

Ανατομία και φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος

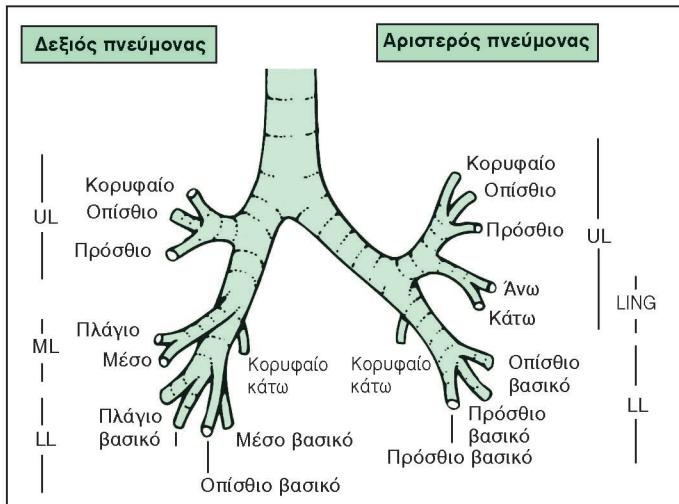
Η ανατομία και η φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος είναι σχεδιασμένες με τέτοιον τρόπο, ώστε να φέρνουν τον αέρα της ατμόσφαιρας και το αίμα της κυκλοφορίας σε στενή επαφή στο επίπεδο της κυψελιδοτριχοειδικής μεμβράνης, προκειμένου να διευκολύνεται η ανταλλαγή του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα.

Κλινική ανατομία

Βρογχικό δένδρο και κυψελίδες

Η **τραχεία** έχει χόνδρινα «πεταλοειδή» ημικρίκια τα οποία υποστηρίζουν το πρόσθιο και πλάγιο τοίχωμα. Το οπίσθιο τοίχωμα είναι χαλαρό και κατά τη διάρκεια του βήχα κινείται προς τα εμπρός. Η τραχεία διαιρείται στον δεξιό και αριστερό κύριο βρόγχο στο επίπεδο της στερνικής γωνίας (γωνία του Louis). Ο **αριστερός κύριος βρόγχος** είναι μεγαλύτερος από τον δεξιό και σχηματίζει με την τραχεία μια περισσότερο οξεία γωνία. Ο **δεξιός κύριος βρόγχος** αποτελεί πιο άμεση συνέχεια της τραχείας, έτσι ώστε οι εισπνεόμενες ουσίες να τείνουν να εισέρχονται στον δεξιό πνεύμονα ευκολότερα απ' ό,τι στον αριστερό. Οι κύριοι βρόγχοι διαιρούνται σε λοβιαίους (άνω, μέσος και κάτω στη δεξιά πλευρά· άνω και κάτω στην αριστερή πλευρά) και αργότερα σε **τμηματικούς**, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Η θέση των πνευμόνων σε σχέση με εξωτερικά οδηγά σημεία φαίνονται στην Εικόνα 1.2. Οι **βρόγχοι** είναι αεραγωγοί που έχουν χόνδρο στο τοίχωμά τους. Υπάρχουν περίπου 10 υποδιαιρέσεις βρόγχων πέρα από τον διχασμό της τραχείας. Οι μικρότεροι αεραγωγοί χωρίς χόνδρους στο τοίχωμά τους ονομάζονται **βρογχιόλια**. Ο όρος **αναπνευστικό**

