

**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

«ΚΛΙΝΙΚΗ ΝΕΥΡΟΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ»

ΘΕΜΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: «F - ταχεοδιασπορά ωλενίου και περνιαίου νεύρου σε άπω και εγγύς ερεθισμό»

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΡΟΝΗ, Καθηγήτρια Νευρολογίας
Πανεπιστημίου Πατρών

Μέλη της εξεταστικής επιτροπής:

ΘΩΜΑΣ ΖΑΜΠΕΛΗΣ, Αν. Καθηγητής Νευρολογίας
Πανεπιστημίου Αθηνών

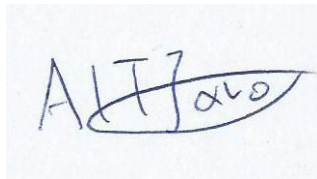
ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΣΤΕΦΑΝΗΣ, Καθηγητής Νευρολογίας
Πανεπιστημίου Αθηνών

Συγγραφέας: Ιωάννης – Αλέξανδρος Τζάνος

Ακαδημαϊκό έτος κατά το οποίο εκπονήθηκε η εργασία:
2018 - 2019

«Δηλώνω υπευθύνως ότι όλα τα στοιχεία σε αυτήν την εργασία τα απέκτησα, τα επεξεργάστηκα και τα παρουσιάζω σύμφωνα με τους κανόνες και τις αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας, καθώς και τους νόμους που διέπουν την έρευνα και την πνευματική ιδιοκτησία. Δηλώνω επίσης υπευθύνως ότι, όπως απαιτείται από αυτούς τους κανόνες, αναφέρομαι και παραπέμπω στις πηγές όλων των στοιχείων που χρησιμοποιώ και τα οποία δε συνιστούν πρωτότυπη δημιουργία μου».

Ιωάννης – Αλέξανδρος Τζάνος

A handwritten signature in blue ink, reading "ΑΙΤΖΑΝΟΣ" (AITZANOS) with a stylized flourish at the end.

Περίληψη (στην ελληνική)

Είναι γενικά παραδεκτό ότι τα F - wave με το μικρότερο λανθάνοντα χρόνο παράγονται από τους μεγάλους σε διάμετρο νευρώνες που άγουν τα ερεθίσματα με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ τα F - wave με το μεγαλύτερο λανθάνοντα χρόνο παράγονται από τους βραδείας μετάδοσης μικρούς νευρώνες. Αυτή η άποψη αμφισβητήθηκε από κάποιους ερευνητές, οι οποίοι πρότειναν ότι η διαφορά μεταξύ των λανθανόντων χρόνων (F-χρονοδιασπορά), θα μπορούσε να εξηγηθεί επαρκώς με την καθυστέρηση που υπάρχει κατά μήκος των περιφερικών νευρικών κλάδων και η οποία είναι ανάλογη με την απόσταση κάθε κινητικής μονάδας από το ηλεκτρόδιο καταγραφής. Για να ξεκαθαρίσουμε αυτό το ζήτημα, καταγράψαμε τα F - wave από μία απομακρυσμένη και μία εγγύς περιοχή του ίδιου νεύρου. Η κλασσική θεώρηση θα επιβεβαιωνόταν εάν η F - χρονοδιασπορά είναι χαμηλότερη στον εγγύς ερεθισμό, όπου υπολογίζεται η αγωγιμότητα σε μικρότερες αποστάσεις.

Δέκα υγιή άτομα (5 άνδρες και 5 γυναίκες, ηλικίας $27,6 \pm 4,1$) προσφέρθηκαν εθελοντικά να συμμετέχουν στη μελέτη. Σαράντα διαδοχικά ερεθίσματα εφαρμόσθηκαν στο ωλένιο νεύρο στον καρπό και τον αγκώνα και στο περνιαίο στην ποδοκνημική και κάτωθεν της κεφαλής της περόνης. Οι ελάχιστοι λανθάνοντες χρόνοι ($Flat_{min}$) και οι μέγιστοι ($Flat_{max}$) καθώς και οι αντίστοιχες ταχύτητες αγωγιμότητας των F - wave (FCVs) υπολογίστηκαν από τον τύπο: $FCV_x = (2 * Distance / Flat_{min} - Mlat - 1) * [(Flat_{min} - 1) / (Flat_x - 1)]$, όπου x = κάθε κύμα F.

Αποτελέσματα: Για το ωλένιο νεύρο η χρονοδιασπορά F, δηλαδή η $Flat_{max} - Flat_{min}$, ήταν σημαντικά μικρότερη στον αγκώνα (μέση τιμή \pm σταθερή απόκλιση = $2,5 \pm 0,7$) σε αντίθεση με τον καρπό ($3,8 \pm 1,0$ ζεύγος t-test, $p = 0,003$). Ομοίως για το περνιαίο, η χρονική διασπορά F ήταν μικρότερη στην κεφαλή της περόνης ($3,7 \pm 1,7$) έναντι της ποδοκνημικής ($5,2 \pm 2,0$, $p = 0,003$). Το εύρος των FCV ήταν σχετικά μικρότερο κατά μήκος του τμήματος αγκώνας - σπονδυλική στήλη ($\Sigma\Sigma$) ($7,3 \pm 2,5$, όρια ομάδας των FCV: 56 - 76 m/s) έναντι του τμήματος καρπός - $\Sigma\Sigma$ ($9,1 \pm 2,7$, $p = 0,06$, 54 - 72 m/s). Ομοίως μικρότερη ήταν κατά μήκος του τμήματος κεφαλή περόνης - $\Sigma\Sigma$ ($4.3 \pm$

1.9, 40 - 52 m/s) έναντι του τμήματος ποδοκνημική - ΣΣ (5.3 ± 2.2 , $p = 0.05$, 38 – 50 m/s).

Τα ευρήματά μας έδειξαν ότι η τιμή της F - χρονοδιασποράς εξαρτάται από τη θέση διέγερσης, που είναι χαμηλότερη στην κεντρική διέγερση. Είναι ένα αξιόπιστο μέτρο των ιδιοτήτων αγωγιμότητας των κινητικών νευρώνων. Επιπλέον, οι ταχύτητες αγωγής των F – wave, όπως συμβαίνει και στις μετρήσεις των απαντήσεων M, ήταν μεγαλύτερες κατά μήκος των κεντρικών τμημάτων.

Περίληψη (στην αγγλική)

It is a general understanding that F - waves of shorter latency are generated by fast conducting large neurons, while those of longer latency by slow conducting small neurons. This view has been questioned by researchers who proposed that latency difference (F - chronodispersion) could be as well explained by unequal delayed along the distal neural branches depending on the distance of each motor unit from the recording electrode. To clarify this issue, we recorded F - waves from a distal and a proximal site of the same nerve. The classical view will be justified if F - chronodispersion is lower at proximal stimulation, where conduction along shorter distances is estimated.

Ten healthy subjects (aged 27.6 ± 4.1 , 5 females) were volunteered. Forty consecutive stimuli were applied to the ulnar nerve at the wrist and elbow and to the peroneal at the ankle and knee. F - wave latency minimum and maximum ($Flat_{min}$, $Flat_{max}$) were measured and corresponding conduction velocities (FCVs) were estimated by the formula: $FCV_x = (2 * Distance / Flat_{min} - Mlat - 1) * [(Flat_{min} - 1) / (Flat_x - 1)]$, where x=each F - wave.

Results: For the ulnar nerve, F - chronodispersion, i.e. $Flat_{max} - Flat_{min}$, was significantly shorter at the elbow (mean \pm sd 2.5 ± 0.7) as opposed to the wrist (3.8 ± 1.0 paired t-test, $p = 0.003$); likewise for the peroneal nerve, F - chronodispersion was shorter at the knee (3.7 ± 1.7) vs the ankle (5.2 ± 2.0 $p = 0.003$). FCV range was relative shorter along elbow - spinal cord (sc) segment (7.3 ± 2.5 ; group limits of FCVs: 56-76m/s) vs wrist - sc (9.1 ± 2.7 , $p = 0.06$; 54-72); similarly shorter along knee - sc (4.3 ± 1.9 ; 40-52m/s) vs ankle - sc (5.3 ± 2.2 , $p = 0.05$; 38-50m/s).

Our findings showed that F - chronodispersion value depends on the stimulation site, being lower at proximal stimulation. It is a reliable measure of motor neuron conduction properties. Moreover, FCVs, like M-response estimated CVs, were faster along proximal parts.

Περιεχόμενα

Σελ. 1	Εξώφυλλο
Σελ. 2	Δήλωση του συγγραφέα
Σελ. 3	Περίληψη (στην ελληνική γλώσσα)
Σελ. 5	Περίληψη (στην αγγλική γλώσσα)
Σελ. 6	Περιεχόμενα
Σελ. 7	Ευχαριστίες
Σελ. 9	Κύριο μέρος της εργασίας
Σελ. 9	i. Εισαγωγή
Σελ. 29	ii. Υλικό-Μεθοδολογία
Σελ. 31	iii. Αποτελέσματα
Σελ. 35	iv. Συζήτηση
Σελ. 41	v. Συμπεράσματα
Σελ. 42	Βιβλιογραφία

Ευχαριστίες

Νιώθω βαθιά την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς την αξιότιμη κα Ελισάβετ Χρόνη, Τακτική Καθηγήτρια στην Έδρα της Νευρολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών και Διευθύντρια της Νευρολογικής Κλινικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών. Στα πλαίσια λειτουργίας του Εργαστηρίου Ηλεκτρομυογραφίας της Νευρολογικής Κλινικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών κατέβαλε άοκνες προσπάθειες προκειμένου να συμβάλει στη βελτίωση του γνωστικού μου υπόβαθρου σε σχέση με το αντικείμενο της Ηλεκτρομυογραφίας και της Ηλεκτρονευρογραφίας. Κατάφερε όχι μόνο να διεγείρει το ενδιαφέρον μου για το επιστημονικό αντικείμενο των κυμάτων f αλλά και μου εμπνεύσει την κριτική σκέψη. Την ευχαριστώ επίσης, τόσο για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε αναθέτοντάς μου τη διερεύνηση ενός περίπλοκου ερευνητικού ερωτήματος που ήταν αναπάντητο ως τώρα από την επιστημονική κοινότητα, όσο και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε σε κάθε στάδιο αυτής της έρευνας προκειμένου να αντιμετωπιστούν ακόμη και οι πλέον ανυπέρβλητες δυσκολίες που κατά διαστήματα προέκυπταν.

