

Φυσιολογία Αναπνευστικού

Εισαγωγή

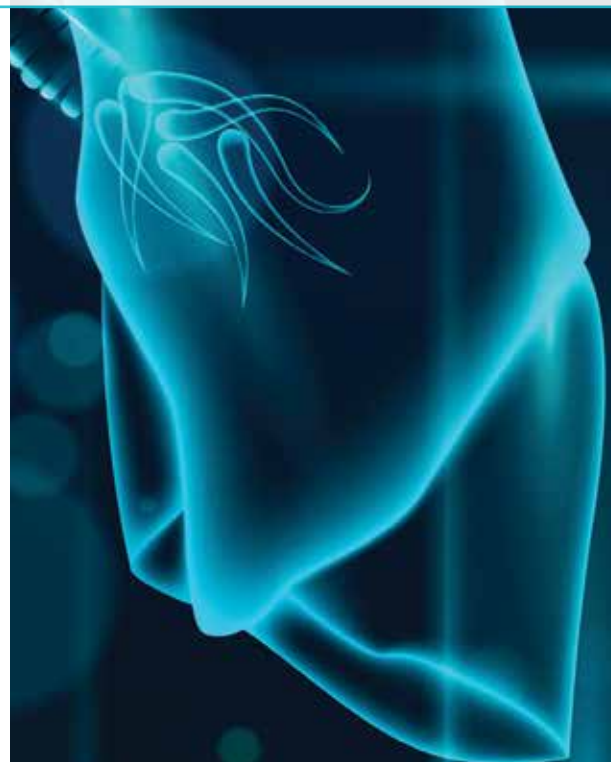
Το αναπνευστικό σύστημα χαρακτηρίζεται από τη συνεχή δράση των αναπνευστικών μυών και τη μεταβολή του όγκου του πνεύμονα, με σκοπό τη διατήρηση του αερισμού και της ανταλλαγής των αερίων. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση βασικών αρχών της φυσιολογίας του αναπνευστικού συστήματος, με επίκεντρο τη μηχανική της αναπνοής, η κατανόηση της οποίας είναι η βάση για τη μελέτη του λειτουργικού ελέγχου της αναπνοής και της νοσολογίας του αναπνευστικού. Αναγνωρίζουμε ότι μια αναλυτική περιγραφή της φυσιολογίας του αναπνευστικού είναι αδύνατη στην έκταση του παρόντος κεφαλαίου και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται σε κλασικά συγγράμματα και ανασκοπήσεις για περαιτέρω μελέτη.

Διαδικασία Αναπνοής

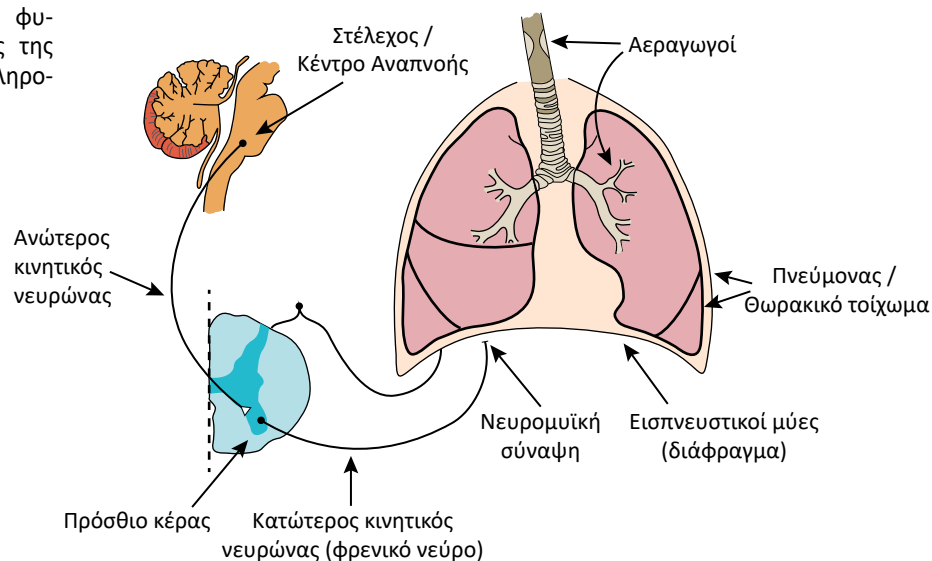
Ο αναπνευστικός κύκλος αποτελείται από την εισπνοή και την εκπνοή. Σε συνθήκες ήρεμης αναπνοής, η εισπνοή αποτελεί μία ενεργητική διαδικασία, απαραίτητη για την υπερνίκηση των αντιστάσεων (Rrs) και του ελαστικού φορτίου του αναπνευστικού συστήματος (Ers), ενώ η εκπνοή γίνεται παθητικά, με τη χαλάρωση των εισπνευστικών μυών.

