

# Monitoring της Νευρομυϊκής Σύναψης

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΑΜΑΝΙΤΗ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρά τις αξιοσημείωτες προόδους στην κατανόηση της φυσιολογίας και της φαρμακολογίας του νευρομυϊκού αποκλεισμού, καθώς και την ολοένα μεγαλύτερη αναγνώριση του ρόλου του υπολειπόμενου νευρομυϊκού αποκλεισμού στην περιεγχειρητική νοσηρότητα και θνητότητα, εν τούτοις, αποτελεί μέχρι σήμερα κακή πρακτική, η μη χρησιμοποίηση αντικειμενικών μεθόδων εκτίμησης του βάθους του νευρομυϊκού αποκλεισμού. Στο παρόν άρθρο ανασκόπησης, αναπτύσσονται οι τεχνικές εκτίμησης του βάθους του νευρομυϊκού αποκλεισμού, όπως οι κλινικές δοκιμασίες και οι τεχνικές διέγερσης κινητικών νεύρων και παρακολούθησης της απάντησης συγκεκριμένων μυών του σώματος και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνικής, από την άποψη της αξιοπιστίας, της ευκολίας εφαρμογής και του κόστους. Ιδιαίτερα αναλύονται οι μέθοδοι παρακολούθησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού με τη διέγερση κινητικών νεύρων με τη χρήση νευροδιεγέρτη και η κλινική χρήση των διαφορετικών τεχνικών διέγερσης. Τέλος περιγράφονται οι αντικειμενικές τεχνικές εκτίμησης της απάντησης του μυός στη νευρική διέγερση, όπως η παλαιότερες μηχανομυογραφία, ηλεκτρομυογραφία και επιταχυνσιογραφία, καθώς και ο νεότερες φωνομυογραφία και κινηματομυογραφία.

**Λέξεις Κλειδιά:** Νευρομυϊκός αποκλεισμός, νευρομυϊκή σύναψη, μυοχαλαρωτικά

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία 20 έτη έχει πραγματοποιηθεί αξιοσημείωτη πρόοδος στον τομέα της παρακολούθησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού, τόσο από την άποψη της κατανόησης της φυσιολογίας της νευρομυϊκής σύναψης και της φαρμακολογίας των νευρομυϊκών αποκλειστών, όσο και από την άποψη της ανάπτυξης νέων τεχνικών παρακολούθησης του βάθους του νευρομυϊκού αποκλεισμού. Εν τούτοις, παρά την εξέλιξη των μέσων και τεχνικών, η παρακολούθηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού σε αρκετά μέρη του κόσμου και δυστυχώς και στην Ελλάδα, απέχει από το να αποτελεί monitoring

ρουτίνας<sup>1</sup>. Ενώ σήμερα πλέον θεωρείται δεδομένη η περιορισμένη ευαισθησία τόσο των κλινικών δοκιμών παρακολούθησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού, όσο και των τεχνικών οπτικής ή απτικής εκτίμησης της απάντησης των μυών σε διάφορων τύπων διεγέρσεις<sup>2,3</sup>, ένας μεγάλος αριθμός συναδέλφων επαφίεται στις εκτιμήσεις αυτές για τη λήψη αποφάσεων, τόσο για τη "διαχείριση" της μυοχάλασης εντός της χειρουργικής αίθουσας, κυρίως όμως για την απομάκρυνση ασθενών από τους ελεγχόμενους χώρους του χειρουργείου και της μονάδας μεταναίσθητικής φροντίδας<sup>4</sup>. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μία πρόσφατη έρευνα που

πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο και αφορούσε στην διερεύνηση των πρακτικών των Βρετανών συναδέλφων, το 62% αυτών απάντησε ότι ουδέποτε χρησιμοποίησε νευροδιεγέρτη, ενώ μόλις το 10% των ερωτηθέντων χρησιμοποιούσε μία αντικειμενική μέθοδο εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού<sup>5</sup>. Από την άλλη πλευρά, αρκετές μελέτες έχουν καταδείξει το ρόλο του υπολειμματικού νευρομυϊκού αποκλεισμού στην εμφάνιση επιπλοκών από το αναπνευστικό, καθώς και στην αύξηση της νοσηρότητας και θνητότητας<sup>6-8</sup>. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι η εισαγωγή στην κλινική πράξη των νεότερων μέσης διάρκειας αποκλειστών της νευρομυϊκής σύναψης έχει συνεισφέρει σημαντικά στην μείωση της επίπτωσης της "υπολειμματικής μυοχάλασης" στη μονάδα μεταναισθητικής φροντίδας<sup>9</sup>, ένας σημαντικός αριθμός ασθενών φθάνει ακόμα και σήμερα στη μονάδα μεταναισθητικής φροντίδας με σημαντικό βαθμό υπολειμματικής μυοχάλασης<sup>10</sup>. Κατά συνέπεια, η σημασία των ποσοτικών τεχνικών εκτίμησης της μυοχάλασης δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να υποτιμηθεί, με την εισαγωγή νεότερων και ασφαλέστερων φαρμάκων<sup>11</sup>. Επιπλέον, η χρήση αντικειμενικών μεθόδων ελέγχου του νευρομυϊκού αποκλεισμού γίνεται επιτακτική λόγω της φύσης των αποκλειστών της νευρομυϊκής σύναψης. Οι τελευταίοι χαρακτηρίζονται από ένα εξαιρετικά μικρό περιθώριο ασφαλείας, δεδομένου ότι η κατάληψη του 75% των υποδοχέων στη νευρομυϊκή σύναψη δεν προκαλεί αποκλεισμό, ενώ η κατάληψη του 90% των υποδοχέων συνεπάγεται πλήρη αποκλεισμό. Ταυτόχρονα, η καλή εφαρμογή τεχνικών "ποσοτικού" ελέγχου του νευρομυϊκού αποκλεισμού επιτρέπει την καλύτερη τιτλοποίηση των αποκλειστών της νευρομυϊκής σύναψης κατά τη διάρκεια της επέμβασης και την εξασφάλιση με τον τρόπο αυτό της βέλτιστης χειρουργικής μυοχάλασης σε συνδυασμό με την ταχύτερη ανάνηψη της νευρομυϊκής σύναψης, όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Στο παρόν άρθρο ανασκόπησης παρουσιάζονται τα μέχρι σήμερα δεδομένα για τις υπάρχουσες τεχνικές παρακολούθησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού, το θεωρητικό υπόβαθρο της εφαρμογής τους καθώς και οι πιθανοί περιορισμοί από τη χρήση τους.

## ΚΛΙΝΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΥΡΟΜΥΪΚΟΥ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ

Μέχρι την εισαγωγή στην κλινική πράξη της τεχνικής της διεγερσης ενός κινητικού νεύρου και της εκτίμησης της μυϊκής απάντησης, αποτέλεσε τη μοναδική μέθοδο εκτίμησης τόσο των αναγκών σε μυοχάλαση κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, όσο και του βαθμού επανόδου της μυϊκής ισχύος μετά το τέλος του χειρουργείου. Για την εκτίμηση, χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν και χρησιμοποιούνται σε σημαντικό βαθμό και σήμερα μία σειρά από κλινικές δοκιμασίες. Ο χαρακτήρας των κλινικών κριτηρίων είναι τέτοιος, που ουσιαστικά περιορίζει τη χρήση τους στη φάση της ανάνηψης από την αναισθησία. Εν τούτοις, ο βαθμός ανάνηψης του ασθενούς από την αναισθησία επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ικανότητά του να τις εκτελέσει, εμποδίζοντας με τον τρόπο αυτό τον αναισθησιολόγο από το να έχει γρήγορη και αξιόπιστη πληροφόρηση σχετικά με την "υπολειμματική μυοχάλαση" του ασθενούς. Επιπροσθέτως, όπως ήδη αναφέρθηκε, έχει ήδη σήμερα αποδειχθεί η μειωμένη αξιοπιστία των κλινικών κριτηρίων<sup>1</sup>.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι πλέον διαδεδομένες κλινικές δοκιμασίες, που έχουν στο παρελθόν χρησιμοποιηθεί. Από αυτές, ορισμένες εξ αυτών έχουν σύντομα εγκαταλειφθεί, καθώς θεωρούνται πλήρως αναξιόπιστες ενώ ορισμένες προσαθούν να "ποσοτικοποιηθούν" ορισμένα χαρακτηριστικά της μυϊκής σύσπασης και θεωρητικά θα μπορούσαν να θεωρηθούν περισσότερο αξιόπιστες<sup>12</sup>.

Η ανύψωση της κεφαλής καθώς και η δυνατότητα ανάπτυξης αρνητικής εισπνευστικής πίεσης ίσης με -25cm H<sub>2</sub>O αποτέλεσαν ορισμένες εκ των πρώτων δοκιμασιών ελέγχου της υπολειμματικής μυοχάλασης<sup>13</sup>.

Η επίτευξη μέγιστης εισπνευστικής πίεσης ίσης με -25cm H<sub>2</sub>O, παρότι έχει φανεί ότι εξασφαλίζει ικανοποιητικό βαθμό κατά λεπτό αερισμού, εν τούτοις υποκρύπτει σημαντικό βαθμό παράταση της μυοχάλασης, καθώς δεν είναι δυνατή ούτε η διατήρηση του αεραγωγού, ούτε η πραγματοποίηση καταποτικών κινήσεων. Τα τελευταία φαίνεται ότι επιτυγχάνονται όταν ασθενής είναι σε θέση να

<b>Πίνακας 1.</b> Κλινικές δοκιμασίες ανάνηψης της νευρομυϊκής σύναψης
<b>Αναξιόπιστες</b>
Παρατεταμένο άνοιγμα οφθαλμών
«Βγάλσιμο της γλώσσας»
Ανάταση του άνω άκρου και σύλληψη του αντίθετου ώμου
Αναπνευστική προσπάθεια που να επιτυγχάνει ή να προσεγγίζει τη φυσιολογική ζωτική χωρητικότητα
Αναπνευστική προσπάθεια που να επιτυγχάνει μέγιστη εισπνευστική πίεση 25 cm H <sub>2</sub> O
<b>Αξιόπιστες</b>
Παρατεταμένη ανύψωση της κεφαλής για 5 δευτερόλεπτα
Παρατεταμένη ανύψωση του άκρου για 5 δευτερόλεπτα
Παρατεταμένο σφίξιμο του χεριού για 5 δευτερόλεπτα
Παρατεταμένη δοκιμασία κατάσπασης της γλώσσας
Αναπνευστική προσπάθεια που να επιτυγχάνει μέγιστη εισπνευστική πίεση 45 cm H <sub>2</sub> O

αναπτύξει τιμές μέγιστης εισπνευστικής πίεσης ίσης ή μεγαλύτερης του -43cm H<sub>2</sub>O<sup>14</sup>. Από την άλλη πλευρά, η ανύψωση της κεφαλής για 5 sec όπως και το σφίξιμο του χεριού θεωρούνται δοκιμασίες που εξασφαλίζουν την ανάνηψη των απαγωγών μυών των φωνητικών χορδών<sup>15,16</sup>. Στους παιδιατρικούς πληθυσμούς, αντίστοιχες δοκιμασίες αποτελούν ανύψωση άκρου και η δυνατή φωνή<sup>17</sup>.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει από κάθε εφαρμοζόμενη τεχνική ελέγχου της μυοχάλασης είναι το γεγονός ότι συχνά χρησιμοποιούνται περιφερικοί μύες των άκρων για να ελεγχθεί ο βαθμός ανάνηψης της νευρομυϊκής σύναψης σε μυϊκές ομάδες όπως το διάφραγμα, οι μύες του λάρυγγα και του φάρυγγα. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ανάνηψη των τελευταίων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση και την προστασία του αεραγωγού, καθώς και για την επάρκεια του αερισμού. Ωστόσο κάθε μυς εμφανίζει διαφορετική ευαισθησία στους αποκλειστές της νευρομυϊκής σύναψης, φαινόμενο το οποίο θα περιγραφεί στη

συνέχεια. Κατά συνέπεια το όποιο κλινικό κριτήριο χρησιμοποιήσουμε και αφορά σε μύες των άκρων ή του κορμού, πρέπει να εμφανίζει κάποιου βαθμού γραμμική συσχέτιση με την συμπεριφορά μυών όπως το διάφραγμα και οι μύες του λάρυγγα και φάρυγγα. Η αύξηση της γνώσης κυρίως πάνω στη συμπεριφορά των αποκλειστών της νευρομυϊκής σύναψης στους μύες του αεραγωγού, οδήγησε στην τροποποίηση των κλινικών κριτηρίων ανάνηψης από τη μυοχάλαση.

#### ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝ

Η διέγερση μέσω ηλεκτροδίων κινητικών νεύρων και η εκτίμηση με διάφορες τεχνικές της απάντησης των μυών αποτελεί μέχρι σήμερα την πλέον αξιόπιστη τεχνική ελέγχου του βαθμού του νευρομυϊκού αποκλεισμού. Οι τεχνικές αυτές άρχισαν να χρησιμοποιούνται ήδη από τη δεκαετία του 1950, έχουν υποστεί αρκετές τροποποιήσεις, ενώ ακόμη και σήμερα εισάγονται στην κλινική πράξη παραλλαγές τους.

Η διέγερση του κινητικού νεύρου μπορεί να προ-

κληθεί είτε ηλεκτρικά είτε μαγνητικά. Παρά το γεγονός ότι η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει μερικά θεωρητικά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι είναι πολύ λιγότερο επώδυνη για τον ασθενή, ωστόσο είναι δύσκολη από πλευράς εξοπλισμού και για το λόγο αυτό σπανίως χρησιμοποιείται στην κλινική πράξη, ενώ η ηλεκτρική διέγερση των κινητικών νεύρων μέσω νευροδιεγερτών αποτελεί την μέθοδο παρακολούθησης ρουτίνας<sup>18</sup>.

Η ηλεκτρική διέγερση του κινητικού νεύρου έχει ως στόχο την διέγερση των μυϊκών ινών που νευροί και την εκτίμηση με κάποιο τρόπο της μυϊκής απάντησης. Οι μυϊκές ίνες απαντούν στη νευρική διέγερση μέσω της αρχής του "όλου ή ουδενός". Αντίθετα, η απάντηση του μυός στο σύνολό του εξαρτάται από τον αριθμό των μυϊκών ινών που θα διεγερθούν, ο δε αριθμός αυτός εξαρτάται με τη σειρά του από την ισχύ της νευρικής διέγερσης. Για την εκτίμηση της μυϊκής απάντησης επιθυμητό είναι να διεγερθεί το σύνολο των μυϊκών ινών που νευρούνται από το συγκεκριμένο νεύρο. Για την επίτευξη του μέγιστου αυτού αποτελέσματος, η εξωτερική ηλεκτρική διέγερση του κινητικού νεύρου έχει ισχύ 20-25% μεγαλύτερη αυτής που απαιτείται για την πρόκληση της μέγιστης κινητικής απάντησης (υπερμέγιστη διέγερση). Η χρήση υπερμεγίστων διεγέρσεων αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία των μετρήσεων, είναι όμως επώδυνη για τον ασθενή, περιορίζοντας τη χρήση τους κατά τη διεγχειρητική φάση και τη πρόωμη φάση της ανάνηψης. Ωστόσο, κατά τη χρήση ποσοτικών τεχνικών εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού, όπως στην τεχνική της απλής διέγερσης, είναι υποχρεωτικό να ληφθούν τιμές ελέγχου της μυϊκής απάντησης, με την εφαρμογή υπερμέγιστης διέγερσης, πριν τη χορήγηση του μυοχαλαρωτικού. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι υπερμέγιστες αυτές διεγέρσεις πρέπει να χορηγηθούν αφού έχει ληφθεί μέριμνα για την αναλγησία και αμνησία του ασθενούς. Ορισμένοι ερευνητές προτείνουν τη χρήση υπομέγιστων διεγέρσεων<sup>19,20</sup>, σε περιπτώσεις ασθενών εν εγρηγόρσει ωστόσο οι μετρήσεις αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες<sup>21</sup>.

## 1. Τύποι διέγερσης νεύρων

### Απλή διέγερση (*single twitch stimulation*)

Ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται από απλές υπερμέγιστες διεγέρσεις, διάρκειας 0,2-0,3msec που προκαλούν μία μέγιστη σύσπαση του συνόλου των μυϊκών ινών που νευρούνται από το υπό διέγερση νεύρο. Οι διεγέρσεις επαναλαμβάνονται σε χρονικά διαστήματα από 10 sec έως 1 sec και αντιστοιχούν σε συχνότητα διέγερσης 0,1Hz έως 1Hz (σχήμα 1). Η έκπτωση της απάντησης σε σχέση με την αρχική τιμή ελέγχου, προ της χορήγησης του μυοχαλαρωτικού, φανερώνει την ύπαρξη νευρομυϊκού αποκλεισμού, καθώς εξαρτάται από το βαθμό της κατάληψης των υποδοχέων από το μυοχαλαρωτικό. Ωστόσο, η σχέση αυτή δεν είναι γραμμική καθώς η απάντηση του μυός στην απλή διέγερση αρχίζει να εκπίπτει μετά την κατάληψη του 75% των υποδοχέων της νευρομυϊκής σύναψης από το μυοχαλαρωτικό (πίνακας 2)<sup>22</sup>.

Η συχνότητα 0,1 Hz έχει επιλεγεί με βάση το γεγονός ότι η νευρομυϊκή σύναψη χρειάζεται 10 sec για να ανανήψει από την προηγούμενη σύσπαση και να ξαναδώσει την μέγιστη απάντηση. Από τη στιγμή που η συχνότητα διέγερσης ξεπεράσει τα 0,15 Hz, τότε η απάντηση του μυός είναι μειωμένη. Ωστόσο η αύξηση της συχνότητας προκαλεί αύξηση και του ρεύματος που τελικά διοχετεύεται στο νεύρο. Για το λόγο αυτό, απλές διεγέρσεις υψηλής συχνότητας (1 Hz) χρησιμοποιούνται κατά την εισαγωγή στην αναισθησία, καθώς επιταχύνουν την επίτευξη της υπερμέγιστης διέγερσης. Ωστόσο, μειονεκτήματα της τεχνικής, που περιορίζουν την αξία της είναι η ανάγκη για λήψη μίας τιμής ελέγχου, πριν την χορήγηση του μυοχαλαρωτικού. Δεδομένου ότι η διέγερση αυτή πρέπει να είναι υπερμέγιστη προκειμένου να είναι αξιόπιστη, είναι επώδυνη για τον ασθενή.

### Δοκιμασία της σειράς των τεσσάρων

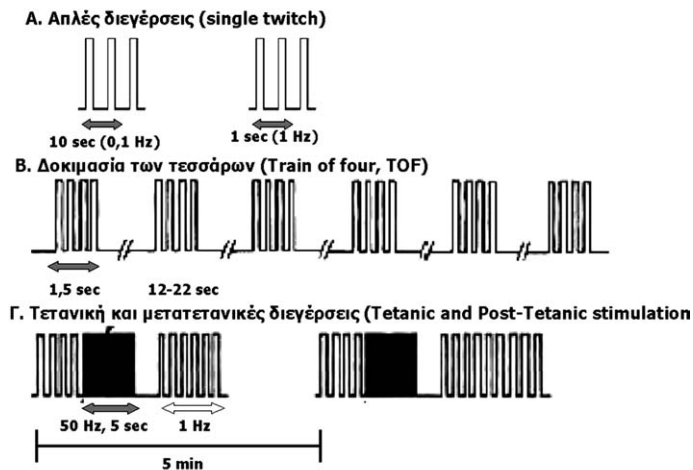
#### (*Train of four stimulation, TOF*)

Πρόκειται για μέθοδο που εισήχθη στην κλινική πράξη από τον Ali το 1970<sup>23,24</sup>. Σήμερα είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνική εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού. Πρόκειται για τέσσερις υπερμέγιστες διεγέρσεις, που δίνονται με μεσοδιαστήματα μεταξύ τους 0,5 sec. Κατά συνέπεια, η συχνότητα διέγερσης αντιστοιχεί σε 2 Hz, ενώ η

**Πίνακας 2.** Συσχέτιση μεταξύ της έντασης της απάντησης του μυός, σε διαφορετικού τύπου διεγέρσεις και της κατάληψης των υποδοχέων. (Τροποποιημένο από Padmaja και Srinivas Mantha, 2002<sup>22</sup>).

Κατάληψη υποδοχέων (%)	T <sub>1</sub> (% του φυσιολογικού)	T <sub>4</sub> (% του φυσιολογικού)	T <sub>1</sub> /T <sub>4</sub> (% του φυσιολογικού)	Τετανικό ερέθισμα
100	-	-	-	-
95	-	-	-	-
	0		Εξαφάνιση της 1 <sup>ης</sup> απάντησης	
90	10		Εξαφάνιση της 2 <sup>ης</sup> απάντησης	
	20		Εξαφάνιση της 3 <sup>ης</sup> απάντησης	
80	25	0	Εξαφάνιση της 4 <sup>ης</sup> απάντησης	Εμφάνιση απόσβεσης στα 30 Hz
	80-90	55-65	0.6-0.7	-
	95	70	0.7-0.75	-
75	100	75-100	0.75-1	-
-	100		0.9-1	Εμφάνιση απόσβεσης στα 50 Hz
50	-	-	-	Εμφάνιση απόσβεσης στα 100 Hz
30	-	-	-	Εμφάνιση απόσβεσης στα 200 Hz

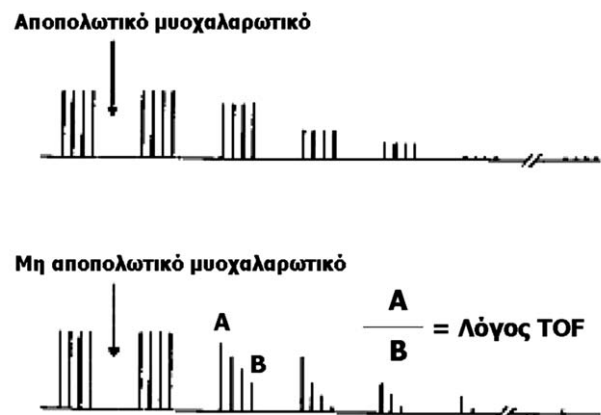




Σχήμα 1. Τύποι διεγέρσεων

όλη ακολουθία των διεγέρσεων έχει διάρκεια 1,5 sec (σχήμα 1). Όταν χρησιμοποιούνται επαναλαμβανόμενα, κάθε ακολουθία των τεσσάρων πρέπει να ξεκινά 10-20 sec αφότου έχει τελειώσει η προηγούμενη, προκειμένου να ανανήψει η νευρομυϊκή σύναψη. Η μέθοδος εκτίμησης της μυοχαλασης με την ακολουθία των τεσσάρων διεγέρσεων στηρίζεται στον γεγονός ότι προ της δράσης του μη αποπολωτικού μυοχαλαρωτικού οι απαντήσεις έχουν ίδια ένταση ενώ επί παρουσίας μερικού μη αποπολωτικού αποκλεισμού, οι απαντήσεις σταδιακά εκπίπτουν, φαινόμενο το οποίο καλείται και απόσβεση (fade). Η απόσβεση των απαντήσεων παρίσταται γραφικά στο σχήμα 2. Ο λόγος της έντασης της τέταρτης απάντησης προς την πρώτη καλείται λόγος TOF (TOF ratio, T4/T1), και συσχετίζεται με την ένταση του αποκλεισμού<sup>25</sup> (σχήμα 2). Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η συσχέτιση της έντασης των απαντήσεων στη δοκιμασία TOF με το ποσοστά κατάληψης των υποδοχέων. Υπάρχει μία αρκετά καλή συσχέτιση ανάμεσα στο ποσοστό κατάληψης των υποδοχέων, της έκπτωσης της απάντησης στην απλή διεγερση και του λόγου TOF<sup>26</sup>. Κατά τη φάση της ανάνηψης από το νευρομυϊκό αποκλεισμό, τιμή λόγου TOF=0,7 θεωρούνταν παλαιότερα αποδεκτή ικανοποιητικής ανάνηψης. Ωστόσο, νεώτερα δεδομένα δίνουν ως ασφαλή τιμή ανάνηψης από το νευρομυϊκό αποκλεισμό την τιμή TOF=0,9, προκειμένου να εξασφαλισθεί η επάρκεια του αεραγωγού καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης μετεγχειρητικών αναπνευστικών επιπλοκών<sup>27,28</sup>. Εν τούτοις, ορισμένοι ερευνητές

αμφισβητούν την εξασφάλιση της πλήρους ανάνηψης του νευρομυϊκού αποκλεισμού σε αυτές τις τιμές TOF, καταδεικνύοντας την πιθανότητα εμφάνισης επιπλοκών ακόμα και μετά από επάνοδο της τιμής TOF>0,9<sup>29</sup>.



