

Αναπνευστικές Παράμετροι

ΓΕΩΡΓΙΑ ΠΑΡΟΥΤΣΙΔΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σωστή ερμηνεία των κυματομορφών ροής, πίεσης και όγκου είναι ζωτικής σημασίας στην αντιμετώπιση των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών. Στην κυματομορφή ροής - χρόνου το εισπνευστικό τμήμα διαφέρει ανάλογα με τη μορφή αερισμού, ενώ το εκπνευστικό τμήμα παρέχει σημαντικές πληροφορίες σε αποφρακτικού ή περιοριστικού τύπου διαταραχές. Η κυματομορφή πίεσης - χρόνου είναι πολύ χρήσιμη στην εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πνεύμονα και στη διαφορική διάγνωση της εμφάνισης αυξημένων ενδοπνευμονικών πιέσεων. Όσον αφορά τις συνδυασμένες κυματομορφές, ο βρόγχος πίεσης - όγκου είναι ένα πολύτιμο εργαλείο καθώς μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί το αναπνευστικό έργο και η ευενδοτότητα του πνεύμονα. Τέλος, ο βρόγχος ροής - όγκου είναι χρήσιμος στη εκτίμηση της ανταπόκρισης του ασθενούς στη χορήγηση βρογχοδιασταλτικών.

Λέξεις Κλειδιά: Κυματομορφές στο μηχανικό αερισμό, Καμπύλες πίεσης - όγκου -ροής

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές καινοτομίες έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα του μηχανικού αερισμού τα τελευταία χρόνια. Αυτές συμπεριλαμβάνουν μεταξύ άλλων και δυνατότητες παρακολούθησης και καταγραφής κυματομορφών πίεσης, ροής και όγκου. Οι κυματομορφές αυτές συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση της παθοφυσιολογίας των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών, έτσι ώστε να προσαρμοστούν ανάλογα οι παράμετροι αερισμού και να επιτευχθεί ο καλύτερος συνδυασμός αυτών κατά κλινική περίπτωση. Η δυνατότητα απεικόνισης κυματομορφών μετατρέπει τους σύγχρονους αναπνευστήρες σε δείκτες της μηχανικής των πνευμόνων και της αλληλεπίδρασης ασθενούς - αναπνευστήρα. Συγκεκριμένα, με τη χρήση τους μας δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσουμε την εξέλι-

ξη της παθολογίας της αναπνοής υπολογίζοντας διάφορες παραμέτρους (πχ ευενδοτότητα), να εκτιμήσουμε την ανταπόκριση του ασθενούς σε διάφορες θεραπευτικές παρεμβάσεις και να προσαρμόσουμε τις ρυθμίσεις έτσι ώστε να μειώσουμε στο ελάχιστο το έργο αναπνοής του ασθενούς και τις πιθανές επιπλοκές του μηχανικού αερισμού.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΠΝΕΥΜΟΝΩΝ

Γενικοί όροι

Η μηχανική παρεμπόδιση στη μετακίνηση του αέρα διαμέσου των αεραγωγών και η επερχόμενη αλλαγή της γεωμετρίας των πνευμόνων και του θώρακος κατά την αναπνοή μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η συνιστώσα που οφείλεται σε δυνάμεις που αντιτίθενται στη ροή του αέρα διαμέσου των αεραγωγών ονομάζεται αντίσταση στη

ροή ή κοινώς αντίσταση (R - resistance, $R = \Delta P/\Delta V$). Η δεύτερη συνιστώσα που αφορά στην υπερνίκηση των ελαστικών αντιστάσεων που αντιτίθενται στη διάταση των πνευμόνων και του θώρακος κατά την εισπνοή, ονομάζεται ελαστικότητα (E - elastance), με αντίστροφό της την ευενδοτότητα (C - compliance, $C = \Delta P/\Delta V$). Οι πιθανές δυνάμεις αδράνειας που αντίστοιχα προκύπτουν θεωρούνται αμελητέες σε κλινικό επίπεδο.

Η εξίσωση της κίνησης

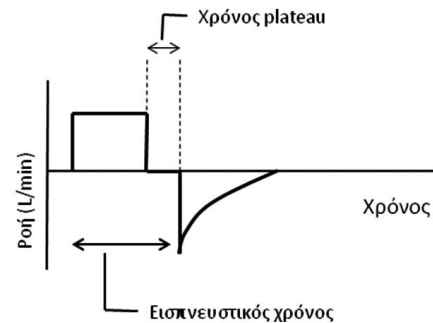
Η εξίσωση της κίνησης περιγράφει τη μεταβολή πίεσης στο άνοιγμα των αεραγωγών κατά τη διάρκεια της αναπνοής. Η εξίσωση προϋποθέτει πως ο πνεύμονας εκπύσσεται το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις και είναι η εξής:

$$\Delta P_{ao}P = (\dot{V} \times R) + V/C$$

Όπου ΔP_{ao} η μεταβολή της πίεσης στο άνοιγμα των αεραγωγών (στόμα ή ενδοτραχειακός σωλήνας), η ροή στους πνεύμονες του ασθενούς, R η αντίσταση στη ροή του αέρα, \dot{V} ο αναπνεόμενος όγκος και C η ευενδοτότητα του αναπνευστικού συστήματος. Πραγματοποιώντας παύση στο τέλος της εισπνοής (ώστε $\dot{V}=0$) η εξίσωση αυτή αντανάκλα την ευενδοτότητα.

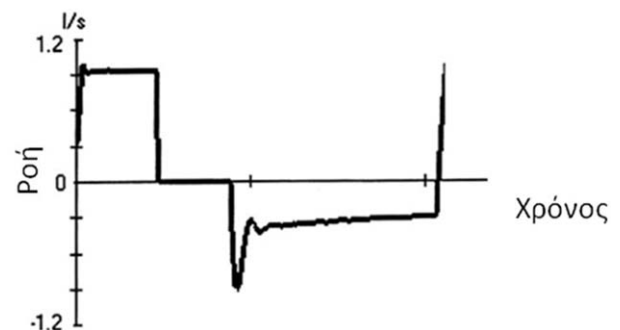
ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΡΟΗΣ, ΠΙΕΣΗΣ, ΟΓΚΟΥ Κυματομορφές ροής - χρόνου

Σε μία κυματομορφή ροής η εισπνευστική ροή απεικονίζεται συνήθως πάνω από τον άξονα του χρόνου (άξονας χ) ενώ η εκπνευστική ροή απεικονίζεται κάτω από τον άξονα του χρόνου. Στην εικόνα 1 φαίνεται μία κυματομορφή ροής-χρόνου "σταθερής ροής". Στην αρχή της εισπνοής παρατηρείται άμεση άνοδος μέχρι την προκαθορισμένη τιμή, η οποία παραμένει σταθερή μέχρι να επιτευχθεί ο αναπνεόμενος όγκος. Στην αρχή του χρόνου plateau (εισπνευστική παύση), η ροή γρήγορα επιστρέφει στο μηδέν. Στο τέλος του χρόνου plateau, η εισπνοή τελειώνει και αρχίζει η εκπνοή. Σε αυτό το σημείο η ροή αναστρέφεται, πράγμα το οποίο μεταφέρει την καμπύλη κάτω από τη μηδενική γραμμή. Η εκπνευστική φάση (πάντα παθητική)

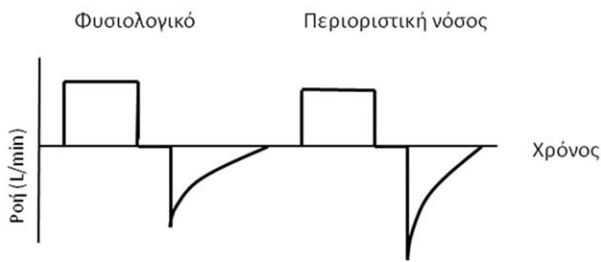


Εικόνα 1. Κυματομορφή ροής - χρόνου (σταθερής ροής). δημιουργεί μία εκθετική καμπύλη σταδιακά μειούμενης ροής.