Η ρύθμιση του κατά λεπτόν αερισμού διενεργείται στους πυρήνες του κέντρου της αναπνοής, το οποίο εντοπίζεται στον προμήκη και τη γέφυρα (Εικόνα 1.1). Κεντρικό ρόλο στον έλεγχο του ρυθμού της αναπνοής έχει το σύμπλεγμα Pre-Botzinger, μία ομάδα κυττάρων που ανήκουν στον δικτυωτό σχηματισμό του στελέχους και εδράζονται στην κοιλιο-πλάγια περιοχή του προμήκους.

Το κέντρο της αναπνοής δέχεται πληροφορίες, κυρίως από τους κεντρικούς και τους περιφερικούς χημειούποδοχείς, οι οποίοι εδράζονται



Εικόνα 1.1 Παρουσιάζεται ο φυσιολογικός μηχανισμός ρύθμισης της αναπνευστικής λειτουργίας. Για πληροφορίες βλ. κείμενο.



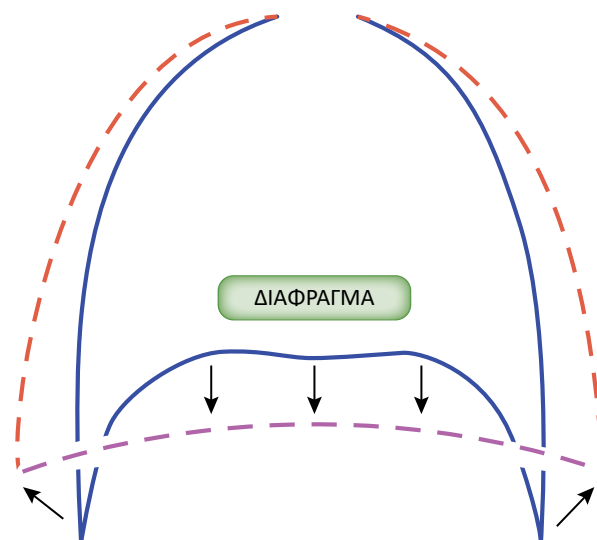
στο κεντρικό νευρικό σύστημα (Κ.Ν.Σ.) και τα καρωτιδικά σωμάτια, αντίστοιχα. Οι κεντρικοί χημειοϋποδοχείς ανιχνεύουν μεταβολές του pH και του PaCO_2 , ενώ οι περιφερικοί χημειοϋποδοχείς αντιδρούν στο pH, το PaCO_2 αλλά και σε μεταβολές του PaO_2 . Ταυτόχρονα, το κέντρο της αναπνοής δέχεται προσαγωγές πληροφορίες από πληθώρα άλλων οργάνων, μεταξύ των οποίων, οι αναπνευστικοί μύες, το θωρακικό τοίχωμα και άλλα κέντρα του Κ.Ν.Σ., συμπεριλαμβανομένων του υποθαλάμου και του φλοιού. Η τελική ώση μεταβιβάζεται μέσω των ανώτερων και κατώτερων (περιφερικών) κινητικών νευρώνων στους εισπνευστικούς μύς, δηλαδή στο διάφραγμα (φρενικό νεύρο) και στους έξω μεσοπλεύριους μύς (μεσοπλεύρια νεύρα).

