

Αερισμός και η Μηχανική της Αναπνοής

ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Μετά την ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου θα πρέπει να είστε σε θέση:

- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο δημιουργείται η ενδοθωρακική πίεση.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο η πίεση κατά μήκος των αεραγωγών συμβάλλει στη διατήρηση της βατότητάς τους.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο οι μεταβολές της κυψελιδικής πίεσης μετακινούν τον αέρα μέσα και έξω από τους πνεύμονες.
- Να εξηγήσετε πώς με τη σπιρομετρία υπολογίζονται οι όγκοι των πνευμόνων και η ροή του αέρα στους ασθενείς.
- Να διακρίνετε τη διαφορά μεταξύ κατά λεπτό αερισμού και κυψελιδικού αερισμού.
- Να περιγράψετε τον τρόπο με τον οποίο το εκπνεόμενο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση του

κυψελιδικού αερισμού (πχ το ποσό του νέου αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες).

- Να διακρίνετε τη διαφορά μεταξύ υπεραερισμού και υπέρπνοιας.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο η ελαστική επαναφορά των πνευμόνων επηρεάζει την ευενδοτότητα των πνευμόνων.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο η περιοχική ευενδοτότητα των πνευμόνων επηρεάζει τη ροή του αέρα στους πνεύμονες.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο ο επιφανειοδραστικός παράγοντας συμβάλλει στη σταθεροποίηση των κυψελίδων στους χαμηλούς όγκους των πνευμόνων.
- Να εξηγήσετε με ποιον τρόπο τα τοιχώματα των αεραγωγών δεν συμπύσσονται κατά τη διάρκεια της βίαιης εκπνοής.
- Να προβλέψετε με ποιον τρόπο οι περιοριστικές και αποφρακτικές διαταραχές των πνευμόνων επηρεάζουν το έργο της αναπνοής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναπνοή είναι βασική για τη ζωή. Κατά τη γέννηση, όταν το νεογνό παίρνει την πρώτη του/της αναπνοή, η εισροή του αέρα κινητοποιεί μία σειρά από γεγονότα που επιτρέπουν στο νεογνό να μεταφερθεί από ένα σύστημα στο οποίο η ζωή του εξαρτάται από τη λειτουργία του πλακούντα σε ένα ανεξάρτητο μέσω της αναπνοής σύστημα. Μία εισπνοή και μία εκπνοή, 12 με 15 φορές κάθε λεπτό, φέρνει, κατά μέσο όρο 7 λίτρα ($\approx 1,85$ γαλόνια) αέρα/λεπτό στους πνεύμονες. Σε κατάσταση ηρεμίας, η ποσότητα αυτή του αέρα είναι επαρκής για να εξασφαλίσει το απαραίτητο οξυγόνο για τον μεταβολισμό τρισεκατομμυρίων κυττάρων. Η αναπνευστική συχνότητα των 12-15 αναπνοών/λεπτό μπορεί να φαίνεται μία απλή διαδικασία, η απλούστευση ωστόσο αυτή είναι παραπλανητική, καθώς η αναπνοή ανταποκρίνεται θεαματικά ακόμα και σε μικρές αλλαγές στη χημεία του αίματος, στη διάθεση, στον βαθμό εγρήγορσης, στη σωματική δραστηριότητα και σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στα προηγούμενα κεφάλαια μάθατε ότι η κύρια λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος είναι η διανομή του αίματος σε όλο το σώμα, προκειμένου να μεταφέρει θρεπτικές ουσίες, οξυγόνο και άλλες χημικές ουσίες στους ιστούς και να απομακρύνει από αυτούς διοξείδιο του άνθρακα και άλλα άχρηστα μεταβολικά προϊόντα. Στα κεφάλαια, στα οποία περιγράφεται η λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος, θα μάθετε ότι το καρδιαγγειακό και το αναπνευστικό

σύστημα είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους και ότι οι πνεύμονες είναι υπεύθυνοι μόνο για τη μεταφορά του οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο αίμα και για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα από το αίμα στην ατμόσφαιρα. Θα μάθετε επίσης ότι οι πνεύμονες είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να μπορούν να αυξήσουν την ανταλλαγή των αερίων περισσότερο από 20 φορές, προκειμένου να απομακρύνουν το διοξείδιο του άνθρακα και να προσφέρουν οξυγόνο στους ιστούς, ικανοποιώντας τις ενεργειακές ανάγκες του οργανισμού. Η διαδικασία της ανταλλαγής των αερίων σπανίως περιορίζει τη σωματική δραστηριότητα. Για παράδειγμα, ένας δρομέας μαραθωνίου που τρέχει σε λιγότερο από 3 ώρες μία απόσταση 26 μιλίων ή κάποιος που διασχίζει τη θάλασσα της Μάγχης (κανάλι της Αγγλίας) σε χρόνο ρεκόρ σπάνια περιορίζει τη δραστηριότητά του από την ποσότητα του οξυγόνου που προσλαμβάνεται από τους πνεύμονες ή από το διοξείδιο του άνθρακα που αποβάλλεται από αυτούς. Αυτά τα παραδείγματα ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεν υπερτονίζουν μόνο τη μεγάλη λειτουργική δυνατότητα των πνευμόνων, αλλά επιπλέον επισημαίνουν τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει η αναπνοή στην απίστευτη προσαρμοστικότητα μας στο περιβάλλον. Τέλος, θα μάθετε ότι η φυσιολογία του αναπνευστικού παίζει σημαντικό ρόλο στην ιατρική εξαιτίας της επίπτωσης που έχουν πολλές αναπνευστικές παθήσεις (π.χ κυστική ίνωση, άσθμα, χρόνιες αποφρακτικές παθήσεις των πνευμόνων, πνευμονική ίνωση, πνευμονική υπέρταση, πνευμονικό οίδημα, άπνοια ύπνου και πνευμονία) στην υγεία

του ανθρώπου. Κατά συνέπεια, η αναπνευστική φυσιολογία επηρεάζει πολλές ειδικότητες της κλινικής ιατρικής συμπεριλαμβανομένου της παιδιατρικής, της παθολογίας, της ακτινολογίας, της χειρουργικής, της ωτορινολαρυγγολογίας, της μαιευτικής/γυναικολογίας και της γηριατρικής.

Η αναπνοή περιλαμβάνει δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, είναι γνωστό ως ανταλλαγή αερίων, και το δεύτερο ως κυτταρική αναπνοή. Η ανταλλαγή των αερίων περιλαμβάνει τη μεταφορά του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ των πνευμόνων και της ατμόσφαιρας. Το δεύτερο στάδιο, η κυτταρική αναπνοή, ολοκληρώνεται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο αφορά στην ανταλλαγή του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα σε κυτταρικό επίπεδο. Το δεύτερο επίπεδο λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό των κυττάρων και περιλαμβάνει, μία σειρά πολύπλοκων μεταβολικών αντιδράσεων κατά τις οποίες το οξυγόνο χρησιμοποιείται για τη διάσπαση των ενεργειακών μορίων και την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα και ενέργειας. Ας ληφθεί υπόψη ότι η παρουσία του οξυγόνου είναι απαραίτητη στο τελικό στάδιο της κυτταρικής αναπνοής για να χρησιμεύσει ως αποδέκτης ηλεκτρονίων σε μία διεργασία κατά την οποία τα κύτταρα αποκτούν ενέργεια.

Οι λειτουργίες του αναπνευστικού συστήματος μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες: αερισμός και μηχανική της αναπνοής, μεταφορά και διακίνηση των αερίων, ροή του αίματος στους πνεύμονες και έλεγχος της αναπνοής. Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται συζήτηση για τον αερισμό, τη μηχανική και το έργο της αναπνοής. Στο Κεφάλαιο 19 γίνεται λόγος για την πρόσληψη και τη μεταφορά των αερίων. Το Κεφάλαιο 20 αφορά στην πνευμονική κυκλοφορία και τη σχέση μεταξύ της ροής του αέρα και της ροής του αίματος στους πνεύμονες. Τέλος στο Κεφάλαιο 21 γίνεται λόγος για τους βασικούς ρυθμούς της αναπνοής, τα αντανάκλαστικά της αναπνοής, τον ολοκληρωμένο (integrated) έλεγχο της αναπνοής και τον έλεγχο της αναπνοής σε ασυνήθη περιβάλλοντα.

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΝΕΥΜΟΝΩΝ

Παρόλο που οι πνεύμονες αποτελούν ένα σαφώς βασικό στοιχείο της διεργασίας της αναπνοής, δεν είναι το μόνο. Οι πνεύμονες από μόνοι τους διαδραματίζουν έναν παθητικό ρόλο στην εισροή και εκροή αέρα από αυτούς, όπως επίσης και στην ανταλλαγή του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και του αίματος. Για παράδειγμα, χωρίς τους αναπνευστικούς μύς και το αεροστεγές θωρακικό τοίχωμα, τα οποία δημιουργούν συνθήκες αρνητικής πίεσης μέσα στον θώρακα, οι πνεύμονες θα ήταν μη λειτουργικοί στη διαδικασία ανταλλαγής των αερίων. Επιπλέον, χωρίς την κυκλοφορία του αί-

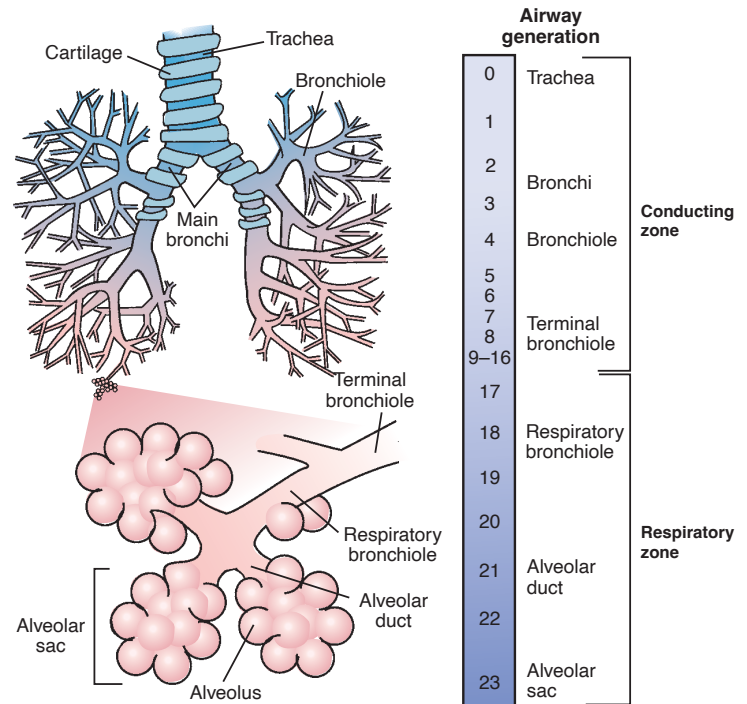
ματος στους πνεύμονες και τη διασύνδεση της ροής του αέρα με τη ροή του αίματος, δε θα υπήρχε ουσιαστικά ανταλλαγή αερίων.

Οι διαδοχικές διακλαδώσεις των αεροφόρων οδών αυξάνουν τη συνολική επιφάνεια διατομής για την ανταλλαγή των αερίων

Τα ανθρώπινα όργανα ανταλλαγής των αερίων περιλαμβάνουν δύο πνεύμονες, κάθε ένας από τους οποίους διαιρείται σε λοβούς. Ο κάθε πνεύμονας αποτελείται από δύο δομές με δενδροειδή διάταξη, το αγγειακό δέντρο και το δέντρο των αεραγωγών, τα οποία περικλείονται από συνδετικό ιστό που εμφανίζει μεγάλη ελαστικότητα. Το αγγειακό δέντρο περιλαμβάνει αρτηρίες και φλέβες που συνδέονται με τριχοειδή (βλέπε Κεφάλαιο 20). Το δέντρο των αεραγωγών περιλαμβάνει μία σειρά από κενούς διακλαδιζόμενους σωλήνες, των οποίων η διάμετρος μειώνεται σε κάθε διακλάδωση (Εικ. 18.1). Ο κύριος αεραγωγός, η τραχεία, διακλαδίζεται σε δύο βρόγχους. Κάθε βρόγχος εισέρχεται μέσα στον πνεύμονα και διακλαδίζεται πολλές φορές σε διαδοχικά μικρότερους βρόγχους, οι οποίοι ακολούθως σχηματίζουν τα βρογχιόλια.

Ένα λειτουργικό μοντέλο του δέντρου των αεραγωγών αποτελείται από δύο ζώνες και παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.1. Η τραχεία και οι πρώτες 16 διακλαδώσεις των αεραγωγών αποτελούν τη ζώνη αγωγής. Η τραχεία, οι βρόγχοι και τα βρογχιόλια της ζώνης αγωγής έχουν τρεις σημαντικές λειτουργίες: (1) να θερμαίνουν και να υγραποποιούν τον εισπνεόμενο αέρα, (2) να κατανέμουν τον αέρα ομοιογενώς στα βαθύτερα τμήματα των πνευμόνων και (3) να λειτουργούν ως τμήμα του αμυντικού συστήματος του οργανισμού (απομάκρυνση σκόνης, βακτηρίων και τοξικών αερίων από τους πνεύμονες). Οι πρώτες τέσσερις υποδιαίρεσεις της ζώνης αγωγής υπόκεινται σε αρνητικές και θετικές μεταβολές της πίεσης και περιέχουν σημαντική ποσότητα χόνδρου, ώστε να αποτρέπεται η σύγκλιση του αεραγωγού. Στην τραχεία και στους κύριους βρόγχους τα χόνδρινα στοιχεία σχηματίζουν δακτύλιους σχήματος U. Στα κατώτερα τμήματα, στους λοβιακούς και τμηματικούς βρόγχους, οι χόνδρινοι δακτύλιοι αντικαθίστανται από μικρές πλάκες χόνδρου. Στα βρογχιόλια τα χόνδρινα τμήματα εξαφανίζονται. Οι μικρότερες αεροφόρες οδοί στη ζώνη αγωγής είναι τα τελικά βρογχιόλια. Τα βρογχιόλια συνδέονται με ελαστικό ιστό στο πνευμονικό παρέγχυμα και η ελαστικότητα του πνευμονικού ιστού συμβάλλει στη διατήρηση αυτών των αεροφόρων οδών ανοικτών. Η ζώνη αγωγής έχει τη δική της ξεχωριστή κυκλοφορία, τη βρογχική κυκλοφορία, που ξεκινάει από την κατιούσα αορτή και εκβάλλει στις πνευμονικές φλέβες. Στη ζώνη αυτή δε λαμβάνει χώρα καμιά ανταλλαγή αερίων.

