωλήνος

R : Η αντίσταση του σωλήνος.

Από τις εξισώσεις προκύπτει ότι στη φυλλώδη ροή υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ πιέσεως και ροής, δηλαδή ότι η ροή είναι ευθέως ανάλογη της πιέσεως, ενώ η αντίσταση (R) του σωλήνος είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετάρτης δυνάμεως της ακτίνας.

Η φυλλώδης ροή μεταπίπτει σε στροβιλώδη, όταν συναντηθεί στένωμα του σωλήνος με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της ροής διαμέσου του σωλήνος.

**Αιτίες αύξησης της αντιστάσεως των αεροφόρων οδών είναι:**

- Πτώση της γλώσσας
- Λαρυγγόσπασμος, βρογχόσπασμος
- Εκκρίσεις
- Οίδημα βλεννογόνων
- Όγκος αεροφόρου οδού.

## ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Ο εισπνεόμενος αέρας εισερχόμενος από τη μύτη ή το στόμα υγραίνεται και θερμαίνεται και στη συνέχεια διερχόμενος από τον φάρυγγα, λάρυγγα, τραχεία, βρόγχους, βρογχιόλια, τελικά βρογχιόλια, αναπνευστικά βρογχιόλια, αναπνευστικούς πόρους και αναπνευστικούς ασκούς φθάνει στις κυψελίδες, όπου με **διάχυση** διαμέσου της κυψελιδοτριχοειδικής μεμβράνης έχουμε **ανταλλαγή αερίων**:

O<sub>2</sub> από τις κυψελίδες → τριχοειδή

CO<sub>2</sub> από τα τριχοειδή → κυψελίδες

δηλαδή τη **λειτουργία του αερισμού (Ventilation)**.

Εντός των πνευμονικών τριχοειδών το μεγαλύτερο μέρος του εισερχόμενου O<sub>2</sub> συνδέεται με την Hb των ερυθρών αιμοσφαιρίων, ενώ το υπόλοιπο παραμένει, φυσικά, διαλελυμένο στο πλάσμα.

Το υπάρχον εντός των πνευμονικών τριχοειδών

O<sub>2</sub>, συνδεδεμένο και ελεύθερο, διαμέσου της συστηματικής κυκλοφορίας φθάνει στους ιστούς, επιτελουμένης της **λειτουργίας της μεταφοράς O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> transport)**.

Η καλή λειτουργία της ανταλλαγής των αερίων στο επίπεδο των κυψελίδων εξαρτάται από τη **σχέση αερισμού-αιματώσεως ( $\dot{V}/Q$ ) (Matching of Ventilation and Perfusion)** και ειδικότερα, από την περιοχική κατανομή του εισπνεόμενου αέρος και της αιματικής ροής εντός της αναπνευστικής ζώνης του πνεύμονος. Η λεπτή ισορροπία μεταξύ αερισμού και αιματώσεως της περιοχής αυτής εξασφαλίζεται με τον αντανakλαστικό μηχανισμό της **υποξαιμικής πνευμονικής αγγειοσύσπασης (Hypoxic Pulmonary Vasoconstriction – HPV)**.

Σε ιδανικά αεριζόμενο πνεύμονα το  $\frac{\dot{V}}{Q}$  είναι 1.

Εάν ο  $\dot{V} >$  της αιματώσεως, το  $\frac{\dot{V}}{Q}$  είναι  $> 1$ .

Εάν η αιμάτωση  $>$  του  $\dot{V}$ , το  $\frac{\dot{V}}{Q}$  είναι  $< 1$ .

## Όγκοι αερισμού

Ο όγκος του εισερχόμενου αέρος εντός των πνευμόνων σε κάθε ήρεμη αναπνοή ονομάζεται **όγκος αναπνοής (Tidal Volume – V<sub>t</sub>)**. Ο όγκος του εισπνεόμενου αέρος ανά λεπτό ονομάζεται **κατά λεπτόν όγκος αερισμού (minute volume ventilation –  $\dot{V}$ )** και ισούται με το γινόμενο του όγκου αναπνοής (V<sub>t</sub>) επί τη συχνότητα των αναπνοών (Rr), δηλαδή  $\dot{V} = V_t \cdot Rr$ .