βρογχιόλιο αναφέρεται στα περιφερικά βρογχιόλια με κυψελίδες στο τοίχωμά τους. Το **βρογχιόλιο** που βρίσκεται αμέσως πριν από την εμφάνιση των κυψελίδων ονομάζεται **τελικό βρογχιόλιο**. Στους βρόγχους, λείες μυϊκές ίνες είναι τοποθετημένες σπειροειδώς εσωτερικά των χόνδρινων πλακών. Ο μυϊκός χιτώνας καθίσταται πληρέστερος προς την περιφέρεια, καθώς οι πλάκες από χόνδρο γίνονται αραιότερες. Το καλυπτήριο επιθήλιο είναι κροσσωτό και περιέχει βλεννοπαραγωγά κύτταρα. Οι κροσσοί κινούνται σαν μαστίγια και συσπαστικά κύματα περνούν συγχρονισμένα από κύτταρο σε κύτταρο, έτσι ώστε τα παγιδευμένα σωματίδια που βρίσκονται μέσα στη στοιβάδα βλέννης πάνω από τους κροσσούς να μετακινούνται προς τα πάνω και έξω από τους πνεύμονες. Η βλεννοκροσσωτή κάθαρση είναι ένα σημαντικό τμήμα της άμυνας των πνευμόνων. Οι μεγαλύτεροι βρόγχοι έχουν και αυτοί βλεννοεκκριτικούς αδένες στον υποβλεννογόνιο χιτώνα, οι οποίοι υπερτρέφονται στη χρόνια βρογχίτιδα. Οι **κυψελίδες** έχουν διάμετρο περίπου 0,1–0,2 mm και επενδύονται από ένα λεπτό στρώμα κυττάρων. Τα κύτταρα είναι δύο τύπων: τα πνευμονοκύτταρα τύπου I τα οποία έχουν επίπεδες προσεκβολές που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της εσωτερικής επιφάνειας των κυψελίδων· τα πνευμονοκύτταρα τύπου II είναι λιγότερα σε αριθμό και περιέχουν πεταλοειδείς δομές υπεύθυνες για την παραγωγή της επιφανειοδραστικής ουσίας. Υπάρχει ένας δυνητικός χώρος μεταξύ των κυψελιδικών κυττάρων και της βασικής μεμβράνης των τριχοειδών, ο οποίος καθίσταται εμφανής μόνο κατά τη διάρκεια νόσων, οπότε και μπορεί να περιέχει υγρό, ινώδη ιστό δικτυαρικό διήθημα.

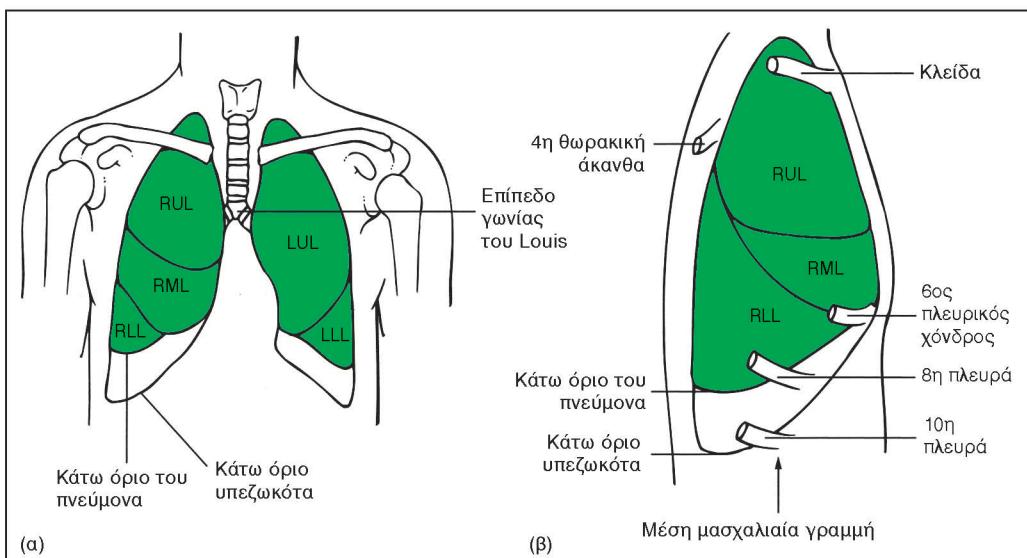


Εικόνα 1.1 Διάγραμμα βρογχοπνευμονικών τμημάτων. UL, άνω λοβός· ML, μέσος λοβός· LL, κάτω λοβός· LING, γλωσσίδα.