Οι τελευταίες επτά υποδιαίρεσεις αποτελούν την



Εικόνα 181. Οι αεροφόρες οδοί διακλαδίζονται συνεχώς. Οι αεροφόρες οδοί περιλαμβάνουν μια σειρά από συνεχώς διακλαδίζόμενους κοίλους αγωγούς, το μήκος και η διάμετρος των οποίων μειώνονται και ο αριθμός τους αυξάνεται, καθώς κατέρχονται στα κατώτερα τμήματα των πνευμόνων. Οι αεροφόρες οδοί διαχωρίζονται σε δύο λειτουργικές ζώνες. Οι πρώτες 16 διακλαδώσεις μεταφέρουν τον αέρα στα κατώτερα τμήματα των πνευμόνων και αποτελούν τη ζώνη αγωγής. Οι τελευταίες επτά διακλαδώσεις συμμετέχουν στην ανταλλαγή των αερίων και αποτελούν την αναπνευστική ζώνη.

αναπνευστική ζώνη, την περιοχή ανταλλαγής των αερίων. Η ανταλλαγή των αερίων επιτυγχάνεται μέσα σε ένα μωσαϊκό εκατομμυρίων εξειδικευμένων κυττάρων που σχηματίζουν σάκους αέρα με λεπτό τοίχωμα, που καλούνται κυψελίδες. Όπως και η ζώνη αγωγής, έτσι και η αναπνευστική ζώνη έχει τη δική της ξεχωριστή κυκλοφορία, την πνευμονική κυκλοφορία. Οι πνεύμονες διαθέτουν το πιο εκτεταμένο δίκτυο τριχοειδών σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο όργανο του ανθρώπινου σώματος. Τα πνευμονικά τριχοειδή καταλαμβάνουν περίπου το 70% με 80% της επιφάνειας των κυψελίδων. Η πνευμονική κυκλοφορία δέχεται όλη την καρδιακή παροχή, με αποτέλεσμα η ροή του αίματος να είναι αυξημένη. Ένας μεμονωμένος κλάδος πνευμονικής αρτηρίας ακολουθεί έναν αεραγωγό και διακλαδίζεται μαζί του. Τα ερυθρά αιμοσφαίρια μπορούν να διασχίσουν ένα πνευμονικό τριχοειδές σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο.

Ο σχηματισμός εξωθυλάκων από τους μικρούς αεραγωγούς, ώστε να σχηματίσουν τις κυψελίδες, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του εμβαδού της εσωτερικής επιφάνειας (βλ. Εικ. 18.1). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα δίκτυο τριχοειδών περιβάλλει κάθε κυψελίδα και φέρνει το αίμα πολύ κοντά, σε προσέγγιση με τον αέρα που βρίσκεται μέσα στην κυψελίδα. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα μετακινούνται διαμέσου του λεπτού τοιχώματος της κυψελίδας μέσω διάχυσης. Οι πνεύμονες του ενήλικα περιέχουν 300 με 500 εκατομμύρια κυψελίδες και η εσωτερική τους επιφάνεια είναι περίπου 75 m², δηλαδή περίπου όσο το μέγεθος ενός γηπέδου τένις. Η επιφάνεια

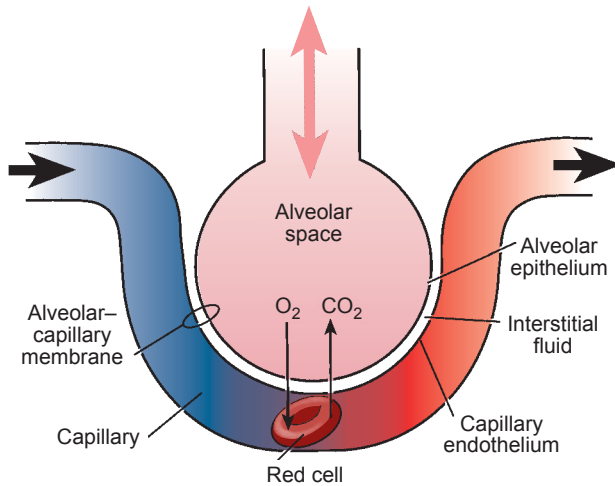
αυτή αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες βιολογικές μεμβράνες του σώματος. Κατά την ανάπτυξη, η επιφάνεια των κυψελίδων αυξάνεται με δύο τρόπους: σε αριθμό και σε διάμετρο κυψελίδων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 18.1. Ωστόσο, μετά την εφηβεία, οι κυψελίδες αυξάνονται μόνο σε αριθμό και αν καταστραφούν, έχουν περιορισμένη ικανότητα αναγέννησης. Για παράδειγμα, ο καπνός του τσιγάρου μπορεί να καταστρέψει κυψελίδες και να οδηγήσει σε ταυτόχρονη μείωση της κυψελιδικής επιφάνειας για την ανταλλαγή των αερίων.

Το αγγειακό και το βρογχικό δέντρο συνενώνονται για να σχηματίσουν μία επιφάνεια αίματος-αερίων για τη διάχυση των αερίων.

Στην αναπνευστική ζώνη, μία ομάδα κυψελιδικών πόρων και οι κυψελίδες τους συνδέονται με τα πνευ-

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.1. Μεταβολές του Αριθμού και της Επιφάνειας των Κυψελίδων του Ανθρώπινου Πνεύμονα σε Σχέση με την Ηλικία

Ηλικία	Αριθμός κυψελίδων (10 ⁶)	Κυψελιδική επιφάνεια (m ²)	Επιφάνεια του δέρματος (m ²)
Γέννηση	24	2,8	0,2
8 ετών	300	32,0	0,9



Εικόνα 18.2 Το δίκτυο αίματος-αερίου είναι το σημείο της ανταλλαγής των αερίων. Τα πνευμονικά τριχοειδή και οι κυψελίδες σχηματίζουν ένα δίκτυο αίματος-αερίων. Τα παχιά βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση της αιματικής ροής και του αερισμού, και τα λεπτά βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση διάχυσης για το O₂ και το CO₂. Η κυψελιδο-τριχοειδική μεμβράνη είναι λεπτή (-0,5 μm) και έτσι, η απόσταση διάχυσης των αερίων είναι μικρή.

αναπνευστική μονάδα. Υπάρχουν περίπου 60.000 τέτοιες μονάδες και στους δύο πνεύμονες. Η κυψελιδο-τριχοειδική μεμβράνη των μονάδων αυτών σχηματίζει μία επιφάνεια επαφής αίματος-αερίων που συχνά ονομάζεται κυψελιδο-τριχοειδικός φραγμός και ο οποίος διαχωρίζει το αίμα στα πνευμονικά τριχοειδή από τον αέρα στις κυψελίδες (Εικ. 18.2). Η κυψελιδική μεμβράνη διαχωρίζεται από την τριχοειδική μεμβράνη από μία στενή ζώνη μεσοκυττάρου χώρου.

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός της δομής αυτής παρέχει μία μεγάλη επιφάνεια για τη διάχυση του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα. Η κυψελιδο-τριχοειδική μεμβράνη είναι εξαιρετικά λεπτή (σε ορισμένες περιοχές λιγότερο από 0,5 μm) και αποτελείται από κυψελιδικό επιθήλιο, διάμεσο υγρό και το επιθήλιο του τριχοειδούς. Ο αέρας μεταφέρεται στη μία πλευρά της μεμβράνης μέσω του αερισμού-της μετακίνησης του αέρα από και προς τις κυψελίδες. Το αίμα μεταφέρεται προς την άλλη πλευρά της μεμβράνης με την πνευμονική κυκλοφορία. Καθώς το αίμα διαρρέει τα κυψελιδικά τριχοειδή, το οξυγόνο προσλαμβάνεται και το διοξείδιο του άνθρακα αποβάλλεται μέσω της κυψελιδο-τριχοειδικής μεμβράνης με διάχυση.

ΟΙ ΠΝΕΥΜΟΝΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ ΚΑΙ Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΝΟΗ

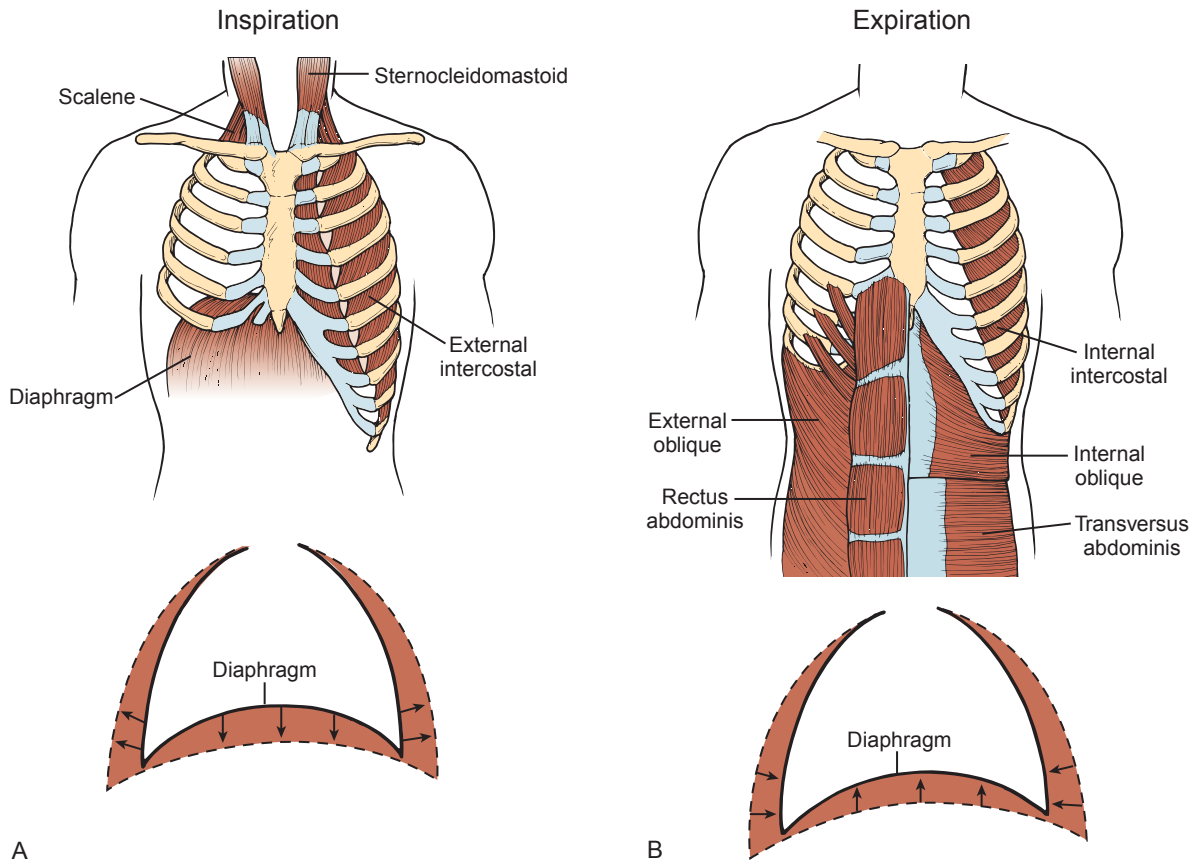
Η μετακίνηση του αέρα εντός και εκτός των πνευμόνων απαιτεί την παρουσία μίας αεροστεγούς θωρακικής κοιλότητας και μίας ομάδας αναπνευστικών μυών. Στους αναπνευστικούς μυς περιλαμβάνονται το διάφραγμα, οι μεσοπλεύριοι μύες, οι σκαλννοί μύες

του αυχένα και οι στερνοκλειδομαστοειδείς μύες, οι οποίοι καταφύονται στην κορυφή του στέρνου. Οι πνεύμονες βρίσκονται σε μία αεροστεγή θωρακική κοιλότητα και διαχωρίζονται από την κοιλιακή κοιλότητα με έναν μεγάλο σκελετικό μυ σε σχήμα θόλου, το διάφραγμα (Εικ. 18.3). Η θωρακική κοιλότητα σχηματίζεται από 12 ζεύγη πλευρών, το στέρνο και τους έσω και έξω μεσοπλεύριους μύς, που βρίσκονται μεταξύ των πλευρών. Ο θωρακικός κλωβός συνδέεται με τη σπονδυλική στήλη, έτσι ώστε να μπορεί να ανυψώνεται και να κατέρχεται κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Ο χώρος μεταξύ των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος είναι ο ενδοθωρακική ή υπεζωκοτική κοιλότητα, που περιέχει ένα λεπτό στρώμα υγρού (περίπου 10 μm πάχος), το οποίο λειτουργεί εν μέρει ως «γλιστρών» έναντι του θωρακικού τοιχώματος.