Αισθάνομαι επίσης το ηθικό χρέος να υπογραμμίσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου προς τον αξιότιμο κο Λεωνίδα Στεφανή, Τακτικό Καθηγητή στην Έδρα της Νευρολογίας και Διευθυντή της Α΄ Νευρολογικής Κλινικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών στο Αιγινήτειο Νοσοκομείο, ο οποίος ως Υπεύθυνος Καθηγητής του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Κλινική Νευροφυσιολογία» είχε την επιστημονική και οργανωτική εποπτεία της ομαλής εκτέλεσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερα νιώθω την ανάγκη να διατυπώσω την ευγνωμοσύνη μου στον αξιότιμο κο Ηλία Παναγιωτόπουλο, Τακτικό Καθηγητή στην Έδρα της Ορθοπαιδικής του Πανεπιστημίου Πατρών και Διευθυντή της Κλινικής Αποκατάστασης Ασθενών με Κακώσεις Νωτιαίου Μυελού του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών. Με την ενθάρρυνση και την αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια, τόσο της παρακολούθησης των μαθημάτων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος

Σπουδών «Κλινική Νευροφυσιολογία», όσο και της ενασχόλησης μου με τη συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων της Διπλωματικής Εργασίας, συνέβαλε καθοριστικά στην επιτυχή έκβαση του παρόντος επιστημονικού πονήματος.

Επίσης ευχαριστώ την αξιότιμη κα Ιουλία Συροκώστα – Σταθοπούλου, Επιμελήτρια Α΄ της Παθολογικής Κλινικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών και Πρόεδρο του Συλλόγου Φίλων της Κλινικής Αποκατάστασης Ασθενών με Κακώσεις Νωτιαίου Μυελού του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών για τη σημαντική συμβολή της στην προσέλκυση των ενήλικων εθελοντών, για τις πολύτιμες συμβουλές της καθώς και για την ηθική συμπαράσταση που μου παρείχε κατά τη διενέργεια των απαραίτητων για τη Διπλωματική Εργασία μετρήσεων.

Επιπρόσθετα ειδική μνεία θα ήθελα να κάνω στην αξιότιμη κα Ξανθή Μιχαήλ, τέως Πρόεδρο της Ευρωπαϊκής Εταιρείας Φυσικής Ιατρικής και Αποκατάστασης και τέως Πρόεδρο της Ευρωπαϊκής Ακαδημίας Αποκατάστασης για την προτροπή της να παρακολουθήσω το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Κλινική Νευροφυσιολογία» καθώς και για την εν γένει ηθική της συμπαράσταση κατά την πραγματοποίηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

Επιπλέον θα ήταν παράληψη να μην αναφερθώ στον ιδιαίτερα χρήσιμο και εποικοδομητικό ρόλο που διαδραμάτισε για την επιτυχή έκβαση της έρευνας η αξιότιμη κα Δήμητρα Βελτσίστα, Επιμελήτρια Β΄ Νευρολογίας της Νευρολογικής Κλινικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ ιδιαίτερος στον καθένα και την καθεμιά από την ομάδα των ανώνυμων ενήλικων εθελοντών που αποτέλεσαν το δείγμα των συμμετεχόντων της διπλωματικής μελέτης. Με το θετικό τους πνεύμα και την υπομονή που τα χαρακτήρισε, τα άτομα αυτά υπήρξαν καθοριστικοί συντελεστές της επιτυχούς έκβασης του παρόντος ερευνητικού εγχειρήματος.

ΚΥΡΙΟ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

i. Εισαγωγή

Όπως σχεδόν σε όλα τα πεδία της ιατρικής, οι πρώτες περιγραφές για το περιφερικό νευρικό σύστημα βρίσκονται στα γραπτά του Ιπποκράτη (460 – 370 π.Χ.) αν και δεν είναι ξεκάθαρο αν έκανε διάκριση μεταξύ τενόντων και νεύρων (εξ ου και η *απονεύρωσις*).¹ Ο Ιπποκράτης κάνει το διαχωρισμό μεταξύ του κεντρικού και περιφερικού νευρικού συστήματος ενώ ο Ηρόφιλος αναγνώρισε την αληθινή φύση των νεύρων. Θεώρησε τον εγκέφαλο ως κεντρικό όργανο του νευρικού συστήματος, *«αρχήν των νεύρων ο εγκέφαλος»* και διέκρινε τα περιφερικά νεύρα σε αισθητικά και κινητικά. *«Δια μεν ετέρων νεύρων αισθητήν δύναμιν επιπέμπει τοις κάτω της κεφαλής ο εγκέφαλος, δι' άλλων δε κίνησιν καθ' ορμήν»* Ο Γαληνός από την Πέργαμο (130 – 200 μ. Χ.) πίστευε ότι ο εγκέφαλος και ο νωτιαίος μυελός προσλαμβάνουν κινητικές πληροφορίες τις οποίες αναλύουν και απαντούν μέσω κινητικών εκδηλώσεων ενώ διαπίστωσε ότι τα νωτιαία νεύρα αναδύονται εκ δύο ριζών, της πρόσθιας και της οπίσθιας, εκ των οποίων η μία συνδέεται με την προώθηση των αισθητικών πληροφοριών και η άλλη με την αγωγή των κινητικών ώσεων. Από το δέκατο έκτο έως το δέκατο ένατο αιώνα μ.Χ. αποκτήθηκαν πολλές πληροφορίες σχετικά με τις νευρικές ίνες. Η ευερεθιστότητα αυτών περιγράφηκε από το Frances Glisson (1597 – 1677), η μικροσκοπική τους δομή από τον Antonj van Leewenhoek (1632 – 1723), ο δε άξονας και η θήκη της μυελίνης από το Fontana (1730 – 1805).

Σημαντική συμβολή στην κατανόηση της ηλεκτρικής δραστηριότητας των μυών και των νεύρων είχαν ο Jallabert το 1747 όταν ερέθισε για πρώτη φορά ανθρώπινο μυ στο σημείο επαφής του με το νεύρο (κινητικό σημείο) και ο Galvani το 1781 ο οποίος δημοσίευσε τις παρατηρήσεις του σχετικά με τον ερεθισμό των νεύρων και των μυών σε βατράχους. Ο διαχωρισμός σε εμμύελες και αμύελες νευρικές ίνες έγινε από το Robert Remak (1815 – 1855) και ο σύγχρονος του Johannes von Purkinje (1787 – 1869) έκανε σαφή τη σχέση μεταξύ νευρώνων και αξόνων.² Το 1839 ο Theodore Schwann δημοσίευσε τα ευρήματα του σχετικά με τη δομή των κυττάρων τα οποία

φέρουν το όνομα του. Οι Camilo Golgi και Ramon-y-Cajal το 1906 μοιράστηκαν το βραβείο Nobel για την εργασία τους που αποδεικνυε ότι το νευρικό σύστημα αποτελεί ένα συνεχόμενο νευρικό δίκτυο που αποτελείται από μεμονωμένα νευρικά κύτταρα με φυσιολογικές μεταξύ τους συνδέσεις.³ Ένα άλλο βραβείο Nobel μοιράστηκαν το 1944 οι Joseph Erlanger και Hebert Gasser για την έρευνά τους σχετικά με την υψηλή λειτουργική διαφοροποίηση των μεμονωμένων νευρικών ινών και την αλληλοσυσχέτισή τους, κάνοντας πιο κατανοητή την έννοια του σύνθετου προκλητού δυναμικού, την αγωγιμότητα των νευρικών ινών και την ανερέθιστο περίοδο των νεύρων. Χρησιμοποιώντας αυτές τις ιδέες οι Hodes, Larrabee και German ανέπτυξαν την εφαρμογή της ηλεκτροφυσιολογίας στην κλινική εξέταση των νεύρων.⁴ Η αξιολόγηση της ικανότητας του περιφερικού νευρικού συστήματος να μεταφέρει ένα ερέθισμα, αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάγνωσης. Η μέτρηση της ταχύτητας με την οποία άγεται ένα ερέθισμα καθώς και το εύρος της ακολουθούμενης προκλητής απάντησης, μας επιτρέπει να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση υγείας του περιφερικού νευρικού συστήματος. Οι πληροφορίες αυτές σε συνδυασμό με άλλα πολύτιμα στοιχεία, δίνουν τη δυνατότητα στο διενεργούντα τον ηλεκτροδιαγνωστικό έλεγχο να θέσει τη διάγνωση αλλά και την πρόγνωση μίας υποκείμενης νοσολογικής οντότητας. Βέβαια, προαπαιτούμενο της μελέτης της νευρικής αγωγιμότητας αποτελεί η γνώση των ανατομικών και φυσιολογικών παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τη συλλογή και ερμηνεία των στοιχείων που προκύπτουν από τον ερεθισμό των περιφερικών νεύρων.

Αν και οι επιστήμονες προσπάθησαν για αρκετό χρονικό διάστημα να μετρήσουν την ταχύτητα της νευρικής αγωγής, μία πρώτη και καινοτόμος προσέγγιση επιχειρήθηκε από τον Von Haller το 1762.⁵ Η προσέγγισή του έγινε όταν στην ανάγνωση της Αινειάδας φωναχτά, προσπάθησε να υπολογίσει τον αριθμό των γραμμάτων που μπορούσε να προφέρει μέσα σε ένα λεπτό. Από τα 1500 γράμματα ανά λεπτό, το γράμμα "R" για το οποίο θεωρείται ότι απαιτούνται 10 συσπάσεις του βελονογλωσσικού μυός, πιστευόταν ότι συσπτόταν και χαλάρωνε 15000 φορές το λεπτό. Υποθέτοντας ότι κάθε μυϊκή σύσπαση διαρκεί 2 msec σε συνδυασμό με την άποψη ότι το ερέθισμα απαιτεί 2 msec για να καλύψει την απόσταση των 10 cm από τον

εγκέφαλο στο μυ, η ταχύτητα αγωγής υπολογίσθηκε στα 50 m/sec. Παρά τις πολλαπλές αβάσιμες υποθέσεις πάνω στις οποίες βασίσθηκε αυτός ο υπολογισμός, η ταχύτητα αυτή ήταν μάλλον μία καλή εκτίμηση. Μεταξύ 1850 και 1870, ο Von Helmholtz και οι συνεργάτες του προσδιόρισαν ότι το μέσο νεύρο έχει μία ταχύτητα αγωγής στα 61 ± 5.1 m/sec χρησιμοποιώντας νευρικό ερεθισμό σε συνδυασμό με τη μέτρηση της έναρξης της ακολουθούμενης μυϊκής σύσπασης.⁶ Χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους, επίσης υπολόγισε ότι η αισθητική ταχύτητα των νεύρων ανέρχεται στα 60 m/sec.⁷ Τη μέγιστη συμβολή για τον προσδιορισμό της διάδοσης των νευρικών ερεθισμάτων πρόσφεραν τη δεκαετία του 1920 οι Erlanger και Gasser όταν διαχώρισαν τις ταχύτητες αγωγής ανάλογα με τη διάμετρο των νευρικών ινών.⁸ Η περαιτέρω βελτίωση τόσο των χρησιμοποιούμενων τεχνικών όσο και της διαθέσιμης τεχνολογίας έδωσε τη δυνατότητα ώστε ο προσδιορισμός της ταχύτητας αγωγής των κινητικών νεύρων να χρησιμοποιηθεί διαγνωστικά από το Hodess και τους συνεργάτες του το 1948.⁹ Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας από το Dowson μέσω της οποίας μπορούσε πλέον να εξάγει το μέσο όρο πολλαπλών απαντήσεων, οι μελέτες της αισθητικής νευρικής αγωγής χρησιμοποιήθηκαν πρακτικά στην κλινική πράξη.¹⁰ Η επιπλέον βελτίωση της τεχνολογίας των συσκευών ερεθισμού και καταγραφής επιτρέπει στην παρούσα φάση η εξέταση του περιφερικού νευρικού συστήματος να γίνεται με μία πολύ καλή διαγνωστική επιτυχία. Επιπλέον, στις συμβατικές μεθόδους εκτίμησης της ταχύτητας αγωγής του περιφερικού τμήματος ενός νεύρου, προστέθηκαν οι τεχνικές των καθυστερημένων μυϊκών προκλητών απαντήσεων. Από αυτές το F - wave, το οποίο συχνά αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ηλεκτροδιαγνωστικής μελέτης, συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον των ερευνητών.