Σχήμα 2. Έκπτωση των απαντήσεων επί παρουσίας αποπολωτικού και μη αποπολωτικού μυοχαλαρωτικού.

Η απόσβεση των απαντήσεων οφείλεται στις ιδιότητες της νευρομυϊκής σύναψης. Τα μη αποπολωτικά μυοχαλαρωτικά ασκούν συναγωνιστικό ανταγωνισμό για τον νικοτινικό υποδοχέα της ακετυλχολίνης στη νευρομυϊκή σύναψη. Εκτός όμως του υποδοχέα αυτού, νικοτινικοί υποδοχείς έχουν απομονωθεί και στις τελικές νευρικές απολήψεις. Η απελευθέρωση ακετυλχολίνης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του δυναμικού στις τελικές νευρικές απολήξεις έχει ως αποτέλεσμα τη δράση των μορίων της ακετυλχολίνης και στους προσυναπτικούς αυτούς υποδοχείς. Η ακετυλχολίνη στη προκειμένη περίπτωση δρα μέσω ενός μηχανισμού θετικής παλίνδρομης ρύθμισης και αυξάνει περαιτέρω της απελευθέρωση του μορίου. Τα μη αποπολωτικά μυοχαλαρωτικά, δρώντας στους συγκεκριμένους υποδοχείς, εμποδίζουν την εκδήλωση του φαινομένου, προκαλώντας το φαινόμενο της απόσβεσης. Αντίθετα, τα αποπολωτικά μυοχαλαρωτικά, δεν εμποδίζουν το μηχανισμό της θετικής παλίνδρομης ρύθμισης και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται απόσβεση. Από την άλλη μεριά, επί παρουσίας βαθέως μη αποπολωτικού αποκλεισμού, η κατάληψη των μετασυναπτικών υποδοχέων δεν επιτρέπει στην επιπλέον ακετυλχολίνη να δράσει, εμποδίζοντας και σε αυτή τη περίπτωση

την εκδήλωση του φαινομένου.

Τα πλεονεκτήματα της δοκιμασίας των τεσσάρων σχετίζονται με το γεγονός ότι σε σχέση με τις άλλες δοκιμασίες είναι πολύ λιγότερο επώδυνη για τον ασθενή, ενώ δεν χρειάζεται να συγκριθεί με μία αρχική τιμή ελέγχου, γεγονός που είναι απαραίτητο στην περίπτωση των απλών διεγέρσεων. Κατά συνέπεια, μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε φάση της αναισθησίας. Επιπροσθέτως, η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή αξιοπιστία σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχει ο απαραίτητος εξοπλισμός για να εκτιμηθεί αντικειμενικά η ένταση των μυϊκών απαντήσεων, είναι όμως δυνατή η υποκειμενική οπτική ή απτική εκτίμησή τους, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια. Υπό αυτές τις συνθήκες, η εξαφάνιση μίας ή και περισσότερων απαντήσεων, είναι δυνατό να συσχετισθεί με το ποσοστό κατάληψης των υποδοχέων και την ένταση του νευρομυϊκού αποκλεισμού (πίνακας 2). Αντιθέτως, από τη στιγμή που θα εμφανισθούν και οι τέσσερις απαντήσεις, η υποκειμενική εκτίμηση της έντασης της μυϊκής σύσπασης είναι πολύ δύσκολη στις περιοχές τιμών TOFR = 0,4-0,8<sup>30</sup>.

#### *Τετανικές διεγέρσεις*

Πρόκειται για επαναλαμβανόμενες διεγέρσεις πολύ υψηλής συχνότητας (50-Hz-200 Hz). Σήμερα, η συνηθέστερη μορφή τετανικής διέγερσης είναι η εφαρμογή διεγέρσεων 50Hz για χρονικό διάστημα 5 sec (σχήμα 1). Όπως και στην περίπτωση της δοκιμασίας των τεσσάρων, επί απουσίας αποκλεισμού της νευρομυϊκής σύναψης καθώς και επί παρουσίας αποπολωτικών μυοχαλαρωτικών, η ένταση των μυϊκών απαντήσεων στις επαναλαμβανόμενες τετανικές διεγέρσεις είναι ίδια. Αντιθέτως, επί παρουσίας μερικού μη αποπολωτικού μυοχαλαρωτικού, εμφανίζεται το φαινόμενο της απόσβεσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο της απόσβεσης εξαρτάται από την παρουσία μη αποπολωτικού αποκλεισμού, επηρεάζεται όμως και από την συχνότητα του ερεθισμού, από τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων ερεθισμάτων καθώς και από το πόσο συχνά επαναλαμβάνεται το τετανικό ερέθισμα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η παρατήρηση ότι επανάληψη των τετανικών ερεθισμάτων σε μεσοδιαστήματα μικρότερα των 6

λεπτών μπορούν να προκαλέσουν τοπική ανάνηψη της νευρομυϊκής σύναψης, προκαλώντας πλήρη αναντιστοιχία μεταξύ της συμπεριφοράς του υπό έλεγχο μυός και του βαθμού νευρομυϊκού αποκλεισμού στο λοιπό σώμα<sup>18</sup>.

Παλαιότερα, τετανικές διεγέρσεις υψηλής συχνότητας 100-200 Hz είχαν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση υπολειμματικού νευρομυϊκού αποκλεισμού, σε περιπτώσεις όπου η απάντηση στη μεμονωμένη διέγερση είχε επανέλθει στην τιμή ελέγχου. Υπό αυτές τις συνθήκες ο υψίσυχνος ερεθισμός οδηγούσε σε έκπτωση της απάντησης, η οποία και ερμηνευόταν ως παρουσία μυοχάλασης. Εν τούτοις, έχει αποδειχθεί ότι η έκπτωση της μυϊκής απάντησης δεν οφείλονταν στην παρουσία μυοχαλαρωτικού αλλά στην αδυναμία της μυϊκής σύναψης να ανανήψει<sup>31</sup>

Με την εξαίρεση της εκτίμησης των μετα-τετανικών απαντήσεων που θα αναλυθούν στη συνέχεια, η τετανική διέγερση έχει πλέον σε μεγάλο βαθμό παραγκωνιστεί, κυρίως από τη δοκιμασία TOF. Αυτό συμβαίνει εν πολλοίς εξ' αιτίας του γεγονότος ότι ούτε όσον αφορά στην αντικειμενική εκτίμηση της μυοχάλασης, ούτε ως προς την υποκειμενική οπτική ή απτική εκτίμηση της απόσβεσης η τετανική διέγερση δεν προσφέρει καμία παραπάνω πληροφορία, σε σύγκριση με τη δοκιμασία TOF<sup>32</sup>. Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της έντασης της απάντησης του μυός σε διαφορετικού τύπου διεγέρσεις, σε σχέση με την κατάληψη των υποδοχέων.

#### *Μετα-τετανικές διεγέρσεις (Post-tetanic stimulation)*

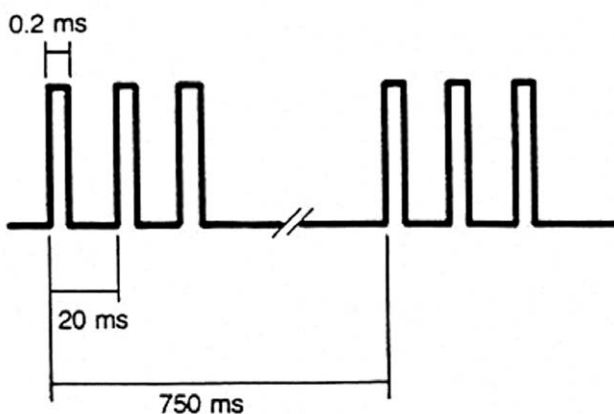
Αποτελεί ουσιαστικά μία σειρά από απλές διεγέρσεις, οι οποίες ακολουθούν 3-5 sec μετά το τέλος του τετανικού ερεθίσματος και επαναλαμβάνονται με συχνότητα 0,1-1 Hz (δηλαδή κάθε 1-10 sec). Οι μετατετανικές διεγέρσεις χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις βαθέως αποκλεισμού, όπου τόσο η απλή διέγερση όσο και η δοκιμασία TOF δεν δίνουν καμία απάντηση. Ο αποκλεισμός αποδράμει ανάλογα με τον αριθμό των μετατετανικών διεγέρσεων που προκαλούν μυϊκή απάντηση και ο χρόνος της αυτόματης ανάνηψης της νευρομυϊκής σύναψης είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού των μετατετανικών αυτών απαντήσεων (Post-

Tetanic Count, PTC)<sup>33,34</sup>.

Η απάντηση του μυός μετά από τέτανο, υπό συνθήκες βαθέως νευρομυϊκού αποκλεισμού, οφείλεται στο φαινόμενο της μετατετανικής ενίσχυσης. Η μετατετανική ενίσχυση είναι ένα προσυναπτικό φαινόμενο. Η διέγερση του νεύρου με ένα υψηλό ερέθισμα, όπως το τετανικό, έχει ως αποτέλεσμα την εισροή μεγάλης ποσότητας ενδοκυττάρου  $Ca_2^+$ , η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε παρατεταμένη απελευθέρωση ακετυλχολίνης στη νευρομυϊκή σύναψη. Η τελευταία παρεκτοπίζει το μυχαλαρωτικό από το νικοτινικό υποδοχέα, προκαλώντας ενίσχυση της μυϊκής απάντησης, ακόμα και αν ο τέτανος δεν προκαλεί μυϊκή απάντηση<sup>18</sup>.

### Η διπλή ομοβροντία διεγέρσεων (Double Burst Stimulation)

Πρόκειται για δύο ομάδες τετανικών διεγέρσεων, που απέχουν χρονικά μεταξύ τους 750msec. Ο συνηθέστερος τύπος διέγερσης είναι ο  $DBS_{3,3}$ , όπου κάθε μία από τις δύο ομοβροντίες αποτελείται από 3 διεγέρσεις, με μεσοδιαστήματα 20 msec μεταξύ τους (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Διπλή ομοβροντία διεγέρσεων  $DBS_{3,3}$ .