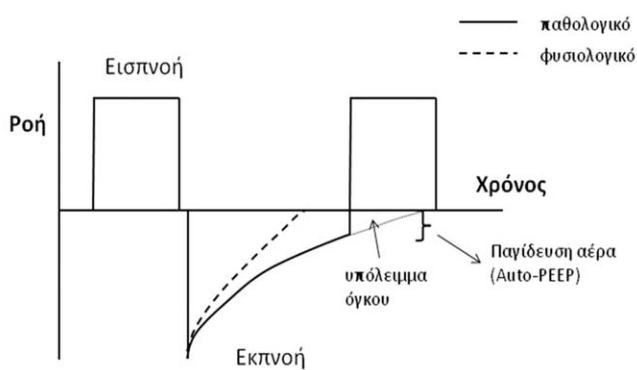
Η πορεία της ροής στην εκπνευστική φάση δίνει μία ολοκληρωμένη εικόνα της συνολικής αντίστασης και ευενδοτότητας των πνευμόνων και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από στοιχεία του ασθενούς όπως ο τελοεισπνευστικός όγκος πνευμόνων, η ελαστική επαναφορά των πνευμόνων και χαρακτηριστικά των αεραγωγών και δεν εξαρτάται από τον τύπο αερισμού. Για το λόγο αυτό το εκπνευστικό τμήμα της καμπύλης μπορεί να αναλυθεί με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους τύπους αερισμού. Μία σημαντική πληροφορία που μπορούμε να πάρουμε από το εκπνευστικό μέρος της κυματομορφής είναι κάποια αποφρακτικού τύπου διαταραχή η οποία φαίνεται χαρακτηριστικά με καθυστέρηση της εκπνευστικής ροής (εικόνα 2). Από την άλλη, σε μειωμένη ευενδοτότητα η εκπνευστική ροή είναι αρχικά μεγαλύτερη και η εκπνοή ολοκληρώνεται ταχύτερα λόγω των αυξημένων δυνάμεων ελαστικής επαναφοράς (εικόνα 3). Αν η εκπνευστική ροή δεν μηδενιστεί πριν την έναρξη της επόμενης εισπνοής, τότε στον ασθενή υπάρχει παγίδευση αέρα (ύπαρξη auto-PEEP) (εικόνα 4).



Εικόνα 2. Κυματομορφή ροής - χρόνου σε ασθενή με αποφρακτικού τύπου διαταραχή.

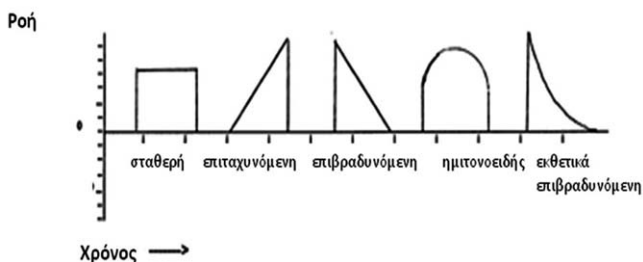


Εικόνα 3. Κυματομορφή ροής - χρόνου σε ασθενή με περιοριστική νόσο.



Εικόνα 4. Κυματομορφή ροής χρόνου σε ασθενή με auto-PEEP.

Η μορφή του εισπνευστικού τμήματος της κυματομορφής ροής - χρόνου εξαρτάται από τον τύπο αερισμού. Σε αερισμό "σταθερής ροής" όπως είναι ο αερισμός ελεγχόμενου όγκου η μέγιστη εισπνευστική ροή είναι προκαθορισμένη και παραμένει σταθερή για όλη την εισπνευστική φάση. Εναλλακτικές μορφές ροής είναι η φθίνουσα ή επιβραδυνόμενη, η επιταχυνόμενη, η ημιτονοειδής και η εκθετικά επιβραδυνόμενη (εικόνα 5).

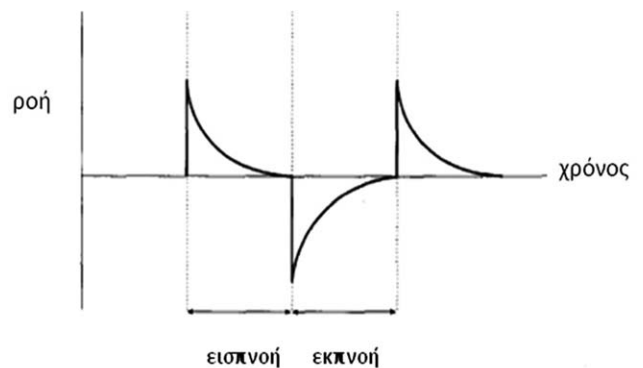


Εικόνα 5. Διάφορες μορφές του εισπνευστικού τμήματος της κυματομορφής ροής.

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες οι οποίες εκτιμούν τις διαφορές που εμφανίζουν οι παραπάνω μορφές ροής όσον αφορά στις επιδράσεις τους στην ανταλλαγή αερίων, τις συστηματικές πιέσεις και άλλες παραμέτρους. Από αυτές τις μελέτες μπορούν να βγουν τα παρακάτω συμπεράσματα!:

- Η μέση πίεση των αεραγωγών είναι υψηλότερη με τη φθίνουσα μορφή ροής και χαμηλότερη με την επιταχυνόμενη.
- Η μέγιστη πίεση των αεραγωγών είναι χαμηλότερη με τη φθίνουσα μορφή ροής και υψηλότερη με την επιταχυνόμενη.
- Η κατανομή των αερίων βελτιώνεται με τη φθίνουσα μορφή ροής. Το αποτέλεσμα αυτής της βελτιωμένης κατανομής είναι η μείωση του πνευμονικού shunt και του νεκρού χώρου.

Στους αναπνευστήρες τελευταίας τεχνολογίας συνήθως παρέχονται η ορθογώνια ροή, η επιβραδυνόμενη και η εκθετικά επιβραδυνόμενη. Σε αερισμό ελεγχόμενου όγκου είναι διαθέσιμη η σταθερή και η επιβραδυνόμενη μορφή ροής, ενώ σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης είναι διαθέσιμη η εκθετικά επιβραδυνόμενη μορφή. Συγκεκριμένα στον αερισμό ελεγχόμενης πίεσης μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες όσον αφορά τον συνδυασμό της αντίστασης και ελαστικότητας των πνευμόνων εξετάζοντας την κλίση καθόδου της εισπνευστικής ροής (εικόνα 6).



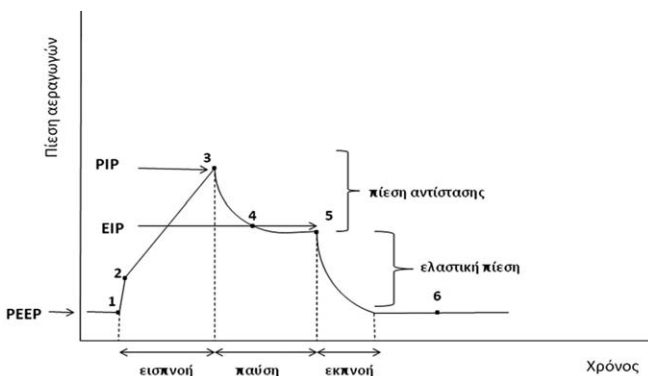
Εικόνα 6. Κυματομορφή ροής χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης.