Ως εκ τούτου, η ικανοποιητική διατήρηση του αερισμού βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ της νευρομυϊκής επάρκειας του αναπνευστικού (κέντρο αναπνοής, νευρική ώση, αναπνευστικοί μύες) και του έργου της αναπνοής (ελαστικό φορτίο, φορτίο αντιστάσεων) (Εικόνα 1.2).

Όγκοι και Χωρητικότητα

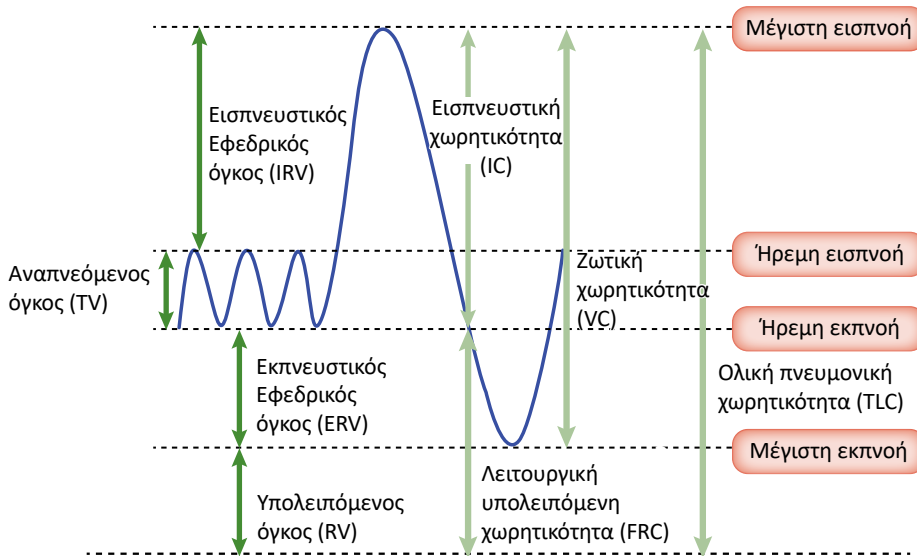
Το αναπνευστικό σύστημα παρουσιάζει μία συνεχή μεταβολή του όγκου του κατά τη διάρκεια του αναπνευστικού κύκλου (Εικόνα 1.3).

Αναγνωρίζονται 4 βασικοί όγκοι: ο αναπνεόμενος όγκος (tidal volume, TV) είναι η μεταβολή του όγκου του αναπνευστικού σε μία ήρεμη αναπνοή, ο εισπνευστικός εφεδρικός όγκος (inspira-



Εικόνα 1.2 Κατά την εισπνοή, το διάφραγμα, ο βασικός εισπνευστικός μυς, συσπάται και μετατοπίζεται προς τα κάτω. Ταυτόχρονα, λόγω της αύξησης της ενδοκοιλιακής πίεσης, οι κατώτερες πλευρές του θωρακικού τοιχώματος μετατοπίζονται προς τα εκτός. Συνδυαστικά τα δύο γεγονότα, αυξάνουν τον όγκο του θωρακικού κλωβού.

tory reserve volume, IRV) είναι ο μέγιστος όγκος αέρα που δύναται να εισέλθει στο αναπνευστικό περαιτέρω, μετά από μία ήρεμη αναπνοή, ο εκπνευστικός εφεδρικός όγκος (expiratory reserve volume, ERV) είναι ο μέγιστος όγκος αέρα που δύναται να αποβληθεί από το αναπνευστικό περαιτέρω, μετά από μία ήρεμη εκπνοή και ο υπολειπόμενος όγκος (residual volume, RV) είναι ο όγκος αέρα που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα μετά από μία μέγιστη εκπνοή. Από το