Πνευμονική αιμάτωση

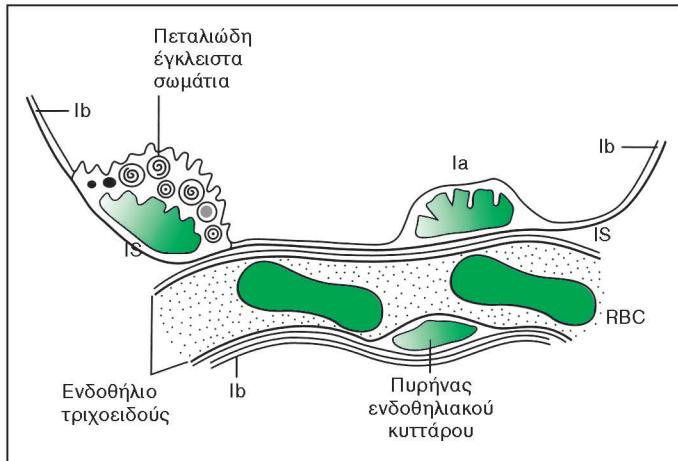
Οι πνεύμονες αιματώνονται τόσο από την πνευμονική όσο και από τη συστηματική κυκλοφορία. Η **πνευμονική αρτηρία** έκεινή από τη δεξιά κοιλία και διαιρέται σε αριστερή και δεξιά πνευμονική αρτηρία, οι οποίες παρέχουν κλάδους που συνδέονται το βρογχικό δένδρο. Το πνευμονικό τρίχοσειδικό δίκτυο στα τοιχώματα των κυψελίδων είναι πολύ πυκνό και παρέχει μια πολύ μεγάλη επιφάνεια για την ανταλλαγή αερίων. Τα πνευμονικά φλεβίδια παροχετεύουν αίμα πλαγίως στην περιφέρεια των

πνευμονικών λοβιδίων και, στη συνέχεια, διέρχονται κεντρικά στα μεσολοβίδια και στα μεσοτημηματικά διαφράγματα. Τελικά, ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τέσσερεις κύριες πνευμονικές φλέβες, οι οποίες εκβάλλουν στον αριστερό κόλπο. Αρκετές μικρές **βρογχικές αρτηρίες** συνήθως προέρχονται από την κατιούσα αορτή και πορεύονται στις εξωτερικές στιβάδες των βρόγχων και βρογχιολίων αιματώνοντας τους ιστούς των αεραγωγών ώς το επίπεδο των αναπνευστικών βρογχιολίων. Το μεγαλύτερο μέρος του αίματος αποχετεύεται στο δίκτυο των πνευμονικών φλεβών, συνεισφέροντας ένα μικρό



Εικόνα 1.2 Επιφανειακή ανατομία. (α) Πρόσθια όψη των πνευμόνων. (β) Πλάγια όψη του δεξιού μέρους του θώρακα στο τέλος της εκπνοής. RUL, δεξιός άνω λοβός· RML, δεξιός μέσος λοβός· RLL, δεξιός κάτω λοβός· LUL, αριστερός άνω λοβός· LLL, αριστερός κάτω λοβός.

Εικόνα 1.3 Δομή του κυψελιδικού τοιχώματος όπως φαίνεται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Ia, πνευμονοκύτταρο. Ib, επίπεδη επέκταση πνευμονοκύτταρου τύπου I, που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της εσωτερικής επιφάνειας της κυψελίδας. II, τύπου II πνευμονοκύτταρο με πεταλιώδη έγκλειστα σωμάτια, τα οποία πιθανώς να αποτελούν τη θέση παραγωγής της επιφανειοδραστικής ουσίας. IS, διάμεσο διάστημα. RBC, ερυθρό αιμοσφαιρίο. Τα πνευμονοκύτταρα και τα ενδοθηλιακά κύτταρα που επικάθονται πάνω σε αυτήν τη λεπτή, συνεχή, βασική μεμβράνη δύνει απεικονίζονται.



