

Διοξείδιο

ΘΕΟΔΩΡΑ ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ, ΦΩΤΗΣ ΚΑΝΑΚΟΥΔΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο έλεγχος του τελοεκπνευστικού CO₂ (ETCO₂) έχει εξελιχτεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες από ένα εργαλείο χρήσιμο για ερευνητικούς κυρίως σκοπούς σε απαραίτητο αναισθησιολογικό monitoring. Η παρακολούθηση του ETCO₂ αποτελεί μία μη επεμβατική μέθοδο, είτε με τη μορφή της καπνογραφίας, δηλαδή της συνεχούς καταγραφής της κυματομορφής της συγκέντρωσης του CO₂ κατά τη διάρκεια ενός αναπνευστικού κύκλου, είτε με τη μορφή της καπνομετρίας, δηλαδή της μέτρησης της τιμής του CO₂. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του CO₂ διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο δειγματοληψίας σε δύο τύπους, στις συσκευές πλαγίου (side-stream) ή κυρίου ρεύματος (mainstream). Οι sidestream συσκευές μεταφέρουν ένα δείγμα αερίων από το κύκλωμα μέσω μίας λεπτής προέκτασης στον αισθητήρα, όπου γίνεται η μέτρηση, ενώ αντίθετα στις mainstream συσκευές ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στο αναπνευστικό κύκλωμα αμέσως μετά τον τραχειοσωλήνα. Η συνεχής παρακολούθηση του ETCO₂ παρέχει πληροφορίες για τρεις βασικές παραμέτρους: τον αερισμό, την κυκλοφορία και το μεταβολισμό, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει και την άμεση αναγνώριση της δυσλειτουργίας του αναισθησιολογικού μηχανήματος ή κάποιου άλλου συμβάματος όπως αποσύνδεση του αναπνευστικού κυκλώματος ή ατυχηματική τοποθέτηση του τραχειοσωλήνα στον οισοφάγο. Βέβαια, η ορθή και κυρίως ασφαλή ερμηνεία των μεταβολών προϋποθέτει προσεκτική συνεκτίμηση της υποκείμενης παθολογίας του ασθενούς, καθώς και της πιθανής επίδρασης παραγόντων όπως το N₂O, της βαρομετρικής πίεσης ή της ύπαρξης υδρατμών στο κύκλωμα. Είναι, λοιπόν, κατανοητό ότι η χρήση της καπνογραφίας ή καπνομετρίας παρέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες συνολικά για τον ασθενή κάτι που εξηγεί το γεγονός ότι η παρακολούθηση του CO₂ συμπεριλαμβάνεται ήδη στο βασικό monitoring σε αρκετές χώρες.

Λέξεις Κλειδιά: Καπνογραφία, Καπνομετρία, μέτρηση τελοεκπνευστικού CO₂

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται δύο έννοιες: της καπνογραφίας και της καπνομετρίας.

Σαν **καπνογραφία** ορίζεται η συνεχής καταγραφή με τη μορφή καμπύλης της πυκνότητας του CO₂ στα αέρια της αναπνοής κατά τη διάρκεια ενός αναπνευστικού κύκλου, ενώ σαν **καπνομετρία** θεωρείται απλά η μέτρηση και αναλογική ή ψηφιακή ένδειξη της τιμής του CO₂ (συνήθως σε 2 φάσεις: στην αρχή της εισπνοής και στο τέλος της εκπνοής).

Ο έλεγχος αυτός γίνεται με μη επεμβατική τεχνική και ουσιαστικά δίνει μια άμεση εικόνα της αποβο-

λής του CO₂ από τους πνεύμονες. Βέβαια έμμεσα δίνει πληροφορίες και για την παραγωγή του CO₂ στους ιστούς, την αιμάτωση και τον αερισμό των πνευμόνων, καθώς και για το βαθμό επάρκειας του αερισμού.

ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για το monitoring του CO₂ ονομάζονται καπνογράφοι/καπνόμετρα και ανάλογα με τον τρόπο δειγματοληψίας διακρίνονται σε 2 τύπους, τις συσκευές του πλαγίου ή του κυρίου ρεύματος.

Στις **συσκευές κυρίου ρεύματος** (main-stream) ο

αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε εξάρτημα που παρεμβάλλεται μεταξύ ενδοτραχειακού σωλήνα και σωληνώσεων του κυκλώματος αναισθησίας και κάνει τη μέτρησή του επιτόπου. Όλες οι συσκευές αυτού του είδους φέρουν θερμαντήρα και θερμαίνουν τα αέρια περισσότερο από τη θερμοκρασία του σώματος (περίπου στους 39°C), για να αποφευχθεί η υγραποίηση των υδρατμών των εκπνεομένων αερίων. Ωστόσο δεν μπορεί να παρεμποδισθεί η θόλωση των οπτικών μερών της συσκευής από τυχόν εκκρίσεις. Οι συσκευές αυτές είναι ογκώδεις, βαρείες (για τη θέση στην οποία βρίσκονται) και συνδέονται με την κύρια συσκευή με καλώδιο. Όλες οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να προκαλέσουν ατύχημα από έλξη του τραχειοσωλήνα ή και έγκλημα προσώπου από ατυχηματική επαφή με το θερμαντικό στοιχείο.¹

Οι **συσκευές πλαγίου ρεύματος** (side-stream) έχουν τον αισθητήρα στο κύριο σώμα της συσκευής και παίρνουν δείγμα αερίων από το κύκλωμα με ένα ελαφρύ και λεπτό σωληνάκι και στη συνέχεια η μέτρηση γίνεται στο κύριο σώμα της συσκευής. Επειδή το δείγμα μίγματος αερίων, στο οποίο μετράται η περιεκτικότητα σε CO₂, συνήθως περιέχει και αναισθητικά αέρια, είναι απαραίτητο αυτές οι συσκευές να είναι συνδεδεμένες με το σύστημα απομάκρυνσης χρησιμοποιηθέντων αερίων (scavenge system), όπου θα διοχετεύουν το δείγμα που χρησιμοποιήσαν για τη μέτρηση. Οι ποσότητες που λαμβάνονται από το κύκλωμα για δειγματοληψία ποικίλουν ανάλογα με τον ασθενή (μικρότερες σε παιδιατρικούς, μεγαλύτερες σε ενήλικες) και ανάλογα με τη συσκευή. Έτσι οι ποσότητες δειγματοληψίας μπορεί να είναι υψηλές (400ml/min ή και περισσότερο) ή χαμηλές. Η πιο αποδεκτή ποσότητα δειγματοληψίας των συσκευών είναι 50-200ml/min, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ενήλικες και για παιδιατρικούς ασθενείς.¹

Οι συσκευές μέτρησης και καταγραφής του CO₂ χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο πρώτο ήμισυ του 20ου αιώνα, αλλά ήταν πολύ ογκώδεις, δαπανηρές για την αγορά αλλά και για τη συντήρησή τους, χωρίς μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Για τους παραπάνω λόγους η χρήση τους ήταν πολύ περιορισμένη και για ερευνητικούς μόνο σκοπούς. Μόλις στις τελευ-

ταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα με την εκρηκτική πρόοδο της τεχνολογίας (κυρίως στα ηλεκτρονικά) μπόρεσαν να κατασκευασθούν συσκευές μικρού μεγέθους, ακριβείς και σε προσιτές τιμές τόσο για την αγορά όσο και για τη συντήρηση. Η χρήση τους στην κλινική πράξη έδειξε μεγάλη και άμεση βοήθεια στην αναγνώριση και αντιμετώπιση ατυχηματικών καταστάσεων κατά την αναισθησία, όπως ο υποαερισμός, η διασωλήνωση στον οισοφάγο αντί της τραχείας και αποσύνδεση του κυκλώματος στο μηχάνημα αναισθησίας.^{2,3} Από ανάλυση αναισθησιολογικών ατυχημάτων φάνηκε ότι το 93% αυτών θα μπορούσε να αποφευχθεί ή/και να αντιμετωπισθεί εγκαίρως, αν οι ζωτικές λειτουργίες των ασθενών ελέγχονταν με καπνογραφία και σφυγμική οξυγονομετρία συγχρόνως.⁴ Στη σημερινή εποχή η καπνογραφία/καπνομετρία συγκαταλέγεται στο βασικό και απαραίτητο monitoring για τη χορήγηση αναισθησίας.⁵

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να μετρηθεί η ποσότητα του CO₂ σε μίγμα αερίων.

Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- **Η φασματογραφία μάζας:** Διαχωρίζει αέρια και ατμούς με διαφορετικό μοριακό βάρος, αφού αναρροφήσει το μίγμα και το επεξεργασθεί κατάλληλα με ιονισμό και επιτάχυνση των ιόντων σε μαγνητικό πεδίο. Οι συσκευές αυτής της τεχνοτροπίας είναι ογκώδεις και κοστίζουν πολύ.^{1,6}
- **Η φασματογραφία Raman:** Χρησιμοποιεί μονοχρωματικό ΛΕΪΖΕΡ Αργού για την επεξεργασία του δείγματος και παρά το αρκετό μέχρι στιγμής κόστος έχει ενσωματωθεί σε ορισμένα monitors.¹
- **Η υπέρυθη φασματογραφία:** Είναι η πλέον δημοφιλής και καθιερωμένη μέθοδος ανίχνευσης και μέτρησης του CO₂. Η αρχή της μεθόδου έγκειται στο ότι με την ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφάται είναι ανάλογη της ποσότητας των μορίων του CO₂, οπότε υπολογίζεται το CO₂ και εκφράζεται είτε ως μερική πίεση σε mmHg, είτε ως ποσοστό % του μίγματος αερίων.¹
- **Φωτοακουστική φασματογραφία:** Η διαδικασία είναι παρόμοια με της υπέρυθρης φασματογραφίας, αλλά εδώ αντί της οπτικής χρησιμοποιείται ακουστική τεχνική. Υπερέχει σε ακρίβεια

και αξιοπιστία και η βαθμονόμηση (calibration) γίνεται σε λιγότερο συχνά χρονικά δαστήματα.^{1,7}

- **Μικροκαπνογραφία:** Είναι μια νεότερη τεχνολογία για το monitoring του CO₂ σε φασματογραφία μοριακής συσχέτισης. Χρειάζεται ελάχιστο (15ml) δείγμα μίγματος αερίων και δεν παρεμβαίνει ουσιαστικά στην ακρίβεια μέτρησης CO₂ ούτε στην σταθερότητα δομής της καταγραφόμενης καμπύλης.⁸

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις στο εκπνεόμενο CO₂ σε όλες τις αναφερθείσες μεθόδους. Οι αναφορές που θα ακολουθήσουν αναφέρονται κυρίως στη μέθοδο υπέρυθρης φασματογραφίας, που είναι η επικρατέστερη και πιο συνήθης μέθοδος που απαντάται μέχρι σήμερα.

- **Ύπαρξη N₂O στα αναπνεόμενα αέρια:** Επειδή το φάσμα απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας του N₂O είναι κοντά στο φάσμα απορρόφησης του CO₂ (4,5μm και 4,3μm αντίστοιχα), το μηχάνημα μπορεί να δίνει λανθασμένα υψηλές τιμές CO₂. Οι σύγχρονοι καπνογράφοι διορθώνουν από μόνοι τους το παραπάνω σφάλμα είτε κάνοντας βαθμονόμηση περίπου στο εύρος των μετρήσεων που θα ακολουθήσουν (φυσιολογικές τιμές εκπνεόμενου CO₂), είτε με ειδικά λογισμικά που διορθώνουν τις "μετρούμενες" τιμές με διάφορους συντελεστές.^{9,10}
- **Τα πτητικά αναισθητικά** σε κλινικά χρησιμοποιούμενες δόσεις δεν φαίνεται να επηρεάζουν ιδιαίτερα τις μετρήσεις CO₂. Αντίθετα το **οξυγόνο** (ιδιαίτερα σε υψηλές πυκνότητες) μπορεί να προκαλέσει μετρήσεις λανθασμένα χαμηλές, αν και οι περισσότερες συσκευές σήμερα διορθώνουν αυτόματα τέτοιου είδους σφάλματα.
- **Η ύπαρξη υδρατμών** επηρεάζει τις μετρήσεις με δύο τρόπους: α) οι υγροποιημένοι υδρατμοί *επικάθονται στον αισθητήρα*, απορροφούν επιπλέον υπέρυθρη ακτινοβολία και δίδουν εσφαλμένα υψηλές τιμές μετρήσεων CO₂. Στις συσκευές κυρίου ρεύματος (main stream) αυτό αποφεύγεται με επιτόπια θέρμανση των αερίων πάνω από τη θερμοκρασία του σώματος, ώστε να μην

υγροποιούνται οι υδρατμοί και στις συσκευές πλαγίου ρεύματος (side stream) με χρήση ειδικών σωληνώσεων δειγματοληψίας και την τοποθέτηση υδατοπαγίδας ή/και φίλτρου πριν τον αισθητήρα.^{9,11} β) Η μερική πίεση των υδρατμών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από τη *θερμοκρασία*, η οποία όσο απομακρύνεται το δείγμα από το κύκλωμα αναισθησίας κοντά στο σημείο εκπνοής τόσο ελαττώνεται. Επομένως *μειώνεται και η μερική πίεση των υδρατμών* με αποτέλεσμα αύξηση της μερικής πίεσης του CO₂ κατά 1,5-2% περίπου. Γι αυτό οι κατασκευαστές δίδουν οδηγίες και φροντίζουν για τη διόρθωση ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πυκνότητα των υδρατμών.^{9,12}

- **Ο ρόλος της ατμοσφαιρικής πίεσης:** Οι αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση επηρεάζουν τις ενδείξεις των συσκευών μέτρησης CO₂ με **άμεσο και έμμεσο** τρόπο.

Αύξηση κατά 1% της ατμοσφαιρικής πίεσης προκαλεί *άμεσα* αύξηση των μορίων του CO₂ κατά 1% και ανάλογη μεταβολή του σήματος στη συσκευή μέτρησης. Αυτό αποφεύγεται με τη βαθμονόμηση της συσκευής με δείγμα μίγματος αερίων του εμπορίου και σύμφωνα με την υπάρχουσα γνωστή ατμοσφαιρική πίεση. Αν όμως η βαθμονόμηση της συσκευής γίνεται όχι με μερική πίεση αλλά με όγκους %, τότε η συσκευή θα πρέπει να διορθώνει τις ενδείξεις των μετρήσεων αναλογικά με την μετρούμενη ατμοσφαιρική πίεση (1% αύξηση της πίεσης προκαλεί 1% αύξηση στην τιμή του CO₂).¹³

Οι μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση που προκαλούνται από τις αλλαγές του καιρού είναι της τάξεως του 0,5-0,8mmHg (σε φυσιολογικές τιμές ETCO₂ 30-40mmHg), επομένως κλινικά ασήμαντες ώστε να χρειάζονται διόρθωση, σε αντίθεση με τις μεταβολές λόγω υψόμετρου.¹³

Η δειγματοληψία με μεγάλη ροή προκαλεί κάποια μείωση της πίεσης στο κύκλωμα με αποτέλεσμα χαμηλότερες μετρήσεις CO₂. Όμως αν ακολουθήσει βαθμονόμηση της συσκευής στην συνήθη ατμοσφαιρική πίεση και με τη ροή της δειγματοληψίας σταθερή, τότε οι ενδείξεις των μετρήσεων είναι αρκετά ακριβείς για την κλινική πράξη.

Τέλος η εφαρμογή PEEP αυξάνοντας την πίεση στο κύκλωμα αυξάνει και την μερική πίεση του

CO₂, επομένως και τις ενδείξεις μετρήσεων των συσκευών. Αυτό αρχίζει να γίνεται εμφανές μόνο σε υψηλές PEEP (εφαρμογή PEEP 20cm H₂O προκαλεί αύξηση των ενδείξεων κατά 1,5mmHg).¹¹

Υπάρχουν σύγχρονες συσκευές που μετρούν την πίεση στο αισθητήρα τους και διορθώνουν αυτόματα τις ενδείξεις των μετρήσεων του CO₂.

Ο έμμεσος τρόπος, που η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης επηρεάζει τις ενδείξεις στις μετρήσεις CO₂, αφορά τις συσκευές που εκφράζουν τη μέτρηση σε όγκους %. Θεωρητικά η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης πρέπει να είναι γνωστή στη συσκευή σε κάθε στιγμή μέτρησης, ώστε να διενεργείται αυτόματη διόρθωση στην ένδειξη (mmHg = FCO₂* atmospheric pressure). Συνήθως όμως οι συσκευές παίρνουν σαν ατμοσφαιρική πίεση αναφοράς την πίεση που υπήρχε τη στιγμή της βαθμονόμησης, η οποία γίνεται σε άλλοτε άλλης συχνότητας χρονικά διαστήματα και σε συνεχή βάση. Γι αυτό ορισμένοι προτιμούν οι συσκευές να δείχνουν τις μετρήσεις CO₂ σε mmHg και όχι σε όγκους %. Ωστόσο, επειδή πολλοί είναι συνηθισμένοι στο διάβασμα των ενδείξεων σε όγκους %, δημιουργήθηκε η λύση του υπολογισμού σε mmHg και η έκφρασή του κατόπιν μετατροπής σε kPa, που αριθμητικά είναι περίπου όσο και οι όγκοι %.^{9,13}

Η ΚΥΨΕΛΙΔΟΤΡΙΧΟΕΙΔΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ (Pa-ET CO₂)

Σε φυσιολογικές συνθήκες η μερική πίεση του τελοεκπνευστικού CO₂ είναι μικρότερη της μερικής πίεσης στα πνευμονικά τριχοειδή (αρτηριακό αίμα) κατά 2-5 mmHg¹⁴⁻¹⁶.

Αυτό οφείλεται στον κυψελιδικό (φυσιολογικό) νεκρό χώρο, σαν αποτέλεσμα κακής (ελλιπούς) και ανομοιογενούς μίξης των εκπνεόμενων αερίων σε όλες τις κυψελίδες. Γι αυτό και θεωρητικά οι μεταβολές στον κυψελιδικό νεκρό χώρο εκφράζουν τη λειτουργική κατάσταση των πνευμόνων και εκφράζονται από μεταβολή στην Pa-ETCO₂, με την προϋπόθεση στο καπνογράφημα η φάση III να έχει οριζόντια σχεδόν μορφή και όχι έντονα ανιούσα (εικόνα 1). Επομένως η Pa-ETCO₂ επηρεάζεται και από όλους τους παράγο-

ντες, που μεταβάλλουν την κλίση της καμπύλης στη φάση III. Για παράδειγμα μια αύξηση του κυψελιδικού νεκρού χώρου δεν συνοδεύεται πάντοτε από αύξηση της Pa-ETCO₂. Η Pa-ETCO₂ μπορεί να παραμένει σταθερή παρά την αύξηση του κυψελιδικού νεκρού χώρου, όταν υπάρχει αύξηση της κλίσης της καμπύλης στη φάση III.

Η μείωση της καρδιακής παροχής (ΚΠ) προκαλεί αύξηση της Pa-ETCO₂, ενώ αντίθετα η αύξηση της ΚΠ μειώνει την Pa-ETCO₂, σαν αποτέλεσμα της καλύτερης αιμάτωσης κυρίως των ανώτερων τμημάτων των πνευμόνων^{17,18}.

Γενικά φαίνεται πως η Pa-ETCO₂ **αυξάνεται** με την ηλικία, στο εμφύσημα, στην πνευμονική εμβολή, στη μείωση της ΚΠ, στην υποβολαιμία και στην αναισθησία. Αντίθετα **μειώνεται** σε αναπνοή με μεγάλους όγκους αναπνοής (tidal volume) και μικρή συχνότητα.

ΤΟ ΚΑΠΝΟΓΡΑΦΗΜΑ

Η συνεχής καταγραφή με τη μορφή καμπύλης της πυκνότητας του CO₂ στα αέρια της αναπνοής κατά τη διάρκεια ενός αναπνευστικού κύκλου γίνεται αργά (με ταχύτητα 0,7mm/sec), όταν θέλουμε να παρατηρήσουμε γενικά την τάση μεταβολής (TREND) των τιμών ETCO₂ ή συνήθως σε δεκαπλάσια ταχύτητα (7mm/sec), όταν θέλουμε να παρατηρούμε λεπτομέρειες στη μορφή του και να παίρνουμε τις ανάλογες πληροφορίες.

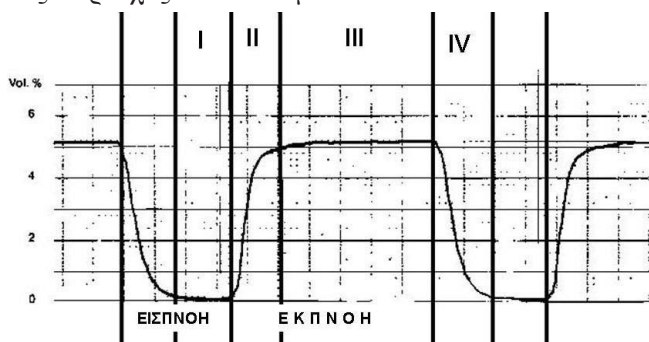
Η συνήθης απεικόνιση του καπνογραφήματος γίνεται με τις τιμές του ETCO₂ (άξονας Y) έναντι στο χρόνο (άξονας X), αν και για άλλους σκοπούς (ερευνητικούς κυρίως) υπάρχουν και συσκευές που καταγράφουν το ETCO₂ έναντι στον εκπνεόμενο όγκο. Και οι δύο μορφές έχουν παρόμοιο σχήμα, αλλά το σχήμα της καταγραφής ETCO₂/εκπνεόμενος όγκος δίδει περισσότερες λεπτομέρειες και δυνατότητες μέτρησης διαφόρων πνευμονικών παραμέτρων. Έτσι ενώ για κλινική χρήση είναι επαρκής (και συνήθως χρησιμοποιούμενη) η καταγραφή έναντι του χρόνου, για μελέτη και εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης των πνευμόνων (σχέση αερισμού/αιμάτωσης) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καταγραφή τιμής CO₂ έναντι του όγκου^{19,20}.

Έχοντας πάντα υπόψη, ότι το καπνογράφημα

αντιπροσωπεύει τη μετρούμενη τιμή του CO_2 στην άκρη του αεραγωγού κατά την διάρκεια του αναπνευστικού κύκλου, στην ανάλυση της καμπύλης διακρίνονται οι εξής φάσεις (εικόνα 1):

- Η **φάση I** αντιστοιχεί στο τέλος της εισπνοής και αρχή της εκπνοής όπου το CO_2 είναι μηδέν.
- Η **φάση II** αντιστοιχεί στην περίοδο της ταχέως αυξανόμενης τιμής του CO_2 , καθώς τα εκπνεόμενα αέρια αναμειγνύονται με τα αέρια του νεκρού χώρου, όπου δεν περιέχεται CO_2 .
- Η **φάση III** αντιστοιχεί στο σχετικά σταθερό επίπεδο (plateau) της τιμής του CO_2 κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της εκπνοής του κυψελιδικού αέρα. Θεωρητικά θα πρέπει να είναι οριζόντιο σε φυσιολογικούς πνεύμονες, αλλά στην κλινική πράξη έχει μια ελάχιστη ανοδική κλίση, που οφείλεται κυρίως στο ότι όλες οι κυψελίδες δεν αδειάζουν ταυτόχρονα. Οι κυψελίδες με χαμηλό δείκτη αερισμού/αιμάτωσης (άρα με σχετικά υψηλότερο CO_2) καθυστερούν να κενωθούν και γι αυτό υπάρχει στο τέλος της εκπνοής κάπως υψηλότερο CO_2 . Επιπλέον η συνέχιση της διάχυσης CO_2 από τα πνευμονικά τριχοειδή προς τις κυψελίδες σε όλη τη διάρκεια της εκπνοής προσθέτει κάτι στην τελική τιμή του πριν αρχίσει η εισπνοή.

Η κλίση του επιπέδου στη φάση III της καμπύλης επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως οι μεταβολές της καρδιακής παροχής, της παραγωγής CO_2 , των αντιστάσεων στους αεραγωγούς και της λειτουργικής υπολειπόμενης χωρητικότητας. Γενικότερα η κλίση της καμπύλης μπορεί να επηρεασθεί από όλες τις καταστάσεις, που επηρεάζουν το δείκτη αερισμού/αιμάτωσης σε διαφορετικές περιοχές των πνευμόνων.



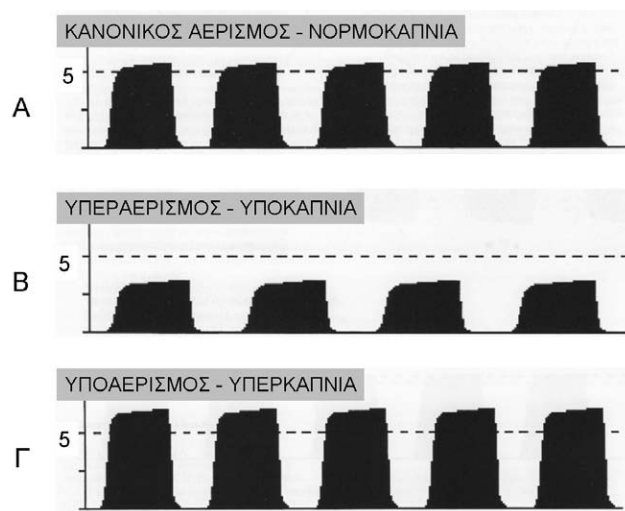
Εικόνα 1: Καπνογράφημα. Τιμές ET/CO_2 έναντι στον χρόνο

- Η **φάση 0 ή IV** δείχνει την εισπνοή και ακολουθεί τη φάση III (ή προηγείται της φάσης I). Συνίσταται σε απότομη μείωση μέχρι μηδενισμού της τιμής του CO_2 , εξαιτίας της εισόδου στους αεραγωγούς των αερίων της εισπνοής που δεν περιέχουν CO_2 .

ΚΛΙΝΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Οι παράγοντες που αυξάνουν ή μειώνουν μέχρι μηδενισμού το τελοεκπνευστικό CO_2 είναι πολλοί και διακρίνονται σε κατηγορίες, που αφορούν την παραγωγή και αποβολή του CO_2 , την πνευμονική κυκλοφορία, τον αερισμό των πνευμόνων και τα τεχνικά ή μηχανικά σφάλματα (πίνακας 1). Για να γίνει αντιληπτό το πιθανό αίτιο μιας παρέκκλισης από τα φυσιολογικά και να ακολουθήσει η ανάλογη παρέμβαση για διόρθωση, είναι προτιμότερη η συνεχής απεικόνιση και δυνατότητα καταγραφής του καπνογραφήματος (καπνογραφία) αντί της απλής ένδειξης της τιμής του ET/CO_2 (καπνομετρία).

Οι ανωμαλίες του καπνογραφήματος γίνονται αντιληπτές παρατηρώντας και αναλύοντας τις διάφορες φάσεις του, τόσο σε μεμονωμένους αναπνευστικούς κύκλους όσο και στην τάση μιας χρονικής περιόδου (TREND). Αυτό ισχύει για όλες τις φάσεις του καπνογραφήματος, σε ότι αφορά το ύψος (ET/CO_2), τη συχνότητα αναπνοών, τον ρυθμό, τη βασική γραμμή (μηδενισμός στη φάση εισπνοής) και το σχήμα της καμπύλης. Ειδικές



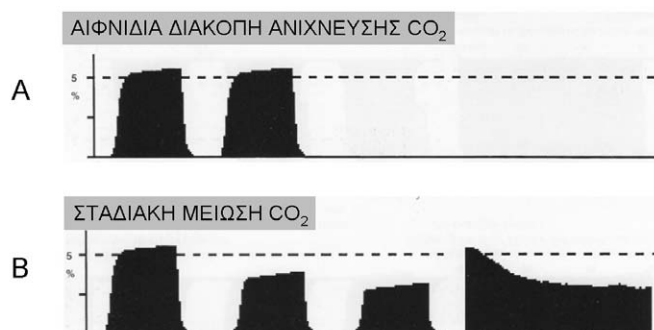
Εικόνα 2: Καπνογραφήματα με φυσιολογικό, χαμηλό και υψηλό ET/CO_2

Πίνακας 1: Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του ETCO₂.

	Παραγωγή και αποβολή CO ₂	Πνευμονική κυκλοφορία	Αερισμός πνευμόνων	Τεχνικά και μηχανικά προβλήματα
Αυξημένο ETCO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Πυρετός • Θυρεοτοξίκωση • Κακοήθης υπερθερμία • Αύξηση HCO₃⁻ • Άρση ισχαιμίου • Διαφυγή CO₂ σε φλέβες 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση ΚΠ • Υπέρταση 	<ul style="list-style-type: none"> • Υποαερισμός • Ενδοβρογχική διασωλήνωση • Μερική απόφραξη αεραγωγού • Επανεισπνοή 	<ul style="list-style-type: none"> • Μη σωστή νατράσβεστος • Ανεπαρκής ροή φρέσκων αερίων • Πρόσμιξη εισπνοής-εκπνοής στο κύκλωμα • Σφάλμα αναπνευστήρα • Σφάλμα στις βαλβίδες
Μειωμένο ETCO ₂ ή Απουσία ETCO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Υποθερμία 	<ul style="list-style-type: none"> • Μείωση ΚΠ • Υπόταση • Υπογκαιμία • Πνευμονική εμβολή • Καρδιακή ανακοπή 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπεραερισμός • Άπνοια • Μεγάλη ή ολική απόφραξη αεραγωγού • Αποδιασωλήνωση ατυχηματική 	<ul style="list-style-type: none"> • Αποσύνδεση στο κύκλωμα • Διαρροή στο σωληνάκι δειγματοληψίας • Σφάλμα αναπνευστήρα

αλλοιώσεις σε συγκεκριμένες φάσεις αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα προβλήματα του ασθενούς ή των συσκευών.

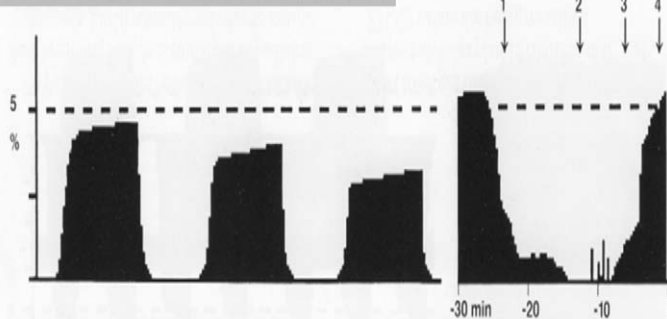
Στην εικόνα 2 παρατίθενται στο άνω μέρος (Α) ένα φυσιολογικό καπνογράφημα με ETCO₂ περίπου 5%, στο μέσον (Β) καπνογράφημα με μεγαλύτερο κατά λεπτόν αερισμό (παρόλο που η συχνότητα είναι μικρότερη, προφανώς ο αναπνεόμενος όγκος είναι μεγάλος) με ETCO₂ περίπου 3,5% και στο κάτω μέρος (Γ) καπνογράφημα υποαερισμού με ETCO₂ περίπου 6,5%.

**Εικόνα 3:** Αιφνίδια και σταδιακή μείωση του ETCO₂

Αιφνίδια διακοπή ένδειξης στο καπνογράφημα (εικόνα 3A) σημαίνει συνήθως αποσύνδεση του κυκλώματος αναισθησίας ή κάμψη/απόφραξη του σωλήνα δειγματοληψίας του καπνογράφου. Αντίθετα σταδιακή μείωση με τελική σταθεροποίηση εμφανώς ορατή στα TRENDS (εικόνα 3B) συμβαίνει σε περίπτωση υπεραερισμού.

Σταδιακή μείωση του $ETCO_2$ συμβαίνει και σε περίπτωση μείωσης της καρδιακής παροχής. Στην εικόνα 4 είναι καταγεγραμμένη περίπτωση ασθενούς με καρδιακή κάμψη, που κατέληξε σε καρδιακή ανακοπή και επανήλθε μετά από επιτυχή ΚΑΡΠΑ. Στο σημείο 1 παρατηρείται ταχεία πτώση της τιμής του $ETCO_2$, στη συνέχεια (σημείο 2) η περίοδος ασυστολίας χωρίς ανίχνευση CO_2 και τέλος τα αποτελέσματα της επιτυχούς ΚΑΡΠΑ (σημείο 3) και η επανάκαμψη της κυκλοφορίας με επάνοδο του $ETCO_2$ στα προηγούμενα επίπεδα (σημείο 4).

ΚΑΜΨΗ και ΚΑΡΔΙΑΚΗ ΑΝΑΚΟΠΗ



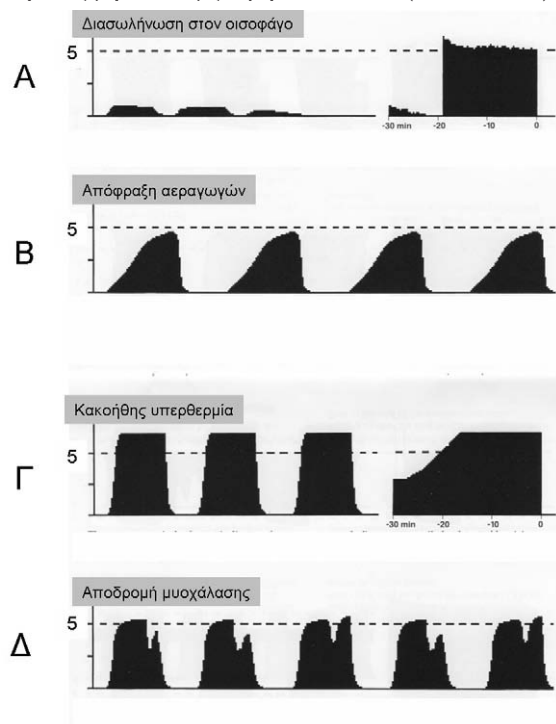
- (1) Σημείο κάμψης της καρδιάς, μείωση ΚΠ.
- (2) Καρδιακή ανακοπή, έναρξη ΚΑΡΠΑ
- (3) Επαναφορά καρδιακής λειτουργίας
- (4) Επαναφορά ΚΠ

Εικόνα 4: Καταγραφή καρδιακής ανακοπής και επιτυχούς έκβασης ΚΑΡΠΑ

Σε διασωλήνωση στον οισοφάγο μπορεί να καταγράφεται μικρή ποσότητα $ETCO_2$ κατά την εκπνοή εξαιτίας των αερίων στο στομάχι, χωρίς όμως κανονική μορφή του καπνογραφήματος. Μετά την αφαίρεση του τραχειοσωλήνα και τη σωστή τοποθέτηση στην τραχεία οι τιμές του $ETCO_2$ καταγράφονται σε φυσιολογικά επίπεδα (ίσως λίγο αυξημένα στην αρχή εξαιτίας συσσώ-

ρευσης διοξειδίου), κι αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην αργή καταγραφή TREND (εικόνα 5A). Σε περίπτωση απόφραξης των αεραγωγών (ΧΑΠ, βρογχικό άσθμα, βρογχόσπασμος, πολλαπλές εκκρίσεις, κάμψη του τραχειοσωλήνα) παρατηρείται παράταση της φάσης II του καπνογραφήματος και έντονη ανιούσα κλίση της φάσης III (εικόνα 5B). Κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης η ανιούσα κλίση της φάσης III θεωρείται αναμενόμενη²¹. Παράταση της φάσης II μπορεί να παρατηρηθεί και σε περίπτωση διαφυγών στο αναπνευστικό κύκλωμα ή και στους καπνογράφους πλάγιας ροής (side stream) όταν υπάρχει λανθασμένη μίξη των αερίων στη γραμμή δειγματοληψίας, κυρίως όταν η ροή δειγματοληψίας είναι χαμηλή (50 ml/min) ή όταν η γραμμή είναι πολύ μακριά και ευρεία^{22,23}.

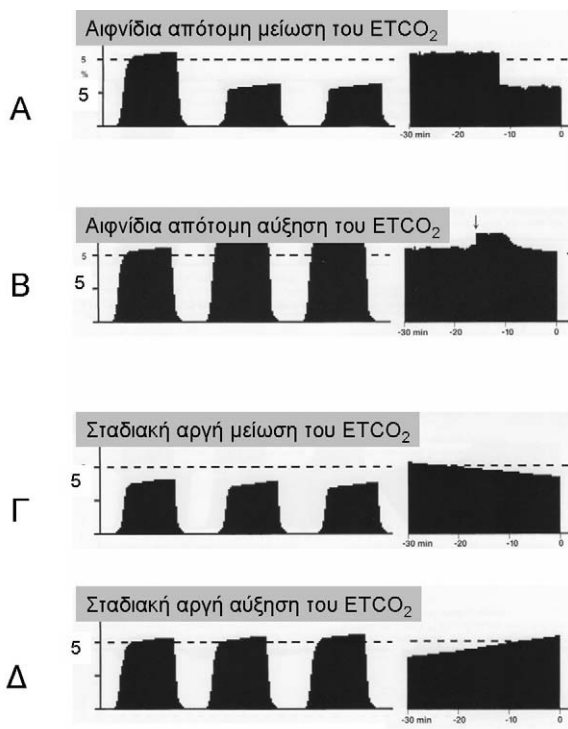
Στην κακοήθη υπερθερμία το καπνογράφημα είναι ίσως ο ταχύτερος διαγνωστικό δείκτης. Η μεγάλη αύξηση του μεταβολικού ρυθμού παράγει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου, προκαλώντας και μεγάλες ποσότητες αποβολής του από τους πνεύμονες. Το αποτέλεσμα είναι η προοδευτική αλλά ταχεία αύξηση του $ETCO_2$, που γίνεται αντιληπτή από τη συνήθη ταχεία καταγραφή αλλά κυρίως στην αργή καταγραφή TREND (εικόνα 5Γ).



Εικόνα 5: Καταγραφή διαφόρων καταστάσεων σε μεγάλης και μικρής ταχύτητας καπνογράφημα

Όταν αρχίσει η αποδρομή της μυοχάλασης στο καπνογράφημα παρατηρούνται κατασπάσεις, που αντιστοιχούν σε ημιτελείς προσπάθειες των ασθενών να εισπνεύσουν αντιμαχόμενοι τον αναπνευστήρα (εικόνα 5Δ).

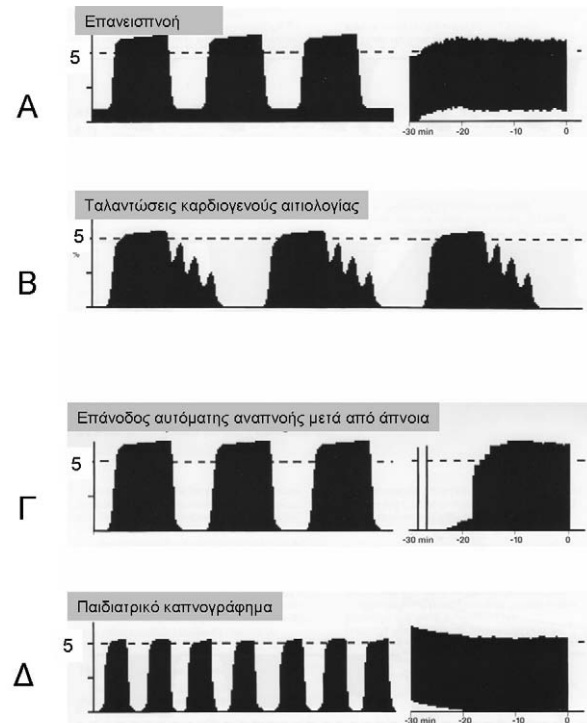
Η απότομη μείωση (αλλά όχι μηδενισμός) και εν συνεχεία σταθερότητα σε χαμηλότερο επίπεδο του ETCO_2 μπορεί να οφείλεται σε μετακίνηση του τραχειοσωλήνα στον κύριο βρόγχο ενός πνεύμονα (πχ σε αλλαγή θέσης του αναισθητοποιημένου ασθενούς) ή σε εσφαλμένη βαθμονόμηση μηδενισμού (zero calibration) του καπνογράφου (εικόνα 6Α). Αντίθετα απότομη αύξηση με βαθμιαία αποκατάσταση μέσα σε λίγα λεπτά στα πρότερα επίπεδα μπορεί να παρατηρηθεί μετά από ταχεία έγχυση HCO_3^- ή άρση αποκλεισμού μεγάλων αγγείων (πχ κοιλιακής αορτής) ή μετά από άρση



Εικόνα 6: Αυξομειώσεις του ETCO_2 σε μεγάλης και μικρής ταχύτητας καπνογράφημα

ίσχαμου επιδέσμου (εικόνα 6B).

Η σταδιακή μείωση του ETCO_2 (εικόνα 6Γ) συνήθως σημαίνει υπεραερισμό, αλλά μπορεί να σημαίνει και μείωση της καρδιακής παροχής ή ειδικότερα της πνευμονικής κυκλοφορίας. Η σταδιακή αύξηση του ETCO_2 (εικόνα 6Δ) μπορεί να



Εικόνα 7: Μη φυσιολογικές καταστάσεις, ορισμένες εκ των οποίων χρειάζονται παρέμβαση

οφείλεται σε υποαερισμό, αλλά μπορεί να οφείλεται και σε αύξηση του μεταβολικού ρυθμού (πχ εξαιτίας πόνου ή πυρετού).

Η μη επάνοδος στο μηδέν του ETCO_2 κατά τη φάση της εισπνοής (εικόνα 7A) σημαίνει επανεισπνοή. Αυτό μπορεί να οφείλεται συνήθως σε αχρηστευμένη νατράσβεστο σε κυκλικό σύστημα ή σε ανεπάρκεια βαλβίδων ή φρέσκων αερίων σε συστήματα μη επανεισπνοής (Bain, Mapleson D). Στην εικόνα 7Δ αποτυπώνεται ένα τυπικό καπνογράφημα παιδιού με μεγάλη αναπνευστική συχνότητα και αρχική επανεισπνοή (λόγω ανεπαρκούς ροής φρέσκων αερίων) που με την κατάλληλη παρέμβαση επανήλθε στο φυσιολογικό.

Στην εικόνα 7B παρατηρείται παράταση της φάσης 0 ή IV με εμφάνιση σε κατιούσα δομή ομοιόμορφων εγκοπών στη διάρκειά της. Αυτό οφείλεται σε ταλαντώσεις του διαφράγματος από τις καρδιακές ώσεις και είναι ιδιαίτερα εμφανές σε αραιές αναπνευστικές συχνότητες. Απλή παράταση της φάσης αυτής χωρίς τις ομοιόμορφες εγκοπές μπορεί να παρατηρηθεί όταν υπάρχει μικρή διαφυγή στην εισπνευστική βαλβίδα του κυκλώμα-

τος, καθώς και στους καπνογράφους με βραδεία ανταπόκριση του αισθητήρα τους²³.

Στην εικόνα 7Γ παρατηρείται η επάνοδος σε αυτόματη αναπνοή μετά από μικρής διάρκειας άπνοια.

Συμπερασματικά, η κατανόηση και ερμηνεία της καπνομετρίας αλλά κυρίως της καπνογραφίας με ανάλυση των χαρακτηριστικών της καμπύλης

(ύψος, συχνότητα αναπνοών, ρυθμός, βασική γραμμή και γενικότερα το σχήμα της καμπύλης) αποτελεί μεγάλο βοήθημα στην έγκαιρη διάγνωση και αντιμετώπιση καταστάσεων, που μπορεί να αποβούν μοιραίες. Εξαιτίας της μεγάλης βοήθειας που προσφέρεται, η καπνογραφία έχει ήδη καθιερωθεί στο βασικό monitoring σε διάφορες χώρες.

ABSTRACT

Carbon Dioxide

Theodora Georgiadou, Fotis Kanakoudis

In the last two decades, control of end tidal CO₂ (ETCO₂) has developed from a research instrument into an essential anesthesia monitoring. Control of ETCO₂ is a non-invasive monitoring technique performed either as capnography, which displays a waveform of CO₂ levels throughout the whole respiratory cycle, or as capnometry, which is the measurement of CO₂. According to the method used for CO₂ sampling there are two types of devices; sidestream and mainstream devices. Sidestream devices transport a portion of the patient's respired gases from the sampling site, through a sampling tube, to the sensor, where CO₂ is actually measured, whereas in the mainstream devices the sensor is placed in the ventilatory circuit just after the tracheal tube. The continuous measurement of CO₂ provides information about the status of three essential functions of the organism: ventilation, circulation and metabolism. In addition to this, other adverse effects such as malfunction of the anesthesia machine or circuit disconnection or oesophageal intubation can be recognized without any delay. However, a correct and moreover a safe interpretation of CO₂ alterations requires careful evaluation of the underlying patient's disease and of the possible impact of other factors such as N₂O, barometric pressure or water vapour. Hence, capnometry or capnography provide useful information for the patient and this explains the fact that CO₂ monitoring is considered as mandatory in many countries.

Key Words: Carbon dioxide monitoring, capnography

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tremper KK, Barker SJ. Fundamental principles of monitoring instrumentation. In: Miller RD (Ed.). Anesthesia Vol I. 3rd ed. New York: Churchill Livingstone, 1990, p957-99.
2. Cote CJ, Liu LMP, Szyfelbein SK, et al: Intraoperative events diagnosed by expired carbon dioxide monitoring in children. Can Anaesth Soc J 1986; 33:315-20
3. O'Flaherty D, Adams AP: The end-tidal carbon dioxide detector. Assessment of new method to distinguish oesophageal from tracheal intubation. Anaesthesia 1990; 45:653-5
4. Tinker ΞH, Dull DL, Caplan RA, et al: Monitoring devices in prevention of anesthetic mishaps: a closed claims analysis. Anesthesiology 1989; 71:541-6
5. Υπουργική απόφαση Υ4α/3592/96 περί "καθορισμού (ελαχίστων) ορίων προδιαγραφών για ασφαλή χορήγηση αναισθησίας", ΦΕΚ 1044/Τεύχος Β'/25-11-1997
6. RaemerDB, Philip JH. Monitoring anesthetic and respiratory gases. In: Blitt CD (Ed.). Monitoring in Anesthesia and Critical Care Medicine. 2nd edition. New York: Churchill Livingstone, 1990; p373-86.
7. Mollgaard K. Acoustic gas measurement. Biomedical Instrumentation and Technology 1989; 23: 495-7.
8. ColmanY, Krauss B. Microstream capnography technology: A new approach to an old problem. J Clin Monit 1999; 15:403-9
9. Paloheimo M, Valli M, Ahjopalo H. A guide to CO₂ monitoring. Finland: Datex Instrumentarium, 1988

10. Kennell EM, Andrews RW, Wollman H. Correction factors for nitrous oxide in the infrared analysis of carbon dioxide. *Anesthesiology* 1973; 39:441-3
11. Raemer DB, Calalang I. Accuracy of end-tidal carbon dioxide tension analyzers. *J Clin Monit* 1991; 7:195-208
12. Fletcher R, Werner O, Nordstrom L, Johnson B. Sources of error and their correction in the measurement of carbon dioxide elimination using the Siemens-Elema CO₂ analyzer. *Br J Anaesth* 1983; 55:177-85
13. Olsson SG, Fletcher R, Johnson B, et al. Clinical studies of a gas exchange during ventilatory support-a method of using the Siemens-Elema CO₂ analyzer. *Br J Anaesth* 1980; 52:491-9
14. Nunn JF, Hill DW. Respiratory dead space and arterial to end-tidal CO₂ tension difference in anesthetized man. *J Appl Physiol* 1960; 15:383-9
15. Shankar KB, Moseley H, Kumar Y, Vemula V. Arterial to end-tidal carbon dioxide tension difference during Caesarian section anaesthesia. *Anaesthesia* 1986; 41:698-702
16. Fletcher R, Johnson B. Deadspace and the single breath test for carbon dioxide during anaesthesia and artificial ventilation. *Br J Anaesth* 1984; 56:109-19
17. Askrog V. Changes in (a-A)CO₂ difference and pulmonary artery pressure in anesthetized man. *J Appl Physiol* 1966; 21:1299-305
18. Weil MH, Bisera J, Trevino RP, Rackow EC. Cardiac output and end-tidal carbon dioxide. *Crit Care Med* 1985; 13:907-9
19. Moon RE, Camporesi EM. Respiratory monitoring. The capnographic waveform. In: *Anesthesia*, Miller RD (Ed), 5th edition, chapter 33, Chaurchill-Livingstone 2000 (on CD)
20. Fletcher R, Johnson B, Cumming G, Brew J. The concept of deadspace with special reference to the single breath test for carbon dioxide. *Br J Anaesth* 1981; 53:77-88
21. Shankar KB, Moseley H, Kumar Y, et al. The arterial to end-tidal carbon dioxide tension difference during anaesthesia for tubal ligations. *Anaesthesia* 1987; 42:482-6
22. Schema J, Thompson J, Crone RK. Mechanical influences on the capnogram. *Crit Care Med* 1984; 12:672-4
23. Pasucci RC, Schema JA, Thompson JE. Comparison of a sidestream and mainstream capnometer in infants. *Crit Care Med* 1989; 17:560-2