F - WAVE

Το F - wave αποτελεί ένα καθυστερημένο μυϊκό δυναμικό, αποτέλεσμα της αντίδρομης πυροδότησης των πρόσθιων κεράτων του νωτιαίου μυελού μετά από ηλεκτρικό ερεθισμό των κινητικών νευρικών ινών. Το F - wave διατρέχει όλο το μήκος ενός περιφερικού νεύρου, από το νωτιαίο μυελό έως το μυ και ως εκ τούτου αποτελεί μέσο εξέτασης των εγγύτερων τμημάτων αυτού, κάτι που δεν επιτυγχάνεται με την κλασσική μελέτη αγωγιμότητας. Η δυνατότητα

αυτή παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε ασθενείς με νόσο Charcot-Marie-Tooth και από τότε η μέθοδος εφαρμόζεται στη μελέτη πολλών νευρολογικών διαταραχών.¹¹

Η πρώτη περιγραφή του F - wave έγινε το 1950 από τους Magladery και Mc Dougal που το προσδιόρισαν έτσι επειδή αρχικά καταγράφηκε από τους αυτόχθονες μυς του ποδιού.¹² Οι ανωτέρω ερευνητές αρχικά αποκάλυψαν μία μικρή απάντηση η οποία συμβαίνει περίπου 30 msec μετά την αρχική κινητική απάντηση M, έπειτα από ερεθισμό του ωλένιου νεύρου και καταγραφή από τους μυς του υποθέναρος και την όρισαν ως F - wave. Επίσης παρατήρησαν ότι το F - wave αυξανόταν σε εύρος και έφτανε στο μέγιστο μετά από υπερμέγιστο ερεθισμό του περιφερικού νεύρου, το εύρος του ποίκιλλε από άτομο σε άτομο, είχε διαφορετική μορφολογία από το ένα ερέθισμα στο άλλο όπως και ελαφρά διαφορετικό λανθάνοντα χρόνο και ότι όλες οι αρχικές κινητικές απαντήσεις M δεν ακολουθούνταν από F - wave. Ενδιαφέρον είχε η παρατήρησή τους ότι η μετακίνηση του ερεθισμού από τον αγκώνα στο περιφερικό τμήμα του αντιβραχίου είχε σαν αποτέλεσμα τη βράχυνση του τελικού λανθάνοντα χρόνου της απάντησης M, όμως το F - wave παρατεινόταν από τα 26 στα 31 msec. Η μείωση του λανθάνοντα χρόνου της απάντησης M ήταν αναμενόμενη καθώς η θέση ερεθισμού ήταν εγγύτερα στο μυ από τον οποίο γινόταν η καταγραφή. Η αύξηση όμως του λανθάνοντα χρόνου του F - wave υποδήλωνε ότι το ερέθισμα που ήταν υπεύθυνο για τη δημιουργία του έπρεπε να διανύσει μεγαλύτερη διαδρομή πριν φτάσει στους μυς του υποθέναρος. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι το F - wave απουσίαζε όταν το ωλένιο νεύρο ερεθιζόταν περιφερικότερα από τη θέση ενός πλήρους μπλοκ του νεύρου με προκαΐνη. Έπειτα από αυτές τις παρατηρήσεις οι ανωτέρω ερευνητές συμπέραναν ότι το F - wave δεν μπορεί να προέρχεται από μία επανειλημμένη πυροδότηση του κινητικού νεύρου, της νευρομυϊκής σύναψης ή του μυ, αλλά ήταν ένα καθυστερημένο δυναμικό το οποίο αρχικά κινείται κεντρικά προς το κεντρικό νευρικό σύστημα και ακολούθως φυγόκεντρα πίσω προς το μυ. Συνεπώς, το F - wave κατά κάποιον τρόπο περιλάμβανε το κεντρικό νευρικό σύστημα μέσω της εκφόρτισης των κινητικών νευρώνων, είτε μέσω μίας παλίνδρομης εκφόρτισης των κυττάρων των πρόσθιων κερμάτων ή σαν αντανακλαστικός μηχανισμός που περιλάμβανε

ανιούσες και κατιούσες κεντρικές συνδέσεις. Το μικρό εύρος των F - wave σήμαινε ότι μόνο ένας επιλεγμένος πληθυσμός κινητικών νευρών απαντούσε στον περιφερικό εκπολωτικό παλμό. Τελικά, οι ανωτέρω ερευνητές συμπέραναν ότι το F - wave ήταν αποτέλεσμα ενός αντανακλαστικού μηχανισμού και όχι παλίνδρομη εκφόρτιση των κυττάρων των πρόσθιων κεράτων.

Μετά τους Magladery και Mc Dougal και άλλοι ερευνητές υπέθεσαν ότι το F - wave ήταν μία αντανακλαστική απάντηση για την οποία μεσολαβούσαν ολιγο- και πολύ- συναπτικές οδοί που απαιτούσαν την ενεργοποίηση ανιόντων οδών.^{13,14} Λίγο αργότερα μετά την πρώτη περιγραφή του F - wave, άλλοι ερευνητές υποστήριξαν ότι αντίθετα από την αντανακλαστική οδό, αυτό παράγεται από τον κινητικό νευρώνα μέσω μίας αντίδρομης διέγερσης, δηλαδή μέσω ενός παλίνδρομου μηχανισμού. Μετά από μπλοκ των οπίσθιων ριζών, διαπιστώθηκε ότι η παραγωγή των F - wave επηρεαζόταν από ελάχιστα έως καθόλου.^{15,16}

Φυσιολογία του F - wave

Τα F - wave παράγονται μετά από αντίδρομη ενεργοποίηση των κινητικών νευρώνων. Κινητικές μονάδες στα F - wave ανευρίσκονται μόνο όταν οι ίδιες κινητικές μονάδες ανευρίσκονται στην άμεση σύνθετη κινητική (M) απάντηση.¹⁷ Για μία δεδομένη κινητική μονάδα, το σχήμα και το μέγεθος του δυναμικού δράσης αυτής τόσο στην άμεση απάντηση όσο και στο F - wave θα είναι ταυτόσημα. Η πιθανότητα γένεσης ενός F - wave από μία κινητική μονάδα μίας συγκεκριμένης νευρωνικής δεξαμενής είναι μικρή.¹⁸ Κάποια ερεθίσματα σε μία ακολουθία μπορεί να μην προκαλούν F - wave. Όπου αυτά ακολουθούν την άμεση (M) απάντηση, δεν έχουν το ίδιο σχήμα και μέγεθος μετά από κάθε ερέθισμα επειδή οι κινητικές μονάδες και ως εκ τούτου τα δυναμικά δράσης αυτών που δημιουργούν F - wave, αλλάζουν μετά από κάθε ερέθισμα.¹⁹

Ο λανθάνων χρόνος του F - wave αντιπροσωπεύει το χρόνο αγωγής μεταξύ της θέσης ερεθισμού του περιφερικού νεύρου και του νωτιαίου μυελού για την επανενεργοποίηση των κινητικών νευρώνων.

Δεδομένου ότι τα F - wave παράγονται από μία παλίνδρομη εκφόρτιση των κινητικών νευρώνων, καθίσταται λογική η απορία γιατί το εύρος των F - wave είναι σημαντικά μικρότερο από το εύρος του προηγούμενα παραγόμενου σύνθετου μυϊκού προκλητού δυναμικού. Αναφερόμενοι στο εύρος των F - wave, θα πρέπει να αναφερθούμε στους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν το πλήθος των κινητικών μονάδων που συμμετέχουν στο F - wave. Ο αριθμός των μυϊκών ινών και η διάμετρος της εγκάρσιας διατομής αυτών που συνθέτουν μία συγκεκριμένη κινητική μονάδα καθώς και το πόσο κοντά οι ίνες αυτές είναι διευθετημένες στο χώρο μπορεί να επηρεάσουν το εύρος ενός δυναμικού. Όσο περισσότερες μυϊκές ίνες ανά κινητική μονάδα βρίσκονται σε ένα δεδομένο χώρο, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρική τάση παράγεται στη διάρκεια της εκπόλωσης και τόσο μεγαλύτερο εμφανίζεται το F - wave. Επίσης, ο συνολικός αριθμός των κινητικών μονάδων που ενεργοποιούνται και η χρονική διασπορά της μίας σε σχέση με την άλλη, ευθέως επηρεάζουν το εύρος του F - wave. Όταν αρκετές κινητικές μονάδες χρονικά συγχρονίζονται, προκύπτει ένα μεγαλύτερο δυναμικό από αυτό που θα προέκυπτε αν ενεργοποιούνταν χρονικά ξεχωριστά. Η αιτία του σχετικά μικρού εύρους του F - wave συγκριτικά με αυτό του σύνθετου μυϊκού προκλητού δυναμικού είναι ότι μόνο ένας μικρός υποπληθυσμός από τις διαθέσιμες κινητικές μονάδες ενεργοποιούνται σε απάντηση των αντιδρομικά διαδιδόμενων κινητικών ερεθισμάτων. Απαιτείται όμως μία εξήγηση για τον παραπάνω ισχυρισμό. Ο Renshaw παρατήρησε ότι μετά από εκτομή των οπίσθων ριζών σε γάτες, ο ερεθισμός ενός κινητικού νεύρου είχε ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο αντιδρομικό ερέθισμα το οποίο κατευθυνόταν προς το κεντρικό νευρικό σύστημα.²⁰ Καταγράφοντας απευθείας από τα ίδια αυτά κινητικά νεύρα, αποκάλυψε ένα δεύτερο ερέθισμα με μόνο 2 - 3% του αρχικού εύρους και το οποίο απαιτήσε ένα χρόνο κεντρικής επανεπιστροφής ή καθυστέρησης που ήταν περίπου 1 msec. Τα ίδια αυτά ερεθίσματα που αντιστοιχούν στην απάντηση του F - wave, περιγράφηκαν από τους Magladary και McDougal, αν και ο Renshaw τα κατέγραψε από το νεύρο, ενώ το F - wave παρατηρείται στο μυ. Με άλλα λόγια ο Renshaw τεκμηρίωσε τη νευρική απάντηση που είναι υπεύθυνη για το μυϊκό δυναμικό που παράγεται από αυτά τα παλίνδρομα νευρικά ερεθίσματα. Σε έρευνες τόσο σε πειραματόζωα όσο και σε ανθρώπους βρέθηκε ότι το F - wave είναι μεταξύ 1