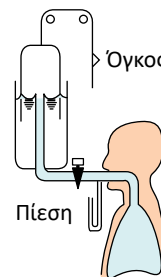
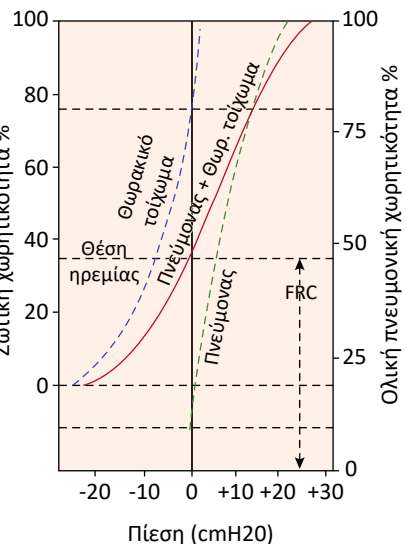
Εικόνα 1.3 Σχηματικός προσδιορισμός των όγκων και των χωρητικότητων του αναπνευστικού συστήματος. Για περαιτέρω πληροφορίες βλ. κείμενο.

άθροισμα των επιμέρους όγκων προκύπτουν οι πνευμονικές χωρητικότητες. Συγκεκριμένα, η εισπνευστική χωρητικότητα (inspiratory capacity, IC) είναι το άθροισμα του αναπνεόμενου και εφεδρικού εισπνευστικού όγκου, ενώ η λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα (functional residual capacity, FRC) είναι το άθροισμα του εκπνευστικού εφεδρικού και υπολειπόμενου όγκου.

Η λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα κατέχει κεντρικό ρόλο στη φυσιολογία του αναπνευστικού, καθώς αποτελεί τον όγκο αέρα που παραμένει στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος μια ήρεμης εκπνοής. Επίσης μεγάλη σημασία δίνεται στη ζωτική χωρητικότητα (vital capacity, VC), δηλαδή στη μεταβολή του όγκου αέρα από τη μέγιστη εισπνοή στη μέγιστη εκπνοή και στην ολική πνευμονική χωρητικότητα (total lung capacity, TLC), δηλαδή στον συνολικό όγκο αέρα στο αναπνευστικό σύστημα στο τέλος μίας μέγιστης εισπνοής.

Σχέση Πίεσης Όγκου

Η σχέση πίεσης / όγκου (Εικόνα 1.4) του αναπνευστικού συστήματος μπορεί να μελετηθεί με τη χρήση ενός μανομέτρου (μετρητή πίεσης) και ενός ροομέτρου (καταγραφή όγκου), συνδεδεμένα με ένα επιστόμιο, σε συνθήκες μηδενικής ροής (στατικές). Όπως φαίνεται στην εικόνα 4, σε κάθε όγκο, η ελαστική τάση επαναφοράς του αναπνευστικού συστήματος (P_{rs}) είναι το αλγεβρικό άθροισμα της πίεσης του πνεύμονα (P_L) και του θωρακικού τοιχώματος (P_{cw}),



Εικόνα 1.4 Καμπύλη πίεσης/όγκου του πνεύμονα, του θωρακικού τοιχώματος και του αναπνευστικού συστήματος, συνολικά.

$$P_{rs} = P_L + P_{cw}$$

Σημειώστε ότι σε αντίθεση με τον πνεύμονα, ο οποίος παρουσιάζει θετική πίεση ελαστικής επαναφοράς σε οποιονδήποτε όγκο, το θωρακικό τοίχωμα παρουσιάζει την τάση να εκπτυχθεί (αρνητική τιμή πίεσης) έως και περίπου το 75% της ζωτικής χωρητικότητας.

Σε συνθήκη ηρεμίας (τέλος ήρεμης εκπνοής), η ελαστική τάση επαναφοράς του πνεύμονα, ισοδυναμεί με την ελαστική τάση έκπτυξης του

θωρακικού τοιχώματος και το αναπνευστικό σύστημα είναι σε θέση ισορροπίας, με τον όγκο να αντιστοιχεί στη λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα. Λόγω της αντίθετης τάσης του πνεύμονα και του θωρακικού τοιχώματος, η υπεζωκοτική πίεση στην θέση ηρεμίας έχει αρνητικές τιμές.