Το διάφραγμα είναι ο κύριος μύς της αναπνοής και συμβάλλει στην έκπτυξη της θωρακικής κοιλότητας

Η αναπνοή επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό από το διάφραγμα που βρίσκεται στη βάση του θώρακα. Η σύσπαση του διαφράγματος αυξάνει το μέγεθος της κοιλότητας με ταυτόχρονη αύξηση του όγκου της. Η διεύρυνση της θωρακικής κοιλότητας επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. Η σύσπαση του διαφράγματος (το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τις κατώτερες πλευρές και το στέρνο) ωθεί το περιεχόμενο της κοιλιακής χώρας προς τα κάτω, επιμηκύνοντας τη θωρακική κοιλότητα σε κατακόρυφο επίπεδο. Δεύτερον, η σύσπαση των έξω μεσοπλεύριων μυών προκαλεί την ανύψωση των πλευρών προς τα άνω και έξω, διευρύνοντας περαιτέρω τη θωρακική κοιλότητα (βλ. Εικ. 18.3).

Η αύξηση του όγκου της θωρακικής κοιλότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης στον χώρο μεταξύ του θωρακικού τοιχώματος και των πνευμόνων. Η μείωση αυτή της πίεσης προκαλεί την έκπτυξη των πνευμόνων και αυτό με τη σειρά του την εμφάνιση μίας αρνητικής διαφοράς πίεσης μεταξύ του στόματος και των κυψελίδων που είναι υπεύθυνη για τη μετακίνηση του αέρα προς τις κυψελίδες. Η σύσπαση του διαφράγματος και των μεσοπλεύριων μυών παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική μετακίνηση του αέρα προς το εσωτερικό των πνευμόνων. Όσο πιο έντονη είναι η σύσπαση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η έκπτυξη των πνευμόνων. Κατά την έντονη εισπνοή, κατά την οποία μία μεγάλη ποσότητα αέρα εισέρχεται στους πνεύμονες, απαιτείται και η συμμετοχή επικουρικών μυών. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται οι σκαλννοί και οι στερνοκλειδομαστοειδείς μύες, η σύσπαση των οποίων προκαλεί την ανύψωση του ανώτερου τμήματος του θωρακικού κλωβού, ώστε να αυξηθεί περαιτέρω ο όγκος του θώρακα. Η λειτουργία του διαφράγματος παρεμποδίζεται στην κύηση, από την παχυσαρκία και από τον πολύ στενό ρουχισμό



Εικόνα 18.3 Οι μεταβολές των θωρακικών όγκων κατά τη διάρκεια του αναπνευστικού κύκλου. Οι κινήσεις του διαφράγματος και οι μεταβολές του όγκου του θωρακικού κλωβού επιτρέπουν στους πνεύμονες να εκπνυχθούν κατά τη διάρκεια της εισπνοής και να συμπυκνωθούν κατά την εκπνοή. (Α) Σε ηρεμία, κατά τη διάρκεια της εισπνοής, το διάφραγμα συσπάται και ωθεί το περιεχόμενο της κοιλιάς προς τα κάτω. Η προς τα κάτω κίνηση ωθεί επίσης τον θωρακικό κλωβό να εκπνυχθεί προς τα έξω. Στην έντονη και βαθιά αναπνοή, οι επικουρικοί μύες (οι έξω μεσοπλευρικοί και οι στερνοκλειδομαστοειδείς) συσπώνται επίσης και ωθούν τον θωρακικό κλωβό προς τα πάνω και έξω. (Β) Η διεργασία της εκπνοής είναι παθητική κάτω από συνθήκες ηρεμίας. Η χάλαση του διαφράγματος επιτρέπει στο ίδιο να επιστρέψει στην αρχική του μορφή, "δίκηνη θόλου", ενώ ταυτόχρονα ο θωρακικός κλωβός κατέρχεται. Κατά τη διάρκεια της βίαιης εκπνοής, ωστόσο, οι έξω μεσοπλευρικοί μύες συσπώνονται και έλκουν τον θωρακικό κλωβό προς τα κάτω και μέσα. Οι κοιλιακοί μύες συσπώνονται επίσης και βοηθούν στην προς τα κάτω κίνηση του θωρακικού κλωβού, μειώνοντας έτσι τον όγκο του θώρακα.

γύρω από το κοιλιακό τοίχωμα. Βλάβη του φρενικού νεύρου (το διάφραγμα νευρώνεται από τα δύο φρενικά νεύρα, ένα σε κάθε ήμισυ του διαφράγματος) μπορεί να οδηγήσει σε παράλυση του διαφράγματος. Όταν καταστραφεί το φρενικό νεύρο, το αντίστοιχο τμήμα του διαφράγματος, που νευρώνεται από αυτό, μετακινείται προς τα πάνω παρά προς τα κάτω κατά τη διάρκεια της εισπνοής.

Η διαδικασία της εκπνοής κατά την ηρεμία είναι περισσότερο απλή. Η εκπνοή είναι παθητική και οι αναπνευστικοί μύες περνάνε σε φάση χάλασης, γεγονός που προκαλεί τη σύμπτωση των πνευμόνων και την ανάπτυξη μίας θετικής διαφοράς πίεσης μεταξύ των κυψελίδων και του στόματος. Ωστόσο, κατά την άσκηση ή σε βίαιη αναπνοή, οι εκπνευστικοί μύες ενεργοποιούνται. Αυτοί οι μύες περιλαμβάνουν όχι μόνο το διάφραγμα, αλλά επίσης και εκείνους του κοιλιακού τοιχώματος και τους έξω μεσοπλευρικούς (Εικ. 18.3B). Η σύσπαση των μυών του κοιλιακού τοιχώματος προκαλεί την ανύψωση του διαφράγμα-

τος προς τον θώρακα, ενώ η σύσπαση των έξω μεσοπλευρικών μυών έχει ως αποτέλεσμα την έλξη των πλευρών προς τα κάτω, μειώνοντας έτσι τον όγκο του θώρακα. Αυτοί οι επικουρικοί αναπνευστικοί μύες είναι, επίσης, απαραίτητοι για λειτουργίες, όπως ο βήχας, η έντονη σωματική καταπόνηση, ο έμετος και η αφόδευση. Ο ρόλος των εκπνευστικών μυών είναι πολύ σημαντικός στο τρέξιμο αντοχής και αυτός είναι ένας από τους λόγους που οι δρομείς μεγάλων αποστάσεων, συχνά εκτελούν ασκήσεις ενδυνάμωσης των κοιλιακών και θωρακικών μυών, ως μέρος του προγράμματος εξάσκησης.

Η διαφορά στις μερικές πιέσεις των αερίων προωθεί τη διάχυση του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα διαμέσου της κυψελιδο-τριχοειδικής μεμβράνης

Μέχρι τώρα, ο αερισμός έχει εξεταστεί στο επίπεδο του αναπνευστικού συστήματος. Έχουν συζητηθεί τα στοιχεία που συμμετέχουν στη διαδικασία του αε-

ρισμού, ορισμένες ιδιότητες του πνεύμονα και του θωρακικού τοιχώματος, καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δομών κατά τη φάση της εισπνοής και εκπνοής. Μία πιο πλήρης κατανόηση ωστόσο, του τρόπου με τον οποίο οι πνεύμονες εκπνύσσονται/συμπνύσσονται και ο αέρας εισπνέεται/εκπνέεται, απαιτεί τη γνώση των μεταβολών της πίεσης επικρατούν στο αναπνευστικό σύστημα. Παρατίθεται μια σύντομη ανασκόπηση των νόμων που διέπουν τα αέρια πριν αναλυθεί η διαδικασία με την οποία οι μεταβολές των πιέσεων της θωρακικής κοιλότητας και των πνευμόνων μεταβάλλουν τους όγκους των πνευμόνων και τη μετακίνηση του αέρα.

Η ατμόσφαιρα, ο αέρας μέσα στον οποίο αναπνέουμε και ζούμε, ασκεί μία πίεση (P), γνωστή ως βαρομετρική πίεση (PB). Στο επίπεδο της θάλασσας, η PB ισούται με 760 mm Hg. Η βαρομετρική πίεση αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους μερικών πιέσεων των διαφόρων αερίων της ατμόσφαιρας. Η σχέση μεταξύ της συνολικής πίεσης που ασκείται από ένα μείγμα αερίων και της μερικής πίεσης του κάθε αερίου περιγράφεται με το νόμο του Dalton, που δηλώνει ότι η ολική βαρομετρική πίεση (PB) ισούται με το άθροισμα των μερικών πιέσεων των ξεχωριστών αερίων. Ο νόμος του Dalton μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$PB = PN_2 + PO_2 + PH_2O + PCO_2 \quad (1)$$

όπου η PN_2 ισούται με τη μερική πίεση του αζώτου, η PO_2 ισούται με τη μερική πίεση του οξυγόνου, η PH_2O ισούται με τη μερική πίεση των υδρατμών και η PCO_2 ισούται με τη μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα. Μερική πίεση είναι η πίεση που ασκεί ένα αέριο από μόνο του, ενώ αποτελεί μέρος ενός αερίου μείγματος. Ο αέρας που αναπνέουμε είναι ένα μείγμα αερίων που αποτελείται κυρίως από άζωτο, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Για παράδειγμα, ο αέρας που φουσάμε μέσα σ' ένα μπαλόνι δημιουργεί μία πίεση η οποία αναγκάζει το μπαλόνι να φουσκώσει. Η ολική πίεση που αναπτύσσεται στο

εσωτερικό του είναι το άθροισμα των μεμονωμένων μερικών πιέσεων του αζώτου, του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα. Η μερική πίεση, λοιπόν, ενός αερίου είναι η πίεση που θα ασκούσε κάθε αέριο από μόνο του. Για να υπολογίσουμε τη μερική πίεση ενός αερίου απαιτείται η αναδιαμόρφωση του νόμου του Dalton. Για παράδειγμα, η μερική πίεση του οξυγόνου (PO_2), σύμφωνα με το νόμο του Dalton, ορίζεται ως $PO_2 = Pb \times FO_2$, όπου FO_2 είναι η κλασματική συγκέντρωση του οξυγόνου. Με δεδομένο ότι ο αέρας περιέχει οξυγόνο σε συγκέντρωση 21%, η μερική πίεση που ασκείται από το οξυγόνο (PO_2), στο επίπεδο της θάλασσας, είναι 160 mm Hg (760×0.21). Αν απομακρυνθούν όλα τα υπόλοιπα αέρια από το μπαλόνι, το οξυγόνο που παραμένει εκεί, θα συνεχίζει να ασκεί την ίδια πίεση (160mmHg). Η μερική πίεση ενός αερίου πολλές φορές αναφέρεται ως τάση του αερίου και ουσιαστικά οι όροι μερική πίεση και τάση αερίου χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα.

Στο επίπεδο της θάλασσας, η τιμή της PO_2 στο εσωτερικό των αεραγωγών είναι μικρότερη από την τιμή της PO_2 στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όταν εισπνέεται ο αέρας, θερμαίνεται, υγροποιείται και κορέννυται με υδρατμούς, σε θερμοκρασία 37°C. Οι υδρατμοί ασκούν μερική πίεση που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας σώματος, όχι της βαρομετρικής πίεσης. Στους 37°C, οι υδρατμοί ασκούν μερική πίεση (PH_2O) 47 mm Hg. Η μερική πίεση των υδρατμών δεν μεταβάλλει το ποσοστό του οξυγόνου ή του αζώτου σε ένα ξηρό μείγμα αερίων, ωστόσο, οι υδρατμοί ελαττώνουν τη μερική πίεση του οξυγόνου μέσα στους πνεύμονες. Οι μερικές πιέσεις των αερίων μέσα στους πνεύμονες υπολογίζονται με βάση την πίεση σε ένα ξηρό μείγμα αερίων, έτσι ώστε η πίεση των υδρατμών να αφαιρείται όταν πρέπει να καθοριστεί η μερική πίεση ενός αερίου. Η πίεση του ξηρού αέρα στην τραχεία είναι $760 - 47 = 713$ mm Hg, και οι μεμονωμένες μερικές πιέσεις του O_2 και του N_2 είναι

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.2. Μερικές Πιέσεις και Συγκεντρώσεις των Αναπνευστικών Αερίων στο Επίπεδο της Θάλασσας (PB = 760 mm Hg)

Αέριο	Ξηρός Αέρας Περιβάλλοντος		Υγροποιημένος Αέρας στην Τραχεία		Κυψελιδικός Αέρας		Αρτηριακό Αίμα Συστηματικής κυκλοφορίας	Μεικτό Φλεβικό Αίμα
	(mm Hg)	(%)	(mm Hg)	(%)	(mm Hg)	(%)		
O_2	160	21	150	20	102	14	95	40
CO_2	0	0	0	0	40	5	40	46
Υδρατμοί	0	0	47	6	47	6	47	47
N_2	600	79	563	74	571	75 ^a	571	571
Σύνολο	760	100	760	100	760	100	760	704 ^b

^a Κυψελιδική PN_2 αυξημένη κατά %1 διότι $R < 1$.