και 3% του σύνθετου μυϊκού προκλητού δυναμικού και αντιπροσωπεύει το 1 - 2% των διαθέσιμων κινητικών νευρώνων.^{21,22} Ο ακριβής μηχανισμός ερμηνείας για την ενεργοποίηση μικρού αριθμού κινητικών νευρώνων μετά από αντίδρομο ερεθισμό δεν είναι πλήρως κατανοητός.

Για την πληρέστερη κατανόηση της ενεργοποίησης μικρού μόνο αριθμού κινητικών νευρώνων μετά την εκπόλωση ενός ολόκληρου μικτού νεύρου, είναι αναγκαία μία σύντομη αναφορά στην ανατομία των κυττάρων των πρόσθιων κεράτων. Τα κύτταρα των πρόσθιων κεράτων που είναι επιφορτισμένα με την κινητική λειτουργία αποτελούνται από ένα σχετικά μεγάλο σώμα με αρκετές μεγάλες προσεκβολές που αναδύονται από αυτό. Η μεγαλύτερη από αυτές τις προσεκβολές είναι ο άξονας ο οποίος προορίζεται να εννεурώσει όλες τις μυϊκές ίνες που λαμβάνουν νεύρωση από αυτόν τον κινητικό νευρώνα. Το τμήμα του κινητικού νευρώνα που σχηματίζει τη συνένωση του τελευταίου εμμύελου τμήματος του άξονα και του κυρίως τμήματος του σώματος, αναφέρεται ως λοφίσκος του άξονα (axon hillock) και είναι αμύελος. Ο ουδός εκπόλωσης του λοφίσκου του άξονα είναι περίπου ο μισός από ότι το υπόλοιπο τμήμα του κινητικού νευρώνα.²³ Οι υπόλοιπες προσεκβολές του σώματος είναι οι δενδρίτες. Το σώμα συνάπτεται με πάνω από 6000 άλλους δενδρίτες και παράγει είτε διεγερτικά είτε ανασταλτικά ερεθίσματα. Το τελικό άθροισμα των διεγερτικών και ανασταλτικών δυναμικών καθορίζει την τελική διεγερσιμότητα του κινητικού νευρώνα και το εάν θα παράξει ένα εκπολωτικό ερέθισμα επαρκές σε μέγεθος για να διεγείρει την περιοχή του λοφίσκου του άξονα παράγοντας τελικά ένα δυναμικό δράσης που θα διαδοθεί περιφερικά. Σε μικρή απόσταση περιφερικά από το λοφίσκο του άξονα, ένας αριθμός νωτιαίων κινητικών νευρώνων κατέχει έναν παράπλευρο νευρικό κλάδο ο οποίος καταλήγει στην πρόσθια έσω μοίρα του πρόσθιου κέρατος και συνάπτεται με ανασταλτικούς ενδιάμεσους νευρώνες που είναι γνωστοί ως κύτταρα Renshaw. Η ενεργοποίηση των κυττάρων Renshaw τείνει να καταστείλει την ενεργοποίηση των κινητικών νευρώνων με τους οποίους συνάπτονται παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ανασταλτικά προσυναπτικά δυναμικά. Καθώς ένα αντίδρομο ερέθισμα διατρέχει τον άξονα προς το πρόσθιο κέρασ, ο παράπλευρος άξονας μεταφέρει ένα δυναμικό δράσης προς

τα κύτταρα Renshaw, τα οποία με τη σειρά τους καταστέλλουν τους κινητικούς νευρώνες με τους οποίους συνάπτονται.

Το τελικό επίπεδο ευερεθιστότητας της κινητικής νευρωνικής δεξαμενής εξαρτάται από πολλαπλές διεγερτικές και ανασταλτικές επιρροές τόσο από το κεντρικό όσο και από το περιφερικό νευρικό σύστημα.²⁴ Όταν ένα μικτό περιφερικό νεύρο ερεθίζεται με ένα υπερμέγιστο ερέθισμα, ένας μεγάλος αριθμός αντίδρομων κινητικών δυναμικών δράσης εισέρχεται στα πρόσθια κέρατα του νωτιαίου μυελού και βρίσκει τα σώματα των αντίστοιχων κινητικών νευρώνων, τα μεμβρανικά δυναμικά ηρεμίας των οποίων ποικίλουν σε διάφορα επίπεδα. Το πότε ένας συγκεκριμένος κινητικός νευρώνας θα παράξει μία παλίνδρομη εκφόρτιση, εξαρτάται από το επίπεδο αποπόλωσης του σώματος και των δενδριτών αυτού. Εάν το μεμβρανικό δυναμικό ηρεμίας του λοφίσκου του άξονα ευνοεί την εκπόλωση της περιοχής, διευκολύνεται η διάδοση του εισερχόμενου δυναμικού δράσης τόσο στο σώμα όσο και στους δενδρίτες του. Όσπου να φτάσει η εκπόλωση στα απώτατα σημεία των δενδριτών, ο λοφίσκος του άξονα έχει επαναπολωθεί και δε βρίσκεται πλέον στην ανερέθιστη περίοδο (περίπου 1 msec). Η εκπόλωση των δενδριτών δημιουργεί ένα τοπικό ρεύμα που μεταβάλλει την κατανομή ιόντων γύρω από το λοφίσκο του άξονα, μειώνοντας τα θετικά φορτία που βρίσκονται στην επιφάνειά του. Η διαμεμβρανική αλλαγή ηλεκτρικής τάσης προκαλεί ένα δυναμικό δράσης στο τμήμα αυτό του άξονα, παράγοντας έτσι τη γένεση μίας παλίνδρομης εκφόρτισης του κινητικού νευρώνα και τελικά την εμφάνιση του F - wave. Η κρίσιμη χρονική περίοδος ή «παράθυρο ευκαιρίας» μεταξύ επαναπόλωσης του λοφίσκου του άξονα που συμπίπτει με το τοπικό ρεύμα σώματος - δενδριτών είναι περίπου 10 - 30 msec.¹⁸ Εάν η μεμβράνη του σώματος εκπολωθεί σε υπερβολικό βαθμό, τότε αυτό και οι δενδρίτες εκπολώνονται σχετικά νωρίς, το τοπικό ρεύμα από τους δενδρίτες βρίσκει το λοφίσκο του άξονα σε ανερέθιστη περίοδο με αποτέλεσμα να μην παράγεται F - wave. Εκτός αυτού, η μετάβαση του ερεθίσματος μεταξύ του εμμέλου τμήματος του άξονα και του λοφίσκου αυτού, δεν ευνοεί την αγωγή εντός του σώματος επειδή η διανομή του ρεύματος αραιώνεται στο αμέλο τμήμα του λοφίσκου του άξονα. Εάν το μεμβρανικό δυναμικό ηρεμίας του αρχικού τμήματος του άξονα είναι σχετικά υπερπολωμένο λόγω τμηματικής

(segmental) ή υπερτμηματικής (suprasegmental) επιρροής, το δυναμικό δράσης δε θα εισέλθει εντός του σώματος και στους δενδρίτες, άρα δε θα παραχθεί F - wave. Ο λόγος που παρατηρείται μόνο ένας μικρός αριθμός F - wave, συνεπώς, είναι επειδή απαιτείται η σύγκλιση ενός αριθμού διεγερτικών και ανασταλτικών επιρροών που να ευνοούν την αγωγή του δυναμικού δράσης στο λοφίσκο του άξονα, με μία κατάλληλη χρονική καθυστέρηση κατά μήκος του σώματος και των δενδριτών, έτσι ώστε να ευνοείται η επανενεργοποίηση του λοφίσκου του άξονα. Αυτή η κατάσταση μεταβάλλεται από στιγμή σε στιγμή, με αποτέλεσμα διαφορετικοί υποπληθυσμοί κινητικών νευρώνων να είναι επιδεκτικοί σε εκπόλωση σε κάθε αντίδρομο ερέθισμα.²⁵

Ο ηλεκτρικός ερεθισμός ενός περιφερικού νεύρου ακολουθείται από μία αντίδρομη δραστηριότητα των κινητικών νευρικών ινών και από μία ορθόδρομη δραστηριότητα των αισθητικών ινών. Και οι δύο μπορούν να επηρεάσουν την ευερεθιστότητα των κινητικών νευρώνων και ως εκ τούτου να αλλάξουν ένα F - wave. Για παράδειγμα, η αντίδρομη δραστηριότητα παράπλευρων κλάδων των κινητικών νευρικών ινών στα πρόσθια κέρατα, ενεργοποιεί τα ενδιάμεσα ανασταλτικά κύτταρα Renshaw τα οποία διασυναπτικά μεταβάλλουν την ευερεθιστότητα των γειτονικών κινητικών νευρώνων. Τα κύτταρα Renshaw τα οποία είναι ευρέως κατανομημένα στις δεξαμενές των κινητικών νευρώνων, κατά προτίμηση αναστέλλουν τους μικρότερους κινητικούς νευρώνες.²⁶