ποσό μη οξυγονωμένου αίματος, το οποίο αποτελεί μέρος της «φυσιολογικής παράκαμψης» (αίμα που διέρχεται από τον πνεύμονα χωρίς να οξυγονώνεται) που παρατηρείται στα φυσιολογικά άτομα. Οι βρογχικές αρτηρίες μπορεί να υπερτραφούν σε χρόνιες αναπνευστικές νόσους. Η σημαντική αιμόπτυση σε νόσους όπως οι βρογχεκτασίες ή το ασπεργιλλωμα συνήθως οφείλονται στις βρογχικές και όχι στις πνευμονικές αρτηρίες και μπορεί να αντιμετωπιστεί με θεραπευτικό εμβολισμό βρογχικής αρτηρίας. Η πνευμονική κυκλοφορία συνήθως προβάλλει πολύ μικρότερες αντιστάσεις σε σύγκριση με τη συστηματική κυκλοφορία και λειτουργεί με χαμηλότερη πίεση αιμάτωσης. Τα πνευμονικά τριχοειδή μπορεί, επίσης, να συμπιεστούν κατά τη διοδό τους από τα κυψελιδικά τοιχώματα, αν η κυψελιδική πίεση ξεπεράσει την τριχοειδική πίεση.

Φυσιολογία

Η κυριότερη λειτουργία του πνεύμονα είναι να φέρνει το οξυγόνο στον οργανισμό και να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα.

Αυτό πραγματοποιείται με μια διαδικασία η οποία ολοκληρώνεται σε δύο βήματα:

1. Μετακίνηση αέρα μέσα και έξω από τον πνεύμονα (ανάμεσα στον εξωτερικό κόσμο και στην κυψελίδα).
2. Ανταλλαγή αερίων: η ανταλλαγή του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα ανάμεσα στον αέρα των κυψελίδων και το αίμα.

Η λειτουργία αυτή συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής κατά κύριο λόγο ασυνείδητα, κάτω από τον συντονισμό ενός κέντρου στο εγκεφαλικό στελέχος. Οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν τη λειτουργία, «τον έλεγχο της αναπνοής», θα αναφερθούν στο κεφάλαιο αυτό.

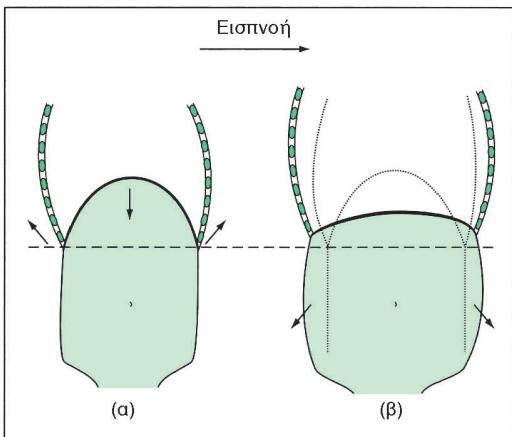
Μετακίνηση αέρα εντός και εκτός του πνεύμονα

Για να γίνει κατανοητή αυτή η διαδικασία, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι μύες που «κινούν την αντλία» και οι περιοριστικές δυνάμεις που θα πρέπει να υπερνικηθούν. Στις δυνάμεις αυτές περιλαμβάνονται οι ελαστικές ιδιότητες του πνεύμονα και η αντίσταση στη ροή αέρα διά μέσου των βρόγχων (αντίσταση των αεραγωγών).

Οι μύες που κινούν την αντλία

Η εισπνοή απαιτεί μυϊκό έργο. Το διάφραγμα αποτελεί τον σημαντικότερο εισπνευστικό μύ. Στο τέλος της προηγούμενης εκπνοής, το διάφραγμα ισορροπεί σε μια χαλαρή, θολωτή θέση, ψηλά στον θώρακα (Εικόνα 1.4). Για να πραγματοποιηθεί η εισπνοή, αυτός ο δυνατός μυς συσπάται, σκληράνει και τείνει να οδηγήσει το περιεχόμενο της κοιλίας προς τα κάτω. Η αντίσταση που συναντά από την κοιλία είναι ποικιλλούσα, γεγονός που σημαίνει ότι για να διατρηθεί η νέα θέση του διαφράγματος, οι κατώτερες πλευρές (στις οποίες καταφύεται) μετακινούνται προς τα άνω και έξω. Το μέγεθος της αντίστασης που προβάλλεται από την κοιλιά μπορεί να αυξηθεί οικειοθελώς με σύσπαση των κοιλιακών μυών και τότε η εισπνοή οδηγεί σε μια ορατή έκπτυξη του θώρακα. Η αντίσταση μπορεί, επίσης, να αυξηθεί και από την παχυσαρκία. Στην περίπτωση αυτήν, υπάρχει ένας ακούσιος περιορισμός τής προς τα κάτω μετακίνησης του διαφράγματος και, καθώς η δυνατότητα προς τα άνω κίνησης των πλευρών είναι περιορισμένη, περιορίζεται και η δυνατότητα για πλήρη εισπνοή. Αυτή η αδυναμία πλήρους αερισμού των πνευμόνων αποτελεί παράδειγμα περιοριστικής αναπνευστικής διαταραχής (βλ. Κεφάλαιο 3).