^b Η συνολική πίεση στο φλεβικό αίμα είναι μειωμένη γιατί η PO_2 ελαττώνεται περισσότερο από ό,τι αυξάνεται η PCO_2 .

$$PO_2 = 0,21 \times (760 - 47) = 150\text{mmHg} \quad (2)$$

και

$$PN_2 = 0,79 \times (760 - 47) = 563 \text{ mm Hg} \quad (3)$$

Στον Πίνακα 18.2 αναγράφονται οι φυσιολογικές μερικές πιέσεις των αναπνευστικών αερίων σε διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος. Κατά τον υπολογισμό των μερικών πιέσεων των αερίων στον πνεύμονα, είναι καλό να θυμάται κάποιος πως όταν ο αέρας φτάσει στη μύτη, πάντα πρέπει να αφαιρείται η πίεση των υδρατμών όταν μετατρέπεται το κλάσμα του αερίου σε μερική πίεση. Στην εικόνα 18.2 απεικονίζεται μπλε το μεικτό φλεβικό αίμα (πχ αίμα που προέρχεται από τα διάφορα όργανα) και κόκκινο το αίμα που εγκαταλείπει τα πνευμονικά τριχοειδή. Η αλλαγή του χρώματος οφείλεται στην προσθήκη οξυγόνου στην αιμοσφαιρίνη. Στον πίνακα 18.2 αναγράφονται οι μερικές πιέσεις των αερίων κατά την ανταλλαγή τους στους πνεύμονες, σε συνθήκες ηρεμίας.

Στη φυσιολογία του αναπνευστικού συστήματος, οι πιέσεις μετρώνται σε mm Hg και εκατοστά ύδατος (cm H₂O). Οι μερικές πιέσεις των αερίων μετρώνται σε mm Hg, αλλά η ροή του αέρα και οι αναπνευστικές πιέσεις είναι τόσο μικρές που μετρώνται σε cm H₂O. Μια πίεση της τάξης του 1 cm H₂O ισούται με 0,74 mm Hg (ή 1 mm Hg = 1,36 cm H₂O). Οι μεταβολές στις πιέσεις του αναπνευστικού συστήματος, κατά τη διάρκεια της αναπνοής, εκφράζονται συχνά ως σχετική πίεση, μια πίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Για παράδειγμα, η πίεση μέσα στις κυψελίδες μπορεί να είναι -2 cm H₂O κατά τη διάρκεια της εισπνοής. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η πίεση είναι υπο-ατμοσφαιρική, δηλαδή -2 cm κάτω από την PB. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της εκπνοής, η πίεση στο εσωτερικό των κυψελίδων μπορεί να είναι +3 cm H₂O. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση είναι 3 cm H₂O πάνω από την PB. Μια θετική ή αρνητική πίεση δηλώνει ότι η πίεση εκφράζεται σε σχέση με την ατμοσφαιρική και είναι αντίστοιχα, πάνω ή κάτω από την PB. Όταν χρησιμοποιούνται οι σχετικές πιέσεις, είναι σημαντικό να θυμάται κανείς ότι η PB θεωρείται μηδέν. Αν η πίεση στους αεραγωγούς είναι μηδέν, τότε η πίεση στο εσωτερικό των αεραγωγών ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση. Εκτός αν διευκρινίζεται διαφορετικά, οι πιέσεις της αναπνοής εκφράζονται ως σχετικές πιέσεις και οι μονάδες είναι cm H₂O. Μια λίστα από σύμβολα και συντμήσεις που χρησιμοποιούνται στη φυσιολογία του αναπνευστικού αναγράφονται στον Πίνακα 18.3.

Οι μεταβολές της ενδοθωρακικής πίεσης είναι σημαντικές για την έκπτυξη και τη σύμπτυξη των πνευμόνων

Καθώς η θωρακική κοιλότητα είναι αεροστεγής, μια αύξηση του όγκου του θώρακα προκαλεί πτώ-

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.3 Σύμβολα και Ορολογία που Χρησιμοποιείται στη Φυσιολογία του Αναπνευστικού	
Σύμβολο	Όρος
<i>Πρωτεύοντα</i>	
C	Ευενδοτότητα
D	Διάχυση
F	Κλασματική συγκέντρωση αερίου
f	Συχνότητα
P	Πίεση ή μερική πίεση
.Q	Όγκος αίματος ανά μονάδα χρόνου (αιματική ροή ή άρδευση)
R	Αντίσταση
S	Κορεσμός
T	Χρόνος
V	Όγκος αερίου
.V	Όγκος αερίου ανά μονάδα χρόνου (ροή αέρα)
<i>Δευτερεύοντα</i>	
A	Κυψελιδικός
a	Αρτηριακός
aw	Αεραγωγός
B	Βαρομετρικός
D	Νεκρός χώρος
E	Εκπνευστικός
i	ΕΙΣΠΝΕΥΤΙΚΟΣ
L	Πνεύμονας
c'	Πνευμονικά τελικά τριχοειδή
pl	Ενδοθωρακικός
pw	Πνευμονική πίεση ενσφήνωσης (Pulmonary wedge)
s	Παράκαμψη (Shunt)
T	Αναπνεόμενος αέρας
tp	Διαπνευμονική
v	Φλεβικός
<i>Παραδείγματα συνδυασμών</i>	
Cl	Ευενδοτότητα πνευμόνων
Dl _{CO}	Ικανότητα διάχυσης των πνευμόνων για το διοξείδιο του άνθρακα
FiO ₂	Κλασματική συγκέντρωση εισπνεόμενου O ₂
Pb	ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ
P _{CO₂}	Μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.3 (συνέχεια)

P_A	Κυψελιδική πίεση
P_{O_2}	Μερική πίεση οξυγόνου
P_{ACO_2}	Μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα σε αρτηριακό αίμα
P_{ACO_2}	Μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα σε κυψελίδες
P_{iO_2}	Μερική πίεση του εισπνεόμενου οξυγόνου
$P_{ECO_{2w}}$	Μερική πίεση CO_2 στον εκπνεόμενο αέρα
$P_{aO_2} - P_{aO_2}$	Κυψελιδο-αρτηριακή διαφορά στη μερική πίεση του O_2
P_{pl}	Ενδοθωρακική πίεση
R_{aw}	Αντίσταση αεροφόρων οδών
S_{aO_2}	Κορεσμός της αιμοσφαιρίνης σε O_2 στο αρτηριακό αίμα
T_i	Χρόνος εισπνοής
T_E	Χρόνος εκπνοής
\dot{V}_A	Κυψελιδικός αερισμός
\dot{V}_A / \dot{Q}	Αναλογία κυψελιδικού αερισμού/αιμάτωσης
V_D	Όγκος νεκρού χώρου
\dot{V}_D	Αερισμός νεκρού χώρου
\dot{V}_E	Εκπνεόμενος κατά λεπτό αερισμός
\dot{V}_{O_2}	Κατανάλωση οξυγόνου ανά λεπτό

Σημείωση: Μια τελεία πάνω από ένα πρωτεύον σύμβολο υποδηλώνει τη ροή ανά μονάδα χρόνου

ση της ενδοθωρακικής ή ενδοϋπεζωκοτικής πίεσης (P_{pl}), δηλαδή της πίεσης στο υπεζωκοτικό υγρό μεταξύ των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος. Μια μείωση της P_{pl} προκαλεί την έκπτυξη των πνευμόνων και την πλήρωσή τους με αέρα. Αυτή η σχέση μεταξύ πίεσης και όγκου, κατά τη διάρκεια της αναπνοής, βασίζεται σε δύο νόμους των αερίων. Ο νόμος του Boyle τονίζει ότι, σε σταθερή θερμοκρασία, η πίεση (P) του αερίου εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από τον όγκο (V) του αερίου, ή $P = 1/V$. Αν μία από τις παραμέτρους, πίεση ή όγκος, μεταβληθεί και αν η θερμοκρασία παραμείνει σταθερή, το γινόμενο της πίεσης επί τον όγκο παραμένει επίσης σταθερό:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (4)$$

Ο νόμος του Charles δηλώνει ότι αν η πίεση διατηρείται σταθερή, ο όγκος ενός αερίου και η θερμοκρασία του μεταβάλλονται αναλογικά ή $V \approx T$. Αν μεταβληθεί μία από τις παραμέτρους, η θερμοκρασία ή ο όγκος, και η πίεση παραμείνει σταθερή, τότε:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 \quad (5)$$

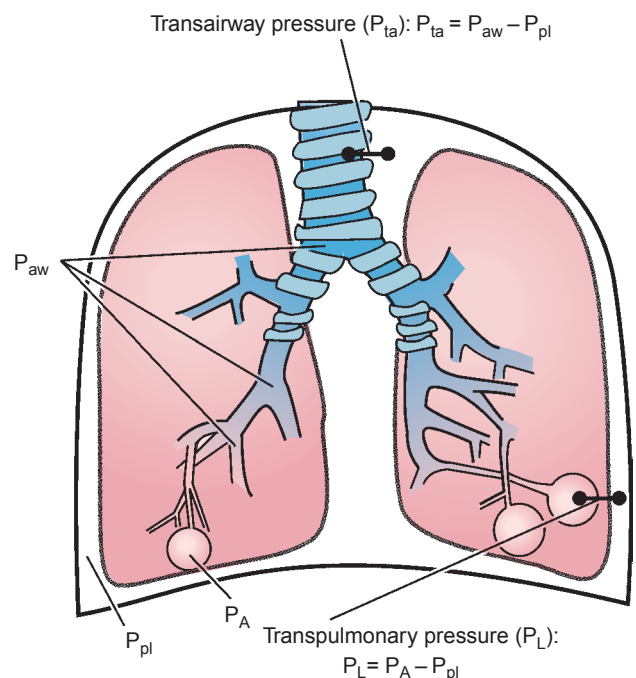
Αυτοί οι δύο νόμοι των αερίων μπορούν να συνδυαστούν με τους γενικούς νόμους των αερίων:

$$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2 \quad (6)$$

Από τους γενικούς νόμους των αερίων διατυπώνεται ότι όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή, η αύξηση του όγκου του θώρακα οδηγεί σε μείωση της ενδοθωρακικής πίεσης.

Η διατοιχωματική πίεση αποτρέπει τη σύμπτωση των πνευμόνων και των αεραγωγών

Εκτός από την ενδοθωρακική πίεση, ορισμένες άλλες πιέσεις σχετίζονται με την αναπνοή και τη ροή του αέρα (Εικ. 18.4). Η κυψελιδική ή ενδοπνευμονική πίεση (P_A) είναι η πίεση στο εσωτερικό των κυψελίδων. Η διατοιχωματική πίεση (P_{tm}) είναι η διαφορά πίεσης κατά μήκος ενός τοιχώματος και σε ό,τι αφορά τους πνεύμονες ονομάζεται διαπνευμονική πίεση (P_L). Η διαπνευμονική πίεση είναι η διαφορά μεταξύ της κυψελιδικής και της ενδοθωρακικής πίεσης στο εξωτερικό των πνευμόνων και υπολογίζεται αφαιρώντας την ενδοθωρακική πίεση από την κυψελιδική ($P_L = P_A - P_{pl}$). Σε κατάσταση ηρεμίας, η ενδοθωρακική πίεση είναι $-5 \text{ cm H}_2\text{O}$ και η κυψελιδική πίεση είναι $0 \text{ cm H}_2\text{O}$. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι η διαπνευμονική πίεση σε φάση ηρεμίας είναι 5 cm



Εικόνα 18.4 Οι πιέσεις μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Κατά τη διάρκεια του αναπνευστικού κύκλου ορισμένες πιέσεις παίζουν σημαντικό ρόλο: η πίεση των αεραγωγών (P_{aw}), η κυψελιδική πίεση (P_A), η ενδοθωρακική πίεση (P_{pl}), η διαπνευμονική πίεση (P_L) και η διαφορά της πίεσης κατά μήκος του τοιχώματος των αεραγωγών (P_{ta}). Τόσο η P_L όσο και η P_{ta} μπορούν να οριστούν ως εσωτερική πίεση μείον την εξωτερική πίεση. Και στις δύο περιπτώσεις, ως εξωτερική πίεση θεωρείται η ενδοθωρακική πίεση (P_{pl}).

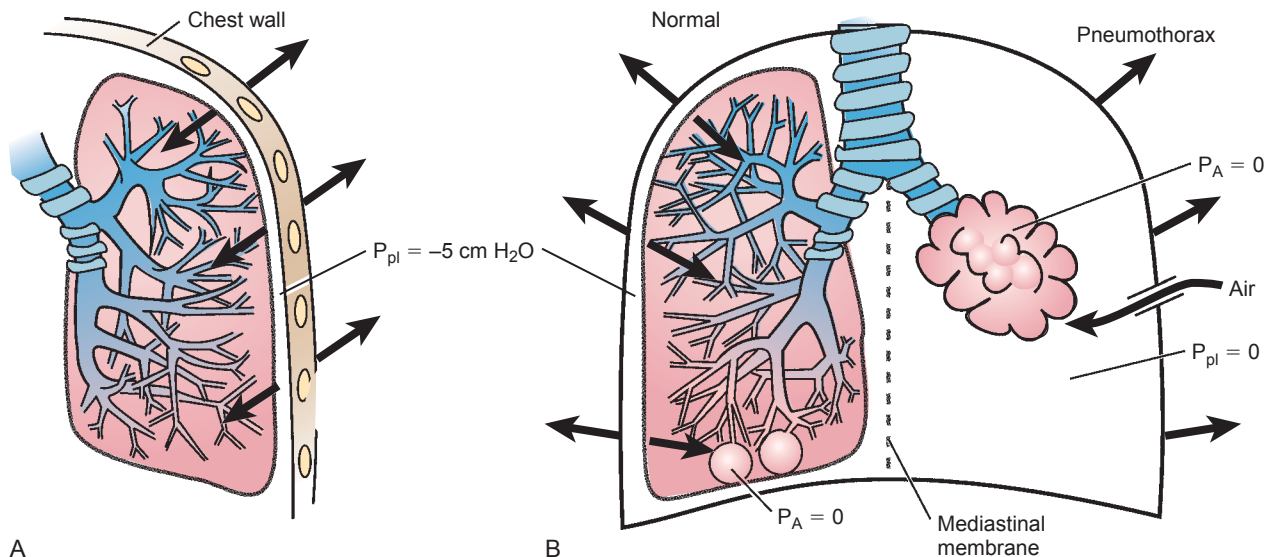
H_2O [$PL = 0 - (-5) = 5 \text{ cm H}_2\text{O}$]. Είναι σημαντικό να θυμάται κανείς ότι η διαπνευμονική πίεση είναι η πίεση που διατηρεί τους πνεύμονες σε έκπτυξη και τους αποτρέπει από πλήρη σύμπτωση των τοιχωμάτων τους. Όσο περισσότερο θετική είναι αυτή η πίεση, τόσο οι πνεύμονες διατείνονται ή εκπύσσονται.