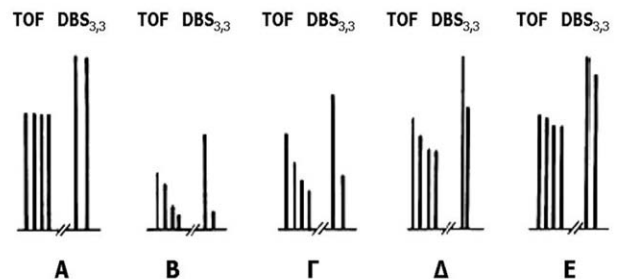
Επί απουσίας μη αποπολωτικού μυχαλαρωτικού, αυτό το οποίο γίνεται αντιληπτό οπτικά ή απτικά είναι δύο μυϊκές συσπάσεις ίσης ισχύος. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του TOF, επί μερικού μη αποπολωτικού αποκλεισμού εμφανίζεται απόσβεση μεταξύ των δύο ομοβροντιών (Σχήμα 4). Υποκειμενικά, στη περίπτωση αυτή γίνονται αντιληπτές δύο συσπάσεις, εκ των οποίων η δεύτερη είναι μικρότερης ισχύος (απόσβεση). Είναι ευρέως αποδεκτό ότι χωρίς τη χρήση αντικειμενικών

τεχνικών ελέγχου της μυοχάλασης, η δοκιμασία DBS δίνει καλύτερες οπτικές ή απτικές πληροφορίες για την ύπαρξη απόσβεσης, σε σχέση με τη δοκιμασία TOF<sup>35,36</sup>.

Όπως και στην περίπτωση της δοκιμασίας TOF, η σχέση του μεγέθους της δεύτερης ομοβροντίας σε σχέση με την πρώτη καλείται λόγος DBS (DBSR). Η απάντηση του μυός στη διπλή ομοβροντία διεγέρσεων εμφανίζει συσχέτιση με τη δοκιμασία TOF<sup>37</sup>. Η σχέση μεταξύ των δύο έχει υπολογισθεί ως ακολούθως<sup>38</sup>:

$$DBSR = 1,07 \times TOFR - 0,03$$

Αν μετά την ακολουθία TOF εφαρμοσθεί η δοκιμασία DBS σε σύντομο χρονικό διάστημα, τότε παρατηρείται διευκόλυνση της πρώτης απάντησης της DBS<sup>36</sup>.



Σχήμα 4. Απάντηση του μυός μετά από διεγερση του μυός με την ακολουθία των τεσσάρων διεγέρσεων (TOF) και την διπλή ομοβροντία διεγέρσεων (DBS). Α: Απάντηση του μυός προ της δράσης του μη αποπολωτικού μυχαλαρωτικού, Β, Γ, Δ: Σταδιακή ανάνηψη του μυός, μετά τη δράση του μυχαλαρωτικού, εμφάνιση του φαινομένου της απόσβεσης.

## 2. Τα χαρακτηριστικά του νευροδιεγέρτη

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ένας νευροδιεγέρτης στην κλινική πράξη, πρέπει να καλύπτει συγκεκριμένες προδιαγραφές. Βασική προϋπόθεση είναι να λειτουργεί με μπαταρίες. Η ηλεκτρική διέγερση που παράγει πρέπει να είναι μονοφασική, με τη μορφή τετράγωνου κύματος. Τα διαφασικά κύματα δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται καθώς



προκαλούν επαναλαμβανόμενη διέγερση και υποεκτιμούν το βάθος του νευρομυϊκού αποκλεισμού<sup>39</sup>. Η άνοδος του ρεύματος πρέπει να γίνεται σε 10 msec ενώ η διάρκεια του τετράγωνου κύματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,2-0,3msec. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς έχει αποδειχθεί ότι διάρκεια τετράγωνου κύματος μεγαλύτερη από 0,5 msec μπορεί να προκαλέσει άμεση διέγερση του μυός, παρακάμπτοντας τη νευρομυϊκή σύναψη. Εκτός αυτού παρατεταμένα ερεθίσματα προκαλούν την έκλυση μιας επαναλαμβανόμενης απάντησης, καθώς διαρκεί περισσότερο από την ανερέθιστη περίοδο του νεύρου<sup>40</sup>. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό αφορά στο ρεύμα εξόδου. Για λόγους ακρίβειας των μετρήσεων, ο νευροδιεγέρτης πρέπει να μπορεί να εγγυηθεί ρεύμα εξόδου σταθερής έντασης και όχι σταθερής τάσης και αυτό διότι ο παράγοντας που καθορίζει τη διέγερση του νεύρου είναι η ένταση του ρεύματος και όχι η τάση. Οι περισσότεροι νευροδιεγέρτες που κυκλοφορούν, δίνουν ρεύμα σταθερής έντασης. Αυτό όμως ισχύει σε μία περιοχή ιστικών αντιστάσεων, που κυμαίνεται από  $0=2,5\text{K}\Omega$ . Η περιοχή αυτή τιμών αντιστοιχεί στις αντιστάσεις των φυσιολογικών ιστών. Μικρές διαφοροποιήσεις μπορεί να επισυμβούν στις αντιστάσεις των ιστών, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ο νευροδιεγέρτης πρέπει να είναι σε θέση να μεταβάλλει την τάση εξόδου, προκειμένου να δώσει σταθερή ένταση ρεύματος. Ωστόσο, σε ακραίες συνθήκες μεταβολής των αντιστάσεων, όπως συμβαίνει συχνά σε περιπτώσεις υποθερμίας, είναι πιθανό να μην επιτυγχάνεται η επιθυμητή ένταση ρεύματος. Έχει βρεθεί ότι κάτω από τους 35,2°C, η ένταση του ρεύματος μειώνεται κατά 16% για κάθε βαθμό Κελσίου πτώσης της θερμοκρασίας δέρματος<sup>41</sup>. Στις περιπτώσεις αυτές δεν διεγείρεται το σύνολο των μυϊκών ινών, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού. Ιδανικά, ένας νευροδιεγέρτης πρέπει να έχει είτε ενσωματωμένο σύστημα θέρμανσης, είτε αισθητήρα ελέγχου της θερμοκρασίας δέρματος.

Όσον αφορά στην ένταση του ρεύματος, ο νευροδιεγέρτης πρέπει να είναι σε θέση να δίνει εντάσεις ρεύματος έως και 80mA. Αυτή είναι και η μέγιστη επιτρεπτή ένταση ρεύματος, που μπορεί να δοθεί σε άνθρωπο. Οι περισσότεροι νευροδιε-

γέρτες που κυκλοφορούν στο εμπόριο ωστόσο, δίνουν μέγιστη ένταση ρεύματος 50mA. Σε κάθε περίπτωση, ο νευροδιεγέρτης πρέπει να είναι σε θέση να δώσει υπερμέγιστη διέγερση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αυξάνοντας σταδιακά την ένταση του ρεύματος, εντοπίζεται η τιμή που δίνει τη μέγιστη μυϊκή απάντηση. Αυξάνοντας στη συνέχεια την ένταση του ρεύματος κατά 10-15%, επιτυγχάνουμε μία υπερμέγιστη διέγερση. Έχει υπολογισθεί ότι η τιμή αυτή ρεύματος είναι περίπου 2,75 φορές μεγαλύτερη της τιμής ρεύματος που έδωσε την πρώτη αντιληπτή μυϊκή απάντηση<sup>42</sup>. Όπως έχει προαναφερθεί, η διαδικασία της εύρεσης της υπερμέγιστης διέγερσης πραγματοποιείται πριν τη χορήγηση του μυοχαλαρωτικού. Απαιτείται αναισθητοποιημένο άρρωστο καθώς είναι αρκετά επώδυνη.

Είναι προφανές ότι για τους σύγχρονους νευροδιεγέρτες, είναι επιθυμητό να μπορούν να δώσουν όλους τους προαναφερθέντες τύπους διέγερσης νεύρων όπως, απλές διεγέρσεις συχνότητας 0,1-1 Hz, TOF ως απλή ακολουθία ή επαναλαμβανόμενες σε διαστήματα μεγαλύτερα των 12 sec ακολουθίες, DBS, τετανικά ερεθίσματα, και μετα-τετανικές διεγέρσεις. Ο τέτανος πρέπει να είναι διάρκειας 5 sec και συχνότητας 50 Hz και να ακολουθείται από μετα-τετανικές διεγέρσεις μετά την πάροδο 3 sec.

### 3. Τα ηλεκτρόδια διέγερσης

Η διέγερση του νεύρου επιτυγχάνεται μέσω δύο ηλεκτροδίων, τα οποία τοποθετούνται κατά μήκος της πορείας του νεύρου και χορηγούν ρεύμα. Το ρεύμα μπορεί να χορηγηθεί είτε μέσω της επιφανείας του δέρματος, είτε διαδερμικά. Στ πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται επιφανειακά ηλεκτρόδια ενώ στη δεύτερη ηλεκτρόδια με τη μορφή βελόνας.

Τα επιφανειακά ηλεκτρόδια Ag ή Ag/AgCl είναι τα συνθεότερα χρησιμοποιούμενα. Αποτελούνται από μία επιφάνεια με τη μορφή σπόγγου, η οποία έχει προκαλυφθεί με αγωγή γέλη, που έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό δίσκο στον οποίο συνδέονται τα καλώδια εξόδου του νευροδιεγέρτη. Η αγωγή επιφάνεια πρέπει να είναι μικρή, έως 7-8 mm. Στην αντίθετη περίπτωση το ρεύμα που φθάνει στο υποκείμενο δέρμα δεν είναι επαρκές με

αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιτύχει υπερμέγιστη διέγερση. Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες με τα αντίστοιχα χρησιμοποιούμενα στο ηλεκτροκαρδιοσκόπιο, εν τούτοις έχουν μία σημαντική διαφορά, που σχετίζεται με το πάχος τους και τα ρυθμιστικά τους διαλύματα που διατηρούν το pH του δέρματος. Ως εκ τούτου, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτροκαρδιοσκόπιο δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για το νευροδιεγέρτη.

Τα επιφανειακά ηλεκτρόδια επιτυγχάνουν διέγερση στην πλειονότητα των περιστατικών. Εν τούτοις είναι δυνατό να αποδειχθούν ανεπαρκή στο να επιτύχουν υπερμέγιστη διέγερση σε περιπτώσεις παθολογικών αντιστάσεων δέρματος, όπως π.χ. σε πολύ κρύους, παχύσαρκους ασθενείς, υποθυρεοειδικούς, νεφροπαθείς, με πεπαχυσμένο δέρμα. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια με τη μορφή βελόνης, η οποία τοποθετείται υποδόρια. Όταν χρησιμοποιούνται τα τελευταία, η ένταση ρεύματος που επιτυγχάνει υπερμέγιστη διέγερση είναι πολύ μικρότερη, ενώ δηλαδή με τη χρήση επιφανειακών ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται υπερμέγιστη ένταση με τιμές έντασης ρεύματος 20-60 mA, οι αντίστοιχες τιμές για τα ηλεκτρόδια βελόνης είναι 5-8 mA. Η χρήση των ηλεκτροδίων βελόνης ωστόσο είναι περισσότερο πολύπλοκη καθώς είναι δυνατό να συνοδευτεί από επιπλοκές όπως λοίμωξη, αιμάτωμα ή βλάβη νευρικού στελέχους.