Υπάρχουν και άλλοι μύες που συμμετέχουν στην εισπνοή. Οι σκαληνοί μύες ανυψώνουν τις ανώ-



Εικόνα 1.4 Επίδραση της διαφραγματικής σύσπασης. Διάγραμμα του θωρακικού κλωβού, της περιποναϊκής κοιλότητας και του διαφράγματος που δείχνουν τη θέση στο τέλος της ήρεμης εκπνοής (a). Καθώς το διάφραγμα συσπάται, ωθεί τα κοιλιακά όργανα προς τα κάτω (το κοιλιακό τοίχωμα κινείται προς τα έξω) και μειώνει την πίεση του θώρακα, γεγονός το οποίο «ρουσφά» αέρα πάντοτε στόμα (εισπνοή). Καθώς το διάφραγμα βραχύνεται και κινείται προς τα κάτω, γίνεται και πιο σκληρό. Το διάφραγμα συναντά ποικίλου βαθμού αντίσταση κατά την κίνηση προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να ωθεί τις κατώτερες πλευρές να κινηθούν προς τα άνω και έξω για να σταθεροποιηθεί στη νέα θέση (b).

τερες πλευρές και το στέρνο. Είναι ενεργοί ακόμη και στην ήρεμη αναπνοή, αν και παλαιότερα θεωρούνταν, μαζί με τους στερνοκλειδομαστοειδείς, ως «επικουρικοί εισπνευστικοί μύες», οι οποίοι ενεργοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια της υπερβολικής αναπνευστικής προσπάθειας σε φάση οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας.

Οι μεσοπλεύριοι μύες συνδέουν τις πλευρές, ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του θωρακικού τοίχωματος. Μεταφέρουν, κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της δράσης των άνω ή κάτω πλευρών σε ολόκληρο τον θωρακικό κλωβό. Επίσης, στηρίζουν το θωρακικό τοίχωμα, αντιτεκόμενοι στην υπερέκπτυξη ή σύμπτωση που θα προκαλούνται οι μεταβολές τις υπεζωκοτικής πίεσης κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Αυτή η στηρικτική ιδιότητα μπορεί να υπερκεραστεί σε έναν βαθμό από τις ιδιαιτέρως αυξημένες μεταβολές πίεσης που παρατηρούνται σε περιόδους εντονότερης αναπνευστικής προσπάθειας, με αποτέλεσμα σε ορισμένα λεπτοφυή άτομα να διαπιστώνεται εισολκή μεσοπλεύριων διαστημάτων ως σημείο αναπνευστικής δυσχέρειας.

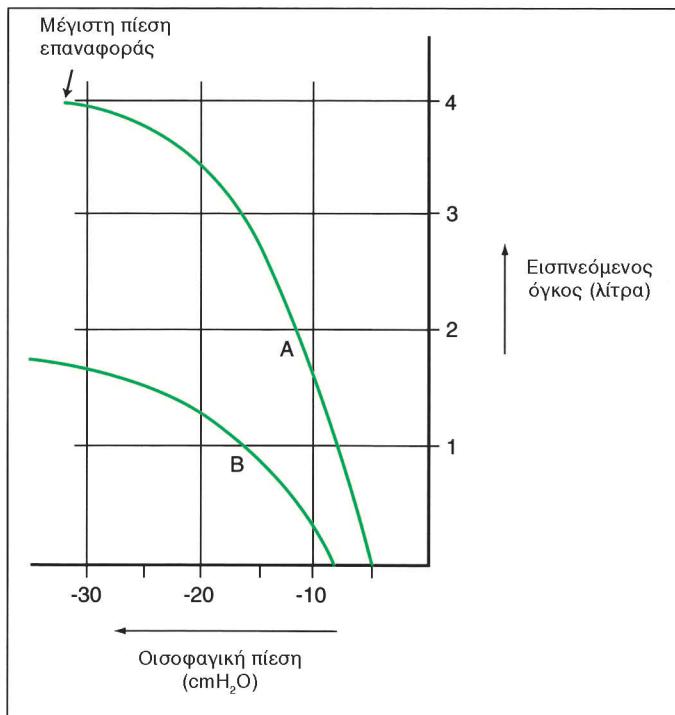
Ενώ η εισπνοή είναι το αποτέλεσμα ενεργητικής μυϊκής προσπάθειας, η ήρεμη εκπνοή αποτελεί μια πιο παθητική διαδικασία. Οι εισπνευστικοί