Η τρίτη πίεση είναι πολύ σημαντική για τη ροή του αέρα στους πνεύμονες και είναι η πίεση των αεραγωγών (P_{ta}), η οποία αντιπροσωπεύει τη διαφορά πίεσης κατά μήκος του τοιχώματος των αεραγωγών ($P_{ta} = P_{aw} - P_{pl}$), όπου P_{aw} είναι η πίεση στο εσωτερικό του αεραγωγού. Η πίεση αεραγωγών είναι σημαντική για τη διατήρηση ανοικτών αεραγωγών κατά τη διάρκεια της βίαιης εκπνοής. Ένας τρόπος να απομνημονεύσει κανείς πώς να υπολογίζει τη διαπνευμονική ή την πίεση των αεραγωγών είναι «εσωτερικό μείον εξωτερικό», όπου P_{pl} είναι πάντα η πίεση στο εξωτερικό των πνευμόνων ή των αεραγωγών.

Γιατί η ενδοθωρακική πίεση είναι αρνητική ή υποατμοσφαιρική; Ο λόγος είναι η ελαστική επαναφορά των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος – δηλαδή, η ικανότητά τους να διατείνονται και μετά να επανέρχονται στην κατάσταση ηρεμίας χωρίς τάση, όπως ένα ελατήριο. Στο τέλος μιας φυσιολογικής εκπνοής, οι πνεύμονες και το θωρακικό τοίχωμα είναι διατεταμένα σε ίσες αλλά αντίθετες κατευθύνσεις (Εικ. 18.5). Οι διατεταμένοι πνεύμονες έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται προς τα μέσα, ενώ το διατεταμένο θωρακικό τοίχωμα να επανέρχεται προς τα έξω. Αυτές οι ίσες, αλλά αντίθετες δυνάμεις μειώνουν την ενδοθωρακική πίεση σε επίπεδα κάτω από την ατμοσφαιρική. Η ενδοθωρακική πίεση είναι

αρνητική ή υποατμοσφαιρική κατά τη διάρκεια της ήρεμης αναπνοής και γίνεται περισσότερο αρνητική κατά τη βαθιά εισπνοή. Μόνο κατά τη διάρκεια της βίαιης εκπνοής η ενδοθωρακική πίεση γίνεται θετική ή μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση.

Η σημασία της ενδοθωρακικής πίεσης φαίνεται κατά την τρώση του θωρακικού τοιχώματος (Εικ. 18.5B), όταν ο αέρας εισέρχεται στον ενδοθωρακικό χώρο, οπότε προκαλείται αμέσως σύμπτωση του διατεταμένου πνεύμονα (επαναφορά προς τα έξω), ενώ ταυτόχρονα ο θωρακικός κλωβός εκπύσσεται προς τα έξω (επαναφορά προς τα έξω). Επειδή η φυσιολογική ενδοθωρακική πίεση είναι υποατμοσφαιρική, αέρας εισέρχεται μέσα στον υπεζωκοτικό χώρο κάθε φορά που το θωρακικό τοίχωμα ή ο πνεύμονας τρωθούν και η ενδοθωρακική πίεση γίνεται ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, καθώς ο αέρας μετακινείται από περιοχές υψηλής σε περιοχές χαμηλής πίεσης. Στις περιπτώσεις αυτές η διαπνευμονική πίεση είναι μηδέν ($PL = 0$), διότι η διαφορά πίεσης κατά μήκος των πνευμόνων εξαλείφεται. Η κατάσταση αυτή, όπου ατμοσφαιρικός αέρας ή κάποιο αέριο συσσωρεύεται στον υπεζωκοτικό χώρο και ο πνεύμονας συμπιέζεται, είναι γνωστή ως πνευμοθώρακας (Εικ. 18.5B, δεξιά πλευρά). Πνευμοθώρακας μπορεί να προκύψει από ένα τραύμα από μαχαίρι ή πυροβολισμό, όπου υπάρχει τρώση του θωρακικού τοιχώματος ή σε ρήξη του πνεύμονα λόγω ενός αποστήματος ή από έντονο βήχα. Στη θεραπεία ορισμένων διαταραχών των πνευμόνων (π.χ. φυματίωση), προκαλείται πνευμοθώρακας εσκεμμένα, διά της εισόδου αποστειρωμένης βελόνας μεταξύ των πλευρών και έγχυσης, μέσα

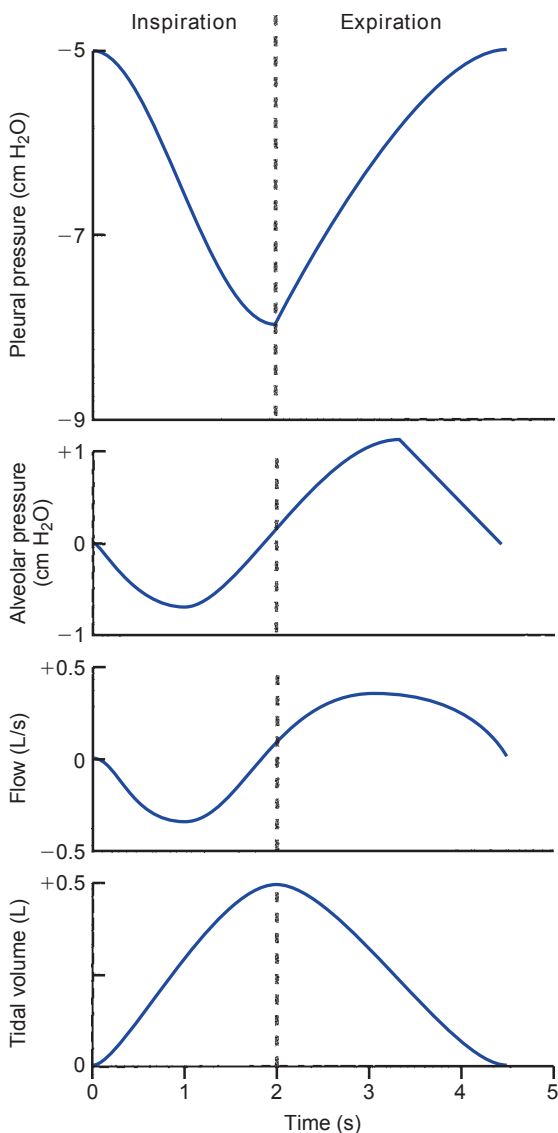


Εικόνα 18.5 Η αρνητική ενδοθωρακική πίεση προκύπτει από την ελαστική επαναφορά των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος που λαμβάνει χώρα προς αντίθετες κατευθύνσεις. (Α) Ο διατεταμένος πνεύμονας (στο τέλος μιας φυσιολογικής εισπνοής) τείνει να επανέλθει προς τα έξω και το θωρακικό τοίχωμα τείνει να επανέλθει προς τα έξω, σε ίσες και αντίθετες διευθύνσεις. Συνεπώς, η ενδοθωρακική πίεση (P_{pl}) γίνεται αρνητική (δηλαδή μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση). (Β) Ρήξη ή τρώση του πνεύμονα ή του θωρακικού τοιχώματος έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πνευμοθώρακα, κατάσταση στην οποία η διαπνευμονική πίεση γίνεται μηδέν και η δύναμη ελαστικής επαναφοράς προκαλεί τη σύμπτωση του πνεύμονα. Η μεμβράνη του μεσοθωρακίου αποτρέπει τον άλλο πνεύμονα από τη σύμπτωση. P_A , κυψελιδική πίεση.

στο πλευριτικό υγρό, αζώτου για τη θεραπεία του προσβεβλημένου πνεύμονα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μεμβράνη του μεσοθωρακίου αποτρέπει τη σύμπτωση και του άλλου πνεύμονα.

Οι μεταβολές της κυψελιδικής πίεσης μετακινούν τον αέρα μέσα και έξω από τους πνεύμονες

Οι μεταβολές των πιέσεων κατά τη διάρκεια ενός φυσιολογικού αναπνευστικού κύκλου αναπαριστούνται στην Εικόνα 18.6. Κατά το τέλος της εκπνοής οι αναπνευστικοί μύες υφίστανται χάλαση και διακόπτεται η ροή του αέρα. Στο σημείο αυτό, η κυψελιδική πίεση είναι μηδέν (ίση με την ατμοσφαιρική πίεση

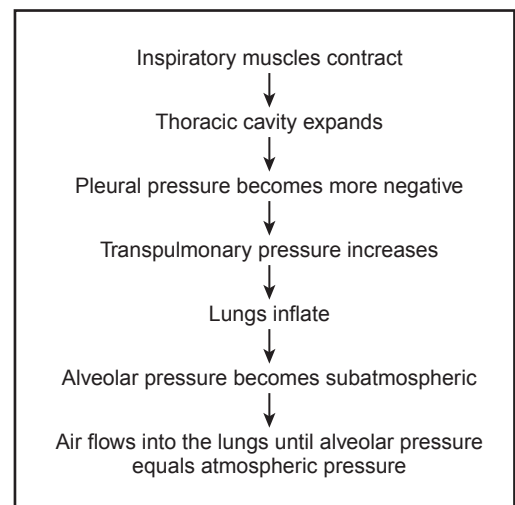


Εικόνα 18.6 Η αντίσταση ροής του αέρα επηρεάζει τον εκπνευστικό χρόνο. Ο εισπνευστικός χρόνος (TI) είναι 2 δευτερόλεπτα και μικρότερος από τον εκπνευστικό (TE) που είναι 3 δευτερόλεπτα. Αυτή η διαφορά, οφείλεται εν μέρει, στη μεγαλύτερη αντίσταση ροής του αέρα κατά τη διάρκεια της εκπνοής, όπως φαίνεται από τη μεγαλύτερη μεταβολή της κυψελιδικής πίεσης (PA) κατά τη διάρκεια της εκπνοής (1,2 cm H₂O) σε σχέση με εκείνη κατά τη διάρκεια της εισπνοής (0,8 cm H₂O). Μια αύξηση της αντίστασης ροής του αέρα θα ελαττώσει την αναλογία TI/TE. Για την επίτευξη του φυσιολογικού αναπνεόμενου όγκου αέρα, αρκεί μια μικρή αλλαγή της πίεσης μεταξύ του στόματος και των κυψελίδων.

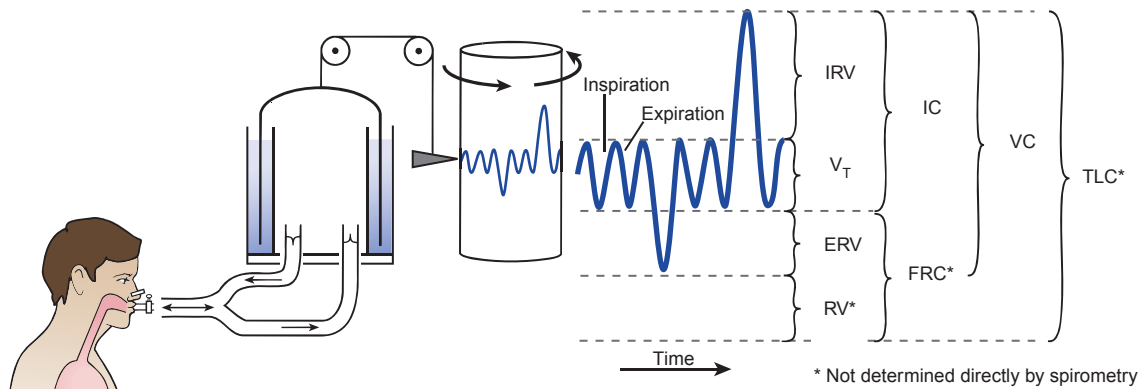
ή PB). Η ενδοθωρακική πίεση είναι -5 cm H₂O, και συνεπώς η διαπνευμονική πίεση είναι 5 cm H₂O [Pp] = 0 - (-5 cm H₂O) = 5 cm H₂O].