Οι νευροδιεγέρτες παράγουν μονοφασικό, συνεχές ρεύμα με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων της καθόδου και της ανόδου. Ιδανικά, η πολικότητα των ηλεκτροδίων πρέπει να σημειώνεται πάνω στη συσκευή και αυτό διότι το αρνητικό ηλεκτρόδιο (η κάθοδος) πρέπει να τοποθετείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο νεύρο που πρόκειται να διεγερθεί<sup>43</sup>. Εφόσον η πολικότητα δεν υποσημαίνεται στη συσκευή τότε πρέπει να δοκιμαστούν και οι δύο πολικότητες και να επιλεγεί αυτή που προκαλεί τη ισχυρότερη διέγερση.

#### 4. Επιλογή των σημείων παρακολούθησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού

Θεωρητικά, οποιοδήποτε επιφανειακό νεύρο μπορεί να διεγερθεί. Η επιλογή του σημείου όπου θα γίνει η εκτίμηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού

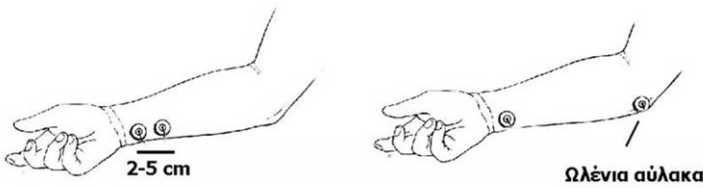
πρέπει να ακολουθεί ορισμένες αρχές:

- Πρέπει να βρίσκεται μακριά από το χειρουργικό πεδίο.
- Εφόσον χρησιμοποιηθεί η οπτική ή η απτική μέθοδος εκτίμησης της μυϊκής απάντησης, το σημείο πρέπει να είναι προσβάσιμο από τον αναισθησιολόγο.
- Το άκρο όπου θα γίνει η εκτίμηση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αρτηριακής πίεσης
- Εφόσον υπάρχει νευροπάθεια, το συγκεκριμένο νεύρο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται

#### Το ωλένιο νεύρο

Αποτελεί το συνηθέστερο σημείο διέγερσης καθώς είναι προσβάσιμο στη μεγάλη πλειοψηφία των επεμβάσεων. Ο μυς ο οποίος συνήθως εκτιμάται είναι ο προσαγωγός του αντίχειρα, δεδομένου ότι νευρούται αποκλειστικά από το ωλένιο νεύρο. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος μυς πλεονεκτεί εξαιτίας του γεγονότος ότι εντοπίζεται στην αντίθετη πλευρά του άκρου από όπου βρίσκεται το σημείο διέγερσης του νεύρου και κατά συνέπεια περιορίζεται η πιθανότητα να διεγερθεί άμεσα ο μυς από τα ηλεκτρόδια διέγερσης.

Η διέγερση του ωλενίου νεύρου μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων σε διαφορετικά σημεία (σχήμα 5). Η διέγερση στον καρπό γίνεται με την τοποθέτηση των δύο ηλεκτροδίων στο περιφερικό έσω τμήμα του αντιβραχίου. Το περιφερικότερο των δύο ηλεκτροδίων πρέπει να τοποθετηθεί περίπου 1 cm κεντρικότερα του σημείου κάμψης της άκρας χειρός, σημείο όπου το ωλένιο νεύρο πορεύεται επιφανειακά. Το εγγύς ηλεκτρόδιο τοποθετείται 2-5 cm εγγύτερα του πρώτου. Η διέγερση στον καρπό παράγει μία χαρακτηριστική κίνηση προσαγωγής του αντίχειρα και κάμψης των δακτύλων, η οποία είναι ισχυρότερη όταν το αρνητικό ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί περιφερικά. Αντίθετα, η διέγερση στον αγκώνα προκαλεί επιπροσθέτως και προσαγωγή του χεριού. Στη προκειμένη περίπτωση, το ηλεκτρόδιο στον αγκώνα τοποθετείται κατά μήκος της ωλένιας αύλακας.



**Σχήμα 5.** Σημεία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων για τη διέγερση του ωλένιου νεύρου.

#### *Το προσωπικό νεύρο*

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το έλεγχο του νευρομυϊκού αποκλεισμού, ωστόσο πολύ συχνά τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται λανθασμένα, με αποτέλεσμα να διεγείρονται άμεσα οι μύες. Η πιο σωστή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων και αυτή που έχει τη μικρότερη πιθανότητα να προκαλέσει άμεση διέγερση των μυών είναι αυτή όπου το αρνητικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται μπροστά από το κατώτερο τμήμα του λοβίου του ωτός και το ουδέτερο πίσω ή κάτω από το λοβίο. Οι μύες του προσώπου που διεγείρονται από το συγκεκριμένο νεύρο και συνήθως παρακολουθούνται είναι ο σφιγκτήρας των βλεφάρων και ο επισκύνιος μυς των οφθαλμών (σχήμα 6).

#### *Το περνιαίο νεύρο*

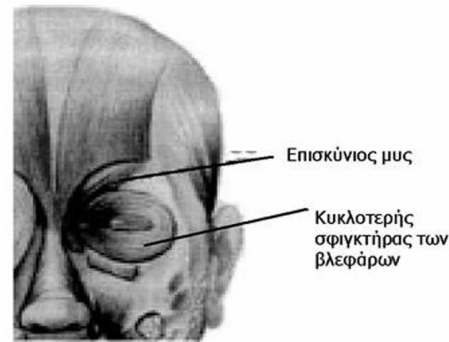
Το αρνητικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται στον αυχένα της περόνης και το ουδέτερο περιφερικότερα στην έξω επιφάνεια της κνήμης. Η διέγερση του προκαλεί ραχιαία κάμψη του άκρου ποδός.

#### *Το οπίσθιο κνημιαίο νεύρο*

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται πίσω από τον έσω ταρσό, ακριβώς μπροστά από τον αχίλλειο τένοντα ενώ το ουδέτερο τοποθετείται εγγύτερα αυτού.

### **Η ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΜΥΩΝ ΣΤΟΥΣ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΕΣ ΤΗΣ ΝΕΥΡΟΜΥΪΚΗΣ ΣΥΝΑΨΗΣ**

Η παρακολούθηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού, με όποια μέθοδο και αν γίνει, προσκρούει σε ένα




**Σχήμα 6.** Μύες του προσώπου που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του αποκλεισμού και διεγείρονται από το προσωπικό νεύρο.

ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της διαφορετικής ευαισθησίας των μυών στα μυοχαλαρωτικά. Έτσι συγκεκριμένες μυϊκές ομάδες εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στα μυοχαλαρωτικά, ενώ αντίθετα άλλοι μύες είναι πιο ανθεκτικοί. Πρακτικά, όσο πιο ανθεκτικός είναι ένας μυς, τόσο πιο γρήγορα εγκαθίσταται ο αποκλεισμός, τόσο πιο μικρό είναι το μέγιστο αποτέλεσμα και τόσο πιο γρήγορα αποδράμει. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκριτικά οι ευαισθησίες των σημαντικότερων μυϊκών ομάδων.

Η διαφορετική ευαισθησία των μυϊκών ομάδων έχει ως αποτέλεσμα η εκτίμηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού σε διαφορετικά σημεία του σώματος να μη δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα όμως έχει και επιπλέον πρακτική σημασία. Ο περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι σε σχέση με τον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα που συνήθως χρησιμοποιούμε για την εκτίμηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού, οι λαρυγγικοί μύες παραλύουν ταχύτερα και ανανήπτουν ταχύτερα (εκτενής ανασκόπηση στο άρθρο των Hemmerling και συν.<sup>44</sup>), ενώ ο μέγιστος αποκλεισμός τους, σε σχέση με τον αποκλεισμό του μακρού προσαγωγού του αντίχειρα, είναι μικρότερος. Έτσι, για να προκληθεί 100% αποκλεισμός των λαρυγγικών μυών απαιτείται δύο φορές η δόση που απαιτείται για να καταστείλει τη μυϊκή σύσπαση του βραχύ προσαγωγού του αντίχειρα κατά 95% σε σχέση με την τιμή ελέγχου (2ED95). Γενικά, το μέγιστο αποτέλεσμα πάντοτε υπολείπεται στο λάρυγγα, σε σχέση με τον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα, η

**Πίνακας 3.** Ευαισθησία των μυών στα μυοχαλαρωτικά

<b>Μύες</b>	<b>Ευαισθησία</b>
Φωνητικές χορδές	<b>Ανθεκτικοί</b>
Διάφραγμα	
Κυκλοτερής σφιγκτήρας οφθαλμού	
Επισκύνιος μυς οφθαλμού	
Ορθός κοιλιακός	
Βραχύς προσαγωγός του αντίχειρα	
Φαρυγγικός μύς	<b>Ευαίσθητοι</b>

δε διαφορά αυτή είναι τόσο περισσότερη έντονη, όσο πιο μικρές δόσεις χρησιμοποιούνται. Όταν χρησιμοποιούνται δόσεις μεγαλύτερες της ED95 για τον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα, τότε έχουμε καταστολή των μυών του λάρυγγα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 85%. Η κλινική διάρκεια του αποκλεισμού στο λάρυγγα διαρκεί μόλις το 40-70% του χρόνου που διαρκεί στον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα. Η σχετική ανθεκτικότητα των μυών του λάρυγγα αποδίδεται στο μεγαλύτερο πληθυσμό υποδοχέων ακετυλχολίνης στις ταχείες ίνες των μυών του λάρυγγα, ενώ η ταχεία έναρξη στην αυξημένη ροή αίματος<sup>45,46</sup>.

Όπως και στην περίπτωση των λαρυγγικών μυών, το διάφραγμα ανήκει στους ανθεκτικότερους μύες. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι δόσεις που προκαλούν καταστολή του 95% της απάντησης του βραχύ προσαγωγού του αντίχειρα (ED95), προκαλούν καταστολή μόλις του 85% της σύσπασης του διαφράγματος, ενώ το μικρότερο αυτό μέγιστο αποτέλεσμα στο διάφραγμα επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, από ότι το μεγαλύτερο στον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα (ταχύτερη έναρξη δράσης στην πρώτη περίπτωση). Επιπροσθέτως, η διάρκεια δράσης κυμαίνεται στις διάφορες μελέτες στο 60-80% της διάρκειας δράσης στον βραχύ προσαγωγό, ενώ διάφραγμα και προσαγωγοί μύες του λάρυγγα συμπεριφέρονται κατά αντίστοιχο τρόπο.

Η συμπεριφορά τόσο του διαφράγματος όσο και των μυών του λάρυγγα έχει ιδιαίτερη σημασία

τόσο στην διασωλήνωση, όσο και στην διεγχειρητική περίοδο και την ανάνηψη από την αναισθησία. Παρότι υπάρχουν μελέτες που αμφισβητούν την αξία του νευρομυϊκού αποκλεισμού για την διασωλήνωση, εν τούτοις γίνεται σαφές ότι χωρίς βαθύ νευρομυϊκό αποκλεισμό, η διασωλήνωση απαιτεί συγκριτικά πολύ μεγαλύτερο βάθος αναισθησίας. Δεδομένου ότι η εγκατάσταση του νευρομυϊκού αποκλεισμού είναι ταχύτερη στους μύες του λάρυγγα από ότι στον βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα, η εξαφάνιση της μυϊκής απάντησης στον τελευταίο κατά τη φάση της διασωλήνωσης, εξασφαλίζει και την απουσία μυϊκής δραστηριότητας στο λάρυγγα. Από την άλλη πλευρά, η παρακολούθηση των μυών του προσώπου πλεονεκτεί έναντι του προσαγωγού του αντίχειρα στο γεγονός ότι και οι δύο παρουσιάζουν αντίστοιχη ευαισθησία με τους μύες του λάρυγγα και το διάφραγμα, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό καλύτερη παρακολούθηση της έναρξης του αποκλεισμού<sup>47-49</sup>. Αναφορικά με την αποδρομή του αποκλεισμού, οι μύες του προσώπου όπως ο σφιγκτήρας των βλεφάρων και ο επισκύνιος μυς ανανήπτουν αρκετά γρήγορα και πολύ πιο γρήγορα από τους μύες του ανώτερου αεραγωγού όπως τους φαρυγγικούς που είναι σημαντικά πιο ευαίσθητοι. Για το λόγο αυτό, η παρακολούθηση των συγκεκριμένων μυών στη φάση της ανάνηψης από την αναισθησία δεν μας δίνει ασφαλή αποτελέσματα, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση του βραχύ προσαγωγού του αντίχειρα<sup>50</sup>.



## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΥΡΟΜΥΪΚΟΥ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ

Αποτελούν τις συνηθέστερα εφαρμοζόμενες τεχνικές ελέγχου του νευρομυϊκού αποκλεισμού, ακόμη και σήμερα. Οι μύες του άνω άκρου κυρίως και σε μικρότερο βαθμό του υπερόφρου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του αποκλεισμού από τον αναισθησιολόγο. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται διέγερση των νεύρων με δοκιμασίες που εμφανίζουν απόσβεση, όπως η δοκιμασία TOF ή η δοκιμασία DBS. Η προκαλούμενη μυϊκή απάντηση εκτιμάται είτε οπτικά είτε απτικά. Όπως είναι προφανές, η έκπτωση της ισχύος της μυϊκής απάντησης σε απόλυτες τιμές δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Αυτό το οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτό είναι η απουσία μίας ή περισσότερων εκ των τεσσάρων απαντήσεων στη δοκιμασία TOF, πληροφορία που είναι αρκετή για την διεγχειρητική περίοδο, όπου μας ενδιαφέρει η εξασφάλιση βαθέως νευρομυϊκού αποκλεισμού (εμφάνιση μίας ή δύο εκ των τεσσάρων απαντήσεων). Από τη στιγμή ωστόσο που εμφανιστούν και οι τέσσερις απαντήσεις, η απτική ή οπτική εκτίμηση του βαθμού απόσβεσης, ιδιαίτερα στις περιοχές TOF 0,4-0,8 είναι αρκετά περιορισμένη<sup>30</sup>. Για το λόγο αυτό οι υποκειμενικές τεχνικές εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού αδυνατούν να δώσουν αξιόπιστες πληροφορίες στη φάση της ανάνηψης από τον νευρομυϊκό αποκλεισμό. Ωστόσο αρκετοί ερευνητές έχουν καταδείξει ότι η εκτίμηση DBS υπερτερεί ως προς τη δοκιμασία TOF στην υποκειμενική εκτίμηση της απόσβεσης μέσω της αφής ή της όρασης.

## ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΝΕΥΡΟΜΥΪΚΟΥ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ

Οι αντικειμενικές μέθοδοι εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού παρέχουν τις πλέον αξιόπιστες πληροφορίες. Η εφαρμογή τους απαιτεί την διέγερση ενός κινητικού νεύρου με τις τεχνικές που προαναφέρθηκαν και στη συνέχεια την ποσοτική εκτίμηση της μυϊκής σύσπασης του μυός στόχου.

## Μηχανομυογραφική μέθοδος (Mechanomyography, MMG)

Αποτελεί ακόμη και σήμερα την πλέον αξιόπιστη μέθοδο ελέγχου του νευρομυϊκού αποκλεισμού και ταυτόχρονα τη μέθοδο σύγκρισης κάθε νεώτερης τεχνικής και αυτό διότι εκτιμά άμεσα την ισχύ της μυϊκής σύσπασης. Με τη μέθοδο αυτή διεγείρεται το επιλεχθέν νεύρο και η ένταση της σύσπασης του υπό εξέταση μυ εκτιμάται με τη βοήθεια ενός μετατροπέα δύναμης, ο οποίος μετατρέπει τη δύναμη που δέχεται σε ηλεκτρικό σήμα. Το τελευταίο ενισχύεται και παρουσιάζεται στην οθόνη της συσκευής ή καταγράφεται με τη βοήθεια καταγραφικού. Με την τεχνική αυτή μπορούν να εκτιμηθούν ποσοτικά η απάντηση του μυός σε απλή διέγερση, οι απαντήσεις μετά από ακολουθία τεσσάρων διεγέρσεων TOF ή τετανική διέγερση.

Βασική προϋπόθεση για την ακρίβεια των μετρήσεων είναι ο μυς μετά τη διέγερση να εκτελέσει μέγιστη ισομετρική σύσπαση. Προκειμένου για το βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα, έχει βρεθεί ότι απαιτείται η εφαρμογή τάσης ηρεμίας στο μυ ίσης τουλάχιστον με 200 gr, για να εκτελέσει αυτός τη μέγιστη σύσπασή του. Έτσι στις συσκευές όπου εκτιμάται η ισχύς της μυϊκής σύσπασης, ο μυς αρχικά τοποθετείται σε συγκεκριμένη θέση σε μία ειδική βάση στήριξης, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακινησία του. Εν συνεχεία εφαρμόζεται σε αυτόν, δια μέσω ενός δακτυλίου, τάση ηρεμίας τουλάχιστον 200 gr, σε κατεύθυνση αντίθετη της φοράς κίνησης του. Τέλος, ο μετατροπέας δύναμης τοποθετείται με κατεύθυνση κάθετη στη κίνηση του αντίχειρα, προκειμένου να καταγράψει τη δύναμη σύσπασης και να τη μετατρέψει σε ηλεκτρικό σήμα.

Με την έναρξη των επαναλαμβανόμενων διεγέρσεων η μυϊκή απάντηση στη διέγερση του νεύρου σταδιακά αυξάνει<sup>31</sup>. Η αύξηση της ισχύος έχει ως υπόβαθρο ένα μοριακό φαινόμενο το οποίο καλείται φαινόμενο κλίμακας και οφείλεται στα σταδιακή φωσφορυλίωση των ελαφρών αλυσέων της μυοσίνης και τη μεταβολή της μέγιστης απάντησης του μυός. Για το λόγο αυτό, προκειμένου για την πραγματοποίηση κλινικών μελετών, απαιτείται μία αρχική περίοδος σταθεροποίησης της μυϊκής απάντησης, προκειμένου να καταγραφεί η απάντηση στην υπερμέγιστη διέγερση, πριν τη χορήγηση του

μυοχαλαρωτικού. Η περίοδος αυτή εξαρτάται από τη συχνότητα διέγερσης, υπολογίζεται σε 8-12 λεπτά για επαναλαμβανόμενες απλές διεγέρσεις, ενώ επί εφαρμογής τετανικού ερεθίσματος, το χρονικό αυτό διάστημα μειώνεται στα 5 min<sup>51</sup>. Η μηχανομυογραφική μέθοδος σήμερα έχει πολύ περιορισμένη χρήση καθώς ο εξοπλισμός είναι βαρύς και δύσχρηστος, απαιτεί την ακινησία του άκρου, ενώ ο μετατροπέας είναι πολύ ευαίσθητος στην κίνηση. Αν και έχει εφαρμοσθεί κυρίως στο βραχύ προσαγωγό του αντίχειρα, άλλο σημείο εφαρμογής αποτελεί ο επισκύνιος μυς του οφθαλμού<sup>52</sup>. Πειραματικές διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί στους προσαγωγούς μύες του λάρυγγα, όπου με τη βοήθεια ενός μπαλονιού γίνεται προσπάθεια να καταγραφεί η ισχύς σύσπασης του και με τον τρόπο αυτό να ληφθούν αμεσότερα αποτελέσματα για την δράση των μυοχαλαρωτικών στον αεραγωγό<sup>56</sup>.

### **Ηλεκτρομυογραφική μέθοδος (Electromyography, EMG)**

Η διέγερση ενός κινητικού νεύρου προκαλεί την ηλεκτρική διέγερση των μυϊκών ινών που νευρώνονται από το υπό εξέταση νεύρο. Η διέγερση κάθε μυϊκής ίνας προκαλεί ένα διαφασικό δυναμικό δράσης. Ωστόσο, η διέγερση ενός μεγάλου αριθμού ινών οδηγεί σε ένα σύνθετο, υψίσυγχο δυναμικό δράσης (σχήμα 7A). Τα χαρακτηριστικά του κύματος αυτού και ιδιαίτερα το ύψος του σχετίζονται με τον αριθμό των μυϊκών ινών που διεγείρονται. Η εφαρμογή ενός μυοχαλαρωτικού προκαλεί μείωση του ύψους του κύματος αυτού. Η ηλεκτρομυογραφική μέθοδος εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού στηρίζεται στην καταγραφή του ηλεκτρικού αυτού κύματος.

Προκειμένου να επιτευχθεί η καταγραφή του ηλεκτρικού αυτού σήματος χρησιμοποιούνται τρία ηλεκτρόδια, δύο εκ των οποίων είναι καταγραφικά και ένα χρησιμοποιείται ως γείωση. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αυτή γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο. Έτσι, το ενεργό ηλεκτρόδιο τοποθετείται στη γαστέρα του μυός, το ουδέτερο στον τένοντα του υπό εξέταση μυ και η γείωση μεταξύ των δύο τελευταίων. Το σύνθετο ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από το σύνολο των μυϊκών ινών και καταγράφεται είναι υψηλής συχνότητας και

δύσκολα μπορεί να καταγραφεί και να αναλυθεί με ακρίβεια (σχήμα 7A). Για το λόγο αυτό το λαμβανόμενο σήμα, ενισχύεται, φιλτράρεται και τελικά αναλύεται ούτω ώστε αποδίδονται γραφικά ή στην οθόνη ορισμένες παράμετροί του όπως το ύψος της μέγιστης διέγερσης, το άθροισμά των μέγιστων θετικών και αρνητικών απαντήσεων ή τέλος η επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη (σχήμα 7B). Ήδη αναφέρθηκε ότι το ύψος της καμπύλης αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των μυϊκών ενώ που διεγείρονται ενώ η διάρκεια του ηλεκτρικού σήματος εξαρτάται και από τη συχνότητα διέγερσης.

Η ηλεκτρομυογραφική μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του αποκλεισμού σε μύες όπως ο βραχύς προσαγωγός του αντίχειρα, ο λάρυγγας, το διάφραγμα, ο σφιγκτήρας των βλεφάρων και ο επισκύνιος μυς των βλεφάρων<sup>53-55</sup>.

Η ηλεκτρομυογραφική μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, σε σχέση με την μηχανομυογραφική μέθοδο. Ο εξοπλισμός είναι πιο εύχρηστος, τα ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν στον ασθενή προ της εισόδου του στο χειρουργείο, απαιτείται μικρότερη ακινητοποίηση του άκρου, ενώ μπορεί να εφαρμοσθεί σε μύες που βρίσκονται μακριά από πρόσβαση. Ωστόσο τα βασικά μειονεκτήματα της τεχνικής σχετίζονται με την ευαισθησία της στα παράσιτα που υπάρχουν στη χειρουργική αίθουσα. Επιπροσθέτως, το ηλεκτρικό σήμα συχνά δεν μηδενίζεται επί βαθέως αποκλεισμού, ενώ δεν επανέρχεται στην αρχική τιμή ελέγχου.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η σύγκριση των τιμών που λαμβάνονται με τις δύο τεχνικές δηλαδή της μηχανομυογραφική και την ηλεκτρομυογραφική οδηγεί εν μέρει σε διαφορετικά αποτελέσματα και κατά συνέπεια τα αποτελέσματά τους δεν μπορούν να συγκριθούν. Έχει βρεθεί ότι η ηλεκτρομυογραφική απάντηση είναι κατά 15% μεγαλύτερη της μηχανομυογραφικής<sup>56</sup>.