Άλλοι πιθανοί μηχανισμοί μεταβολής της ευερεθιστότητας των κινητικών νευρώνων μπορεί να είναι η επαγωγή ενός αρκετά μεγάλου πεδίου δυναμικών εντός των πρόσθιων κερμάτων, καθώς και η παράπλευρη αναστολή από κινητικό νευρώνα σε κινητικό νευρώνα.²⁷ Για να επηρεαστεί η εκφόρτιση ενός F - wave από την αντίδρομη ή την ορθόδρομη δραστηριότητα των κινητικών και αισθητικών ινών αντίστοιχα, θα πρέπει η δραστηριότητα αυτή να φτάσει στον κινητικό νευρώνα πριν από την αντίδρομη πυροδότηση. Συνεπώς, οι νευρικές ίνες που άγουν ερεθίσματα με χαμηλή ταχύτητα είναι σχεδόν αδύνατο να επηρεάσουν την παραγωγή F - wave. Αντίθετα, η δραστηριότητα των κινητικών νευρώνων με μεγαλύτερη ταχύτητα αγωγής μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή F - wave από τους μικρότερης ταχύτητας αγωγής κινητικούς νευρώνες. Αν και σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται 3

msec για την ενεργοποίηση των ενδιάμεσων νευρώνων²⁸ και άλλα 0,9 msec για να επηρεάσουν τα κύτταρα Renshaw την ευερεθιστότητα των κινητικών νευρώνων.²⁹

Από μία δεξαμενή κινητικών νευρώνων, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό (1 - 2%) παράγει F - wave λόγω τμηματικής ή υπερτμηματικής ανασταλτικής επιρροής. Καθώς υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών φυσιολογικών ιδιοτήτων των κινητικών μονάδων, είναι σημαντικό το ποιες επιλέγονται στη γένεση F - wave. Η επιλογή επηρεάζει την ταχύτητα αγωγής και επομένως τους λανθάνοντες χρόνους των κινητικών μονάδων στα F - wave, θέτει δε το ζήτημα του κατά πόσο οι ταχύτητες αγωγής των F - wave είναι αντιπροσωπευτικές του κινητικού νεύρου στο σύνολό του.

Αν και η διάμετρος των μεγαλύτερων νευρικών ινών στα πρόσθια κέρατα είναι περίπου διπλάσια αυτής των μικρότερων ινών,³⁰ που σημαίνει ότι οι μεγαλύτεροι άλφα κινητικοί άξονες άγουν με διπλάσια ταχύτητα από αυτήν των μικρότερων, αυτό το εύρος ταχυτήτων δεν παρατηρείται στα F - waves. Αντίθετα παρατηρείται ένα εύρος 15 - 20%,³¹ κάτι που υποδηλώνει ότι υπάρχει μία προτίμηση προς τους ταχύτερους κινητικούς νευρώνες στην παραγωγή των F - waves.

Υπάρχουν μελέτες που υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει προτίμηση στην επιλογή των κινητικών μονάδων στα F - wave,^{22,32} οι μελέτες όμως αυτές έγιναν με υπομέγιστο ερεθισμό. Αν και F - wave παράγονται με υπομέγιστο ερεθισμό, εντούτοις με υπερμέγιστο ερεθισμό (25% πάνω από τον απαιτούμενο για το μέγιστο κύμα M) τα F - wave είναι πιο εμφανή, καθώς το εύρος και η συχνότητα εμφάνισής τους αυξάνει όσο αυξάνεται η ένταση του ερεθίσματος.

Τεχνική καταγραφής

Μία σειρά από ερευνητές έχουν αναπτύξει πολλαπλές μεθοδολογίες για τη διαγνωστική χρήση του F - wave. Η βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται από όλους τους ερευνητές είναι ο λανθάνων χρόνος της απάντησης του F - wave. Επειδή όμως η ακολουθία των λανθανόντων χρόνων ποικίλει, έχουν προταθεί μία σειρά στρατηγικών για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, όπως η μέση τιμή των λανθανόντων χρόνων, το εύρος των

λανθανόντων χρόνων, η ταχύτητα αγωγής του F - wave και η αναλογία (ratio) των λανθανόντων χρόνων του F - wave. Το εύρος των F - wave, πλην από ελάχιστους ερευνητές, δεν έχει χρησιμοποιηθεί διαγνωστικά.

Ένα F - wave μπορεί να καταγραφεί δυναμικά από κάθε μυ στον οποίο θα δοθεί υπερμέγιστος ερεθισμός και η ευαισθησία του ενισχυτή να ρυθμιστεί έτσι ώστε να μπορεί να αποκαλυφθεί η απάντηση. Η ευαισθησία ρυθμίζεται συνήθως στα 100 - 200 $\mu\text{V}/\text{Div}$. αν και αυτή η ευαισθησία δεν επιτρέπει να φανεί όλο το μέγεθος του σύνθετου μυϊκού προκλητού δυναμικού. Ο καθυστερημένος λανθάνων χρόνος του F - wave, απαιτεί μία ταχύτητα σάρωσης στα 5 msec/Div. για τα άνω άκρα και 10 msec/Div. αντίστοιχα για τα κάτω άκρα. Η καταγραφή του F - wave γίνεται με επιφανειακά ηλεκτρόδια από τον απαγωγό του μεγάλου δακτύλου και το βραχύ εκτείνοντα τους δακτύλους μετά από ερεθισμό του κνημιαίου και του περνιαίου νεύρου αντίστοιχα στην περιοχή της ποδοκνημικής και του βραχύ απαγωγού του αντίχειρα και απαγωγού του μικρού δακτύλου μετά από ερεθισμό του μέσου και του ωλένιου νεύρου αντίστοιχα στην περιοχή του καρπού. Μπορεί επίσης να καταγραφεί από τους μύς της γαστροκνημίας με ερεθισμό του κνημιαίου νεύρου στον ιγνυακό βόθρο. Η καταγραφή γίνεται με τον πρότυπο τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων (το ενεργό πάνω από το κινητικό σημείο του μυ και το αδιάφορο πάνω από τον καταφυτικό τένοντα αυτού), ενώ ο ερεθισμός γίνεται με την τοποθέτηση της καθόδου πάνω από το νεύρο και της ανόδου σε απόσταση από το νευρικό στέλεχος για να αποφευχθεί το ανοδικό block της αντίδρομης ώσης, αν και αυτό αμφισβητείται από πολλούς ερευνητές. Επειδή τα F - wave μπορεί να επηρεαστούν από τα προηγούμενα ερεθίσματα, η συχνότητα ερεθισμού πρέπει να είναι 1 Hz ή μικρότερη. Τα F - wave που καταγράφονται από περιφερικούς μύς διαχωρίζονται επαρκώς από το δυναμικό M, στην περίπτωση όμως του κεντρικότερου ερεθισμού, λόγω μικρότερου λανθάνοντα χρόνου των F - wave, ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να μην είναι εμφανής και ως εκ τούτου να απαιτούνται τεχνικές σύγκρουσης (collision techniques). Ο ερεθισμός είναι υπερμέγιστος και η ανάλυση του F - wave για να είναι αξιόπιστη απαιτεί μία σειρά κυμάτων (περισσότερα από δέκα). Οι συνήθεις εκτιμώμενες παράμετροι είναι οι λανθάνοντες χρόνοι, η διαφορά μεταξύ ελάχιστου και μέγιστου λανθάνοντα χρόνου, η διάρκεια, το

ποσοστό των διακριτών F - wave, το εύρος και ο αριθμός αυτών σε μία σειρά που έχουν παρόμοιο λανθάνοντα χρόνο, εύρος και σχήμα κυματομορφής.

Ανάλυση των F - wave

Οι λανθάνοντες χρόνοι του F – wave μετρούν την αγωγιμότητα των κινητικών αξόνων και αποτελούν την πιο μελετημένη παράμετρο αυτού. Μετρούνται από το σημείο του παράσιτου ερεθισμού έως την έναρξη του προκλητού δυναμικού, είτε αυτή είναι θετική είτε αρνητική. Οι λανθάνοντες χρόνοι σχετίζονται άμεσα με το ύψος, το μήκος του μέλους και την ηλικία. Ένα ευαίσθητο κριτήριο ανωμαλίας είναι μία διαφορά λανθάνοντα χρόνου μεταξύ των δύο πλευρών, ή μεταξύ δύο νεύρων του ίδιου μέλους σε ετερόπλευρες βλάβες που επηρεάζουν μόνο ένα νεύρο.³³ Οι λανθάνοντες χρόνοι των F - wave αντικατοπτρίζουν το χρόνο αγωγής μεταξύ του σημείου ερεθισμού και του νωτιαίου μυελού, το χρόνο επανενεργοποίησης των κινητικών νευρώνων και το χρόνο ενεργοποίησης των κινητικών μονάδων μέσω του φυγόκεντρα αγομένου δυναμικού δράσης. Τα μεμονωμένα F - wave παράγονται από περιοδικές εκφορτίσεις μίας από τις πολύ λίγες κινητικές μονάδες που συνοδεύονται από δυναμικό δράσης και συνεπώς F - wave, οι λανθάνοντες χρόνοι των οποίων διαφέρουν μεταξύ τους. Οι διαφορές των κινητικών μονάδων που παράγουν F - wave, είναι υπεύθυνες για τις διαφορές στο μέγεθος (σε σχέση με το μέγεθος του κινητικού προκλητού δυναμικού M και το οποίο είναι < 5% αυτού), το σχήμα και το λανθάνοντα χρόνο των παραγόμενων F - wave.

Χρησιμοποιώντας τις πιο συχνές τεχνικές καταγραφής των F - wave, όπως αυτή με υπερμέγιστο ερεθισμό, παρατηρούνται παραλλαγές στο λανθάνοντα χρόνο που φθάνουν τα 3 msec.³⁴ Η εγγενής μεταβλητότητα των F - wave υπαγορεύει ότι θα πρέπει να ληφθεί ένας επαρκής αριθμός αυτών έτσι ώστε να είναι βέβαιο ότι οι καταγραφές είναι ακριβείς και αναπαραγώγιμες. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αξιολόγησης των F - wave είναι η συλλογή 10 ή περισσότερων F - wave και ακολούθως η μέτρηση του βραχύτερου λανθάνοντα χρόνου. Όμως είναι δύσκολη η ταυτοποίηση των λανθανόντων χρόνων κάποιων F - wave επειδή είτε υπερκαλύπτονται από το προηγούμενο κινητικό προκλητό δυναμικό M είτε η αρχική απόκλισή τους είναι τόσο

βαθμιαία που καθιστά δύσκολη την ταυτοποίηση της έναρξής τους. Επιπρόσθετα, μεμονωμένα F - wave μπορεί να επικαλύπτονται και να συγχέονται με αξονικά αντανακλαστικά και A - wave.^{35,36} Πάντως, αντίθετα από ότι συμβαίνει με τα F - wave, τα αξονικά αντανακλαστικά μπλοκάρονται με την αύξηση της έντασης του ερεθίσματος λόγω «σύγκρουσης» στο κατιόν σκέλος του αντανακλαστικού. Τα A - wave παραμένουν με την αύξηση της έντασης του ερεθίσματος και μπορεί να υπερκαλύπτουν τα F - wave, ή να συμβαίνουν πριν ή μετά από αυτά.