Στην περίπτωση αυτή η ροή πέφτει κατά τη διάρκεια της εισπνοής καθώς η αυξανόμενη πίεση στις κυψελίδες μειώνει την οδηγό πίεση της ροής. Ο ρυθμός πτώσης της ροής σχετίζεται με το πόσο γρήγορα ανεβαίνει η κυψελιδική πίεση (P_{alv}),

γεγονός το οποίο εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των πνευμόνων².

Κυματομορφές πίεσης - χρόνου

Στην εικόνα 7 φαίνεται μία κυματομορφή πίεσης χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενου όγκου (σταθερής ροής). Στην αρχή της εισπνοής η πίεση μεταξύ των σημείων 1 και 2 αυξάνει πάρα πολύ λόγω της αντίστασης του συστήματος. Μετά το σημείο 2, η πίεση αυξάνεται σε ευθεία γραμμή ως το σημείο 3 που αντικατοπτρίζει τη μέγιστη πίεση των αεραγωγών (PIP - Peak Inspiratory Pressure ή P_{peak}). Στο σημείο 3 έχει ήδη χορηγηθεί ο ορισμένος αναπνεύσιμος όγκος και μηδενίζεται η ροή. Λόγω της έλλειψης ροής, η πίεση γρήγορα πέφτει στην τελοεισπνευστική πίεση (EIP - End Inspiratory Pressure ή $P_{plateau}$) (σημείο 5). Μπορεί να υπάρξει μία μικρή μείωση της πίεσης μεταξύ των σημείων 4 και 5 λόγω της επιστράτευσης κυψελίδων και απωλειών στο σύστημα. Στο σημείο 5 αρχίζει η εκπνοή λόγω των δυνάμεων ελαστικής επαναφοράς του θώρακα και είναι μία παθητική διαδικασία.



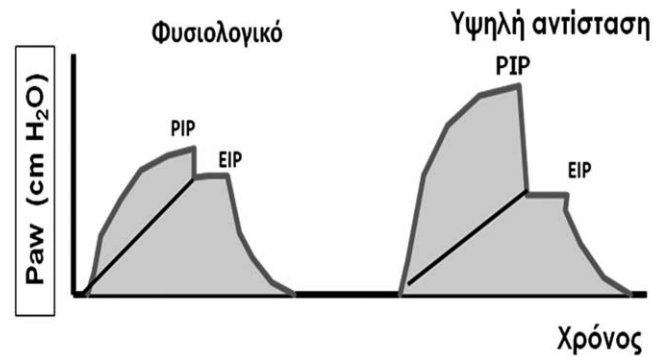
Εικόνα 7. Κυματομορφή πίεσης - χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενου όγκου.

Η μέγιστη πίεση των αεραγωγών (PIP) αντιπροσωπεύει τη συνολική πίεση που χρειάζεται για να ξεπεραστεί η αντίσταση στην εισπνευστική ροή (πίεση αντίστασης - resistive pressure), η ελαστική επαναφορά των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος (ελαστική πίεση - elastic pressure) και η πίεση στις κυψελίδες που είναι παρούσα στην έναρξη της εισπνοής (θετική τελοεισπνευστική πίεση - PEEP).

Η τελοεισπνευστική πίεση (EIP) αντιπροσωπεύει τη στατική πίεση που ασκείται στους μικρούς

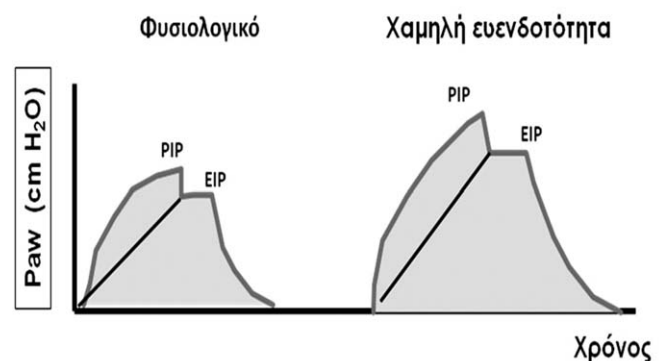
αεραγωγούς και τις κυψελίδες. Ο έλεγχος της πίεσης αυτής είναι σημαντικός γιατί οι αυξημένες τιμές της έχουν συνδεθεί άμεσα με βλάβη του πνευμονικού παρεγχύματος (Ventilator Induced Lung Injury - VILI)³.

Η διαφορά μεταξύ PIP και EIP (πίεση αντίστασης) αντικατοπτρίζει τις πιέσεις που αναπτύσσονται από τις αντιστάσεις των μεγάλων αεραγωγών αλλά και από τις αντιστάσεις του αναπνευστικού κυκλώματος (και του ενδοτραχειακού σωλήνα). Για παράδειγμα σε μία κρίση άσθματος, παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ PIP και EIP (εικόνα 8). Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί σε ασθενή με μικρού μεγέθους ενδοτραχειακό σωλήνα ή σε τσάκισμα ή σε απόφραξη του ενδοτραχειακού σωλήνα από εκκρίσεις.



Εικόνα 8. Κυματομορφή πίεσης σε ασθενή με οξεία κρίση άσθματος

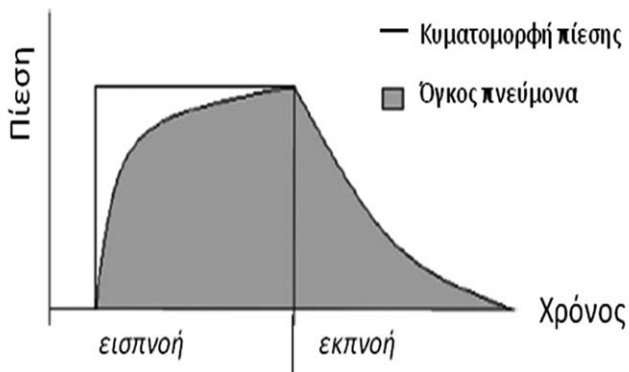
Η ελαστική πίεση είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων ελαστικής επαναφοράς των πνευμόνων και του θωρακικού τοιχώματος καθώς και του χορηγηθέντος όγκου αερίων. Οι τιμές της είναι αυξημένες σε μειωμένη ευενδοτότητα του πνεύμονα (πχ



Εικόνα 9. Κυματομορφή πίεσης σε ασθενή με μειωμένη ευενδοτότητα πνευμόνων

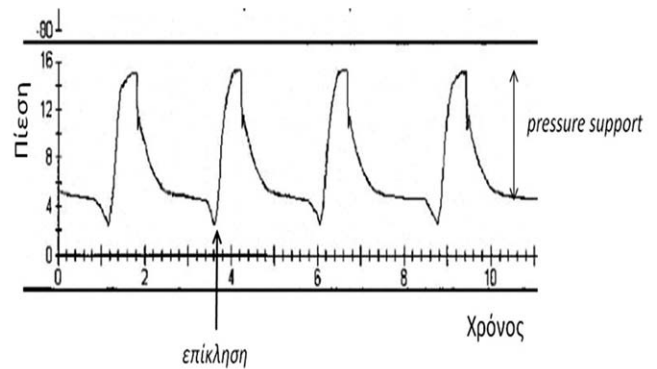
πνευμονική ίνωση, ατελεκτασία) ή σε μειωμένη έκπτυξη του θωρακικού τοιχώματος ή του διαφράγματος (πχ ασκίτης, παχυσαρκία, εγκυμοσύνη). (εικόνα 9)

Σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης, το όριο πίεσης (δηλαδή η μέγιστη πίεση) είναι η ΕΙΡ. Κατά την εισπνευστική φάση τα αέρια εισέρχονται απότομα μέσα στο αναπνευστικό κύκλωμα για να ανεβάσουν την πίεση μέχρι έναν συγκεκριμένο στόχο πίεσης. Μόλις αυτό επιτευχθεί, η ροή προσαρμόζεται έτσι ώστε να διατηρήσει την πίεση στα ίδια επίπεδα για όσο διάστημα διαρκεί η εισπνοή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μορφή της κυματομορφής πίεσης να είναι σχεδόν ορθογώνια (εικόνα 10).