Η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του αναπνευστικού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες μηδενικής ροής (στατικές συνθήκες) ή κατά την διάρκεια αναπνευστικής ροής (δυναμικές συνθήκες). Στην πρώτη περίπτωση, λαμβάνουμε σημαντικές πληροφορίες για τη στατική ενδοτικότητα του αναπνευστικού συστήματος, ενώ στη δεύτερη υπολογίζονται κυρίως οι αντιστάσεις των αεραγωγών.

Το Αναπνευστικό σε Στατικές Συνθήκες

Η σχέση πίεσης-όγκου του αναπνευστικού συστήματος σε στατικές συνθήκες επιτρέπει τον υπολογισμό της στατικής ενδοτικότητας (static compliance, C_{st}), έναν δείκτη της διατασιμότητας (ευκολίας έκπτυξης) του αναπνευστικού συστήματος, σύμφωνα με τον τύπο:

$$C_{st} = \Delta \text{Όγκου} / \Delta \text{Πίεσης}$$

Παρατηρήστε στην εικόνα 5, ότι η C_{st} είναι ουσιαστικά η κλίση της καμπύλης πίεσης-όγκου του αναπνευστικού συστήματος και ότι αυτή μεταβάλλεται μη γραμμικά σε σχέση με τον αναπνεύσιμο όγκο, κάτι που οφείλεται στην επιφανειακή τάση και τις ελαστικές ιδιότητες του αναπνευστι-

κού συστήματος. Σε χαμηλούς όγκους, επίσης, παρατηρείται μείωση της κλίσης της καμπύλης πίεσης-όγκου ως αποτέλεσμα της δημιουργίας μικρο-ατελεκτασιών (de-recruitment) (Εικόνα 1.5).

Ένα κεντρικό χαρακτηριστικό της στατικής καμπύλης πίεσης-όγκου είναι η υστέρηση, δηλαδή η απόκλιση που παρουσιάζει το εισπνευστικό από το εκπνευστικό σκέλος (για τον ίδιο όγκο, έχουμε μικρότερη πίεση στην εκπνοή). Αυτό οφείλεται κυρίως στη δράση του επιφανειοδραστικού παράγοντα, στην αντίσταση των ιστών (viscoelasticity) και την απορρόφηση του αέρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

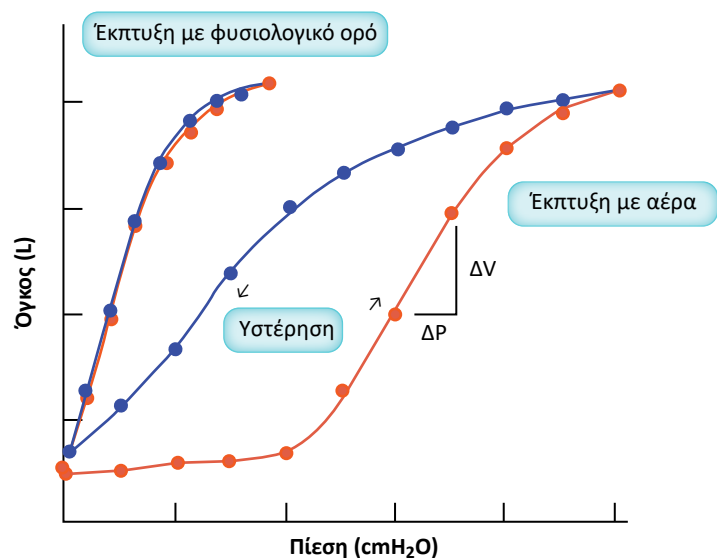
Το Αναπνευστικό σε Δυναμικές Συνθήκες

Κατά τη διάρκεια της εισπνοής, η σύσπαση των εισπνευστικών μυών προσθέτει μία εισπνευστική δύναμη (P_{mus} , αρνητική ως εισπνευστική), η οποία μεταδίδεται μέσω του υπεζωκοτικού χώρου στις κυψελίδες, όπου η πίεση (P_{alv}) γίνεται αρνητική. Έτσι, δημιουργείται μία κλίση πίεσης μεταξύ του κυψελιδικού χώρου και της αρχής των αεραγωγών (στόμα), προκαλώντας ροή αέρα (\dot{V}).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6, η ελαστική τάση επαναφοράς του πνεύμονα (P_L) εξισορροπείται από την ίση και αντίθετη συνισταμένη πίεσης έκπτυξης του πνεύμονα που προκύπτει από την διαφορά της υπεζωκοτικής πίεσης (P_{pl}) και της πίεσης στις κυψελίδες (P_{alv}):