Ο όγκος αναπνοής (V<sub>t</sub>) βάσει της λειτουργικής του ανταποκρίσεως επιμερίζεται ονομαστικά σε **κυψελιδικό όγκο (Alveolar Volume – V<sub>a</sub>)** και σε **νεκρό χώρο (Dead space – V<sub>d</sub>)**.

**Κυψελιδικός όγκος (V<sub>a</sub>)** είναι ο όγκος του αναπνεόμενου αέρος ο οποίος συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων.

**Νεκρός χώρος (V<sub>d</sub>)** είναι ο όγκος της αναπνοής ο οποίος δεν συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων.

**Κατά λεπτόν όγκος αερισμού των κυψελίδων (Alveolar Ventilation –  $\dot{V}_a$ )** είναι το γινόμενο του όγκου αναπνοής (V<sub>t</sub>) μείον τον όγκο του νεκρού χώρου (V<sub>d</sub>) επί τη συχνότητα των αναπνοών (Rr), δηλαδή

$$\dot{V}_a = (V_t - V_d) \cdot Rr$$

Ο νεκρός χώρος ( $V_d$ ) διακρίνεται σε:

- **Ανατομικό νεκρό χώρο**, ο οποίος αντιστοιχεί στην ανώτερη αεροφόρο οδό και στην κατώτερη μέχρι και τα τελικά βρογχιόλια και
- **Κυψελιδικό νεκρό χώρο**, ο οποίος αντιστοιχεί στον όγκο των κυψελίδων οι οποίες αερίζονται αλλά δεν αιματώνονται, δηλαδή στον όγκο των περιοχών εκείνων του πνευμονικού παρεγχύματος όπου το πηλίκον αερισμού/αιματώσεως  $\frac{\dot{V}}{Q}$  είναι  $> 1$ .

Το άθροισμα του ανατομικού νεκρού χώρου και του κυψελιδικού νεκρού χώρου αποτελεί τον **φυσιολογικό νεκρό χώρο (Physiologic dead space)**.

Ο φυσιολογικός νεκρός χώρος, σε φυσιολογικά άτομα, ταυτίζεται με τον ανατομικό νεκρό χώρο, καθότι στους φυσιολογικούς πνεύμονες όλες οι κυψελίδες συμμετέχουν στην ανταλλαγή των αερίων. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου όλες οι κυψελίδες δεν συμμετέχουν στην ανταλλαγή των αερίων, είναι δυνατόν ο φυσιολογικός νεκρός χώρος να είναι και 10 φορές ή και περισσότερο πολλαπλάσιος του ανατομικού.

Η μέτρηση του φυσιολογικού νεκρού χώρου ( $V_d$ ) γίνεται βάσει της **εξίσωσης του Bohr**:

$$\frac{V_d}{V_t} = \frac{PaCO_2 - P_ECO_2}{PaCO_2}$$

όπου

$V_d$  : Φυσιολογικός νεκρός χώρος

$V_t$  : Όγκος αναπνοής

$PaCO_2$  : Μερική πίεση  $CO_2$  αρτηριακού αίματος και

$P_ECO_2$  : Συγκέντρωση  $CO_2$  εκπνεομένου αέρος.

Ο ανατομικός νεκρός χώρος κατά το ήμισυ περίπου είναι ενδοθωρακικός και κατά το υπόλοιπο εξωθωρακικός και υπολογίζεται για τον ενήλικα σε 2,2 κ.ε./Χγρ. β.σ. (περίπου 150 κ.ε.), ενώ για το νεογνό σε 2-3 κ.ε./Χγρ. β.σ. Σε περίπτωση διασωληνώσεως ο ανατομικός νεκρός χώρος μειούται κατά το μέγεθος του εξωθωρακικού τμήματος και αυξάνει με όγκο ίσο προς τον όγκο του ενδοθωρακικού σωλήνος ή τον όγκο του σωλήνος τραχειοστομίας.