Εικόνα 10. Κυματομορφή πίεσης - χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης. Η πίεση εμφανίζει τετραγωνισμένη μορφή και επιτυγχάνει απόδοση του μεγαλύτερου μέρους του αναπνεόμενου όγκου πρώιμα στην εισπνοή.

Παρόμοια θα είναι η κυματομορφή της πίεσης και στον αερισμό υποβοηθούμενης αυτόματης αναπνοής με τη μορφή του pressure support αερισμού (εικόνα 11). Εδώ η έναρξη της εισπνοής ελέγχεται από τον ασθενή μέσω της επίκλησης (trigger) και η κάθε αναπνοή υποστηρίζεται με θετική πίεση που φτάνει σε μία προκαθορισμένη τιμή. Η έναρξη της εκπνοής καθορίζεται από την επίτευξη μία συγκεκριμένης τιμής ροής μέσα στο αναπνευστικό κύκλωμα (σε αντίθεση με τον αερισμό ελεγχόμενης πίεσης που η έναρξη της εκπνοής καθορίζεται από το πέρας συγκεκριμένου χρόνου).

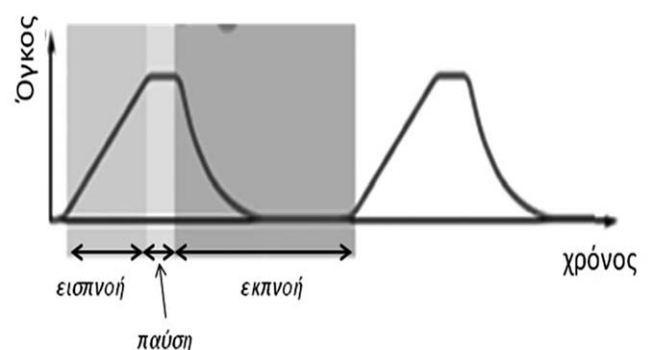


Εικόνα 11. Κυματομορφή πίεσης χρόνου σε αερισμό pressure support

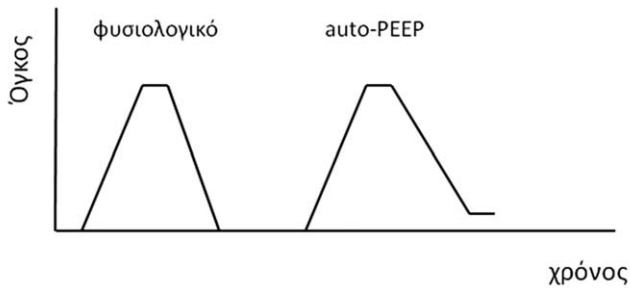
Κυματομορφές όγκου - χρόνου

Η κυματομορφή του εισπνεόμενου όγκου σε σχέση με τον χρόνο σε αερισμό ελεγχόμενου όγκου σταθερής ροής φαίνεται στην εικόνα 12. Στη φάση της εισπνοής ο όγκος αυξάνεται συνεχώς. Κατά τη διάρκεια της παύσης παραμένει σταθερός και κατά την εκπνοή μειώνεται σαν αποτέλεσμα της παθητικής εκπνοής. Αν ο ασθενής δεν εκπνέει τελείως (auto-PEEP) η καμπύλη δεν τελειώνει στη γραμμή μηδενικού όγκου (εικόνα 13).

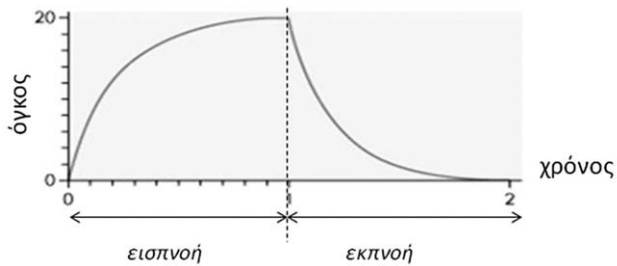
Στη φάση της εισπνοής η κυματομορφή είναι ανιούσα αν χορηγείται αερισμός σταθερής ροής και εκθετικά ανιούσα αν χορηγείται επιβραδυνόμενη μορφή ροής. Στην εικόνα 14 φαίνεται η κυματομορφή όγκου - χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης (επιβραδυνόμενη μορφή ροής).



Εικόνα 12. Κυματομορφή του εισπνεόμενου όγκου σε σχέση με τον χρόνο σε αερισμό ελεγχόμενου όγκου σταθερής ροής



Εικόνα 13. Κυματομορφή όγκου - χρόνου σε ασθενή με auto-PEEP



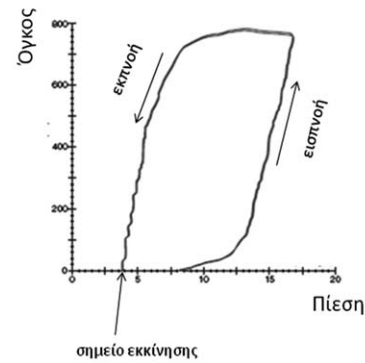
Εικόνα 14. Κυματομορφή όγκου - χρόνου σε αερισμό ελεγχόμενης πίεσης

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΕΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ

Οι συνδυασμένες κυματομορφές είναι συνδυασμός καταγραφής δύο κυματομορφών που σχηματίζει έναν βρόγχο. Οι δύο πιο συνηθισμένες συνδυασμένες κυματομορφές είναι πίεσης - όγκου και ροής - όγκου. Η καταγραφή παρουσιάζει πληροφορίες για την κάθε κυματομορφή σε σχέση με την άλλη και σε σχέση με το χρόνο.

1. Βρόγχος πίεσης - όγκου

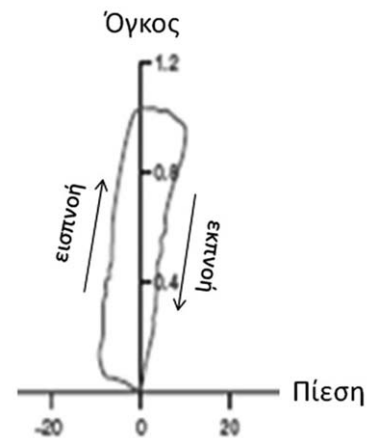
Ο βρόγχος πίεσης - όγκου φαίνεται στην εικόνα 15. Ο όγκος είναι στον κάθετο άξονα, ενώ η πίεση είναι στον οριζόντιο άξονα. Οι θετικές πιέσεις καταγράφονται στα δεξιά του άξονα του όγκου, ενώ οι αρνητικές στα αριστερά του. Η εισπνοή ξεκινάει από το σημείο εκκίνησης προς τα δεξιά, ενώ η εκπνοή κινείται από δεξιά προς τα αριστερά. Αυτή η καταγραφή είναι χρήσιμη στον καθορισμό του αναπνεόμενου όγκου και του εισπνευστικού έργου, καθώς και στην ανίχνευση της υπερδιάτασης και των μεταβολών της ευενδοτότητας και της αντίστασης.