$$P_L = -(P_{pl} - P_{alv}) = P_{alv} - P_{pl}$$

Εικόνα 1.5 Στατική καμπύλη πίεσης-όγκου του αναπνευστικού συστήματος σε εισπνοή (↙) και εκπνοή (↗). Παρατηρείστε ότι η έκπτυξη του αναπνευστικού συστήματος με φυσιολογικό ορό απαιτεί λιγότερη πίεση, έναντι της έκπτυξης με αέρα, κάτι που υποδηλώνει την επίδραση της επιφανειακής τάσης του υγρού που επικαλύπτει την επιφάνεια των κυψελίδων στην ελαστική τάση επαναφοράς του αναπνευστικού συστήματος.



$$P_L = -(P_{pl} - P_{alv}) = P_{alv} - P_{pl} \text{ , επομένως}$$

$$P_{alv} = P_L + P_{pl}$$

Όσον αφορά στο θωρακικό τοίχωμα, η παθητική τάση επαναφοράς (P_{cw}) ισορροπείται από τη συνισταμένη δύναμη έκπτυξης που δίνεται από τη διαφορά των πιέσεων από τη μυική σύσπαση (P_{mus}) των εισπνευστικών μυών και την υπεζωκοτική πίεση (P_{pl}), (Εικόνα 1.6) δηλαδή:

$$P_{CW} = -(P_{mus} - P_{pl}) = P_{pl} - P_{mus}$$

$$P_{CW} = -(P_{mus} - P_{pl}) = P_{pl} - P_{mus} \text{ , επομένως}$$

$$P_{mus} = P_{pl} - P_{cw} \quad P_{mus} = P_{pl} - P_{cw}$$

Η πίεση που αναπτύσσεται καταναλώνεται για την υπερνίκηση των ελαστικών δυνάμεων επαναφοράς του αναπνευστικού συστήματος (αύξηση όγκου, V) και για την υπερνίκηση των αντιστάσεων των αεραγωγών (ροή αέρα, \dot{V}). Έτσι προκύπτει η εξίσωση κινητικής του αναπνευστικού συστήματος:

$$P_{mus} = 1/C_{rs} * V + R_{rs} * \dot{V}$$

Τονίζεται ξανά ότι στη φυσιολογία του αναπνευστικού, η ενδοτικότητα εκφράζει την «ευκολία» έκπτυξης του αναπνευστικού συστήματος και είναι αντιστρόφως ανάλογη της ελαστικότητας (E) αυτού, δηλαδή $C = 1 / E$.

Σύμφωνα με τον νόμο του Poiseuille για τη

σχέση πίεσης – ροής (\dot{V}) σε ευθύ αγωγό κυκλικής διατομής ισχύει:

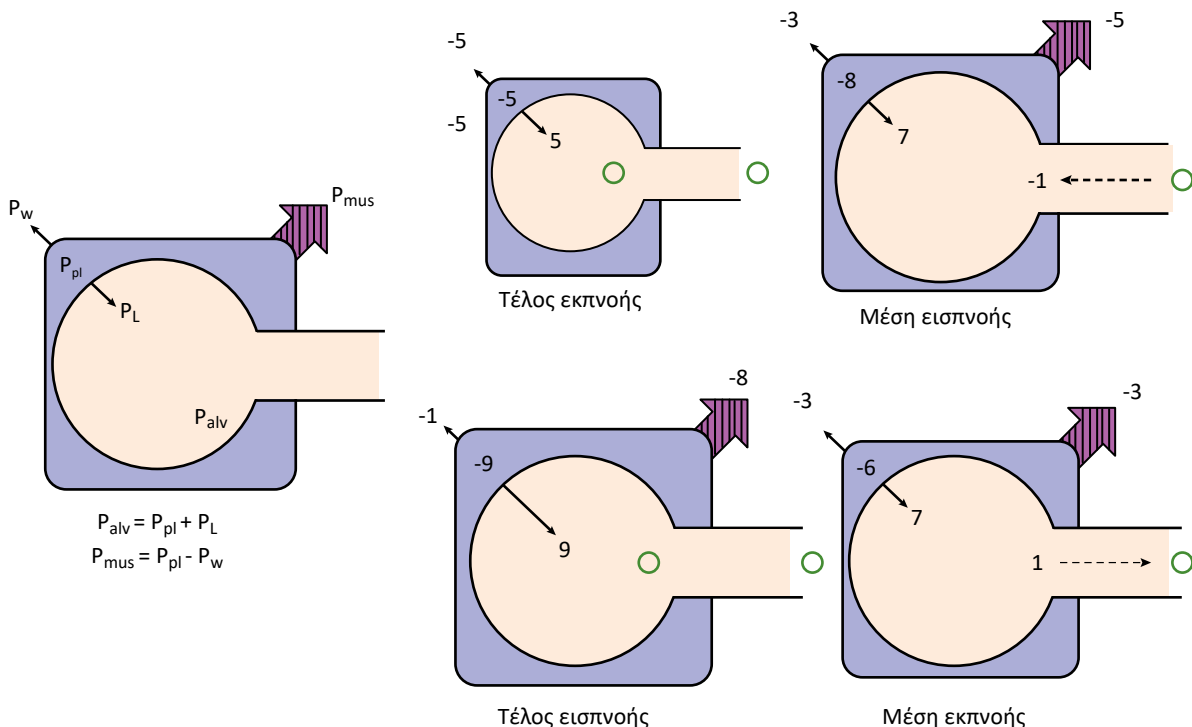
$$\dot{V} = \Delta \text{Πίεση} * \pi r^4 / 8nl$$

όπου Δ Pressure είναι η οδηγός πίεση, r η ακτίνα του αγωγού, n η γλοιότητα του ρευστού και l το μήκος του αγωγού.

Επειδή όμως, σε γραμμική ροή, η αντίσταση στην ροή (R) ισούται με την οδηγό πίεση δια την ροή, προκύπτει ότι:

$$R = \frac{8nl}{\pi r^4}$$

Από το παραπάνω γίνεται σαφές, ότι το κυριότερο στοιχείο που καθορίζει την αντίσταση ενός αεραγωγού είναι η ακτίνα της διατομής του και όχι το μήκος του. Ως γνωστόν, η ακτίνα ενός αεραγωγού καθορίζεται με τη σειρά της από τα δομικά στοιχεία του τοιχώματος του αεραγωγού, τον όγκο του αναπνευστικού συστήματος (η έκπτυξη του πνεύμονα αυξάνει τη διάμετρο των αεραγωγών, μέσω ακτινωτής έλξης), τη σύσπαση των λείων μυικών ινών του αεραγωγού και τη δράση του αυτόνομου νευρικού συστήματος (η ενεργοποίηση του παρασυμπαθητικού προκαλεί βρογχοσύσπαση, ενώ η ενεργοποίηση αδρενεργικών υποδοχέων προκαλεί βρογχοδιαστολή).



Εικόνα 1.6 Παρουσίαση των πιέσεων που αναπτύσσονται στο αναπνευστικό σύστημα κατά την διάρκεια του αναπνευστικού κύκλου.

Βιβλιογραφία

1. West J.B., Respiratory Physiology. The essentials. 9th Ed., 2012, Lippincott Williams & Wilkins.
2. Macklem P.T. and Mead J., Handbook of Physiology. Volume III. Mechanics of breathing, 1986, American Physiological Society.
3. Vassilakopoulos T, Zakynthinos S, Roussos C. Respiratory muscles and weaning failure. Eur Respir J. 1996;9(11):2383-400.
4. Petersson J, Glenn RW. Gas exchange and ventilation-perfusion relationships in the lung. Eur Respir J. 2014;44(4):1023-41.