μύες σταθερά παύουν τη σύσπασή τους και η ελαστικότητα του πνεύμονα οδηγεί τον αναπνευστικό κύκλο πίσω στο αρχικό του σημείο. Η βίαιη εκπνοή, αντιθέτως, είτε είναι ενεργητική είτε σε περίπτωση βήχα, απαιτεί μυϊκή προσπάθεια. Οι μυϊκές ομάδες τις κοιλιας αποτελούν τον βασικότερο παράγοντα.

Η φυσική ελαστική ιδιότητα των πνευμόνων

Ο πνευμονικός ιστός έχει φυσική ελαστικότητα. Αν απομονωνόταν ο πνεύμονας μόνο, θα είχε την τάση να συμπιεστεί σε μέγεθος λίγο μικρότερο από αυτό της γροθιάς. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί ορισμένες φορές ακτινολογικά στα πλαίσια ενός ολικού **πνευμοθώρακα** (Κεφάλαιο 16). Η τάση του πνευμονικού παρεγχύματος να συμπτύσσεται εξισορροπείται από το θωρακικό τοίχωμα που έχει την τάση να εκπτύσσεται από τη συνήθη θέση. Στο τέλος της ήρεμης εισπνοής, οι δύο αντίθετες δυνάμεις ισορροπούν, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται καμία μυϊκή προσπάθεια για τη διατήρηση αυτής της «ουδέτερης» θέσης. Η αναπνοή κοντά σε αυτόν τον πνευμονικό όγκο (φυσιολογική ήρεμη αναπνοή) είναι κατά συνέπεια πολύ αποτελεσματική και μειώνει το έργο της αναπνοής. Δυστυχώς, σε ορισμένα νοσήματα [άσθμα, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ)] η αναπνοή γίνεται υποχρεωτικά σε υψηλότερους όγκους (βλ. Κεφάλαιο 3). Αυτό αυξάνει το έργο της αναπνοής, ένας παράγοντας που συμμετέχει στο αίσθημα της δύσπνοιας. Δοκιμάστε να πάρετε μια βαθιά αναπνοή και να αναπνεύσετε σε αυτόν τον υψηλό όγκο για ένα λεπτό.

Οι αντίθετες δυνάμεις, προερχόμενες από το πνευμονικό παρέγχυμα και το θωρακικό τοίχωμα, δημιουργούν αρνητική πίεση εντός της υπεζωκοτικής κοιλότητας. Αυτή η αρνητική πίεση είναι που διστηρεί τον πνεύμονα σε έκπτυξη. Είναι εμφανές ότι σε υψηλότερους πνευμονικούς όγκους ο πνεύμονας είναι πιο διατεταμένος και απαιτείται πιο αρνητική πίεση για να τον διατηρήσει σε αυτήν την κατάσταση. Η σχέση μεταξύ της υπεζωκοτικής πίεσης (της δύναμης επι του πνεύμονα) και του πνευμονικού όγκου μπορεί να απεικονιστεί γραφικά (Εικόνα 1.5). Ο πνεύμονας, όμως, δεν συμπεριφέρεται σαν τέλειο ελατήριο. Ας θυμηθούμε ότι το μήκος του ελατηρίου είναι ανάλογο της δύναμης που εφαρμόζεται επάνω του (νόμος του Hooke). Στην περίπτωση του πνεύμονα, καθώς αυξάνεται ο όγκος του, απαιτείται διαρκώς μεγαλύτερη δύναμη για να επιτευχθεί η ίδια αύξηση όγκου, δηλαδή ο πνεύμονας γίνεται λιγύτερο «διατατός» καθώς αυξάνεται ο όγκος του. Η **πνευμονική διατασιμότητα** ορίζεται ως «η μεταβολή του πνευμονικού όγκου που προκαλείται ανά μονάδα μεταβολής της διαπνευμονικής (υπεζωκοτικής) πίεσης»