Εικόνα 15. Βρόγχος πίεσης - όγκου σε μηχανικό αερισμό (υποχρεωτική αναπνοή)

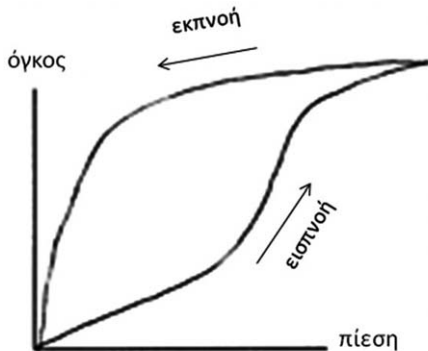
Η χορήγηση του αναπνεόμενου όγκου τόσο κατά τις υποχρεωτικές όσο και κατά τις αυτόματες αναπνοές αντικατοπτρίζεται από τις μέγιστες τιμές που επιτυγχάνονται στον κάθετο άξονα (άξονα του όγκου). Ο αναπνεόμενος όγκος μπορεί να μετρηθεί κατευθείαν με τη χρήση αυτής της τεχνικής. Στον αυτόματο αερισμό, ο βρόγχος κινείται δεξιόστροφα, σε επίπεδα αρνητικής πίεσης, από το σημείο μηδέν μέχρι την επίτευξη του αναπνεόμενου όγκου. Στην εκπνοή συνεχίζει δεξιόστροφα, σε επίπεδα θετικών πιέσεων (εικόνα 16). Το εισπνευστικό έργο αντικατοπτρίζεται από το τμήμα της καμπύλης που κινείται στην κλίμακα των αρνητικών πιέσεων. Το εισπνευστικό έργο παράγεται από τους κύριους μύες της αναπνοής. Προσαρμόζοντας τις ρυθμίσεις του αναπνευστήρα είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί το τμήμα του βρόγχου που αντιστοιχεί σε αρνητικές πιέσεις και έτσι να ελαχιστοποιηθεί το εισπνευστικό έργο.

Υπερδιάταση συμβαίνει όταν υπάρχει άνοδος



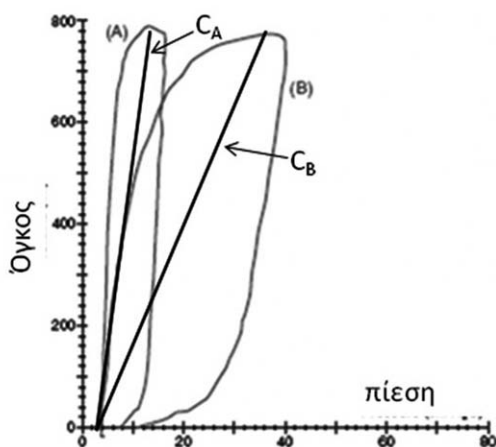
Εικόνα 16. Βρόγχος πίεσης όγκου (αυτόματη αναπνοή)

της πίεσης χωρίς συνοδό χορήγηση όγκου (εικόνα 17). Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα μία εικόνα στο βρόγχο που μοιάζει με ράμφος πουλιού. Η υπερδιάταση προκαλεί την ανάπτυξη υπερβολικών πιέσεων στους πνεύμονες με πολύ μικρή ή καθόλου αλλαγή στον όγκο.



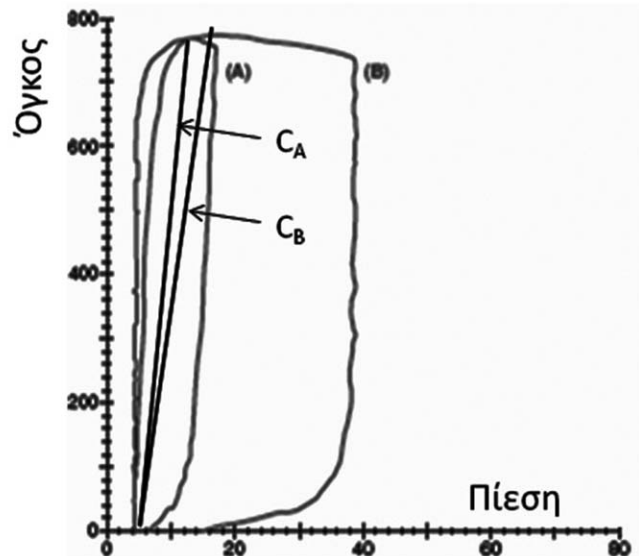
Εικόνα 17. Εικόνα υπερδιάτασης σε βρόγχο όγκου - πίεσης

Μεταβολές της ευενδοτότητας μπορούν να γίνουν αντιληπτές παρατηρώντας την κλίση του βρόγχου πίεσης - όγκου. Αυξημένη ευενδοτότητα αντιπροσωπεύεται από πιο απότομη κλίση (μεγαλύτερη χορήγηση όγκου για μία συγκεκριμένη πίεση). Μειωμένη ευενδοτότητα αντιπροσωπεύεται από μικρότερη κλίση του βρόγχου (μικρότερη χορήγηση όγκου για μία συγκεκριμένη πίεση) (εικόνα 18).



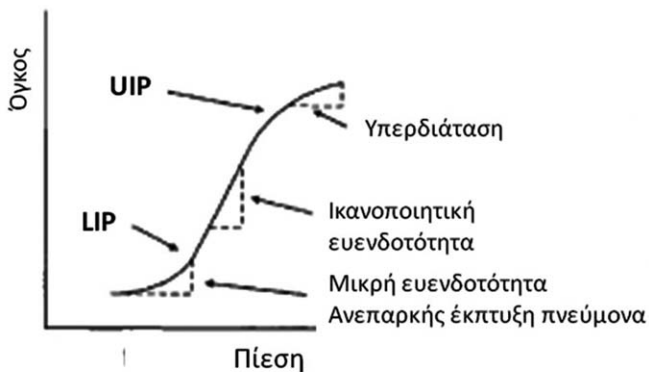
Εικόνα 18. Δύο βρόγχοι όγκου πίεσης με διαφορετική ευενδοτότητα. Ο βρόγχος Α αντιπροσωπεύει μεγαλύτερη ευενδοτότητα (C_A - μεγαλύτερη κλίση άρα μεγαλύτερη ευενδοτότητα), ενώ ο βρόγχος Β αντιπροσωπεύει μικρότερη ευενδοτότητα (C_B - μικρότερη κλίση άρα μικρότερη ευενδοτότητα).

Μεταβολές στην αντίσταση των αεραγωγών μπορούν να εκτιμηθούν παρατηρώντας το διάστημα ανάμεσα στο εισπνευστικό και στο εκπνευστικό τμήμα του βρόγχου. Δύο βρόγχοι που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αντιστάσεις φαίνονται στην εικόνα 19. Ο βρόγχος με τη μεγαλύτερη αντίσταση (βρόγχος Β) εμφανίζει μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ των δύο τμημάτων του, το εισπνευστικό τμήμα είναι πιο στρογγυλεμένο και εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος του άξονα των πιέσεων, καθώς για έναν συγκεκριμένο όγκο οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες λόγω των αυξημένων αντιστάσεων.