### **Επιταχυνσιογραφική μέθοδος (Acceleromyography, AMG)**

Αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνική ελέγχου του νευρομυϊκού αποκλεισμού στην κλινική πράξη. Η μέθοδος στηρίζεται στον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Η δύναμη ισούται με το γινόμενο

της μάζας επί την επιτάχυνση που προκαλεί. Από τη στιγμή που η μάζα που εφαρμόζεται παραμένει σταθερή, η δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της δύναμης σύσπασης του μυός μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα από την προκαλούμενη επιτάχυνση. Η ανίχνευση της επιτάχυνσης του μυός γίνεται αντιληπτή με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, ο οποίος συνδέεται με δύο ηλεκτρόδια. Η δύναμη που εφαρμόζεται στον κρυστάλλο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο της επιτάχυνσης. Η τεχνική είναι αρκετά εύρηστη καθώς δεν απαιτεί την εφαρμογή προφορτίου, η ακινητοποίηση του χεριού που απαιτείται είναι ελάχιστη ενώ αυτό το οποίο χρειάζεται είναι η ελεύθερη κίνηση του αντίχειρα<sup>57</sup>.

Όπως ισχύει και στην περίπτωση της σύγκρισης του μηχανογραφικού και του ηλεκτρομυογραφικού τρόπου εκτίμησης του νευρομυϊκού αποκλεισμού, τα αποτελέσματα από τη χρήση του επιταχυνσιογράφου δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα προηγούμενα. Ως προς τη δοκιμασία TOF, οι τιμές της T1 που λαμβάνονται με τον επιταχυνσιογραφικό τρόπο είναι υψηλότερες αυτών που καταγράφονται με τις άλλες τεχνικές. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται εν πολλοίς στην ελεύθερη κίνηση του αντίχειρα. Για το λόγο αυτό, ορισμένοι ερευνητές προτείνουν την ανάνηψη του δείκτη TOF στην τιμή 1 ως ασφαλή, προκειμένου να εξασφαλισθεί ο αεραγωγός<sup>58</sup>.

Το σημείο το οποίο κατεξοχήν έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού με τον επιταχυνσιογραφικό τρόπο είναι ο προσαγωγός του μεγάλου δακτύλου. Ωστόσο, όταν ο τελευταίος δεν είναι διαθέσιμος, έχουν χρησιμοποιηθεί και ο σφιγκτήρας των βλεφάρων και ο επισκύνιος μυς. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις που παίρνουμε από τους τελευταίους θεωρούνται σχετικά αναξιόπιστες<sup>59</sup>.

### **Φωνομυογραφία (Phonomyography, PMG)**

Αποτελεί μια αρκετά καινούργια τεχνική. Στηρίζεται στο γεγονός ότι η σύσπαση των μυών παράγει χαμηλής συχνότητας ήχους οι οποίοι μπορούν να καταγραφούν. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι της μορφής μικροφώνων το δε σήμα λαμβάνεται από δερματικά ηλεκτρόδια. Μία

σειρά από μελέτες έχουν δείξει καλή συσχέτιση ανάμεσα στις μετρήσεις που λαμβάνονται με τον μηχανομυογραφικό και τον φωνομυογραφικό τρόπο<sup>63</sup>. Αν και δεν είναι ακόμη διαθέσιμο στην αγορά και χρησιμοποιείται για πειραματικούς σκοπούς, δίνει ενθαρρυντικά στοιχεία καθώς μπορεί να εφαρμοσθεί σε μία πλειάδα μυών όπως οι μύες του λάρυγγα και το διάφραγμα<sup>60</sup>.

### **Κινηματομυογραφία (kinemyography, KMG)**

Είναι μία πρόσφατη μέθοδος, η οποία έχει εισαχθεί στην αγορά από δύο εταιρίες και κυκλοφορεί στο ParaGraph Neuromuscular Blockade Monitor (Vital Signs, Totowa, NJ) ενώ βρίσκεται ενσωματωμένη στα monitor της Datex (M-NMT MechanoSensor, AS/3, Datex-Ohmeda, Helsinki, Finland). Πρόκειται για έναν πιεζοηλεκτρικό κρυστάλλο ο οποίος ανιχνεύει την κίνηση του αντίχειρα σε σχέση με το δείκτη. Τα αποτελέσματα από τη χρήση του είναι εν τούτοις αντικρουόμενα, ιδιαίτερα στη φάση της ανάνηψης από τη νευρομυϊκή σύναψη, σε σύγκριση με τη μηχανομυογραφική και την ηλεκτρομυογραφική μέθοδο<sup>61</sup>. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι αποτελεί ένα πολύ πρακτικό κλινικό εργαλείο.

### **Η ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΥΡΟΜΥΪΚΟΥ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΛΙΝΙΚΗ ΠΡΑΞΗ**

Ο στόχος της χορήγησης ανταγωνιστών της νευρομυϊκής σύναψης είναι η εξασφάλιση ιδανικών συνθηκών διασωλήνωσης και άριστων χειρουργικών συνθηκών. Ιδανικά, η παρακολούθηση της νευρομυϊκής σύναψης πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να διευκολύνει την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Δεδομένου όμως ότι τόσο οι τεχνικές διέγερσης των νεύρων όσο και οι μέθοδοι παρακολούθησης της απάντησης του μυός έχουν τους περιορισμούς τους, το είδος του χειρουργείου καθώς και η φάση της αναισθησίας καθορίζουν και τη μέθοδο παρακολούθησης. Ορισμένοι ερευνητές για παράδειγμα, προτείνουν την παρακολούθηση των οφθαλμικών μυών του αντιθέτου οφθαλμού, προκειμένου για οφθαλμολογικές επεμβάσεις.

Ως γενικές αρχές, μπορούν να σημειωθούν τα εξής: Εφόσον η επέμβαση αφορά στα άνω ή κάτω

άκρα, η παρακολούθηση του προσαγωγού του αντίχειρα δίνει ικανοποιητικές πληροφορίες για την διεγχειρητική περίοδο, προκειμένου να διατηρηθεί επαρκές βάθος νευρομυϊκού αποκλεισμού, π.χ. TOF < 0,25. Εφόσον η επέμβαση αφορά στο θώρακα ή την κοιλία, η παρακολούθηση του προσαγωγού του αντίχειρα κατά τη διεγχειρητική περίοδο δεν προσφέρει ικανοποιητικές πληροφορίες, δεδομένου ότι τόσο το διάφραγμα, όσο και οι μύες του κοιλιακού τοιχώματος ανανήπτουν νωρίτερα από αυτόν. Στις περιπτώσεις αυτές προτείνεται η παρακολούθηση μυών όπως ο επισκύνιος μυς του οφθαλμού, ενώ μελλοντικά είναι δυνατό να εφαρμοσθούν νεώτερες τεχνικές όπως η φωνομυογραφία στο διάφραγμα. Το πρόβλημα ωστόσο που προκύπτει με τον τελευταίο είναι ότι οι συσκευές που υπάρχουν στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του αποκλεισμού με τον επιταχυνσιογραφικό τρόπο, δεν μπορούν να εφαρμοσθούν με αξιοπιστία στο συγκεκριμένο μυ. Από την άλλη πλευρά, περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα δίνει η εφαρμογή στη συγκεκριμένο μυ της φωνομυογραφίας και της ηλεκτρομυογραφίας<sup>45</sup>. Το ίδιο ισχύει και για την έναρξη του νευρομυϊκού αποκλεισμού, όπου τόσο ο σφιγκτήρας των βλεφάρων όσο και ο επισκύνιος, αντικατοπτρίζουν καλύτερα τον αποκλεισμό των μυών του λάρυγγα. Αντιθέτως, η ανάνηψη του αποκλεισμού εκτιμάται με μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσαγωγό του αντίχειρα<sup>45</sup>.

Όσον αφορά στην τεχνική διέγερσης που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση, ο έναρξη της δράσης του μυοχαλαρωτικού εκτιμάται είτε με τις απλές διεγέρσεις, είτε με τη δοκιμασία TOF. Και στις δύο περιπτώσεις, απαιτούμε πλήρη εξαφάνιση της απάντησης του μύος. Στη φάση της διατήρησης, ο

στόχος είναι η εξασφάλιση επαρκούς βάθους. Αυτό γίνεται με τιμές TOF < 25%. Επί βαθέως αποκλεισμού, η εμφάνιση των μετα-τετανικών απαντήσεων προηγείται της εμφάνισης απαντήσεων στη δοκιμασία TOF και εμφανίζει συσχέτιση με το χρόνο ανάνηψης της νευρομυϊκής σύναψης. Τέλος στη φάση της ανάνηψης η δοκιμασία TOF δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρακολούθηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού με τη χρήση αντικειμενικών ποσοτικών τεχνικών, ως μέρος του monitoring ρουτίνας, παρότι αξιολογείται ως απαραίτητη με βάση την τεκμηρίωση, απέχει πολύ από το να εφαρμοσθεί στην κλινική πράξη. Επιπροσθέτως, έχει αποδειχθεί ότι πρακτικές όπως η χρήση κλινικών κριτηρίων ή και υποκειμενικής εκτίμησης δοκιμασιών όπως η TOF, δεν μπορούν να αποκλείσουν την παρουσία υπολειμματικής μυοχάλασης. Η τελευταία, ακόμα και στην εποχή των μέσης διάρκειας μυοχαλαρωτικών, συνεχίζει να υφίσταται, συμβάλλοντας σημαντικά στην περιεγχειρητική νοσηρότητα. Συνεπώς, η καλή γνώση και χρήση των προαναφερθέντων τεχνικών, αυξάνει τις συνθήκες ασφαλείας ενώ ταυτόχρονα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη χρήση των ανταγωνιστών της νευρομυϊκής σύναψης. Από την άλλη πλευρά, η εισαγωγή νεώτερων τεχνικών όπως η φωνομυογραφία, φιλοδοξεί να επιτύχει την επιλεκτική παρακολούθηση του νευρομυϊκού αποκλεισμού στο σημείο όπου είναι απαραίτητο, καθιστώντας τη μυοχάλαση περισσότερο ευέλικτη στις ανάγκες του χειρουργείου.

### ABSTRACT

#### Neuromuscular Monitoring Ekaterini Amaniti

Despite recent advantages in understanding neuromuscular pharmacology and physiology and the well established role of residual neuromuscular block in perioperative morbidity and mortality, neuromuscular block monitoring is still achieved using clinical criteria, and not the most reliable objective methods of estimation. This review article summarizes the methods of evaluation of neuromuscular block, the limitations of clinical monitoring and the techniques of nerve stimulation. The advantages and disadvantages of each technique are described in detail, regarding reliability, clinical utility and cost.