Ο κυψελιδικός νεκρός χώρος αυξάνεται σε περιπτώσεις μείωσης της αιμάτωσης της πνευμονικής ζώνης, όπως υπόταση, εμφύσημα, πνευμονική εμβολή και τεχνητό αερισμό υπό θετική πίεση.

Η επίπτωση του νεκρού χώρου στον κυψελιδι-

κό αερισμό ( $\dot{V}_a$ ) των πνευμόνων είναι σημαντική κατά την εφαρμογή τεχνητού αερισμού των πνευμόνων, όπως και σε ασθενείς με αυτόματη επιλόλαια αναπνοή και ταχύπνοια.

#### Παράδειγμα:

Ασθενής Α με αυτόματη αναπνοή και  $V_t$ : 250 κ.ε.,  $V_d$ : 150 κ.ε.,  $R_t$ : 35, υστερεί έναντι άλλου

Β με αυτόματη αναπνοή και  $V_t$ : 500 κ.ε.,  $V_d$ : 150 κ.ε.,  $R_t$ : 12,

καθότι με δεδομένο  $\dot{V}_a = (V_t - V_d) \cdot R_t$

ο ασθενής Α έχει  $\dot{V}_a = (250 - 150) \cdot 35 = 100 \cdot 35 = 3.500$  κ.ε., ενώ

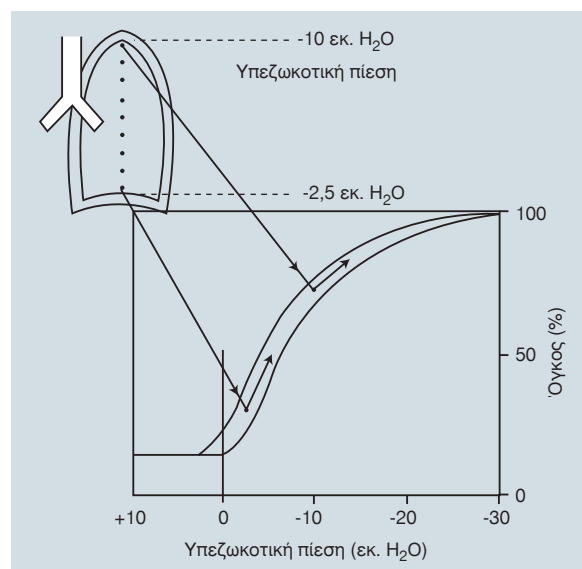
ο ασθενής Β έχει  $\dot{V}_a = (500 - 150) \cdot 12 = 350 \cdot 12 = 4.200$  κ.ε.

#### Κατανομή αερισμού

Ο εισπνεόμενος αέρας δεν κατανέμεται εξίσου σε όλη την έκταση της κυψελιδικής επιφάνειας των πνευμόνων. Ο αέρας κατά προτίμηση κατευθύνεται στις καλύτερα αιματούμενες περιοχές του πνεύμονος, τις εξαρτώμενες από τη βαρύτητα.

Κύριος ρυθμιστής της κατανομής του αέρος εντός των πνευμόνων είναι η **ευενδοτότητα (compliance)** των διαφόρων τμημάτων του πνεύμονος.

Σε όρθια θέση, η αρνητική πίεση εντός της υπεζωκοτικής κοιλότητας παρουσιάζει μείωση από την



**Σχήμα 2.10.** Κατανομή όγκου αναπνοής. Τα βέλη απεικονίζουν τη μεταβολή του όγκου. Η ίδια μεταβολή πίεσεως προκαλεί μεγαλύτερη μεταβολή όγκου στη βάση του πνεύμονος από ό,τι στην κορυφή<sup>1</sup>.