Η έκπτυξη των πνευμόνων αρχίζει με τη σύσπαση του διαφράγματος. Αν η εισπνοή ξεκινήσει μετά το τέλος μιας μέγιστης εκπνοής, τότε γίνεται φανερό η έκπτυξη του θωρακικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της εισπνοής. Σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, καθώς οι πνεύμονες γεμίζουν με αέρα, αισθανόμαστε την ανάγκη να κλείσουμε την επιγλωττίδα, ώστε να κρατηθεί ο αέρας μέσα στους πνεύμονες. Στο παράδειγμα που φαίνεται στην Εικόνα 18.6, η ενδοθωρακική πίεση αλλάζει από -5 σε -8 cm H₂O. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των αερίων, όπως και του αέρα, είναι ότι οι πιέσεις μεταξύ δύο περιοχών έχουν την τάση να εξισορροπούνται. Επομένως, όταν η ενδοθωρακική πίεση μειώνεται, η διαπνευμονική πίεση αυξάνεται και οι πνεύμονες πληρούνται με αέρα. Η έκπτυξη των πνευμόνων προκαλεί αύξηση της διαμέτρου των κυψελίδων και μείωση της πίεσης στις κυψελίδες κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση (Εικ. 18.6). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μίας διαφοράς πίεσης μεταξύ του στόματος και των κυψελίδων, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την εισροή αέρα μέσα στις κυψελίδες. Η ροή του αέρα σταματά στο τέλος της εισπνοής, επειδή η κυψελιδική πίεση γίνεται ξανά ίση με την ατμοσφαιρική (Εικ. 18.6). Η αλληλουχία των γεγονότων αυτών συνοψίζεται στην Εικόνα 18.7.

Κατά τη διάρκεια της εκπνοής, οι εισπνευστικοί μύες υφίστανται χάλαση, ο θωρακικός κλωβός κατέρχεται, η ενδοθωρακική πίεση αυξάνεται (γίνεται λιγότερο αρνητική), η διαπνευμονική πίεση ελαττώνεται και οι διατεταμένοι πνεύμονες συμπτύσσονται. Όταν η κυψελιδική διάμετρος μειώνεται κατά τη διαδικασία αυτή, η κυψελιδική πίεση γίνεται μεγαλύτερη από



Εικόνα 18.7 Η ροή του αέρα ακολουθεί παράλληλη πορεία με την κυψελιδική πίεση κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Η αλληλουχία των γεγονότων κατά τη διάρκεια της εισπνοής οδηγεί σε μια μείωση της κυψελιδικής πίεσης, προκαλώντας έτσι την εισροή αέρα στο εσωτερικό των πνευμόνων.



Εικόνα 18.8 Με τη σπιρομέτρηση μετρώνται οι όγκοι των πνευμόνων. Με την εκπνοή ο δείκτης καταγράφει μια προς τα κάτω απόκλιση. Ας σημειωθεί ότι ο υπολειπόμενος όγκος (RV), η λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα (FRC), και η ολική χωρητικότητα των πνευμόνων (TLC) δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα με τη σπιρομέτρηση. IRV, εισπνευστικός εφεδρικός όγκος, V_T , αναπνεόμενος όγκος αέρα, ERV, εκπνευστικός εφεδρικός όγκος, IC εισπνευστική χωρητικότητα, VC, ζωτική χωρητικότητα.

την ατμοσφαιρική πίεση και ωθεί τον αέρα έξω από τους πνεύμονες. Η ροή του αέρα προς το εξωτερικό των πνευμόνων συνεχίζεται μέχρις ότου η κυψελιδική πίεση εξισωθεί με την ατμοσφαιρική.

Η ροή του αέρα προς το εξωτερικό των πνευμόνων συνεχίζεται μέχρις ότου η κυψελιδική πίεση εξισωθεί με την ατμοσφαιρική.

ΣΠΙΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΟΓΚΟΙ ΤΩΝ ΠΝΕΥΜΟΝΩΝ

Η σπιρομέτρηση είναι η συνηθέστερη δοκιμασία ελέγχου της πνευμονικής λειτουργίας. Συγκεκριμένα, με τη σπιρομέτρηση εκτιμάται το ποσό (όγκος) και η ταχύτητα (ροή) του αέρα που μπορεί να εισπνέεται και να εκπνέεται από τους πνεύμονες. Το σπιρόμετρο καταγράφει μία καμπύλη όγκου – χρόνου σε ένα γράφημα όπου το όγκος (λίτρα) τοποθετείται στον άξονα Y και ο χρόνος (δευτερόλεπτα) στον άξονα X. Η καταγραφή που λαμβάνεται από το σπιρόμετρο ονομάζεται σπιρογράφημα.

Με τη σπιρομέτρηση καταγράφονται συγκεκριμένοι πνευμονικοί όγκοι

Οι πνευμονικοί όγκοι και η ροή του αέρα χωρίζονται σε διάφορα ξεχωριστά τμήματα κατά τη διάρκεια της εισπνοής και εκπνοής. Ο όγκος του αέρα που εξέρχεται από τους πνεύμονες κατά τη διάρκεια μιας μεμονωμένης αναπνοής λέγεται αναπνεόμενος όγκος (V_T). Υπό συνθήκες ηρεμίας, ο V_T είναι περίπου 500 mL και αποτελεί μόνο ένα μέρος του συνολικού αέρα στους πνεύμονες. Το μέγιστο ποσό αέρα στους πνεύμονες, στο τέλος μιας μέγιστης εισπνευστικής προσπάθειας είναι η ολική χωρητικότητα (TLC) και είναι περίπου 6 L σε έναν φυσιολογικό ενήλικα άνδρα και λίγο μικρότερη σε μία ενήλικη γυναίκα. Μια

άλλη σημαντική μέτρηση είναι η λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα (FRC), ο όγκος του αέρα που παραμένει στους πνεύμονες στο τέλος ενός φυσιολογικού αναπνεόμενου όγκου (τέλος εκπνοής). Σημειώστε τη χρήση του όρου «όγκος» στην πρώτη περίπτωση και τον όρο «χωρητικότητα» στις δύο επόμενες. Ο όρος όγκος χρησιμοποιείται όταν πρόκειται για ένα μόνο όγκο, ενώ ο όρος χωρητικότητα χρησιμοποιείται όταν ένας όγκος μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο ή περισσότερους μικρότερους όγκους. Για παράδειγμα, η FRC ισούται με το άθροισμα του εκπνευστικού εφεδρικού όγκου (ERV) και του υπολειπόμενου όγκου αέρα (RV). Οι επιμέρους όγκοι και χωρητικότητες του πνεύμονα συνοψίζονται στον Πίνακα 18.4.

Η δυναμική ζωτική χωρητικότητα είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες για την εκτίμηση της πνευμονικής λειτουργίας

Ο μέγιστος όγκος αέρα που μπορεί να εκπνεύσει ένα άτομο μετά από μια μέγιστη εισπνοή είναι η ζωτική χωρητικότητα (VC). Όταν η εκπνοή γίνεται όσο το δυνατό πιο γρήγορα και πιο έντονα στο σπιρόμετρο, ο όγκος αυτός καλείται δυναμική ζωτική χωρητικότητα (FVC) και είναι περίπου 5 L σε έναν ενήλικα άνδρα (βλ. Εικ. 18.8). Η ζωτική χωρητικότητα και η δυναμική ζωτική χωρητικότητα είναι οι ίδιοι όγκοι. Η ζωτική χωρητικότητα καθορίζεται από το άθροισμα του εκπνευστικού εφεδρικού όγκου, του αναπνεόμενου όγκου αέρα και του εισπνευστικού εφεδρικού όγκου. Η δυναμική ζωτική χωρητικότητα είναι μια άμεση μέτρηση όγκου της σπιρομέτρησης και αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μετρήσεις για την εκτίμηση της αναπνευστικής λειτουργίας των πνευμόνων. Για να μετρηθεί η FVC, το άτομο μετά από μία μέγιστη εισπνοή, εκπνέει στο σπιρόμετρο (με κλειστή μύτη) όσο πιο δυνατά, γρήγορα και ολοκληρωτικά μπορεί.

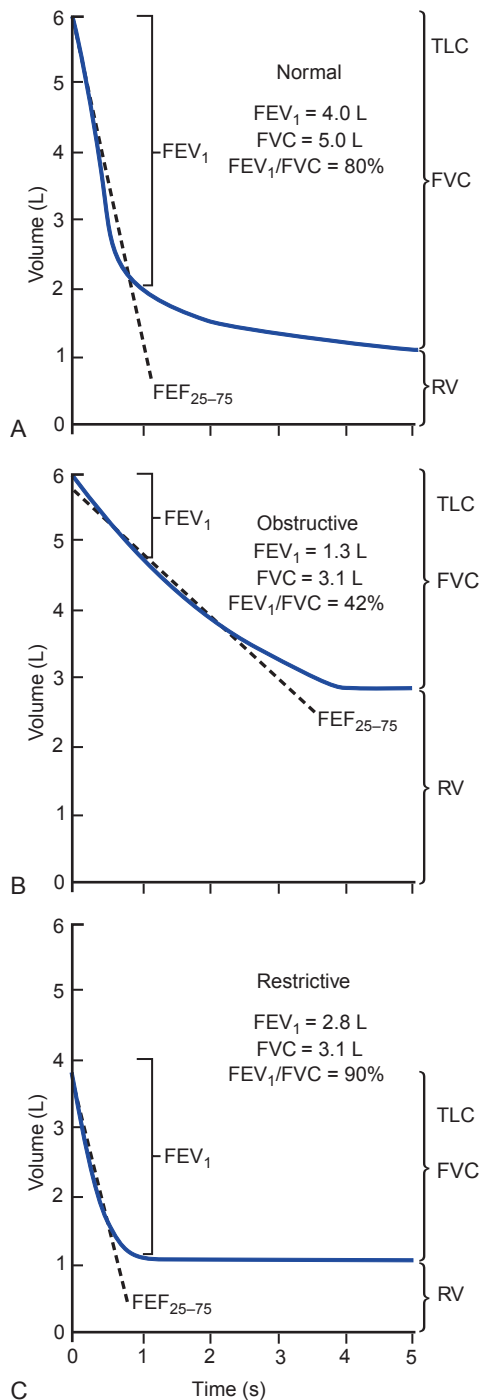
Από το σπιρογράφημα της FVC εξάγονται δύο

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.4 Σύντομογραφίες και Ορισμοί που σχετίζονται με την πνευμονική λειτουργία

Σύντμηση	Όρος	Ορισμός	Φυσιολογική τιμή ¹
EPP	Σημείο ίσης πίεσης	Το σημείο εκείνο στο οποίο η πίεση στο εσωτερικό των αεραγωγών ισούται με την πίεση έξω από αυτούς (π.χ., P _{pl}).	
ERV	Εκπνευστικός εφεδρικός όγκος	Ο μέγιστος όγκος εκπνεόμενου αέρα στο τέλος μιας ήρεμης εκπνοής.	1,2 L
FEF ₂₅₋₇₅	Βίαια εκπνεόμενη ροή στο 50% της FVC	Ο μέγιστος ρυθμός ροής κατά τη διάρκεια της εκπνοής, που μετράται τραβώντας μια γραμμή μεταξύ των σημείων που αναπαριστούν το 25% και το 75% της δυναμικής ζωτικής χωρητικότητας.	5 L/sec
FEV ₁	Βίαια εκπνεόμενος όγκος	Ο μέγιστος όγκος αέρα που εκπνέεται βίαια σε 1 δευτερόλεπτο	4,0 L
FEV ₁ /FVC%	Αναλογία βίαια εκπνεόμενου όγκου /δυναμική ζωτική χωρητικότητα	Το ποσοστό της FVC που εκπνέεται βίαια σε 1 δευτερόλεπτο.	80%
FRC	Λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα	Ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες στο τέλος μιας ήρεμης αναπνοής	2,4 L
FVC	Δυναμική ζωτική χωρητικότητα	Ο μέγιστος όγκος αέρα που εκπνέεται βίαια μετά από μια μέγιστη εισπνοή	4,8 L
IC	Εισπνευστική χωρητικότητα	Ο μέγιστος όγκος αέρα που εισπνέεται μετά από μια φυσιολογική εκπνοή	3,6 L
IRV	Εισπνευστικός εφεδρικός όγκος	Ο μέγιστος όγκος αέρα που εισπνέεται μετά από μια φυσιολογική εισπνοή	3,1 L
PEF	Μέγιστος εκπνευστικός ρυθμός ροής	Ο μέγιστος εκπνευστικός ρυθμός ροής κατά τη διάρκεια μιας προσπάθειας για εκτίμηση της FVC	7,5 L/sec
RV	Υπολειπόμενος όγκος αέρα	Ο όγκος αέρα που παραμένει στους πνεύμονες μετά τη λήξη μίας μέγιστης εκπνοής	1,2 L
RV/TLC	Αναλογία υπολειπόμενου όγκου αέρα/ολικής χωρητικότητας των πνευμόνων	Το ποσοστό της ολικής χωρητικότητας των πνευμόνων που αποτελεί τον υπολειπόμενο όγκο αέρα	20%
TLC	Ολική χωρητικότητα	Ο όγκος του αέρα στους πνεύμονες στο τέλος μιας μέγιστης εισπνοής	6,0 L
VC	Ζωτική χωρητικότητα	Ο μέγιστος όγκος αέρα που μπορεί να εκπνευσθεί. (Σημειώστε ότι οι τιμές για τις FVC και VC είναι ίδιες.) Η VC υπολογίζεται από τους στατικούς όγκους του πνεύμονα (VC = ERV + VT + IRV). Η FVC καθορίζεται με άμεση σπιρομέτρηση.	4,8 L
V _D /V _T	Αναλογία νεκρού χώρου/ αναπνεόμενου όγκου αέρα	Το κλάσμα του αναπνεόμενου όγκου αέρα που αποτελεί το νεκρό χώρο	30%
V _T	Αναπνεόμενος όγκος αέρα	Ο όγκος του αέρα που εισπνέεται ή εκπνέεται με κάθε αναπνοή	0,5 L