Εικόνα 19. Δύο βρόγχοι πίεσης - όγκου με διαφορετικές αντιστάσεις αεραγωγών. Ο βρόγχος Α αντιπροσωπεύει χαμηλότερη αντίσταση, ενώ ο βρόγχος Β αντιπροσωπεύει μεγαλύτερη αντίσταση. Βλέπουμε ότι η C_A έχει περίπου την ίδια κλίση με τη C_B επομένως η ευενδοτότητα στις δύο αυτές περιπτώσεις δε διαφέρει σημαντικά.

Επιπρόσθετα σε όλα τα παραπάνω, μία ιδιαίτερη χρησιμότητα είναι η εκτίμηση της ευενδοτότητας με την καμπύλη πίεσης - όγκου. Η καμπύλη πίεσης - όγκου παρέχει σημαντική βοήθεια στην προσαρμογή των ρυθμίσεων του αναπνευστήρα σε ασθενείς με σοβαρή βλάβη των πνευμόνων, έτσι ώστε να τους χορηγείται "ιδανικός" αναπνεόμενος όγκος (αρκετός για να διατηρεί τις κυψελίδες ανοιχτές αλλά όχι τόσο μεγάλος ώστε να υπερδιατείνει τον πνεύμονα). Συνήθως η καμπύλη έχει σιγμοειδή μορφή (εικόνα 20) με τον όγκο να απει-

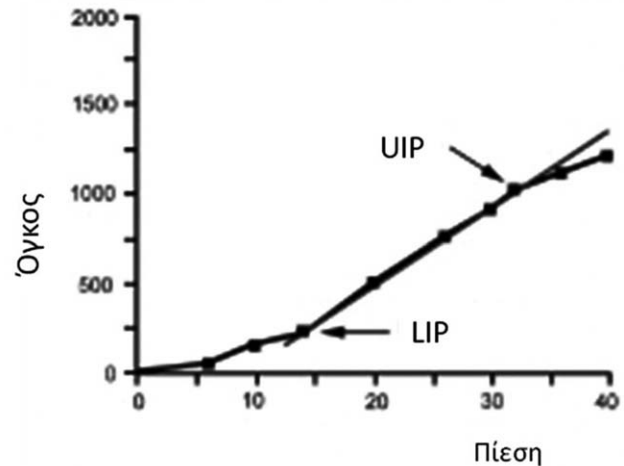


Εικόνα 20. Στατική καμπύλη πίεσης - όγκου (UIP: Upper Inflection Point, LIP : Lower Inflection Point)

κονίζεται στον κάθετο άξονα και την πίεση στον οριζόντιο. Το χαμηλότερο τμήμα της καμπύλης αντιστοιχεί σε αναπνεόμενους όγκους όπου οι κυψελίδες συμπιέζονται και η ευενδοτότητα του πνεύμονα είναι φτωχή.

Το κεντρικό γραμμικό κομμάτι αντιπροσωπεύει τους αναπνεόμενους όγκους με τους οποίους οι κυψελίδες παραμένουν ανοιχτές και η ευενδοτότητα είναι ικανοποιητική. Το επιπεδωμένο άνω τμήμα αντιπροσωπεύει τη ζώνη της υπερδιάτασης, όπου η ευενδοτότητα και πάλι μειώνεται. Τα σημεία μετάβασης από το ένα τμήμα της καμπύλης στο άλλο ονομάζονται κάτω σημείο καμψής (lower inflection point - LIP) και άνω σημείο καμψής (upper inflection point - UIP). Το LIP θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το σημείο στο οποίο οι μικρότεροι αεραγωγοί και οι κυψελίδες ανοίγουν ξανά και ανταποκρίνονται στον όγκο σύγκλεισης (closing volume). Κάποιοι ερευνητές υποστηρίζουν πως οι ασθενείς με ARDS θα πρέπει να αερίζονται με τιμή PEEP λίγο πιο πάνω από το LIP, παρότι η θεωρία αυτή έχει αμφισβητηθεί από άλλους ερευνητές⁴. Η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης αντιπροσωπεύει την ευενδοτότητα των πνευμόνων. Σε μειωμένη ευενδοτότητα η κλίση της καμπύλης γίνεται μικρότερη (εικόνα 21).

Χρησιμότητα της καμπύλης αυτής αποτελεί η κλινική δυνατότητα ρύθμισης του αναπνεόμενου όγκου έτσι ώστε να κινείται στο ευθύγραμμο σημείο της καμπύλης. Μειονέκτημα είναι οι χρονοβόρες μετρήσεις που πρέπει να γίνουν για τον ακριβή σχηματισμό της. Επιπλέον αυτού του είδους η καμπύλη σχηματίζεται από επανειλημμέ-



Εικόνα 21. Καμπύλη πίεσης - όγκου σε μειωμένη ευενδοτότητα πνευμόνων (UIP: Upper Inflection Point, LIP : Lower Inflection Point)

νες διαδοχικές μετρήσεις υπό συνθήκες άπνοιας, συνθήκη συνήθως απαγορευτική για ασθενείς υπό μηχανικό αερισμό. Διαφορετικά οι μετρήσεις που προκύπτουν αποδίδουν τη δυναμική ευενδοτότητα των πνευμόνων. Αυτή μπορεί να είναι αναξιόπιστη, ιδιαίτερα σε ασθενείς με αποφρακτική νόσο του πνεύμονα⁵. Ουσιαστικά η καμπύλη αυτή απεικονίζει γραφικά τη συνάρτηση $C = \Delta P / \Delta V$ (όπου C η ευενδοτότητα σε ml/cmH₂O, V ο όγκος σε ml και P η πίεση σε cmH₂O).

Άλλη μία χρησιμότητα του βρόγχου πίεσης - όγκου είναι ο υπολογισμός του έργου της αναπνοής μέσω αυτού. Για να επιτευχθεί ο αερισμός των πνευμόνων, πρέπει να παραχθεί έργο για να ξεπεράσει τις ελαστικές δυνάμεις και τις δυνάμεις τριβής του πνεύμονα και του θωρακικού τοιχώματος. Το έργο αυτό παράγεται από τους ασθενείς κατά τη σύσπαση των εισπνευστικών τους μυών, τον αναπνευστήρα ή και από τους δύο άλλοτε σε άλλο βαθμό. Το μηχανικό έργο της αναπνοής (W) σημαίνει πως η εφαρμοζόμενη πίεση (P_{appl}) προκαλεί κάποια μετατόπιση του συστήματος, δηλαδή παράγει όγκο (V), σύμφωνα με τον τύπο:

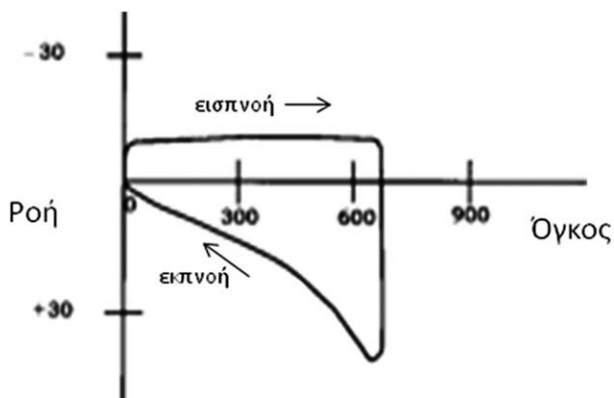
$$W = P_{\text{appl}} \times V$$

Το ολοκλήρωμα της συγκεκριμένης συνάρτησης αντιπροσωπεύει το εμβαδό που περικλείει ο βρόγχος πίεσης - όγκου. Το έργο μπορεί να εκφραστεί

σαν έργο ανά αναπνοή, ανά λεπτό ή ανά λίτρο αερισμού. Το έργο ανά λίτρο φαίνεται να αντανάκλα πιο αξιόπιστα τις ανωμαλίες στη μηχανική των πνευμόνων, ενώ το έργο ανά λεπτό εξαρτάται από τον κατά λεπτό αερισμό και μπορεί να είναι ψευδώς χαμηλότερο σε ασθενείς με σοβαρή απόφραξη αεραγωγού⁴.