Furthermore, the role of peripheral nerve stimulation and the use of different stimulation techniques, during the perioperative period, are discussed. Finally, a thorough description of the objective methods of evaluation of neuromuscular block, using peripheral nerve stimulation and quantitative measurement of specific muscle groups, like mechanomyography, electromyography and acceleromyography, and the newly

**Key Words:** Neuromuscular Monitoring, Neuromuscular block

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Viby-Mogensen J. Neuromuscular monitoring. *Current Opinion in Anaesthesiology* 2001; 14: 655-659.
2. Beemer GH, Rozental P. Postoperative neuromuscular function. *Anaesth Intensive Care* 1986; 14: 41-45.
3. Pedersen T, Viby-Mogensen J, Bang U, Olsen NV, Jensen E, Engboeck J. Does perioperative tactile evaluation of the train-of-four response influence the frequency of postoperative residual neuromuscular blockade?. *Anesthesiology* 1990; 73: 835-839.
4. Baillard C, Gehan G, Reboul-Marty J, Larmignat P, Samama CM, Cupa M. Residual curarization in the recovery room after vecuronium. *Br J Anaesth* 2000; 84: 394-395.
5. Grayling M, Sweeney BP. Recovery from neuromuscular blockade: a survey of practice. *Anaesthesia* 2007; 62: 806-809.
6. Berg H, Roed J, Viby-Mogensen J, et al. Residual neuromuscular block is a risk factor for postoperative pulmonary complications. A prospective, randomised, and blinded study of postoperative pulmonary complications after atracurium, vecuronium and pancuronium. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica* 1997; 41: 1095-1103.
7. Arbous MS, Grobbee DE, Van Kleef JW, et al. Mortality associated with anaesthesia: a qualitative analysis to identify risk factors. *Anaesthesia* 2001; 56: 1141-1153.
8. Arbous MS, Meursing AE, Van Kleef JW, et al. Impact of anesthesia management characteristics on severe morbidity and mortality. *Anesthesiology* 2005; 102: 257-268.
9. Naguib M, Kopman AF, Ensor JE. Neuromuscular monitoring and postoperative residual curarisation: a meta-analysis. *Br J Anaesth* 2007; 98: 302-316.
10. Hayes AH, Mirakhur RK, Breslin DS, et al. Postoperative residual block after intermediate-acting neuromuscular blocking drugs. *Anaesthesia* 2001; 56: 312-358.
11. Viby-Mogensen J, Claudius C, Eriksson Lih. Neuromuscular monitoring and postoperative residual curarization. *Br J Anaesth* 2007; 99: 297 -303.
12. Viby-Mogensen J. Postoperative residual curarization and evidence-based anesthesia. *Br J Anaesth* 2000; 84: 301-303.
13. Brand JB, Cullen DJ, Wilson NE, Ali HH: Spontaneous recovery from nondepolarizing neuromuscular blockade: Correlation between clinical and evoked responses. *Anesth Analg* 1977; 56: 55-58.
14. Johansen SH, Jorgensen M, Molbech S: Effect of tubocurarine on respiratory and nonrespiratory muscle power in man. *J Appl Physiol* 1964; 19: 990-994.
15. Pavlin EG, Holle RH, Schoene RB. Recovery of airway protection compared with ventilation in humans after paralysis with curare. *Anesthesiology* 1989; 70: 381-385.
16. Gal TJ, Arora NS. Respiratory mechanics in supine subjects during progressive partial curarization. *J Appl Physiol*. 1982; 52: 57-63.
17. Mason LJ, Betts EK. Leg lift and maximum inspiratory force, clinical signs of neuromuscular blockade reversal in neonates and infants. *Anesthesiology* 1980; 52: 441-442.
18. Viby-Mogensen. Neuromuscular monitoring. In: Miller RD, ed. *Anesthesia*, 5 edn. New York: Churchill Livingstone, 2000; 1351-1366.
19. Brull SJ, Ehrenwerth J, Silverman DG:

- Stimulation with submaximal current for train-of-four monitoring. *Anesthesiology* 1990; 72: 629-632.
20. Brull SJ, Ehrenwerth J, Connelly NR, et al: Assessment of residual curarization using low-current stimulation. *Can J Anaesth* 1991; 38: 164-168.
  21. Helbo-Hansen HS, Bang U, Nielsen HK, Skovgaard LT. The accuracy of train-of-four monitoring at varying stimulating currents. *Anesthesiology* 1992; 76: 199-203.
  22. Padmaja D, Mantha S. Monitoring of neuromuscular junction. *Indian J Anaesth* 2002; 46:279-288.
  23. Ali HH, Utting JE, Gray C: Stimulus frequency in the detection of neuromuscular blocks in humans. *Br J Anaesth* 1970;42:967-978
  24. Ali HH, Utting JE, Gray C: Quantitative assessment of residual antidepolarizing block (part II). *Br J Anaesth* 1971; 43: 478-485
  25. Kopman A, Yee P, Neuman. Relationship of the Train-of-four Fade Ratio to Clinical Signs and Symptoms of Residual Paralysis in Awake Volunteers. *Anesthesiology* 1997; 86: 765-771.
  26. Waud BE, Waud DR. The relation between the response to "train-of-four" stimulation and receptor occlusion during competitive neuromuscular block. *Anesthesiology* 1972; 37: 413-416.
  27. Eriksson LI, Sundman E, Olsson R, et al. Functional assessment of the pharynx at rest and during swallowing in partially paralyzed humans: simultaneous videomanometry and mechanomyography of awake human volunteers. *Anesthesiology* 1997; 87: 1035-1043.
  28. Berg H, Roed J, Viby-Mogensen J, et al. Residual neuromuscular block is a risk factor for postoperative pulmonary complications. A prospective, randomised, and blinded study of postoperative pulmonary complications after atracurium, vecuronium and pancuronium. *Acta Anaesthesiol Scand* 1997; 41: 1095-103.
  29. Eikerman M, Blobner M, Groeben H, Rex C, Grote T, Neuhauser M, Beiderlinden M, Peters J. Postoperative upper airway obstruction after recovery of the train of four ratio of the adductor pollicis muscle from neuromuscular blockade. *Anesth Analg* 2006; 102: 937-942.
  30. Viby-Mogensen J, Jensen NH, Engbaek J, Ording H, Skovgaard LT, Chraemmer-Jorgensen B. Tactile and visual evaluation of the response to train-of-four nerve stimulation. *Anesthesiology*. 1985;63: 440-443.
  31. Stanec A, Heyduk J, Stanec G, Orkin LR: Tetanic fade and post-tetanic tension in the absence of neuromuscular blocking agents in anesthetized man. *Anesth Analg* 1978; 57: 102-107.
  32. Ali HH. Criteria of adequate clinical recovery from neuromuscular block. *Anesthesiology* 2003; 98: 1278-1280.
  33. Viby-Mogensen J, Howardy-Hansen P, Chraemmer-Jorgensen B et al. Post tetanic count (PTC): a new method of evaluating an intense nondepolarizing neuromuscular blockade. *Anesthesiology* 1981; 55: 458-61.
  34. El-Orbany MI, Joseph JN, Salem MR: The relationship of posttetanic count and train-of-four responses during recovery from intense cisatracurium-induced neuromuscular blockade. *Anesth Analg* 2003; 97:80-88.
  35. Drenck NE, Olsen NV, Ueda N, et al: Clinical assessment of residual curarization. A comparison of train-of-four stimulation and double burst stimulation. *Anesthesiology* 1989; 70:578-584.
  36. Drenck NE, Ueda N, Olsen NV, et al. Manual evaluation of residual curarization using double burst stimulation: a comparison with train-of-four. *Anesthesiology* 1989; 70: 578-581.
  37. Ueda N, Muteki T, Tsuda H, et al: Is the diagnosis of significant residual neuromuscular blockade improved by using double-burst nerve stimulation? *Eur J Anaesth* 1991; 213-218.
  38. Engbaek J, Ostergaard D, Viby-Mogensen J. Double burst stimulation (DBS). A new pattern of nerve stimulation to identify residual neuromuscular block. *Br j Anaesth* 1989; 62: 274-278.
  39. Epstein RA, Wyte SR, Jackson SH. The electromechanical response to stimulation by the block-aid monitor. *Anesthesiology* 1969; 30: 43-47.
  40. Brull SJ, Silverman DG. Pulse width, stimulus intensity, electrode placement, and polarity

- during assessment of neuromuscular block. *Anesthesiology* 1995; 83: 702-709.
41. Heier T, Coldwall JE, Sessler DI, Miller RD. The effect of local and central cooling on adductor pollicis twitch tension during nitrous oxide/Isflurane and nitrous oxide/fentanyl anaesthesia in humans. *Anesthesiology* 1990; 72: 807-811.
  42. Kopman AF, Lawson D. Milliampere requirements for supramaximal stimulation of the ulnar nerve with surface electrodes. *Anesthesiology* 1984; 61:83-85.
  43. Brull SJ. Muscle relaxants, what should I monitor and what it tell me? ASA annual Refresher Courses, New Orleans, 1996.
  44. Hemmerling TM. Brief review: Neuromuscular monitoring: an update for the clinician. *Can J Anaesth* 2007; 54:57-63.
  45. Ibebunjo C, Srikant CB, Donati F. Morphological correlates of the differential responses of muscles to vecuronium. *Br J Anaesth* 1999; 83: 284-291.
  46. Donati F. Onset of action of relaxants. *Can J Anaesth* 1988; 35: S52-58.
  47. Plaud B, Debaene B, Donati F. The corrugator supercilii, not the orbicularis oculi, reflects rocuronium neuromuscular blockade at the laryngeal adductor muscles. *Anesthesiology* 2001; 95:96-101.
  48. Hemmerling TM, Schmidt J, Hanusa C, Wolf T, Schmitt H. Simultaneous determination of neuromuscular block at the larynx, diaphragm, adductor pollicis, orbicularis oculi and corrugator supercilii muscles. *Br J Anaesth* 2000; 85: 856-60.
  49. Hemmerling TM, Donati F, Beaulieu P, Babin D. Phonomyography of the corrugator supercilii muscle: signal characteristics, best recording site and comparison with acceleromyography. *Br J Anaesth* 2002; 88: 389-93.
  50. Viby-Mogensen J. Clinical assessment of neuromuscular transmission. *Br J Anaesth* 1982; 54: 209-223.
  51. Kopman AF, Kumar S, Klewicka MM, Neuman GG. The staircase phenomenon: implications for monitoring of neuromuscular transmission. *Anesthesiology* 2001; 95: 403-407.
  52. Hemmerling TM, Michaud G, Babin D, Trager G, Donati F. Comparison of phonomyography with balloon pressure mechanomyography to measure contractile force at the corrugator supercilii muscle. *Can J Anesth* 2004; 51: 116-121.
  53. Donati F, Plaud B, Meistelman C. A method to measure elicited contraction of laryngeal adductor muscles during anesthesia. *Anesthesiology* 1991; 74: 827-832.
  54. Dhonneur G, Kirov K, Slavov V, Duvaldestin P. Effects of an intubating dose of succinylcholine and rocuronium on the larynx and diaphragm: an electromyographic study in humans. *Anesthesiology* 1999; 90: 951-951.
  55. Hemmerling TM, Schmidt J, Wolf T, Hanusa C, Siebzehruebl E, Schmitt H. Intramuscular versus surface electromyography of the diaphragm for determining neuromuscular blockade. *Anesth Analg* 2001; 92: 106-111.
  56. Rupp MS. Monitoring neuromuscular blockade. Twitch monitoring. *Anesth Clin North Am* 1993; 11:361-378.
  57. Viby-Mogensen J, Jensen E, Werner M, et al: Measurement of acceleration: A new method of monitoring neuromuscular function. *Acta Anaesthesiol Scand* 1988; 32: 45-52.
  58. Eikermann M, Groeben H, Husing J, et al: Accelerometry of adductor pollicis muscle predicts recovery of respiratory function from neuromuscular blockade. *Anesthesiology* 2003; 98:1133-1141.
  59. Gatke MR, Larsen PB, Engb?k J, et al: Acceleromyography of the orbicularis oculi muscle I: significance of the electrode position. *Acta Anaesthesiol Scand* 2002; 46:1124-1130.
  60. Michaud G, Trager G, Deschamps S, Hemmerling TM. Monitoring neuromuscular blockade at the vastus medialis muscle using phonomyography. *Can J Anesth* 2005; 52: 795-800.
  61. Motamed C, Kirov K, Combes X, Duvaldestin P. Comparison between the Datex-Ohmeda M-NMT module and a force-displacement transducer for monitoring neuromuscular blockade. *Eur J Anaesthesiol* 2003; 20: 467-469.