πρόσθετες μετρήσεις (Εικ. 18.9): ο βίαια εκπνεόμενος όγκος σε 1 δευτερόλεπτο (FEV₁) και η βίαια εκπνεόμενη ροή (FEF). Ο όγκος FEV₁ παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις σε φυσιολογικά άτομα μετά από μία βίαια εκπνευστική προσπάθεια και θεωρείται μια από τις πιο αξιόπιστες μετρήσεις της σπιρομέτρησης. Ένας άλλος χρήσιμος τρόπος για την έκφραση

του FEV₁ είναι ως ποσοστό της FVC (π.χ. FEV₁/FVC x 100), το οποίο έχει ως πλεονέκτημα ότι διορθώνει και τις διαφορές στο μέγεθος των πνευμόνων. Φυσιολογικά, η αναλογία FEV₁/FVC είναι 0,8, που σημαίνει ότι το 80% της FVC ενός ατόμου είναι δυνατό να εκπνέεται στο πρώτο δευτερόλεπτο μιας δυναμικής ζωτικής χωρητικότητας. Αυτό είναι σχετικά αξιοθαύμαστο,



Εικόνα 18.9 Η δυναμική ζωτική χωρητικότητα (FVC) αποτελεί έναν χρήσιμο δείκτη για την εκτίμηση της αναπνευστικής λειτουργίας. (Α) Ένα άτομο εισπνέει μέχρι την ολική χωρητικότητα του πνεύμονα και μετά εκπνέει όσο πιο δυνατά μπορεί μέσα στο σπιρόμετρο. Δύο ακόμα μετρήσεις μπορούν να ληφθούν με αυτό τον χειρισμό: ο βίαια εκπνεόμενος όγκος σε 1 δευτερόλεπτο (FEV_1) και η βίαια εκπνεόμενη ροή στο 50% της FVC (FEF_{25-75}). Οι μετρήσεις των FVC, FEV_1 , του λόγου FEV_1/FVC και του FEF_{25-75} χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση των αποφρακτικών και περιοριστικών διαταραχών του πνεύμονα. **(Β)** Σε μια αποφρακτικού τύπου διαταραχή, ο ρυθμός ροής βίαια εκπνοής μειώνεται σημαντικά και ο λόγος FEV_1/FVC είναι χαμηλός. **(Γ)** Σε μια περιοριστικού τύπου διαταραχή, η έκπτυξη των πνευμόνων ελαττώνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση των RV και TLC. Παρόλο που η FVC είναι μειωμένη, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο λόγος FEV_1/FVC είναι φυσιολογικός ή αυξημένος σε μια περιοριστική διαταραχή.

καθώς για τη μετακίνηση αυτού του όγκου αέρα λαμβάνουν χώρα πολύ μικρές μεταβολές πίεσης. Η FVC και η FEV_1 είναι σημαντικές μετρήσεις στη διάγνωση συγκεκριμένων τύπων πνευμονικών παθήσεων.

Μια δεύτερη μέτρηση που λαμβάνεται από το σπιρογράφημα της βίαιης ζωτικής χωρητικότητας (FVC) είναι η βίαια εκπνεόμενη ροή (FEF_{25-75}) στο 50% της FVC. Ο ρυθμός αυτός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη διερεύνηση πρώιμων διαταραχών της ροής σε παθήσεις αποφρακτικού τύπου (βλ. Εικ. 18.9). Με τη μέτρηση αυτή εκτιμάται ο ρυθμός της βίαια εκπνεόμενης ροής στο μέσο της δυναμικής ζωτικής χωρητικότητας (μεταξύ του 25% και του 75%). Ο ρυθμός της βίαια εκπνεόμενης ροής υπολογίζεται αναγνωρίζοντας τα σημεία εκείνα του σπιρογράφηματος που αντιστοιχούν στο 25% και 75% του όγκου της FVC και στη συνέχεια μετρώντας τον όγκο και το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο σημείων. Με αυτήν τη μέθοδο, ο υπολογιζόμενος ρυθμός ροής εκφράζεται σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο.

Οι υπολειπόμενοι όγκοι των πνευμόνων δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα με τη σπιρομέτρηση

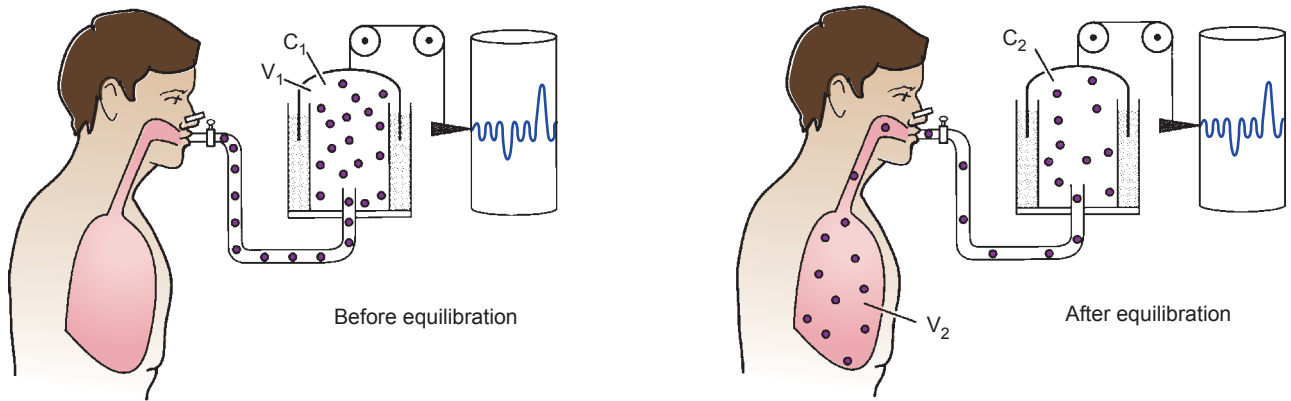
Επειδή οι πνεύμονες δεν είναι δυνατό να κενωθούν πλήρως μετά από μια μέγιστη εκπνευστική προσπάθεια, ούτε ο RV, ούτε ο FRC μπορούν να μετρηθούν άμεσα με μία απλή σπιρομέτρηση. Υπάρχει όμως η δυνατότητα έμμεσης μέτρησης με τη βοήθεια μιας τεχνικής αραίωσης στην οποία χρησιμοποιείται το ήλιο, ένα ανενεργό και σχετικά αδιάλυτο αέριο που δεν προσλαμβάνεται από την αιματική κυκλοφορία στους πνεύμονες. Το άτομο συνδέεται με ένα σπιρόμετρο γεμάτο με διάλυμα 10% ήλιο σε οξυγόνο (Εικ. 18.10). Οι πνεύμονες αρχικά δεν έχουν καθόλου ήλιο. Μετά την εισπνοή του μείγματος πλίου-οξυγόνου και την εξισορρόπηση με το σπιρόμετρο, η συγκέντρωση του πλίου στους πνεύμονες θα εξισωθεί με αυτή στο σπιρόμετρο. Λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος

$$C_1 \times V_1 = C_2 (V_1 + V_2) \quad (7)$$

Όπου C_1 ισούται με την αρχική συγκέντρωση του πλίου στο σπιρόμετρο, V_1 ισούται με τον αρχικό όγκο του μείγματος πλίου-οξυγόνου στο σπιρόμετρο, C_2 ισούται με τη συγκέντρωση του πλίου μετά την εξισορρόπηση και V_2 είναι ο ζητούμενος όγκος των πνευμόνων.

$$V_2 = \frac{V_1(C_1 - C_2)}{C_2} \quad (8)$$

Είναι σημαντικό η έναρξη της δοκιμασίας να γίνει την κατάλληλη χρονική στιγμή. Αν η δοκιμασία αρχίσει στο τέλος ενός φυσιολογικού αναπνεόμενου όγκου αέρα (τέλος εκπνοής), ο όγκος του αέρα που



$$V_2 = \frac{V_1 (C_1 - C_2)}{C_2}$$

Εικόνα 18.10 Η τεχνική διάλυσης με ήλιο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του υπολειπόμενου όγκου (RV). Οι κουκίδες αντιπροσωπεύουν το ήλιο πριν και μετά την εξισορρόπηση. C, συγκέντρωση, V, όγκος.

παραμένει στους πνεύμονες αντιπροσωπεύει τη λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα (FRC). Αν η δοκιμασία αρχίσει με τη λήξη μιας δυναμικής ζωτικής χωρητικότητας (FVC), τότε θα καταγραφεί ο υπολειπόμενος όγκος αέρα (RV). Ομοίως, αν η δοκιμασία ξεκινήσει μετά από μία μέγιστη εισπνοή, τότε το V_2 θα ισούται με την ολική χωρητικότητα των πνευμόνων (TLC). Κατά τη δοκιμασία, το διοξείδιο του άνθρακα απορροφάται και προστίθεται οξυγόνο στο σπιρόμετρο, έτσι ώστε να αναπληρωθεί το οξυγόνο που καταναλώνεται από το άτομο κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας. Παρόλο που η τεχνική διάλυσης με ήλιο είναι εξαιρετική για τη μέτρηση των FRC και RV σε υγιή άτομα, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς σε ασθενείς των οποίων οι πνεύμονες έχουν φτωχό αερισμό, λόγω αποφραγμένου αεραγωγού ή μεγάλης αντίστασης στις αεροφόρες οδούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ήλιο παρέχει ψευδώς χαμηλή τιμή για την FRC.

ΚΑΤΑ ΛΕΠΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΙΔΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Η μέτρηση των στατικών πνευμονικών όγκων είναι σημαντική για την εκτίμηση της πνευμονικής λειτουργίας. Η αναπνοή, όμως, είναι μία δυναμική διεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη ροή και τον όγκο του αέρα που μετακινείται εντός και εκτός των πνευμόνων σε ένα λεπτό. Αν 500 mL αέρα εισπνέονται με κάθε αναπνοή (VT) και ο ρυθμός αναπνοής (f) είναι 14 ανά ένα λεπτό, τότε το σύνολο του αέρα είναι 7L (500 x 14 = 7,000 mL/min ή 7 L/min). Η μέτρηση αυτή αντιστοιχεί στον κατά λεπτό αερισμό (.VA), ο οποίος συχνά αναφέρεται ως κατά λεπτό όγκος εκπνεόμενου αέρα (VE) και υπολογίζεται από το ποσό του εκπνεόμενου όγκου αέρα σε ένα λεπτό.

Ο κατά λεπτό αερισμός και ο κατά λεπτό όγκος εκπνεόμενου αέρα αντιστοιχούν στην ίδια τιμή, γε-

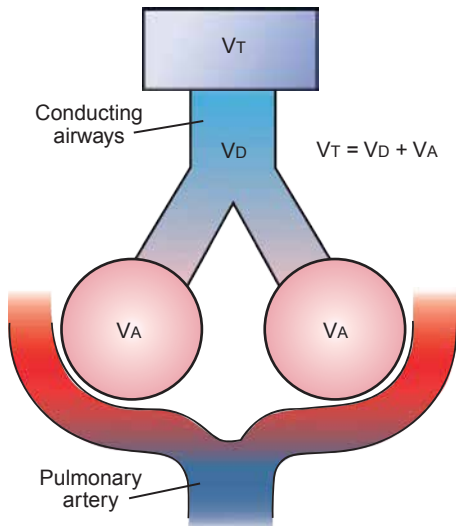
γόνος που βασίζεται στην υπόθεση ότι ο όγκος του αέρα που εισπνέεται ισούται με τον όγκο που εκπνέεται. Αυτό, ωστόσο, δεν είναι και τόσο ακριβές, επειδή καταναλώνεται περισσότερο οξυγόνο, σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται. Για πρακτικούς σκοπούς όμως, αυτή η διαφορά παραβλέπεται και αναπαρίσταται με την εξίσωση:

$$VE = VT \times f \quad (9)$$

Όλος ο όγκος του εισπνεόμενου αέρα δε φτάνει στις κυψελίδες και χαρακτηρίζεται ως αέρας που «σπαταλάται»

Ο αναπνεόμενος όγκος αέρα κατανέμεται μεταξύ της ζώνης αγωγής και των κυψελίδων. Καθώς η ανταλλαγή των αερίων συμβαίνει μόνο στις κυψελίδες και όχι στη ζώνη αγωγής, ένα μέρος του κατά λεπτό αερισμού θεωρείται αέρας που «σπαταλάται» και δεν χρησιμοποιείται. Για κάθε 500 mL αέρα που εισπνέονται, περίπου τα 150 mL παραμένουν στη ζώνη των αεραγωγών και δεν συμμετέχουν στη διαδικασία ανταλλαγής των αερίων (Εικ. 18.11). Αυτός ο όγκος «χαμένου» αέρα είναι γνωστός ως νεκρός χώρος (VD). Επειδή ο VD είναι αποτέλεσμα της ανατομίας των αεροφόρων οδών, ο χώρος αυτός αναφέρεται συχνά και ως ανατομικός νεκρός χώρος.