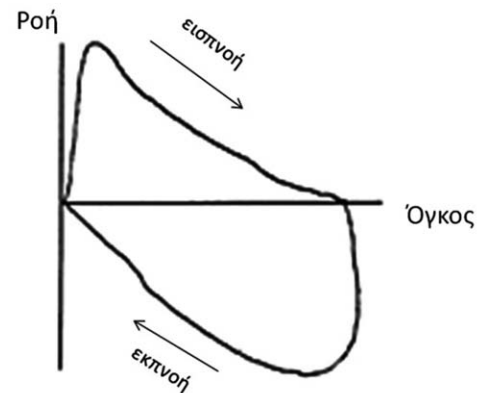
2. Βρόγχος ροής - όγκου

Οι βρόγχοι ροής - όγκου σχηματίζονται με τη ροή στον κάθετο άξονα και τον όγκο στον οριζόντιο άξονα. Η εισπνευστική ροή από μία αναπνοή θετικής πίεσης συνήθως εμφανίζεται πάνω από τον άξονα του όγκου, ενώ η εκπνευστική ροή εμφανίζεται στο κάτω μέρος του. Στην εικόνα 22 φαίνεται ένας βρόγχος ροής - όγκου με αερισμό σταθερής ροής (αερισμός ελεγχόμενου όγκου). Στην εισπνοή η ροή αυξάνει γρήγορα ως ένα σημείο και μετά παραμένει σταθερή μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού όγκου. Στην εκπνοή η ροή αυξάνει ταχέως στην αρχή, γρήγορα φτάνει τη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια με βραδύτερο ρυθμό αρχίζει σταδιακά να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Η μορφή αυτού του τμήματος του βρόγχου καθορίζεται από την ελαστική επαναφορά του πνεύμονα και του θωρακικού τοιχώματος και από την συνολική αντίσταση στη ροή (από το βρογχικό δέντρο, τον τραχειοσωλήνα, το εκπνευστικό σκέλος του αναπνευστικού κυκλώματος).

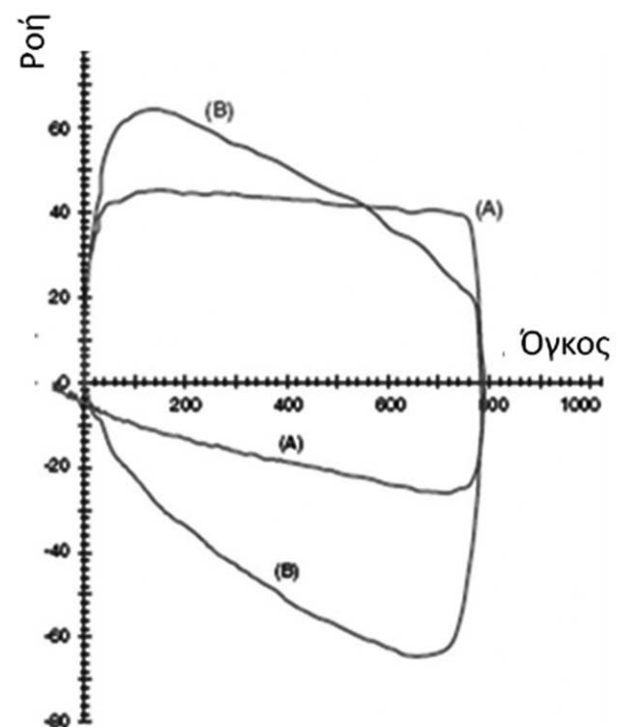


Εικόνα 22. Βρόγχος ροής - όγκου (σταθερής ροής)

Στην εικόνα 23 φαίνεται ένας βρόγχος ροής - όγκου με επιβραδυνόμενη μορφή ροής. Εμφανίζει ταχεία αύξηση της ροής στην εισπνοή φτάνοντας τη μέγιστη ροή και στη συνέχεια σταδιακή μείωση



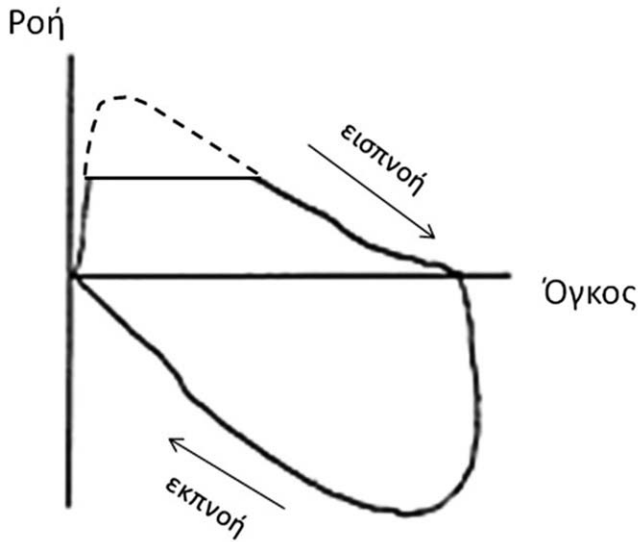
Εικόνα 23. Βρόγχος ροής - όγκου (επιβραδυνόμενη ροή)



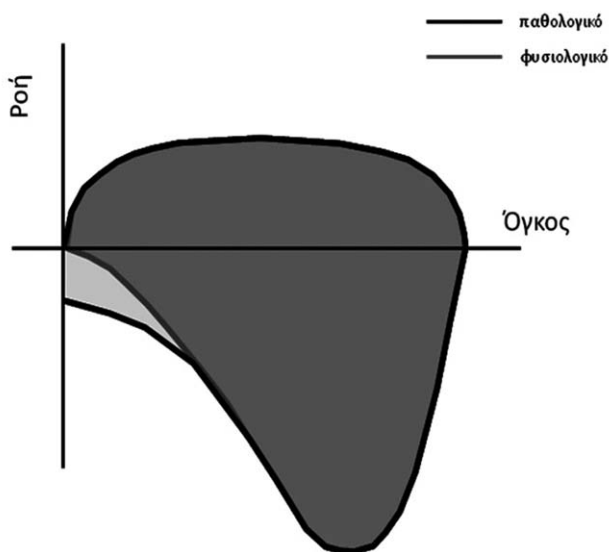
Εικόνα 24. Δύο βρόγχοι ροής - όγκου. Ο βρόγχος A αντιπροσωπεύει μεγαλύτερη αντίσταση λόγω στένωσης του αεραγωγού, ενώ ο βρόγχος B αντιπροσωπεύει μικρότερη αντίσταση.

ως το τέλος της εισπνοής όπου η ροή μηδενίζεται. Οι βρόγχοι αυτής της μορφής είναι χρήσιμοι στην εκτίμηση των αλλαγών της αντίστασης των αεραγωγών, που φαίνονται άμεσα μετά τη χορήγηση βρογχοδιασταλτικών. Όταν βελτιωθεί η αντίσταση, η εκπνευστική ροή είναι μεγαλύτερη και η κλίση του βρόγχου είναι μεγαλύτερη (εικόνα 24).

Αν ο αναπνευστήρας χορηγεί επιβραδυνόμενη ροή αλλά ο βρόγχος εμφανίζει μία επιπεδωμένη



Εικόνα 25. Βρόγχος ροής - όγκου σε απόφραξη ενδοτραχειακού σωλήνα



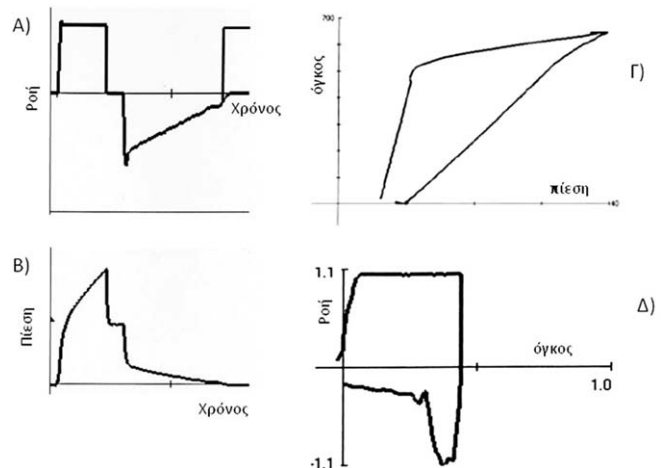
Εικόνα 26. Βρόγχος ροής - όγκου σε ασθενή με auto-PEEP

εισπνευστική ροή, είναι πιθανή η ύπαρξη τεχνητής απόφραξης στη ροή (πχ τσακισμένος ενδοτραχειακός σωλήνας, απόφραξη ενδοτραχειακού σωλήνα από εκκρίσεις κτλ) (εικόνα 25)

Σε ασθενείς με ενδογενές PEEP η εκπνευστική ροή σταματά απότομα πριν την επόμενη αναπνοή, δημιουργώντας μία χαρακτηριστική "κομμένη" εμφάνιση στον βρόγχο (εικόνα 26).

ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

1. Ασθενείς με αποφρακτικού τύπου διαταραχές
Σύμφωνα με τα παραπάνω στους ασθενείς αυτούς παρατηρούνται τα εξής: (α) στην κυματομορφή ροής - χρόνου χαμηλή και παρατεταμένη εκπνευστική ροή, συχνά χωρίς να μηδενίζεται μέχρι την επόμενη εισπνοή (auto PEEP) (εικόνα 27-A), (β) στην κυματομορφή πίεσης - χρόνου αυξημένη μέγιστη πίεση των αεραγωγών (PIP) σε σχέση με την τελοεκπνευστική πίεση των αεραγωγών (EIP)(εικόνα 27-B), (γ) στην κυματομορφή όγκου - χρόνου μπορεί η καμπύλη να μην τελειώνει στη γραμμή μηδενικού όγκου, (δ) στο βρόγχο πίεσης - όγκου μπορεί να υπάρχει εικόνα υπερδιάτασης με τη χαρακτηριστική εικόνα "ράμφους πουλιού" (εικόνα 27-Γ), (ε) στον βρόγχο ροής - όγκου εικόνα παραμόρφωσης στο εκπνευστικό σκέλος ή/και "κομμένο" εκπνευστικό σκέλος χαρακτηριστικό για ύπαρξη auto PEEP (εικόνα 27- Δ).

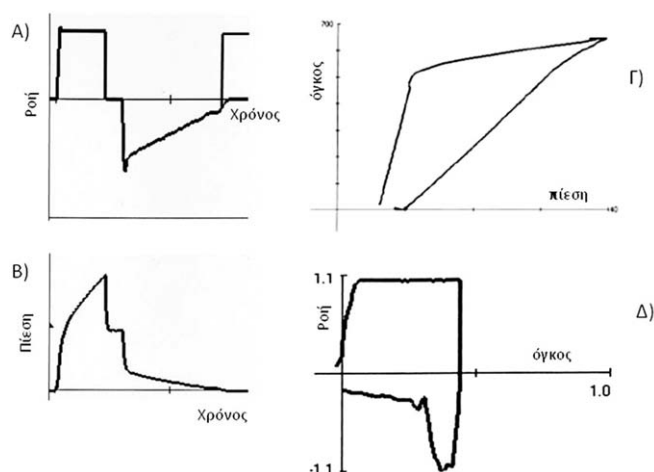


Εικόνα 27. Γραφικά σε ασθενή με αποφρακτικού τύπου διαταραχή: Α)κυματομορφή ροής - χρόνου, Β)κυματομορφή πίεσης - χρόνου, Γ)βρόγχος πίεσης - όγκου, Δ)βρόγχος ροής - όγκου

2. Ασθενείς με περιοριστικού τύπου διαταραχές

Με βάση τα παραπάνω σε αυτούς τους ασθενείς (πχ. ασθενείς με ARDS) μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής: (α) στην κυματομορφή ροής - χρόνου ευχερέστερη και ταχύτερη ολοκλήρωση της εκπνοής, (β) στην κυματομορφή πίεσης - χρόνου αύξηση τόσο της μέγιστης πίεσης των αεραγωγών (PIP) όσο και της τελοεκπνευστικής πίεσης των

αεραγωγών (EIP), (γ) στον βρόγχο πίεσης - όγκου αλλαγή της κλίσης του βρόγχου προς τον οριζόντιο άξονα (της πίεσης), (δ) στον βρόγχο ροής - όγκου αυξημένη εκπνευστική ροή (λόγω της αυξημένης ελαστικής επαναφοράς) και απότομη κλίση του ανιόντος σκέλους.



Εικόνα 28. Γραφικά σε ασθενή με περιοριστικού τύπου διαταραχή: Α) κυματομορφή ροής - χρόνου, Β) κυματομορφή πίεσης - χρόνου, Γ) βρόγχος πίεσης - όγκου, Δ) βρόγχος ροής - όγκου

ABSTRACT

Monitoring of Respiratory Mechanics During Mechanical Ventilation

Georgia Paroutsidou

The correct interpretation of flow, pressure and volume waveforms is of vital importance in the management of mechanically ventilated patients. In the flow - time waveform the inspiratory part varies depending on the type of ventilation, while the expiratory part provides important information in obstructive or restrictive pulmonary disorders. The pressure - time waveform is very useful in assessing the mechanical properties of the lung and in the differential diagnosis of increased intrapulmonary pressures. As regards combined waveforms, the pressure - volume loop it is a precious tool as through it respiratory work and lung compliance can be calculated. Finally, the flow - volume loop is useful in assessing the patient's response to administration of bronchodilators.

Key Words: Waveforms, mechanical ventilation, respiratory parameters, pressure-volume curve, flow-volume loop, pressure-volume loop, pressure-time waveform, flow-time waveform, volume-time waveform

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ

1. Tobin, M. J. (2006). Principles and Practice of Mechanical Ventilation. McGraw- Hill. Ch. 3
2. Hall J., Schmidt G., Wood L. Principles of Critical Care. McGraw- Hill, 2005. Ch. 32
3. A.S.Slutsky, L.Brochard. Mechanical Ventilation (Update in Intensive Care Medicine). Springer, 2004.
4. Gerard J. Criner, Gilbert E D'Alonzo. Critical Care study guide : text and review. Springer - Verlag, New York 2002. Ch. 34
5. Blom J.A. Monitoring of respiration and circulation. CRC Press, 2004. Ch. 6
6. Rajiv Dhand. Ventilator Graphics and Respiratory Mechanics in the Patient With Obstructive Lung Disease. Respiratory Care, February 2005; 50:2
7. Scott Harris. Pressure-Volume Curves of the Respiratory System. Respiratory Care, January 2005; 50:1
8. Dean Hess, Robert M. Kacmarek. Essentials of mechanical ventilation. McGraw- Hill, 2002. Ch. 29