Αντίσταση αεραγωγών

Κατά τη διάρκεια της ήρεμης αναπνοής, οι αναπνευστικοί μύες πρέπει να υπερνικήσουν τις ελαστικές ιδιότητες του πνεύμονα και του θωρακικού τοιχώματος αλλά και τις δυνάμεις τριβής που αντιστέκονται στη ροή αέρα μέσα και έξω από τον πνεύμονα.

Η θέση της μέγιστης αντίστασης

Είναι γενικώς κατανοητό ότι η αντίσταση στη ροή μέσα από έναν σωλήνα αυξάνεται απότομα, όταν η ακτίνα (r) του αυλού μικραίνει (κατά τη γραμμική ροή η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του r^4). Επομένως, μπορεί να προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης προέρχεται από τους μεγάλους αεραγωγούς (λάφυγας, τραχεία και κύριοι βρόγχοι). Αυτό οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι η ταχύτητα ροής είναι πολύ μεγάλη και η ροή πιο στροβιλώδης, αλλά και στη μεγαλύτερη ολική επιφάνεια διατομής στις τελευταίες γενεές βρόγχων οι οποίες ουσιαστικά λειτουργούν σαν να είναι συνδεδεμένες παράλληλα (Εικόνα 1.6). Η κατάσταση μπορεί να είναι διαφορετική σε διάφορα νοσήματα. Το άσθμα και η ΧΑΠ, νοσήματα που επηρεάζουν το εύρος διαμέτρου των αεραγωγών, τείνουν να επηρεάζουν περισσότερο τις μικρότερες γενιές αεραγωγών. Η μειωμένη διάμετρος των μικρών αεραγωγών γίνεται πολύ σημαντική και το σημείο της κύριας θέσης αντίστασης μετακινείται πιο περιφερικά.

Σκεφθείτε το μοντέλο του πνεύμονα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7. Εδώ ο σωλήνας παριστά την οδό ανάμεσα στις γενιές των αεραγωγών από τις κυψελίδες στο στόμα. Οι μικρότεροι αεραγωγοί, που στερούνται χόνδρινου ιστού, απεικονίζονται στο κυματοειδές (ασταθές) τμήμα του σωλήνα (Β). Οι αεραγωγοί είναι «εμβυθισμένοι» στον πνεύμονα και συνδέονται εξωτερικά με τον πνευμονικό ιστό, του οποίου η ελαστική τάση επαναφέρεται και η σύνδεση με το θωρακικό τοίχωμα στηρίζουν τελικά τα ασταθή τμήματα. Αυτή η ελαστική δύναμη απεικονίζεται με τα ελατήρια. Κατά τη διάρκεια της εκπνοής παράγεται θετική πίεση εντός των κυψελίδων (Α). Ο αέρας κινείται από την περιοχή Α διά του αεραγωγού, περνά το σημείο Β όπου η πίεση είναι χαμηλότερη (και πρέπει να είναι, διαφορετικά δεν θα υπήρχε ροή προς αυτή την κατεύθυνση) φτάνοντας στο στόμα όπου η πίεση είναι μηδενική. Η διατοιχωματική διαφορά πίεσης του ασταθούς τμήματος (Α μείον Β) θα μπορούσε να προκαλέσει τη σύμπτωση των αεραγωγών, αλλά προλαμβάνεται από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα ελατήρια.

Ο μηχανισμός περιορισμού της ροής

Κατά τη διάρκεια της εκπνοής το μέγεθος της πτώσης πίεσης μεταξύ του Α και του Β είναι ανάλογο του ρυθμού της ροής αέρα. Είναι σαφές ότι αυξάνοντας την προσπάθεια η ροή θα αυξηθεί... μέχρι ενός ορίου. Σταδιακά, θα επιτευχθεί ένα σημαντικό