Ας αναπαραστήσουμε τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός φυσιολογικού αναπνευστικού κύκλου. Ένας φυσιολογικός αναπνεόμενος όγκος αέρα 500 mL εκπνέεται. Κατά τη διάρκεια της επόμενης εισπνοής, άλλα 500 mL αέρα εισέρχονται μέσα στους πνεύμονες, αλλά τα πρώτα 150 mL αέρα που εισέρχονται στις κυψελίδες είναι αυτά από το νεκρό χώρο (παλιός όγκος αέρα που είχε μείνει πίσω). Έτσι, μόνο 350 mL νέου, «φρέσκου» αέρα φτάνει στις κυψελίδες και τα υπόλοιπα 150 mL παραμένουν στη ζώνη των αεραγωγών. Η φυσιολογική αναλογία του νεκρού χώρου προς τον αναπνεόμενο όγκο αέρα (VD/VT) κυμαίνει-



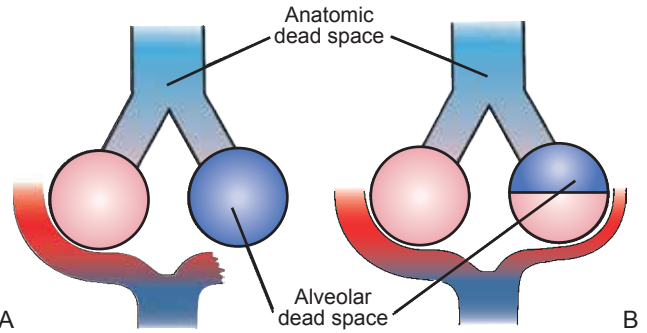
Εικόνα 18.11 Μέρος του αναπνεόμενου όγκου αέρα δεν συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων. Ο αναπνεόμενος όγκος αέρα (V_T) αναπαρίσταται με το παραλληλόγραμμο και είναι ο όγκος του αέρα που θα εισέλθει κατά τη διάρκεια της εισπνοής. Ο V_T θα καταναμηθεί μεταξύ της ζώνης αγωγής και των κυψελίδων. Ο όγκος του αέρα στη ζώνη αγωγής δεν συμμετέχει στη διαδικασία ανταλλαγής των αερίων και αποτελεί τον **όγκο του νεκρού χώρου (V_D)**. V_A είναι ο όγκος του νέου αέρα που εισέρχεται στις κυψελίδες.

ται μεταξύ των τιμών 0,25 με 0,35. Στο παραπάνω παράδειγμα, η αναλογία (150/500) είναι 0,30, που σημαίνει ότι το 30% του αναπνεόμενου όγκου αέρα ή το 30% του κατά λεπτό αερισμού δεν συμμετέχει στη διαδικασία ανταλλαγής των αερίων και αποτελεί τον όγκο αέρα στο νεκρό χώρο.

Ο νεκρός χώρος δεν περιορίζεται πάντα μόνο στη ζώνη των αεραγωγών. Ο αέρας μέσα στις κυψελίδες που δεν συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων, αποτελεί επίσης μέρος του «χαμένου» αέρα. Για παράδειγμα, αν ο εισπνεόμενος αέρας διανέμεται σε κυψελίδες χωρίς αιματική ροή, αυτός αποτελεί επίσης νεκρό χώρο και αναφέρεται ως κυψελιδικός νεκρός χώρος (Εικ. 18.12A). Ο κυψελιδικός νεκρός χώρος δεν περιορίζεται μόνο στις κυψελίδες χωρίς αιματική ροή. Οι κυψελίδες που έχουν μειωμένη αιματική ροή, ανταλλάσσουν μικρότερο όγκο εισπνεόμενου αέρα σε σχέση με το φυσιολογικό (Εικ. 18.12B). Κάθε μέρος του κυψελιδικού αέρα σε περίσσεια, σε σχέση με αυτό που χρειάζεται για να διατηρηθεί μια φυσιολογική ανταλλαγή των αερίων, αποτελεί επίσης κυψελιδικό νεκρό χώρο. Έτσι ο νεκρός χώρος (V_D) διαχωρίζεται είτε σε ανατομικό είτε σε κυψελιδικό νεκρό χώρο. Το άθροισμα των δύο τύπων νεκρού χώρου αποτελεί τον φυσιολογικό ή λειτουργικό νεκρό χώρο. Έτσι φυσιολογικός V_D = ανατομικός V_D + κυψελιδικός V_D . Ο φυσιολογικός νεκρός χώρος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{V_D}{V_T} = \frac{F_{ACO_2} - F_{ECO_2}}{F_{ACO_2}} \quad (10)$$

Οι φυσιολογικές τιμές του λόγου V_D/V_T κυμαίνο-



Εικόνα 18.12 Ο φυσιολογικός νεκρός χώρος αναπαριστά το συνολικό ποσό του αέρα που «σπαταλάται» στους πνεύμονες. Ο νεκρός χώρος στους πνεύμονες περιλαμβάνει τη ζώνη αγωγής και τις κυψελίδες με φτωχό δίκτυο τριχοειδικής κυκλοφορίας. **(Α)** Δεν υπάρχει αιματική ροή σε μια κυψελιδική περιοχή. **(Β)** Υπάρχει ελαττωμένη αιματική ροή. Και στις δύο περιπτώσεις, ένα μέρος του κυψελιδικού αέρα δε συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων και αποτελεί τμήμα του όγκου του νεκρού χώρου. Ας σημειωθεί ότι ο φυσιολογικός νεκρός χώρος είναι το άθροισμα του κυψελιδικού νεκρού χώρου και του ανατομικού νεκρού χώρου.

νται μεταξύ 0,2 και 0,35. Εφόσον καθοριστεί ο λόγος αυτός, μπορεί να υπολογιστεί και ο όγκος του φυσιολογικού νεκρού χώρου. Για παράδειγμα, αν ένας ασθενής έχει αναπνεόμενο όγκο αέρα 500 ml και η αναλογία V_D/V_T είναι 0,35, τότε ο φυσιολογικός νεκρός χώρος είναι 175 ml (φυσιολογικός V_D = 500 x 0,35). Βασικά, ο ανατομικός V_D , ο κυψελιδικός V_D και ο φυσιολογικός V_D είναι όροι που δηλώνουν τον όγκο του εισπνεόμενου αέρα που δεν συμμετέχει στη διαδικασία ανταλλαγής των αερίων. Στη μία περίπτωση υπάρχει ένα κλάσμα του V_T που δεν φτάνει στις κυψελίδες (ανατομικός νεκρός χώρος). Στην άλλη περίπτωση, ένα κλάσμα του V_T φτάνει μεν στις κυψελίδες, αλλά υπάρχει ελαττωμένη ή καθόλου αιματική ροή, δημιουργώντας έτσι τον κυψελιδικό νεκρό χώρο. Ο όγκος του φυσιολογικού νεκρού χώρου αναπαριστά το σύνολο του ανατομικού και του κυψελιδικού νεκρού χώρου. Σε υγιή άτομα, ο φυσιολογικός V_D είναι περίπου ίδιος με τον ανατομικό νεκρό χώρο.

Ο κυψελιδικός αερισμός είναι το ποσό του «φρέσκου» αέρα που συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων

Ο όγκος του νέου αέρα ανά λεπτό, που πραγματικά φτάνει στις κυψελίδες, είναι γνωστός ως κυψελιδικός αερισμός (\dot{V}_A). Για να υπολογιστεί ο όγκος αυτός, αφαιρείται ο όγκος του νεκρού χώρου από τον αναπνεόμενο όγκο αέρα και το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την αναπνευστική συχνότητα, f . Αναπαρίσταται με τη σχέση

$$\dot{V}_A = (V_T - V_D) \times f \quad (11)$$

όπου V_T ισούται με τον αναπνεόμενο όγκο αέρα, V_D ισούται με τον όγκο νεκρού χώρου, και f ισούται με τη συχνότητα των αναπνοών. Για παράδειγμα, αν ένα άτομο έχει αναπνευστικό ρυθμό 14 αναπνοές/λεπτό, V_T ίσο με 500 mL, και V_D 150 ml, τότε ο όγκος του αέρα που εισέρχεται στις κυψελίδες είναι 4,9 L/

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.5. Επίδραση των Αναπνευστικών Προτύπων στον Κυψελιδικό Αερισμό

Υποκείμενο	Αναπνεόμενος όγκος αέρα (mL)	'	Συχνότητα (αναπνοές/λεπτό)	=	Κατά λεπτό αερισμός (mL/ min)	-	Αερισμός Νεκρού Χώρου ¹ (mL/min)	=	Κυψελιδικός Αερισμός (mL/min)
A	150	x	40	=	6.000	-	150 x 40	=	0
B	500	x	12	=	6.000	-	150 x 12	=	4.200
Γ	1.000	x	6	=	6.000	-	150 x 6	=	5.100

min [(500 - 150 mL) x 14 = 4.900 mL/min]. Μόνο ο κυψελιδικός αερισμός αναπαριστά το ποσό του νέου αέρα που φτάνει στις κυψελίδες και είναι το μόνο ποσό του αέρα που συμμετέχει στην ανταλλαγή των αερίων. Για παράδειγμα, ένας κολυμβητής που χρησιμοποιεί αναπνευστήρα αναπνέει μέσω ενός σωλήνα που αυξάνει τον όγκο του νεκρού χώρου. Παρομοίως, ένας ασθενής που είναι συνδεδεμένος με μηχανικό αναπνευστήρα έχει επίσης αυξημένο όγκο νεκρού χώρου. Πράγματι, αν ο κατά λεπτό αερισμός διατηρείται σταθερός, τότε ο κυψελιδικός αερισμός μειώνεται κατά την αναπνοή μέσα από αναπνευστήρα ή από σωλήνα μηχανικού αερισμού.

Η σημασία του όγκου του νεκρού χώρου, του κατά λεπτό αερισμού και του κυψελιδικού αερισμού φαίνονται στον Πίνακα 18.5. Η αναπνοή του ατόμου Γ είναι αργή και βαθιά, η αναπνοή του Β είναι φυσιολογική και η αναπνοή του Α είναι ταχεία και ρηχή. Σημειώστε ότι κάθε άτομο εμφανίζει τον ίδιο κατά λεπτό αερισμό (δηλ. το συνολικό ποσό του αέρα που εκπνέεται ανά λεπτό), αλλά ο καθένας έχει διακριτές διαφορές σε ό,τι αφορά τον κυψελιδικό αερισμό. Το άτομο Α δεν παρουσιάζει καθόλου κυψελιδικό αερισμό και θα μπορούσε να πεθάνει εντός μερικών λεπτών, ενώ το άτομο Γ έχει κυψελιδικό αερισμό μεγαλύτερο του φυσιολογικού. Το σημαντικό μάθημα από τα παραδείγματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 18.5 είναι ότι η αύξηση του βάθους της αναπνοής είναι πολύ πιο αποτελεσματική για την αύξηση του κυψελιδικού αερισμού από την αύξηση της συχνότητας ή του ρυθμού των αναπνοών. Ένα καλό παράδειγμα για αυτό είναι η άσκηση, καθώς στις περισσότερες καταστάσεις με αυξημένη φυσική δραστηριότητα, ο αυξημένος κυψελιδικός αερισμός επιτυγχάνεται με αύξηση του βάθους παρά του ρυθμού των αναπνοών. Ένας καλά εκπαιδευμένος αθλητής μπορεί συχνά να αυξήσει τον κυψελιδικό του αερισμό κατά τη διάρκεια μέτριας έντασης άσκησης με μικρή ή σχεδόν καθόλου αύξηση στη συχνότητα των αναπνοών του.

Ο κυψελιδικός αερισμός στους ασθενείς υπολογίζεται από τη μέτρηση του όγκου του εκπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα

Ο κυψελιδικός αερισμός είναι εύκολο να υπολογιστεί αν ο όγκος του νεκρού χώρου είναι γνωστός.

Ωστόσο, ο όγκος του νεκρού χώρου δεν μπορεί να καθοριστεί εύκολα σε έναν υγιή ή σε έναν ασθενή. Συχνά, ο νεκρός χώρος υπολογίζεται 'κατά προσέγγιση για ένα καθήμενο άτομο, εικάζοντας ότι ο νεκρός χώρος (σε χιλιοστά του λίτρου) ισούται με το βάρος του ατόμου σε λίβρες (π.χ., ένα άτομο που ζυγίζει 170 lb θα έχει όγκο νεκρού χώρου γύρω στα 170 mL). Αυτή η υπόθεση είναι σχετικά αξιόπιστη σε υγιή άτομα, αλλά δεν ισχύει για ασθενείς με αναπνευστικά προβλήματα. Ο κυψελιδικός αερισμός υπολογίζεται στο εργαστήριο αναπνευστικής λειτουργίας από τον όγκο του εκπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά λεπτό και την κλασματική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στα κυψελιδικά αέρια (Εικ. 18.13). Αυτή η μέτρηση βασίζεται στις παραδοχές ότι: (1) καμιά ανταλλαγή αερίων δε γίνεται στη ζώνη των αεραγωγών, (2) ο εισπνεόμενος αέρας δεν περιέχει σχεδόν καθόλου διοξείδιο του άνθρακα, και (3) όλο το ποσό του εκπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα προέρχεται από την ανταλλαγή των αερίων στις κυψελίδες.

Έτσι,

$$.VECO_2 = .VA \times FACO_2 \quad (12)$$

όπου $.VECO_2$ ισούται με τον όγκο του εκπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά λεπτό και $FACO_2$ ισούται με την κλασματική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στα κυψελιδικά αέρια. Ανακαταθέτοντας τα μέρη της εξίσωσης, ο κυψελιδικός αερισμός προκύπτει από τη σχέση:

$$.VA = .VECO_2 / FACO_2 \quad (13)$$

Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στις κυψελίδες μπορεί να υπολογιστεί με δειγματοληψία από το τελευταίο μέρος του αναπνεόμενου όγκου αέρα (τελοεκπνευστικός όγκος αέρα), ο οποίος περιέχει κυψελιδικά αέρια. Ο κυψελιδικός αερισμός μπορεί επίσης να καθοριστεί από τη μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα στις κυψελίδες ($PACO_2$), με βάση το γεγονός ότι η $PACO_2$ ισούται με τη $FACO_2$ πολλαπλασιασμένη με τη συνολική πίεση των αερίων στις κυψελίδες. Έτσι, η εξίσωση 13 μπορεί να γραφτεί ως εξής: