

## ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ REVIEW

# Τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης θώρακα

Η τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης θώρακα (THEΘ) είναι μια σχετικά νέα απεικονιστική μέθοδος, η οποία βασίζεται στην καταγραφή της σύνθετης αντίστασης προκαθορισμένων περιοχών ενδιαφέροντος του θώρακα και με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων μπορεί να απεικονίσει μια διατομή του θώρακα στο ύψος του έμππτου μεσοπλεύριου διαστήματος. Μέσω της THEΘ επιτρέπεται η παρακολούθηση της κατανομής του πνευμονικού αερισμού, ενώ, παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα της καταγραφής των μεταβολών επιλεγμένων αναπνευστικών παραμέτρων, όπως του αναπνεόμενου και του λειτουργικού υπολειπόμενου όγκου. Η παρακολούθηση του πνευμονικού αερισμού και των μεταβολών της αναπνοής γίνεται σε πραγματικό χρόνο και καθώς μέσω της μεθόδου «οπτικοποιείται» η αναπνοή, υπάρχει η δυνατότητα άμεσης παρέμβασης, όταν αυτό απαιτείται, όπως για παράδειγμα για τη διόρθωση των παραμέτρων του μηχανικού αερισμού ή τη διόρθωση της θέσης του ασθενούς. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ασθενείς με αναπνευστικές νόσους, διασωληνωμένους και μη. Βασικό πλεονέκτημα της THEΘ έναντι των άλλων απεικονιστικών μεθόδων είναι η έλλειψη ανεπιθύμητων ενεργειών αλλά και το μικρό κόστος, ενώ σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή σχετικά ανάλυση απεικόνισης συγκριτικά με τους κλασικούς τομογράφους. Οι κλινικές εφαρμογές της αναφέρονται κυρίως στην παρακολούθηση της αναπνοής και κατ' επέκταση στη βελτίωση του πνευμονικού αερισμού τόσο τοπικά όσο και γενικευμένα. Έτσι, με τη βοήθεια του τομογράφου εμπέδησης μπορεί να πραγματοποιηθεί τιτλοποίηση της PEEP των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών, εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των χειρισμών για την επιστράτευση των κυψελίδων, διερεύνηση της καταλληλότητας της τοποθέτησης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της υποστήριξής του με μηχανικό αερισμό, παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας του μη επεμβατικού μηχανικού αερισμού, εκτίμηση της αποτελεσματικότητας τόσο της αναπνευστικής φυσικοθεραπείας όσο και πολλών άλλων εφαρμογών που βρίσκονται ακόμη υπό διερεύνηση.

### 1. ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος της Τομογραφίας Εμπέδησης Θώρακα (THEΘ) παρουσιάστηκε πρώτη φορά στην επιστημονική κοινότητα στις αρχές της δεκαετίας του 1980 από το τμήμα Ιατρικής Φυσικής και Κλινικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου του Sheffield του Ηνωμένου Βασιλείου, όπου με τη βοήθεια 16 ηλεκτροδίων επιτεύχθηκε η ανασύνθεση εικόνων του θώρακα η οποία βασίστηκε στις μεταβολές της σύνθετης αντίστασης του ανθρώπινου σώματος.<sup>1</sup> Έκτοτε, η πολλά υποσχόμενη τεχνική αναπτύσσεται, εξελίσσεται και τείνει να επεκταθεί και σε άλλες ανατομικές περιοχές του ανθρώπινου σώματος, καθώς επίσης και σε άλλες επιστήμες, όπως η Βιολογία και η Γεωλογία.<sup>2</sup>

Σήμερα, εκτός από τις πειραματικές διατάξεις εμπέδησης που διαθέτουν τα ερευνητικά τμήματα αρκετών πανεπι-

στημίων παγκοσμίως, υπάρχουν και εμπορικές διατάξεις (PulmoVista® 500, Swisstom's BB<sup>2</sup>, Elisa 800<sup>MT</sup>), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνες τους σε ασθενείς με αυτόματη αναπνοή ή σε συνδυασμό με αντίστοιχους συμβατούς αναπνευστήρες σε μηχανικά αεριζόμενους ασθενείς.

### 2. Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Από τα τρία είδη αντιστάσεων που παρουσιάζουν οι αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος (ωμική, χωρητική και επαγωγική), το ανθρώπινο σώμα, όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, παρουσιάζει τη χωρητική και την ωμική αντίσταση, ενώ δεν διαθέτει την επαγωγική αντίσταση.<sup>2</sup> Το άθροισμα των δύο παραπάνω αντιστάσεων περιγράφεται από τη Φυσική ως σύνθετη αντίσταση του ανθρώπινου σώματος.<sup>3</sup>

ΑΡΧΕΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ 2019, 36(5):589-596  
ARCHIVES OF HELLENIC MEDICINE 2019, 36(5):589-596

Κ. Γρηγοριάδης,<sup>1</sup>  
Α. Αρμαγανίδης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Φυσικοθεραπείας,  
Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο  
«Αττικόν», Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα  
<sup>2</sup>Β' Κλινική Εντατικής Θεραπείας,  
Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο  
«Αττικόν», Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Chest electrical impedance  
tomography

Abstract at the end of the article

### Λέξεις ευρετηρίου

Απεικονιστικές μέθοδοι  
Τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης

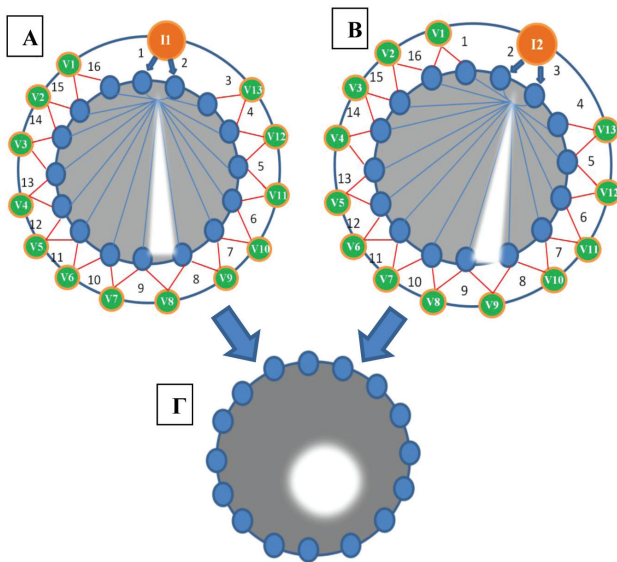
Υποβλήθηκε 10.9.2018

Εγκρίθηκε 25.9.2018

Η αρχή της τομογραφίας εμπέδησης βασίζεται στον υπολογισμό και στις μεταβολές της σύνθετης αντίστασης του ανθρώπινου σώματος σε μια εγκάρσια διατομή, η οποία μετράται με τη βοήθεια 16 ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα γύρω από το επίπεδο της εγκάρσιας διατομής που πρόκειται να μελετηθεί (σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για το 5ο μεσοπλεύριο διάστημα του θώρακα), ενώ η ανασύνθεση της εικόνας αναπαράγεται σε monitor το οποίο διαθέτει ο τομογράφος.

Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα γνωστής έντασης μεταξύ δύο ηλεκτροδίων δημιουργείται ηλεκτρική δραστηριότητα μεταξύ τους. Η ηλεκτρική αυτή δραστηριότητα καταγράφεται ως διαφορά δυναμικού από τα υπόλοιπα 13 ζεύγη ηλεκτροδίων τα οποία κατανέμονται κυκλωτερώς στην επιφάνεια της νοητής διατομής που μελετάται. Έτσι, σχηματίζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές του οποίου διαπερνούν εγκάρσια το μελετώμενο ανατομικό τμήμα (εικόνες 1Α, 1Β).

Κάθε φορά που οι δυναμικές γραμμές του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου διέρχονται από μια περιοχή η οποία δεν είναι συμπαγής, αυτή εκλαμβάνεται ως περιοχή μεγάλης αντίστασης και απεικονίζεται από τον τομογράφο με λευκό χρώμα. Αντίθετα, όταν οι δυναμικές γραμμές του πεδίου διέρχονται από μια περιοχή που είναι συμπαγής, αυτή εκλαμβάνεται ως περιοχή μικρής αντίστασης και απεικονίζεται από τον τομογράφο με σκούρο χρώμα<sup>4</sup> (εικ. 1Γ).



**Εικόνα 1.** Η ηλεκτρική δραστηριότητα κάθε ζεύγους ηλεκτροδίων ανιχνεύεται ως διαφορά δυναμικού από τα υπόλοιπα 13 ζεύγη ηλεκτροδίων. Στα (Α) και (Β) περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία για τα δύο πρώτα ζεύγη ηλεκτροδίων, η οποία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα ζεύγη. Ο υπολογιστικός συνδυασμός του συνόλου των πιο πάνω πληροφοριών οδηγεί στην απεικόνιση των περιοχών στις οποίες μεταβάλλεται τοπικά (Γ).

Ο υπολογιστικός ανασυνδυασμός των 208 διαφορετικών διαφορών δυναμικού που προκύπτουν, μετά και την εφαρμογή ειδικών φίλτρων, συνθέτει μια εικόνα 32×32 εικονοστοιχείων τα οποία οπτικοποιούν τις μεταβολές της σύνθετης αντίστασης της μελετώμενης περιοχής και αναπαράγουν πλήρως την κατανομή και τις διαφορές του πνευμονικού αερισμού,<sup>5</sup> μιας και ο αέρας που εισέρχεται στον πνεύμονα κατά την εισπνοή μεταβάλλει την πυκνότητα του πνευμονικού παρεγχύματος και επομένως τη σύνθετη αντίσταση του θώρακα.<sup>6</sup> Η εν λόγω εικόνα λαμβάνεται από τον τομογράφο 50 φορές το δευτερόλεπτο, με αποτέλεσμα την ομαλοποίησή της για συνεχόμενη παρατήρηση, ενώ είναι κατάλληλη για παρακολούθηση του πνευμονικού αερισμού σε πραγματικό χρόνο με τον χαρακτηρισμό «δυναμική εικόνα».

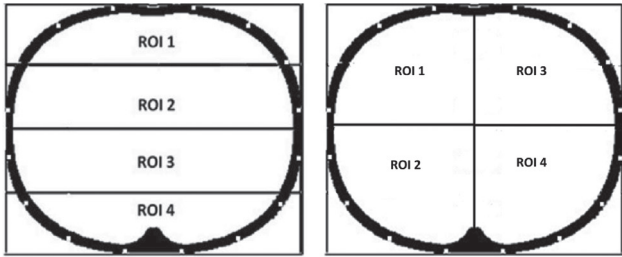
Τα ρευματίδια που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτόν είναι ασθενέστατα (από 25  $\mu\text{V}$  έως 160 mV) και ασφαλή, ενώ δεν γίνονται αντιληπτά σε καμιά περίπτωση από τον ασθενή.<sup>5</sup>

Προκειμένου τα παραπάνω ηλεκτρόδια να τοποθετούνται εύκολα, με τη σωστή σειρά, στις σωστές αποστάσεις και χωρίς να αποκλίνουν από το ύψος της διατομής που πρόκειται να μελετηθεί, είναι τοποθετημένα επάνω σε ελαστικό ιμάντα, ο οποίος τοποθετείται κυκλωτερώς στην υπό εξέταση ανατομική εγκάρσια διατομή (εικ. 2).

Για μεθοδικότερη και όσο το δυνατόν πληρέστερη αξιολόγηση του πνευμονικού αερισμού, η εξεταζόμενη εγκάρσια διατομή του θώρακα χωρίζεται σε νοητές περιοχές, που χαρακτηρίζονται ως «περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος» (regions of interest, ROI) (εικ. 3) και καθορίζονται από τον εξεταστή ανάλογα με το είδος της εξέτασης.



**Εικόνα 2.** Ο τομογράφος εμπέδησης κατά τη διάρκεια παρακολούθησης του αερισμού μη διασωληνωμένου ασθενούς. Διακρίνεται η ζώνη με τα 16 ηλεκτρόδια που έχει τοποθετηθεί στο πέμπτο μεσοπλεύριο διάστημα του θώρακα.



**Εικόνα 3.** Οι περιοχές ενδιαφέροντος (regions of interest, ROI) μπορούν να ρυθμιστούν από τον εξεταστή (εμπρός-πίσω, δεξιά-αριστερά κ.λπ.).

Οι συνεχείς και πολλαπλές μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης προσφέρουν πληροφορίες, όπως για το ποσοστό της κατανομής του αερισμού σε κάθε μία από τις περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος της υπό εξέταση διατομής (εμπρός-πίσω, δεξιά-αριστερά κ.λπ.),<sup>7</sup> καθώς και για τη διαφορά της τελοεκπνευστικής εμπέδησης συνολικά, αλλά και για κάθε περιοχή ειδικού ενδιαφέροντος ξεχωριστά, πριν και μετά από κάθε μεταβολή των παραμέτρων της αναπνοής, η οποία αναλογεί σε αντίστοιχη διαφορά του τελοεκπνευστικού όγκου και εκφράζεται ως ποσοστό του αναπνεόμενου όγκου.<sup>8</sup>

Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του αναπνεόμενου όγκου και της διαφοράς τελοεισπνευστικής-τελοεκπνευστικής εμπέδησης ( $R^2=0,9864$ ) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μεταβολές που παρουσιάζονται στον αερισμό μετά από οποιαδήποτε παρέμβαση στο αναπνευστικό σύστημα θα μπορούσαν να μελετηθούν ως προς τις διαφορές οι οποίες αντιστοιχούν αναλογικά σε ποσοστό του αναπνεόμενου όγκου.<sup>8</sup> Επίσης, η μεταβολή της λειτουργικής υπολειπόμενης χωρητικότητας εκφράζεται σε ποσοστιαία μεταβολή του αναπνεόμενου όγκου και επομένως η μεταβολή του αναπνεόμενου όγκου μπορεί να γίνει μέτρο σύγκρισης του βάθους της αναπνοής, αλλά και των μεταβολών των υπολειπόμενων όγκων.<sup>9</sup> Εφόσον διατεθεί συμβατός αναπνευστήρας με τον οποίο μπορεί να συνδεθεί ο τομογράφος θα υπάρξει και η δυνατότητα ακριβούς καταγραφής του αναπνεόμενου όγκου σε mL (εικ. 4).

Επισημαίνεται ότι, όπως και σε όλες τις απεικονιστικές μεθόδους, κατά την τοποθέτηση του εξεταζόμενου στον τομογράφο απαιτείται η εξασφάλιση σχετικής ακινησίας. Μεταβολές στην εμπέδηση του ανθρώπινου σώματος παρατηρούνται με την ανύψωση του κορμού σε σχέση με τα κάτω άκρα, με την κάμψη ή την έκταση του ενός ή και των δύο άνω άκρων, ή ακόμη με την κάμψη ή την έκταση μόνο του αντιβράχιου, η οποία δίνει μεταβολή της τάξης του 5%. Όταν δε η μεταβολή αφορά στο κάτω άκρο, μπορεί να φθάσει και στο 12% της συνολικής εμπέδησης του σώματος.<sup>10</sup> Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του τομογράφου που σχετίζονται με τις μεταβολές του αναπνεόμενου όγκου ή της λειτουργικής υπολειπόμενης χωρητικότητας (όχι όμως με την κατανομή του αερισμού) επηρεάζονται από την αλλαγή της θέσης του εξεταζόμενου κατά τη διάρκεια της λήψης των μετρήσεων. Επί πλέον, κατά τον επανέλεγχο, ο εξεταζόμενος θα πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς στην ίδια θέση με αυτή της λήψης των αρχικών μετρήσεων.

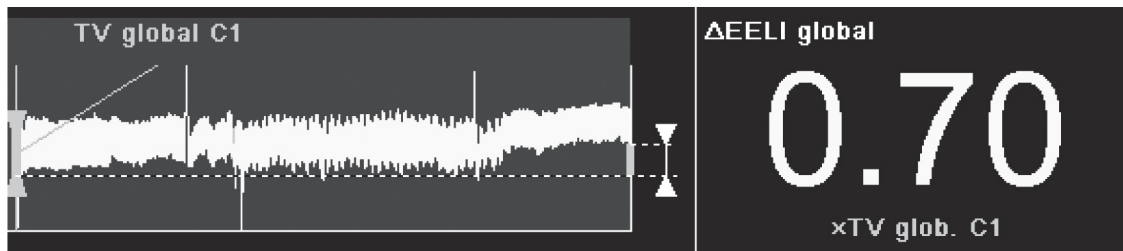
**3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ ΘΩΡΑΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΑΛΛΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**

Όπως κάθε μέθοδος κλινικής εξέτασης, η THEΘ έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάποια σημεία υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων απεικόνισης, ενώ σε κάποια άλλα όχι.

**3.1. Πλεονεκτήματα**

Στα πλεονεκτήματα της THEΘ περιλαμβάνεται η μη εκπομπή ιονίζουσας ακτινοβολίας όπως συμβαίνει με άλλες απεικονιστικές μεθόδους, όπως το σπινθηρογράφημα με ραδιενεργό ξένο (<sup>133</sup>Xe)<sup>11</sup> και η αξονική τομογραφία,<sup>12</sup> κατά την εφαρμογή των οποίων το ανθρώπινο σώμα επιφορτίζεται με ιονίζουσα ακτινοβολία.

Η THEΘ προσφέρει δυναμική απεικόνιση, είναι σύντομη στην εφαρμογή και χαμηλού κόστους σε σχέση με τη



**Εικόνα 4.** Ο τομογράφος εμπέδησης έχει τη δυνατότητα αναπαραγωγής των αλλαγών των τιμών της εμπέδησης του θώρακα. Οι μεταβολές της τελοεκπνευστικής εμπέδησης (ΔEELI) κάθε αναπνευστικού κύκλου εκφράζονται ως μεταβολές του αναπνεόμενου όγκου του πρώτου ή προκαθορισμένου σταθερού αναπνευστικού κύκλου.

μαγνητική τομογραφία, η οποία είναι μέθοδος στατική, δαπανηρή και χρονοβόρα, ενώ, παράλληλα, είναι η μοναδική κατάλληλη μέθοδος για συνεχή κλινική παρακολούθηση.<sup>2</sup>

Το μικρό μέγεθος της συσκευής συμβάλλει στη φορητότητα της και εξασφαλίζει χαμηλές απαιτήσεις μετακίνησης των υπό εξέταση ασθενών στο ακτινολογικό τμήμα, γεγονός το οποίο συντελεί στη μείωση των συμβαμάτων από τις μετακινήσεις των βαρέως πασχόντων ασθενών.<sup>13</sup>

Η μέθοδος προσφέρει επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων σ' ό,τι αφορά στην κατανομή του αερισμού σε διάφορες θέσεις στο ίδιο δείγμα πληθυσμού, γεγονός που την καθιστά πολύτιμη για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, οι οποίες απέχουν μεγάλο χρονικό διάστημα από την αρχική μέτρηση, ιδιότητα που συμβάλλει στην αξιοπιστία της.<sup>7</sup> Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα στατικής και δυναμικής παρακολούθησης της αναπνοής σε όλο το φάσμα του αναπνευστικού κύκλου, καθώς και αποθήκευσης των παραμέτρων της αναπνευστικής λειτουργίας που καταγράφει ο τομογράφος για αρκετές ώρες, με σκοπό τη μελλοντική τους επεξεργασία.<sup>14</sup>

Η αναπαραγωγή της απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο παρέχει τη δυνατότητα στον εξεταστή να πληροφορείται άμεσα για τις μεταβολές που επιφέρει στον πνευμονικό αερισμό οποιαδήποτε μεταβολή στις συνθήκες υποστήριξης των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών (όπως για παράδειγμα η μεταβολή των παραμέτρων του αναπνευστήρα<sup>14</sup>) και να επεμβαίνει ανάλογα.

Στις διευκολύνσεις που προσφέρει η μέθοδος στον εξεταστή περιλαμβάνεται ο μη αυτόματος καθορισμός των περιοχών ειδικού ενδιαφέροντος. Ο καθορισμός των περιοχών γίνεται έτσι ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης για περιοχικές μεταβολές του αερισμού.<sup>14</sup> Η λεπτομερής παρακολούθηση της κατανομής του αερισμού επιτρέπει την επισήμανση περιοχών του πνεύμονα με καθυστερημένη πλήρωση αέρα, ενώ, παράλληλα, επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση των ενδεχόμενων αλλαγών στις συνθήκες αερισμού ανά περιοχή ειδικού ενδιαφέροντος για μεγάλο χρονικό διάστημα, όσο δηλαδή υπάρχει καταγραφή στην περιοχή του γραφήματος μεταβολής της εμπέδησης σε σχέση με τον χρόνο.<sup>15</sup>

Η μέθοδος προσδίδει ευελιξία ως προς την τοποθέτηση του ασθενούς. Ο εξεταζόμενος μπορεί να τοποθετηθεί για την παρακολούθησή του στη θέση που του προσφέρει τη μεγαλύτερη άνεση, μιας και δεν απαιτούνται ειδικές θέσεις,<sup>16</sup> αρκεί η εν λόγω επιλεγμένη θέση να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Τέλος, ένα από τα πλέον αξιολογικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα να προσφέρει πληροφόρηση

για τις μεταβολές των τελοεκπνευστικών όγκων, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη στους μηχανικά αεριζόμενους ασθενείς.<sup>17</sup>

### 3.2. Μειονεκτήματα

Οι διαφορές που προκύπτουν μετά από οποιαδήποτε παρέμβαση αναφέρονται ως ποσοστό του αναπνεόμενου όγκου και όχι σε μονάδα μέτρησης όγκου. Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων θα πρέπει ο αναπνεόμενος όγκος να παραμένει σταθερός, συνθήκη που ικανοποιείται είτε στην περίπτωση του μηχανικά αεριζόμενου ασθενούς ή με τη χρήση ειδικού συμπληρωματικού λογισμικού το οποίο αξιοποιεί μέσες τιμές όταν εφαρμόζεται σε ασθενή με αυτόματη αναπνοή.

Επί πλέον, η χαμηλή ανάλυση που προκύπτει από το εμβαδόν των 32x32 εικονοστοιχείων δεν αφήνει τα περιθώρια λεπτομερειακής ανάλυσης των περιοχών ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα οι πολύ εντοπισμένες διαφορές να μην είναι δυνατόν να υπολογιστούν με ακρίβεια.<sup>14</sup>

## 4. ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η THEΘ, ως κλινική μέθοδος αξιολόγησης, οπτικοποιεί την περιοχική κατανομή του αερισμού και των αλλαγών των πνευμονικών όγκων, πληροφορία χρήσιμη για την οργάνωση της φροντίδας του αναπνευστικού πάσχοντα, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της ανταλλαγής των αναπνευστικών αερίων και την επίτευξη μιας πιο ομογενοποιημένης κατανομής του αερισμού στον πνεύμονα.<sup>17</sup>

Με τη μέθοδο της THEΘ υπάρχει η δυνατότητα αξιολόγησης του πνευμονικού αερισμού για μια διατομή του θώρακα σ' ό,τι αφορά στην επίδραση ενός ή περισσότερων παραγόντων που επιδρούν στην αναπνοή του εξεταζόμενου. Πιο συγκεκριμένα, με τη μέθοδο είναι διακριτές οι μεταβολές που προκύπτουν στον πνευμονικό αερισμό από παχυσαρκία,<sup>18</sup> από πιθανή πλευριτική συλλογή,<sup>19</sup> σε περιπτώσεις πνευμονεκτομής,<sup>20</sup> πνευμοθώρακα,<sup>21</sup> ατελεκτασίας,<sup>22</sup> καθώς και στην περίπτωση συνδρόμου οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας (ARDS).<sup>23</sup> Τα αποτελέσματα των απεικονίσεων προσφέρουν στοιχεία για πιο ολοκληρωμένη εικόνα σε σχέση πάντα με τις κλασικές μεθόδους απεικόνισης.

### 4.1. Για την τιτλοποίηση της PEEP

Η επιλογή της ιδανικής τελοεκπνευστικής πίεσης (PEEP) των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών είναι σημαντική για την αποφυγή ατελεκτασιών και τραυματισμών του πνεύμονα λόγω λανθασμένης επιλογής πιέσεων (βαρότραυμα,

ατελεκτότραυμα).<sup>24,25</sup> Με τη βοήθεια της THEΘ παρέχεται η δυνατότητα επιλογής της ιδανικής PEEP μέσω της παρακολούθησης της τελοεκπνευστικής εμπέδησης (σταθερή τελοεκπνευστική εμπέδηση αντιστοιχεί σε σταθερό τελοεκπνευστικό όγκο και ιδανική τιμή PEEP).<sup>26</sup>

Η επιλογή της ιδανικής PEEP μπορεί επίσης να προκύψει μετά από μικρές αυξομειώσεις των τιμών της, με στόχο την εξάλειψη των περιοχών με καθυστέρηση έκπτυξης (pendelluft),<sup>15,25,27</sup> η οποία πιθανόν να οδηγήσει σε καταστροφή των κυψελίδων. Στην περίπτωση αυτή η βλάβη προκύπτει από το επαναλαμβανόμενο άνοιγμα-κλείσιμο μικρών αεραγωγών και καταγράφεται με τη μέθοδο της THEΘ ως διαφορά φάσης των αναπνευστικών κύκλων μεταξύ συγκεκριμένων περιοχών, αλλά και του συνόλου του πνεύμονα.<sup>15,28,29</sup>

#### 4.2. Ως μέσο ελέγχου της αποτελεσματικότητας των χειρισμών επιστράτευσης κυψελίδων

Ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας των χειρισμών επιστράτευσης των κυψελίδων είναι απαραίτητος προκειμένου να διαπιστωθεί αν τελικά έχει ωφεληθεί ο ασθενής που βρίσκεται σε μηχανικό αερισμό και έχει υποβληθεί σε αυτή τη διαδικασία.<sup>30</sup> Με τη μέθοδο της THEΘ καταγράφονται οι περιοχές στις οποίες αυξήθηκε ο αερισμός, προκειμένου να υπάρχει σαφής εικόνα των περιοχών που ωφελήθηκαν από τη διαδικασία. Η όλη τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο ARDS, όπου η διαδικασία επιστράτευσης των κυψελίδων είναι ένας από τους σημαντικούς τρόπους αντιμετώπισης της μεγάλης υποξαιμίας.<sup>31</sup>

#### 4.3. Ως μέσο ελέγχου της αποτελεσματικότητας της τοποθέτησης στον πνευμονικό αερισμό

Με τη μέθοδο της τομογραφίας εμπέδησης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της περιοχικής κατανομής του πνευμονικού αερισμού κατά την επιλογή της τοποθέτησης (positioning) του ασθενούς.<sup>32</sup> Οι μεταβολές του αερισμού γίνονται άμεσα αντιληπτές σε πραγματικό χρόνο και η τοποθέτηση μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα.<sup>7</sup>

#### 4.4. Ως μέσο ελέγχου της αποτελεσματικότητας του μη επεμβατικού μηχανικού αερισμού

Η τεχνική δεν χρησιμοποιείται μόνο για την παρακολούθηση του αερισμού κατά τον επεμβατικό μηχανικό αερισμό, αλλά και για την παρακολούθηση των μεταβολών του αερισμού του πνεύμονα κατά τον μη επεμβατικό μηχανικό αερισμό (MEMA). Η τεχνική επιτρέπει την καταγραφή του υπολειπόμενου όγκου αέρα, γεγονός που της προσφέρει

πεδίο εφαρμογής στην αξιολόγηση της επιτυχίας ή μη του MEMA (επιστράτευση κυψελίδων) για τη λύση πιθανών ατελεκτασιών και την αποφυγή της διασωλήνωσης.<sup>33</sup>

#### 4.5. Ως μέσο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας «δυναμικών» οξυγονοθεραπευτικών μέσων

Οι διαφορές που καταγράφονται στην τελοεκπνευστική εμπέδηση έχουν συσχετιστεί με τις διαφορές που συμβαίνουν στη λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα.<sup>8,34</sup> Αυτό είναι χρήσιμο σε πάρα πολλές περιπτώσεις παρακολούθησης της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής δυναμικών οξυγονοθεραπευτικών μέσων (tracheal gas insufflation, TGI, high flow) στην αναπνοή των βαρέως πασχόντων, ειδικά εκείνων που βρίσκονται σε διαδικασία αποδέσμευσης από τον μηχανικό αερισμό και χρειάζονται περαιτέρω υποστήριξη.<sup>35</sup>

#### 4.6. Ως αξιολόγηση της αναπνευστικής φροντίδας/φυσικοθεραπείας

Στον τομέα της αναπνευστικής φροντίδας, η THEΘ αποτελεί εφόδιο για την αξιολόγηση των αναπνευστικών πασχόντων που έχουν δεχθεί χειρισμούς αναπνευστικής φυσικοθεραπείας<sup>36</sup> και την παρακολούθησή τους σε πραγματικό χρόνο (monitoring) μέσω των παραγόμενων στατικών ή δυναμικών εικόνων, αλλά και για την αξιολόγηση και παρακολούθηση των βαρέως πασχόντων και κυρίως αυτών που υποβάλλονται σε μηχανικό αερισμό.<sup>37</sup>

Οι αναφορές από βάσεις δεδομένων που σαφώς αναφέρονται στη σχέση φυσικοθεραπείας και THEΘ είναι ελάχιστες. Αντίθετα, υπάρχουν αρκετές που σχετίζονται με ζητήματα τα οποία άπτονται του αντικείμενου της φυσικοθεραπείας. Οι εν λόγω μελέτες δείχνουν ότι η συνεισφορά της THEΘ στη φυσικοθεραπευτική αξιολόγηση αναφέρεται στον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της θετικής τελοεκπνευστικής πίεσης και της λειτουργικής υπολειπόμενης χωρητικότητας,<sup>38</sup> με σκοπό την υποστήριξη του ασθενούς κατά την αποδέσμευσή του από τον μηχανικό αερισμό,<sup>39,40</sup> και τη βελτίωση του αερισμού κατά τη διάρκεια φυσικοθεραπευτικής παρέμβασης σε ενήλικες,<sup>41</sup> παιδιά,<sup>42</sup> αλλά και πρόωρα νεογνά.<sup>43</sup> Επί πλέον, πραγματοποιείται παρακολούθηση του χρονισμού του αναπνευστικού κύκλου των μηχανικά αεριζόμενων ασθενών για την αποφυγή της δημιουργίας ατελεκτασιών,<sup>44</sup> ενώ, παράλληλα, ελέγχεται η αποτελεσματικότητα τεχνικών αναπνευστικής φυσικοθεραπείας για τον χειρισμό περιστατικών με κυστική ίνωση.<sup>45</sup> Τέλος, ελέγχεται η αποτελεσματικότητα τεχνικών δυναμικής οξυγονοθεραπείας (high flow, TGI) σε ενήλικες αλλά και σε παιδιά και η επίδρασή τους στη λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα.<sup>46</sup>

Η παραπάνω αρθρογραφία φαίνεται να καλύπτει ένα μικρό τμήμα του φάσματος των εφαρμογών που μπορεί να έχει η ΤΗΕΘ στο πεδίο της αναπνευστικής φυσικοθεραπείας, μιας και μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής οπτικοποιούνται οι μεταβολές του αερισμού, οι διαταραχές γίνονται άμεσα αντιληπτές και παρέχεται στον θεραπευτή η δυνατότητα της ασφαλούς και άμεσης επέμβασης, αλλά και της επιλογής των βέλτιστων συνθηκών αερισμού.

Περαιτέρω μελέτες θα μπορούσαν να εστιάσουν στην αξιολόγηση μέσω της ΤΗΕΘ, σ' ό,τι αφορά στην αποτελεσματικότητα των διαφόρων τεχνικών φυσικοθεραπείας (π.χ. της τεχνικής υπερέκπτυξης με αναισθησιολογικό ασκό) ή συνδυασμού των τεχνικών αυτών με ειδικές θέσεις τοποθέτησης, καθώς επίσης και στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης των χρόνια αποφρακτικών ασθενών μέσω της αποφόρτισης των περιοχών υπερδιάτασης λόγω αυτογενούς τελοεκπνευστικής πίεσης. Τέλος, όπως έχει ήδη μελετηθεί, εκτός από την αποτελεσματικότητα της τεχνικής στην παρακολούθηση των ασθενών υπό επεμβατικό αερισμό, θα μπορούσε να μελετηθεί και η συμβολή της στην ασφαλέστερη διαχείριση των ασθενών που υποβάλλονται σε επιστράτευση των κυψελίδων με τη μέθοδο του μη επεμβατικού μηχανικού αερισμού.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης είναι μια αναπτυσσόμενη μέθοδος απεικόνισης-παρακολούθησης των αναπνευστικών ασθενών, κυρίως των βαρέως πασχόντων. Η απεικόνιση αυτή είναι πρωτότυπη και ιδιαίτερη λόγω του γεγονότος ότι παράγει αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο και πληροφορεί για πολλές μεταβολές που μπορούν να συμβούν σε πληθώρα παραμέτρων του αναπνευστικού συστήματος, με μεγαλύτερα πλεονεκτήματα την έλλειψη ανεπιθύμητων ενεργειών και τη φορητότητα της μεθόδου παρά την κλίνη του ασθενούς.

Η ΤΗΕΘ έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι έχει εκπονηθεί πληθώρα μελετών (μέχρι σήμερα περίπου 3.000 άρθρα), παρ' όλο το νεαρό της ηλικίας της. Η πολλά υποσχόμενη μέθοδος αναμένεται να καταλάβει εξέχουσα θέση στην παρακολούθηση της αναπνοής στη μονάδα εντατικής θεραπείας αλλά και εκτός αυτής, ενώ η περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου θα μπορούσε να βελτιώσει τα μειονεκτήματά της, όπως η σχετικά χαμηλή οπτική ανάλυση, και να την εξελίξει σε μια λεπτομερή απεικονιστική μέθοδο με πληθώρα δυνατοτήτων.

## ABSTRACT

### Chest electrical impedance tomography

K. GRIGORIADIS,<sup>1</sup> A. ARMAGANIDIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physiotherapy, "Attikon" University Hospital, School of Medicine, National and Kapodistrian University of Athens, Athens, <sup>2</sup>Second Department of Critical Care, "Attikon" University Hospital, School of Medicine, National and Kapodistrian University of Athens, Athens, Greece

*Archives of Hellenic Medicine 2019, 36(5):589–596*

Chest electrical impedance tomography (CEIT) is a new imaging technique based on the recording of the impedance of predetermined thoracic regions of interest. With the use of computational methods, it can visualize a cross section of the fifth intercostal zone of the thorax. It is used to monitor the distribution of pulmonary ventilation and to record the changes in selected respiratory parameters, such as the tidal volume and the functional residual volume. The monitoring of both pulmonary ventilation and the respiratory changes takes place in real time, and, as the method gives the sense of breathing "visualization", there is the possibility of immediate intervention when required (e.g., correction of mechanical ventilation parameters, correction of the patient's position, etc.). The key advantages of CEIT compared with other imaging techniques are the absence of side effects and the low cost, but a significant disadvantage is the low imaging resolution compared with computed tomography (CT) scans. The clinical applications of CEIT are mainly related to the monitoring of breathing for the improvement of the pulmonary ventilation, both locally and overall. With the use of CEIT, it is possible to titrate the positive end expiratory pressure (PEEP) of mechanically ventilated patients, to estimate the effectiveness of the mobilization of the alveoli, to estimate the suitability of a patient's placement during mechanical ventilation, to monitor the efficacy of non-invasive mechanical ventilation, and to assess the effectiveness of respiratory physiotherapy, and many other applications are still under investigation.

**Key words:** Electrical impedance tomography, Imaging methods

## Βιβλιογραφία

1. BARBER DC, BROWN BH, FREESTON IL. Imaging spatial distributions of resistivity using applied potential tomography – APT. In: Deconinck F (ed) *Information processing in medical imaging*. Springer, Dordrecht, 1984:446–447
2. LYMPEROPOULOS G, LYMPEROPOULOS P, ALIKARI V, DAFOGIANNI C, ZYGA S, MARGARI N. Applications for electrical impedance tomography (EIT) and electrical properties of the human body. *Adv Exp Med Biol* 2017, 987:109–117
3. PREEDY VR. *Handbook of anthropometry: Physical measures of human form in health and disease*. Springer Verlag, New York, 2012:52
4. YORKEY TJ, WEBSTER JG, TOMPKINS WJ. Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography. *IEEE Trans Biomed Eng* 1987, 34:843–852
5. BOONE K, BARBER D, BROWN B. Imaging with electricity: Report of the European Concerted Action on Impedance Tomography. *J Med Eng Technol* 1997, 21:201–232
6. FRERICHS I. Electrical impedance tomography (EIT) in applications related to lung and ventilation: A review of experimental and clinical activities. *Physiol Meas* 2000, 21:R1–R21
7. REIFFERSCHIED F, ELKE G, PULLETTZ S, GAWELCZYK B, LAUTENSCHLÄGER I, STEINFATH M ET AL. Regional ventilation distribution determined by electrical impedance tomography: Reproducibility and effects of posture and chest plane. *Respirology* 2011, 16:523–531
8. HINZ J, HAHN G, NEUMANN P, SYDOW M, MOHRENWEISER P, HELDIGE G ET AL. End-expiratory lung impedance change enables bedside monitoring of end-expiratory lung volume change. *Intensive Care Med* 2003, 29:37–43
9. BIKKER IG, LEONHARDT S, BAKKER J, GOMMERS D. Lung volume calculated from electrical impedance tomography in ICU patients at different PEEP levels. *Intensive Care Med* 2009, 35:1362–1367
10. LOZANO A, ROSELL J, PALLÁS-ARENY R. Errors in prolonged electrical impedance measurements due to electrode repositioning and postural changes. *Physiol Meas* 1995, 16:121–130
11. ALTES TA, REHM PK, HARRELL F, SALERNO M, DANIEL TM, DE LANGE EE. Ventilation imaging of the lung: Comparison of hyperpolarized helium-3 MR imaging with Xe-133 scintigraphy. *Acad Radiol* 2004, 11:729–734
12. MENTORE K, FROH DK, DE LANGE EE, BROOKEMAN JR, PAGET-BROWN AO, ALTES TA. Hyperpolarized HHe 3 MRI of the lung in cystic fibrosis: Assessment at baseline and after bronchodilator and airway clearance treatment. *Acad Radiol* 2005, 12:1423–1429
13. HINZPETER R, SPRENGEL K, WANNER GA, MILDENBERGER P, ALKA-DHI H. Repeated CT scans in trauma transfers: An analysis of indications, radiation dose exposure, and costs. *Eur J Radiol* 2017, 88:135–140
14. BROWN BH. Electrical impedance tomography (EIT): A review. *J Med Eng Technol* 2003, 27:97–108
15. MUDERST, LUEPSCHEN H, PUTENSEN C. Regional ventilation delay index: Detection of tidal recruitment using electric impedance tomography. In: Vincent JL (ed) *Yearbook of intensive care and emergency medicine*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009:405–412
16. FRERICHS I, SCHIFFMANN H, OEHLER R, DUDYKEYVICH T, HAHN G, HINZ J ET AL. Distribution of lung ventilation in spontaneously breathing neonates lying in different body positions. *Intensive Care Med* 2003, 29:787–794
17. BIKKER IG, PREIS C, EGAL M, BAKKER J, GOMMERS D. Electrical impedance tomography measured at two thoracic levels can visualize the ventilation distribution changes at the bedside during a decremental positive end-expiratory lung pressure trial. *Crit Care* 2011, 15:R193
18. NESTLER C, SIMON P, PETROFF D, HAMMERMÜLLER S, KAMRATH D, WOLF S ET AL. Individualized positive end-expiratory pressure in obese patients during general anaesthesia: A randomized controlled clinical trial using electrical impedance tomography. *Br J Anaesth* 2017, 119:1194–1205
19. ALVES SH, AMATO MB, TERRA RM, VARGAS FS, CARUSO P. Lung re-aeration and reventilation after aspiration of pleural effusions. A study using electrical impedance tomography. *Ann Am Thorac Soc* 2014, 11:186–191
20. LEHMANN S, TENBROCK K, SCHRADING S, PIKKEMAAT R, ANTINK CH, SANTOS S ET AL. Monitoring of lobectomy in cystic fibrosis with electrical impedance tomography – a new diagnostic tool. *Biomed Tech (Berl)* 2014, 59:545–548
21. MORAIS CC, DE SANTIS SANTIAGO RR, FILHO JR, HIROTA AS, PACCE PH, FERREIRA JC ET AL. Monitoring of pneumothorax appearance with electrical impedance tomography during recruitment maneuvers. *Am J Respir Crit Care Med* 2017, 195:1070–1073
22. AMBROSIO AM, CARVALHO-KAMAKURA TPA, IDA KK, VARELA B, ANDRADE FSRM, FACÓ LL ET AL. Ventilation distribution assessed with electrical impedance tomography and the influence of tidal volume, recruitment and positive end-expiratory pressure in isoflurane-anesthetized dogs. *Vet Anaesth Analg* 2017, 44:254–263
23. HOCHHAUSEN N, BIENER I, ROSSAINT R, FOLLMANN A, BLEILEVENS C, BRAUNSCHWEIG T ET AL. Optimizing PEEP by electrical impedance tomography in a porcine animal model of ARDS. *Respir Care* 2017, 62:340–349
24. GRASSO S, MASCIA L, DEL TURCO M, MALACARNE P, GIUNTA F, BROCHARD L ET AL. Effects of recruiting maneuvers in patients with acute respiratory distress syndrome ventilated with protective ventilatory strategy. *Anesthesiology* 2002, 96:795–802
25. SLUTSKY AS. Lung injury caused by mechanical ventilation. *Chest* 1999, 116(Suppl 1):9S–15S
26. ERLANDSSON K, ODENSTEDT H, LUNDIN S, STENQVIST O. Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery. *Acta Anaesthesiol Scand* 2006, 50:833–839
27. GREENBLATT EE, BUTLER JP, VENEGAS JG, WINKLER T. Pendelluft in the bronchial tree. *J Appl Physiol (1985)* 2014, 117:979–988
28. MUDERST, ZINSERLING J, LUEPSCHEN H, LEONHARDT S, PUTENSEN C, WRIGGE H. Monitoring of cyclic opening and closing of ventilatory lung units using the regional ventilation delay index – preliminary data. In: Dössel O, Schlegel WC (eds) *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Munich,

2009. IFMBE Proceedings, vol 25/7. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009:578–579
29. ZHAO Z, STEINMANN D, FRERICHS I, GUTTMANN J, MÖLLER K. PEEP titration guided by ventilation homogeneity: A feasibility study using electrical impedance tomography. *Crit Care* 2010, 14:R8
  30. MEIER T, LUEPSCHEN H, KARSTEN J, LEIBECKE T, GROSSHERR M, GEHRING H ET AL. Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography. *Intensive Care Med* 2008, 34:543–550
  31. YUN L, HE HW, MÖLLER K, FRERICHS I, LIU D, ZHAO Z. Assessment of lung recruitment by electrical impedance tomography and oxygenation in ARDS patients. *Medicine (Baltimore)* 2016, 95:e3820
  32. RIEDEL T, RICHARDS T, SCHIBLER A. The value of electrical impedance tomography in assessing the effect of body position and positive airway pressures on regional lung ventilation in spontaneously breathing subjects. *Intensive Care Med* 2005, 31:1522–1528
  33. YILDIRIM F, ESQUINAS AM, GLOSSOP AJ. Noninvasive mechanical ventilation during spontaneous breathing anaesthesia: Can electrical impedance tomography be a useful bedside tool to titrate PEEP level? *J Clin Anesth* 2017, 39:106–107
  34. MOERER O, HAHN G, QUINTEL M. Lung impedance measurements to monitor alveolar ventilation. *Curr Opin Crit Care* 2011, 17:260–267
  35. HERNÁNDEZ G, ROCA O, COLINAS L. High-flow nasal cannula support therapy: New insights and improving performance. *Crit Care* 2017, 21:62
  36. SUH M, HEITKEMPER M, SMICK. Chest physiotherapy on the respiratory mechanics and elimination of sputum in paralyzed and mechanically ventilated patients with acute lung injury: A pilot study. *Asian Nurs Res (Korean Soc Nurs Sci)* 2011, 5:60–69
  37. HOUGH JL, FLENADY V, JOHNSTON L, WOODGATE PG. Chest physiotherapy for reducing respiratory morbidity in infants requiring ventilatory support. *Cochrane Database Syst Rev* 2008, 3:CD006445
  38. SUTT AL, ANSTEY CM, CARUANA LR, CORNWELL PL, FRASER JF. Ventilation distribution and lung recruitment with speaking valve use in tracheostomised patient weaning from mechanical ventilation in intensive care. *J Crit Care* 2017, 40:164–170
  39. LOPES FA, SOUZA LAM, BERNARDI JTN, ROCHA CE, FIGUEIREDO LC, AGOSTINI APRDA ET AL. Pendelluft diagnosed from ventilator weaning indexes obtained through bioelectrical impedance tomography: A case report. *Sao Paulo Med J* 2017, 135:302–308
  40. VAN GENDERINGEN HR, VAN VUGHT AJ, JANSEN JR. Estimation of regional lung volume changes by electrical impedance pressures tomography during a pressure-volume maneuver. *Intensive Care Med* 2003, 29:233–240
  41. SCHULLCKE B, KRUEGER-ZIOLEK S, GONG B, JÖRRES RA, MUELLER-LISSE U, MOELLER K. Ventilation inhomogeneity in obstructive lung diseases measured by electrical impedance tomography: A simulation study. *J Clin Monit Comput* 2018, 32:753–761
  42. MAZZONI MB, PERRI A, PLEBANI AM, FERRARI S, AMELIO G, ROCCHI A ET AL. Electrical impedance tomography in children with community acquired pneumonia: Preliminary data. *Respir Med* 2017, 130:9–12
  43. HOUGH J, TROJMAN A, SCHIBLER A. Effect of time and body position on ventilation in premature infants. *Pediatr Res* 2016, 80:499–504
  44. BOEHME S, BENTLEY A, HARTMANN EK, CHANG S, ERDOES G, PRINZING A ET AL. Influence of inspiration to expiration ratio on cyclic recruitment and derecruitment of atelectasis in a saline lavage model of acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med* 2015, 43:e65–e74
  45. WETTSTEIN M, RADLINGER L, RIEDEL T. Effect of different breathing aids on ventilation distribution in adults with cystic fibrosis. *PLoS One* 2014, 9:e106591
  46. HOUGH JL, PHAM TM, SCHIBLER A. Physiologic effect of high-flow nasal cannula in infants with bronchiolitis. *Pediatr Crit Care Med* 2014, 15:e214–219

*Corresponding author:*

K. Grigoriadis, 1 Rimini street, 124 62 Chaidari, Greece  
e-mail: grigoriakost@med.uoa.gr