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος σύγκρισης λανθανόντων χρόνων των F - wave είναι ο καθορισμός των μέσων τιμών αυτών. Η μέθοδος αυτή δεν εξαρτάται από την ταυτοποίηση ενός μόνο F - wave αλλά αντικατοπτρίζει ένα εύρος τιμών και είναι περισσότερο αναπαραγώγιμη από ότι ο ελάχιστος λανθάνων χρόνος ($Flat_{min}$). Σχετίζεται με το ύψος και την ηλικία κατά τον ίδιο τρόπο όπως και ο $Flat_{min}$. Μία διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών που κυμαίνεται στα 2 msec για τα άνω άκρα, 3 msec για τους μύς της γαστροκνημίας και 4 msec για τους μύς του ποδιού, αποτελούν τα ανώτερα φυσιολογικά όρια.³⁷ Η ανωτέρω μέθοδος ως η πιο ακριβής μέθοδος, προτείνεται σε πολλές μελέτες.^{37,38,39,40}

Ως χρονοδιασπορά αναφέρεται η διαφορά μεταξύ ελάχιστου και μέγιστου λανθάνοντα χρόνου⁴¹ και ως εκ τούτου αντανακλά το εύρος των λανθανόντων χρόνων σε μία σειρά F - wave. Η χρονοδιασπορά δε σχετίζεται με την ηλικία, το φύλο και το ύψος, όπως επίσης δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ δεξιάς και αριστερής πλευράς.³³

Η ταχύτητα αγωγής του F - wave (CV) έχει προταθεί με σκοπό τον υπολογισμό της ταχύτητας αγωγής στο εγγύς τμήμα των κινητικών ινών και εκτιμάται με βάση τον τύπο: $CV (m/sec) = 2D / (Flat - Mlat - 1)$. Το 1 msec είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επιστροφή του ερεθίσματος εντός του νωτιαίου μυελού. Η απόσταση D σε cm μετράται για μεν το άνω άκρο από την ακανθώδη απόφυση του A7 με το χέρι σε απαγωγή 90° για δε το κάτω άκρο από το Θ12 με το άτομο σε όρθια θέση.¹¹ Για την αποφυγή λαθών σχετικά με τη μέτρηση της απόστασης έχει προταθεί η μελέτη του πηλίκου του λανθάνοντα χρόνου του F - wave (F ratio latency). Για τον υπολογισμό του F

ratio, το κινητικό νεύρο ερεθίζεται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του νεύρου με τις παραδοσιακές μεθόδους. Όταν το μέσο και το ωλένιο νεύρο ερεθίζονται στον αγκώνα και το κνημιαίο και περονιαίο νεύρο στην ιγνυακή κοιλότητα, το F ratio προσφέρει έναν απλό τρόπο για την εκτίμηση της αγωγιμότητας του εγγύς σε σχέση με το περιφερικό τμήμα.¹¹ Το F ratio latency υπολογίζεται με βάση τον τύπο: $Flat - Mlat - 1 \text{ (msec)}/2Mlat \text{ (msec)}$

Η διάρκεια του F - wave μετράται από την έναρξη της απόκλισης έως την τελική επιστροφή στη βασική γραμμή. Η μέση διάρκεια ποικίλει από 7,2 έως 11,8 msec στο μέσο νεύρο, 6,5 έως 13,7 στο ωλένιο νεύρο και 14 έως 15,7 στο κνημιαίο νεύρο.³³ Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ δεξιάς και αριστερής πλευράς και δε σχετίζεται με την ηλικία και το φύλο.

Το εύρος του F - wave το οποίο αντανακλά τη διεγερσιμότητα των κινητικών νευρώνων, μετράται από κορυφή σε κορυφή, η τιμή του ποικίλει ευρέως στη βιβλιογραφία και δε σχετίζεται με την ηλικία και το φύλο,³³ αν και το απόλυτο εύρος του F - wave τείνει να παρουσιάζει μία αύξηση με την πάροδο της ηλικίας. Φυσιολογικά υπάρχει μία θετική συσχέτιση μεταξύ εύρους και διάρκειας και μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ λανθάνοντα χρόνου και διάρκειας του F - wave.⁴² Τα F - wave για να είναι εύκολα διακριτά πρέπει να υπερβαίνουν σε εύρος από κορυφή σε κορυφή τα 40 μV . Λόγω της μεταβλητότητας των F - wave, το εύρος υπολογίζεται σε μέσες τιμές και σχετίζεται με το μέγιστο δυναμικό M, δηλαδή το μέσο πηλίκο F / M. Το πηλίκο αυτό δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο πλευρών (δεξιά - αριστερά), ενώ έχει θετική συσχέτιση με τη γήρανση.³³

Ως επαναληψιμότητα αναφέρεται το ποσοστό απαντήσεων σε ένα δεδομένο αριθμό ερεθισμάτων. Δε σχετίζεται με το ύψος και την ηλικία, ενώ η ήπια σύσπαση των μυών ή η αύξηση της συχνότητας των ερεθισμάτων αυξάνει σημαντικά αυτήν την παράμετρο.

Ως ταχεοδιασπορά ορίζεται η κατανομή των ταχυτήτων αγωγής ενός στατιστικά σημαντικού αριθμού διαδοχικών F - wave. Επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ ατόμων με διαφορετικό ύψος και υπολογίζει την αναλογία των ταχυτήτων αγωγής διαφορετικών κατηγοριών κινητικών ινών. Η χρονοδιασπορά αποτελεί χρήσιμο βοήθημα στη μελέτη των περιφερικών

νευροπαθειών.⁴³ Μειονεκτήματα της ταχεοδιασποράς μπορεί να θεωρηθούν τα πιθανά λάθη κατά τη μέτρηση των αποστάσεων καθώς και οι διορθώσεις που πρέπει να γίνουν αναφορικά με το χρόνο αναστροφής του ερεθίσματος εντός των πρόσθιων κεράτων του νωτιαίου μυελού.

Οι λανθάνοντες χρόνοι του F - wave ποικίλουν ανάλογα με το μήκος των μελών και σε μικρότερο βαθμό με την ηλικία, συνεπώς απαιτείται περεταίρω επεξεργασία λαμβάνοντας υπόψη τους δύο αυτούς παράγοντες.⁴⁴

Μία τέτοια επεξεργασία φαίνεται στο Διάγραμμα 1:

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1

Λανθάνοντες χρόνοι

	Ελάχιστος	Μέση τιμή
ΒΑΑ (μέσο ν.)	$(-3,5)+0,063a+0.37d$	$0,04+0,056a+0,35d \pm 2\text{msec}$
ΑΜΔ (ωλένιο ν.)	$(-1,5)+0.056a+0.36d$	$(-0,40)+0,063a+0,35d \pm 2\text{msec}$
Γαστρ/μιος (κνημιαίο ν.)	$15,6+0.051a+0.31d$	$10,5+0,092a+0,43d \pm 3\text{msec}$
ΒΕΔ (περνιαίο ν.)	$46,3+3,2(\text{ht } 147-160)$	$(-26,4)+0,112a+0,39\text{ht} \pm 5\text{msec}$
	$49,3+3,8(\text{ht } 163-175)$	
	$52,8+4,2(\text{ht } 178=193)$	
ΑΜΔ (κνημιαίο ν.)	$47,3+3,6(\text{ht } 147-160)$	$(-28,5)+0,131a+0,414\text{ht} \pm 5\text{msec}$
	$50,6+3,7(\text{ht } 163-175)$	
	$55,4+4,2(\text{ht } 178-193)$	

Τα ανώτερα φυσιολογικά όρια της διαφοράς των μέσων λανθανόντων χρόνων του F - wave μεταξύ των δύο πλευρών είναι 2 msec για το χέρι και 3 msec για το πόδι.

a: ηλικία σε έτη, d: απόσταση σε cm, ht: ύψος σε cm

ΒΑΑ: Βραχύς Απαγωγός Αντίχειρος

ΑΜΔ: Απαγωγός Μικρού Δακτύλου

ΒΕΔ: Βραχύς Εκτείνων Δακτύλου

ΑΜΔ: Απαγωγός Μεγάλου Δακτύλου

Χρονοδιασπορά*

ΒΑΑ 6.2 msec

ΑΜΔ 5.5 msec

Γαστρ/μιος 7 msec

ΒΕΔ 9.5 msec

ΑΜΔ 9.3 msec

* Ανώτερα φυσιολογικά όρια

Εύρος (πηλίκο μέσης τιμής εύρους F / M_{max} [mF/M])*

ΒΑΑ 22±10**

Γαστροκνήμιος 25±12

* Μέση τιμή εύρους F σε μV , μέγιστο M σε mV

** Μέση τιμή \pm Σταθερά απόκλισης

Τροποποιημένος από: Fisher M.A (2007) F-Waves – Physiology and Clinical Uses. The Scientific World Journal 7, 144-160

ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΟΥ F - WAVE

Έχει βρεθεί ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ γήρανσης και λανθανόντων χρόνων, εγγύς αγωγιμότητας και πηλίκου του εύρους F / M των F – wave. Παρατηρείται μία προοδευτική μείωση της αγωγιμότητας, κυρίως του Flat_{max}, ενώ και η F - ταχεοδιασπορά μειώνεται σημαντικά με την πάροδο της ηλικίας. Κατά τη γήρανση, έχει βρεθεί μία προοδευτική μείωση των κινητικών μονάδων στους μυς του θέναρος η οποία σχετίζεται στατιστικά με την αγωγιμότητα των F – wave των μεγάλων κινητικών μονάδων. Τα ευρήματα αυτά οδηγούν στην υπόθεση ότι η προοδευτική απώλεια των κινητικών μονάδων που παρατηρείται κατά τη γήρανση, αφορά κυρίως στους μεγαλύτερους και ταχύτερους νευρικούς άξονες και ερμηνεύουν έτσι τις αλλαγές στην αγωγιμότητα με την πάροδο της ηλικίας.⁴⁵ Ωστόσο, δεν παρατηρείται μείωση της συχνότητας των F – wave με την ηλικία παρά τη μείωση του συνολικού αριθμού των κινητικών μονάδων, είτε λόγω αντισταθμιστικής αύξησης της διεγερσιμότητας των κινητικών νευρών, είτε λόγω παράπλευρης επανανεύρωσης.¹⁹ Κατά τη διάρκεια της ατονίας του ύπνου REM, τα F – wave μειώνονται λόγω υπερπόλωσης των νωτιαίων κινητικών νευρώνων, όπως επίσης μειώνονται το πηλίκo του εύρους F / M, η διάρκεια και η συχνότητα αυτών. Αντίθετα από ότι συμβαίνει με τα φυσιολογικά άτομα, τα F – wave διατηρούνται σε πλήρη διατομή του νωτιαίου μυελού. Αυτό στηρίζει την άποψη ότι ο δικτυωτός σχηματισμός επηρεάζει τα F – wave μέσω της διεγερσιμότητας των κινητικών νευρώνων.⁴⁶ Η ήπια σύσπαση των αγωνιστών μυών αυξάνει το εύρος του F – wave, χωρίς όμως αλλαγές στο λανθάνοντα χρόνο και τη διάρκεια αυτού.⁴² Παρόμοια δράση έχει και ο υπεραερισμός λόγω αυξημένης διεγερσιμότητας των φλοιϊκών κατιόντων δεματίων.⁴⁷ Φάρμακα με δράση στο κεντρικό νευρικό σύστημα δεν ασκούν αξιόλογη επίδραση στο F – wave.

ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ F - WAVE

Περιφερικές νευροπάθειες: Οι περιφερικές νευροπάθειες αποτελούν την πλέον συχνή ένδειξη ηλεκτροδιαγνωστικής εξέτασης. Οι πολυνευροπάθειες αφορούν στη συμμετοχή πολλαπλών νεύρων και διακρίνονται σε κυρίως

αξονικές ή απομυελινωτικές, αναλόγως εάν η κύρια προσβολή αφορά στον άξονα ή τη μυελίνη αντίστοιχα. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αξονικών νευροπαθειών είναι το μειωμένο εύρος των προκλητών δυναμικών ως αποτέλεσμα της απώλειας νευραξόνων, η σχετικά περιορισμένη επιβράδυνση της αγωγιμότητας και τα ηλεκτρομυογραφικά ευρήματα ως αποτέλεσμα της διάρρηξης της φυσιολογικής σύνδεσης νεύρου και μυ. Οι απομυελινωτικές νευροπάθειες συνοδεύονται από πιο σημαντική επιβράδυνση της αγωγιμότητας, ενώ σε μερικές περιπτώσεις υπάρχει αυξημένη χρονική διασπορά του προκλητού δυναμικού ή και μπλοκ αγωγιμότητας.

Στις νευροπάθειες οι λανθάνοντες χρόνοι των F - wave είναι παρατεταμένοι, ακόμη και αν οι περιφερικές κινητικές ταχύτητες αγωγής είναι φυσιολογικές.⁴⁸ Η εξέταση των F - wave είναι περισσότερο ευαίσθητη από τις κλασσικές μελέτες κινητικής αγωγής στις αξονικές νευροπάθειες,⁴⁹ είναι πιο αξιόπιστη μέτρηση για επανειλημμένες μελέτες νευρικής αγωγιμότητας στον ίδιο ασθενή,⁵⁰ και περισσότερο ευαίσθητη παράμετρος νευρικής αγωγιμότητας σε ασθενείς που πάσχουν από σακχαρώδη διαβήτη.⁵¹ Τα ανωτέρω οφείλονται στο ότι τα F - wave επηρεάζονται από τη δυσλειτουργία του νεύρου σε όλο το μήκος αυτού.

Εκτός από το λανθάνοντα χρόνο, οι άλλες παράμετροι των F - wave μπορούν να δώσουν επιπλέον πολύτιμες πληροφορίες, όπως το ποσοστό των επανειλημμένων κυμάτων, το οποίο είναι αυξημένο σε νευρογενείς διαταραχές, ιδιαίτερα σε αυτές που συνοδεύονται από ατροφία.³⁵ Η αύξηση στις διάρκειες των F - Wave αποτελεί πρώιμο σημείο διαβητικής πολυνευροπάθειας,⁵² ενώ ο μέσος λόγος εύρους F / M μπορεί να είναι αυξημένος στις νευροπάθειες, ιδιαίτερα στις αξονικές,³⁰ όπου το εύρος των F - wave είναι αυξημένο και το ύψος των μέγιστων κινητικών προκλητών δυναμικών M μειωμένο.

Γενικά τα χαρακτηριστικά ευρήματα στις αξονικές πολυνευροπάθειες είναι η ήπια παράταση των λανθανόντων χρόνων των F - Wave, οι αυξημένες τιμές πηλίκου εύρους F / M και η αυξημένη συχνότητα επανειλημμένων κυμάτων, ενώ στις απομυελινωτικές οι εμφανώς παρατεταμένοι λανθάνοντες χρόνοι των F - Wave (> 150% των αναμενόμενων τιμών), η μειωμένη συχνότητα

(persistence) και η απουσία F - Wave παρά τη σχετική ύπαρξη των κυμάτων M.

Στη διάγνωση των εστιακών και παγιδευτικών νευροπαθειών, το F – Wave δεν είναι υποβοηθητικό αφού τα μικρά τμήματα του νεύρου μπορούν να μελετηθούν καλύτερα με τις παραδοσιακές τεχνικές αγωγιμότητας.

F - Wave σε ριζοπάθειες: Στη ριζοπάθεια, η βλάβη της ρίζας οφείλεται σε συμπίεση και φλεγμονή, τα οποία οδηγούν σε τοπική απομυελίνωση και ως εκ τούτου επιβράδυνση της νευρικής αγωγιμότητας.⁵³ Τα F - wave αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στην ηλεκτροφυσιολογική εκτίμηση των ριζοπαθειών αν και η χρήση τους είναι αμφιλεγόμενη. Η κριτική σχετικά με τη χρήση των F - wave στη μελέτη των ριζοπαθειών βασίζεται στα επιχειρήματα ότι η βλάβη της ρίζας δεν περιλαμβάνει όλους τους κινητικούς άξονες αυτής, ότι οι μύες καταγραφής των F - wave έχουν πολλαπλή ριζική νεύρωση, ότι η σχετικά μικρή καθυστέρηση του λανθάνοντα χρόνου που συνοδεύει την πίεση της ρίζας είναι δυσδιάκριτη μέσα στην πολύ μεγαλύτερη διάρκεια του λανθάνοντα χρόνου του F - wave και τέλος ότι τα δεδομένα των F - Wave επικαλύπτονται από τα ευρήματα του ηλεκτρομυογραφήματος (ΗΜΓ) με βελονοειδές ηλεκτρόδιο. Η απάντηση στα ανωτέρω επιχειρήματα είναι κατά πρώτον ότι στην ανάλυση των παραμέτρων των F - wave δε λαμβάνεται υπόψη μόνο ο ελάχιστος λανθάνων χρόνος αλλά επίσης η μέση, η ενδιάμεση και η μέγιστη τιμή των λανθανόντων χρόνων όπως επίσης και η χρονοδιασπορά. Δεύτερον, μέσω των απεικονιστικών μελετών και των ηλεκτροδιαγνωστικών εξετάσεων, αποδεικνύεται ότι συνήθως δεν υπάρχει εστιακή ριζική βλάβη αλλά σπονδυλική στένωση η οποία συνοδεύεται από πολλαπλή ριζική δυσλειτουργία. Τρίτον, τα F - wave έχουν σημαντική αξιοπιστία και επαναληψιμότητα καθώς και δυνατότητα σύγκρισης της διαφοράς των λανθανόντων χρόνων μεταξύ των δύο πλευρών. Τέλος, το ΗΜΓ με βελονοειδές ηλεκτρόδιο αποκαλύπτει αξονικές βλάβες, ενώ το F - Wave κυρίως απομυελινωτικές, συνεπώς δεν υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των δύο εξετάσεων.

Το 90% περίπου των ριζοπαθειών αφορούν το οσφυοϊερό επίπεδο και το 80% περιλαμβάνει την O5 και/ή την I1 ρίζα.⁵⁴ Οι παραπάνω ρίζες νευρώνουν

τους μυς της γαστροκνημίας και του άκρου ποδός από τους οποίους γίνεται η καταγραφή των F - wave. Αντίθετα, περίπου το 90% των αυχενικών ριζοπαθειών αφορούν τις A5, A6 και A7 ρίζες.⁵⁵ Οι μύες όμως από τους οποίους γίνεται καταγραφή των F - wave στο χέρι, λαμβάνουν νεύρωση από τις ρίζες A8 και Θ1, συνεπώς το F - wave δεν είναι χρήσιμο στη μελέτη των αυχενικών ριζοπαθειών.

Αρκετές πρόσφατες μελέτες, χρησιμοποιώντας όλες τις παραμέτρους του F - wave, αποδεικνύουν την ευαισθησία της εξέτασης στη μελέτη των O5 και I1 ριζοπαθειών, η οποία είναι συγκρίσιμη με αυτήν του ΗΜΓ με βελονοειδές ηλεκτρόδιο.^{56,57,58,59,60,61}

Ο ελάχιστος λανθάνων χρόνος του F - wave δεν είναι επαρκής και απαιτείται η εκτίμηση των πολλαπλών παραμέτρων αυτού. Το F - wave δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του στη μελέτη των ριζοπαθειών, είναι όμως χρήσιμο όταν συνδυάζεται με τις υπόλοιπες ηλεκτροδιαγνωστικές εξετάσεις.

Σκοπός του παρούσας έρευνας είναι να απαντηθεί το ερώτημα της αιτίας της εμφανιζόμενης F – χρονοδιασποράς. Η κλασσική ερμηνεία του φαινομένου υποστηρίζει πως αυτό οφείλεται στο ότι τα F - wave με το μικρότερο λανθάνοντα χρόνο παράγονται από τους μεγάλους σε διάμετρο νευρώνες που άγουν τα ερεθίσματα με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ τα F - wave με το μεγαλύτερο λανθάνοντα χρόνο παράγονται από τους βραδείας μετάδοσης μικρούς νευρώνες. Η δεύτερη θεώρηση ισχυρίζεται πως η F – χρονοδιασπορά θα μπορούσε να εξηγηθεί επαρκώς με την καθυστέρηση που υπάρχει κατά μήκος των περιφερικών νευρικών κλάδων και η οποία είναι ανάλογη με την απόσταση κάθε κινητικής μονάδας από το ηλεκτρόδιο καταγραφής. Για να διαλευκάνουμε αυτό το ζήτημα, καταγράψαμε τα F – wave από μία απομακρυσμένη και μία εγγύς περιοχή του ίδιου νεύρου. Η πρώτη θεώρηση θα επιβεβαιωνόταν εάν η F - χρονοδιασπορά ήταν χαμηλότερη στον εγγύς ερεθισμό, όπου υπολογίζεται η αγωγιμότητα σε μικρότερες αποστάσεις. Η δεύτερη άποψη θα επιβεβαιωνόταν εάν δεν προέκυπτε διαφορά ως προς την F – χρονοδιασπορά ανάμεσα στους δύο ερεθισμούς (άπω και εγγύς).

ii. Υλικό-Μεθοδολογία

Στη μελέτη μας πήραν μέρος 10 υγιή νεαρά άτομα (5 άνδρες και 5 γυναίκες) ηλικίας $27,1 \pm 4,6$ ετών. Τα άτομα αυτά ανήκαν στο τεχνικό ή νοσηλευτικό προσωπικό του νοσοκομείου. Τα άτομα αυτά επιλέχθηκαν προσεχτικά μετά από λεπτομερή λήψη ιστορικού και πλήρη νευρολογική εξέταση για να αποκλειστούν άτομα με σακχαρώδη διαβήτη, νόσο του συνδετικού ιστού ή άλλη νόσο που να σχετίζεται με πολυνευροπάθεια. Επίσης, κανένα από τα άτομα που πήραν μέρος στη μελέτη δεν έπαιρνε φάρμακα ή έκανε υπερβολική χρήση αλκοόλ. Οι ασθενείς πριν την εξέταση ενημερώθηκαν με απλά λόγια για το σκοπό και τη διαδικασία της μελέτης, δίνοντας έμφαση στη σημασία της μυϊκής χαλάρωσης ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη συνεργασία με τον εξεταζόμενο. Τοποθετήθηκαν αναπαυτικά σε ανακλινόμενη θέση, με τα άνω άκρα όταν εξεταζόταν το ωλένιο νεύρο να είναι τοποθετημένα σε πλαϊνά στηρίγματα. Μέσω ενός θερμομέτρου επιφανείας το οποίο επικολλήθηκε στο δέρμα, διατηρήθηκε η θερμοκρασία του δέρματος των μελών στους 33 ± 0.5 °C σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας καταγραφής των F - wave.

Για τη μελέτη μας χρησιμοποιήθηκε συσκευή ηλεκτρομυογραφίας Keyport ver. 3.25 (Medtronic – Dantec Electronics) δύο καναλιών. Η μέτρηση της κινητικής ταχύτητας αγωγής και η μελέτη των F - wave έγινε στη μη επικρατούσα πλευρά. Για τον ερεθισμό των νεύρων χρησιμοποιήθηκε διπολικό ηλεκτρόδιο με εμβαπτισμένα σε αλατούχο διάλυμα τσόχινα πέλματα (με κάθοδο διαμέτρου 6 mm και σε απόσταση 23 mm από την άνοδο διαμέτρου επίσης 6 mm). Για τη λήψη των F – wave, το ηλεκτρόδιο ερεθισμού με την κάθοδο περιφερικά, στερεώθηκε στο κατάλληλο σημείο με πλαστική αυτοκόλλητη ταινία ώστε να αποφεύγονται μετακινήσεις αυτού κατά τη διάρκεια της εξέτασης. Η καταγραφή του σύνθετου μυϊκού δυναμικού έγινε με δυο επιφανειακά ηλεκτρόδια αποτελούμενα από δίσκους από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 10 mm ενσωματωμένους σε πλαστική βάση και η απόσταση των οποίων από κέντρο σε κέντρο ήταν 30 mm. Για τη μελέτη του F - wave στο ωλένιο νεύρο τα επιφανειακά καταγραφικά ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν πάνω από το κινητικό σημείο του απαγωγού του μικρού

δακτύλου μυ (το ενεργό ηλεκτρόδιο στο μέσον της γραμμής που ενώνει την πέμπτη μετακαρποφαλαγγική άρθρωση με το πισσοειδές οστό). Για τη μελέτη του F - wave στο περνιαίο νεύρο τα καταγραφικά ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν πάνω από το κινητικό σημείο του βραχύ εκτείνοντος τους δακτύλους μυ (το ενεργό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε τρία δάκτυλα περιφερικά από το κατώτερο χείλος του έξω σφυρού, παράλληλα με το έξω χείλος του άκρου πόδα).

Ένας ερεθιστής σταθερού ρεύματος διένεμε παλμούς τετράγωνης κυματομορφής με συχνότητα 1 Hz και διάρκεια 0.2 msec.

Αναφορικά με την ένταση του ερεθίσματος, χρησιμοποιήθηκε ερέθισμα υπερμέγιστης έντασης, δηλαδή 25% πάνω από το επίπεδο που απαιτείται για την εμφάνιση σύνθετου μυϊκού προκλητού δυναμικού μέγιστου εύρους.

Τα F - wave μελετήθηκαν με καθοδικό ερεθισμό του ωλένιου νεύρου στον καρπό και ακολούθως στην ωλένια αύλακα του αγκώνα και του περνιαίου νεύρου στην πρόσθια επιφάνεια της ποδοκνημικής άρθρωσης, μεταξύ των σφυρών και ακολούθως κάτωθεν της κεφαλής της περόνης. Κάθε συνεδρία περιλάμβανε 40 διαδοχικά ερεθίσματα σε κάθε θέση ερεθισμού των ανωτέρω νεύρων.

Για όλες τις προκλητές απαντήσεις το σήμα καταγράφηκε σε μία ζώνη φιλτραρίσματος μεταξύ 20 Hz και 10 kHz, η ευαισθησία ορίστηκε στα 0,5 mV/Div., η ταχύτητα σάρωσης στα 5 msec/Div. όταν επρόκειτο για ερεθισμό του ωλένιου νεύρου και 10 msec/Div. όταν επρόκειτο για ερεθισμό του περνιαίου νεύρου.

Ο λανθάνων χρόνος υπολογίστηκε από το παράσιτο του ερεθίσματος έως την έναρξη του μυϊκού δυναμικού M του οποίου η αρχική απόκλιση ήταν πάντα αρνητική και αρνητική ή θετική για το F - wave. Όταν δύο ξεχωριστά F - wave ελήφθησαν ως απάντηση σε ένα ερέθισμα, αυτά θεωρήθηκαν ως ανεξάρτητα για τις μετρήσεις των λανθανόντων χρόνων. Οι λανθάνοντες χρόνοι του συνόλου των F - wave που ελήφθησαν από κάθε νεύρο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανομής των ταχυτήτων των κινητικών ινών του νεύρου αυτού. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας μετρήθηκε το μήκος του νεύρου από το σημείο ερεθισμού έως τα πρόσθια κέρατα του νωτιαίου μυελού. Συγκεκριμένα για το ωλένιο νεύρο μετρήθηκε η απόσταση από τα σημεία ερεθισμού στον καρπό και ακολούθως από τον αγκώνα έως την ακανθώδη απόφυση του έβδομου αυχενικού σπονδύλου, με

το άνω άκρο ύπτια, σε έκταση και απαγωγή 90⁰ στον ώμο και ελαφρά κάμψη στον αγκώνα. Για δε το περνιαίο νεύρο μετρήθηκε η απόσταση από το σημείο ερεθισμού στην ποδοκνημική και ακολούθως από την κεφαλή της περόνης έως την ακανθώδη απόφυση του πρώτου οσφυϊκού σπονδύλου, με το άκρο σε έκταση και περνώντας τη μετρική ταινία από την περιοχή του μείζονα τροχαντήρα.

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων αγωγιμότητας των F - wave (FCVs) και εντέλει της ταχεοδιασποράς χρησιμοποιήθηκε ο τύπος: $FCV_x = (2 * Distance / Flat_{min} - Mlat - 1) * [(Flat_{min} - 1) / (Flat_x - 1)]$, όπου x = κάθε κύμα F, Distance = η απόσταση μεταξύ του σημείου ερεθισμού και του A7 (ωλένιο) ή O1 (περνιαίο) σπονδύλου, Mlat = λανθάνων χρόνος της άμεσης απάντησης M.

Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική αφορά στη συλλογή καινούργιων δεδομένων, κατατέθηκε ως πρωτόκολλο στην Επιτροπή Έρευνας Ηθικής και Δεοντολογίας του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Πατρών όπου ανήκει η επιβλέπουσα Καθηγήτρια και όπου έγινε η συλλογή των στοιχείων. Η έγκριση από την εν λόγω επιτροπή δόθηκε με την υπ. αρ. 64/12.2.2019 απόφασή της, η οποία εγκρίθηκε με το υπ' αριθ. 5632/25.2.19 έγγραφο του Επιστημονικού Συμβουλίου του Νοσοκομείου και εν τέλει έγινε αποδεκτή κατά την αρ. 13/10-04-2019 τακτική συνεδρίαση του Διοικητικού Συμβουλίου του Νοσοκομείου (Θέμα 42^ο).

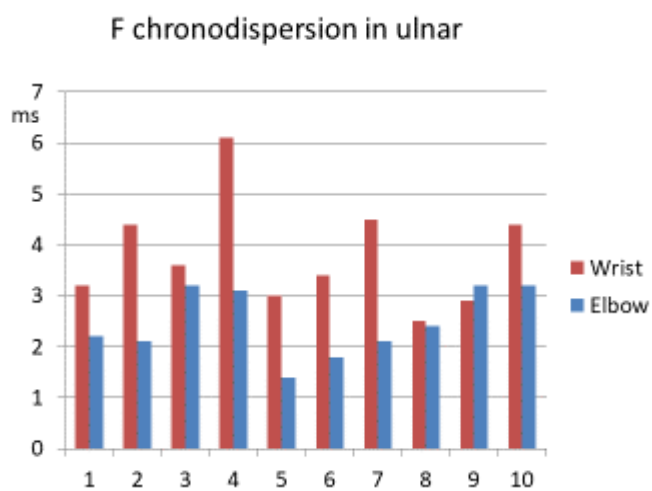
iii. Αποτελέσματα

Για το ωλένιο νεύρο η χρονοδιασπορά F, δηλαδή η $Flat_{max} - Flat_{min}$, ήταν σημαντικά μικρότερη στον αγκώνα (μέση τιμή \pm sd = $2,5 \pm 0,7$) σε αντίθεση με τον καρπό ($3,8 \pm 1,0$, ζεύγος t-test, $p = 0,003$). Ομοίως για το περνιαίο νεύρο, η χρονική διασπορά F ήταν μικρότερη στην κεφαλή της περόνης ($3,7 \pm 1,7$) σε σχέση με την ποδοκνημική ($5,2 \pm 2,0$, $p = 0,003$). Το εύρος των FCV ήταν σχετικά μικρότερο κατά μήκος του τμήματος αγκώνας - σπονδυλική στήλη (ΣΣ) ($7,3 \pm 2,5$, όρια ομάδας των FCV: 56 - 76 m/s) έναντι του τμήματος καρπός - ΣΣ ($9,1 \pm 2,7$, $p = 0,06$, 54 - 72). Ομοίως μικρότερη ήταν κατά μήκος του τμήματος κεφαλή περόνης - ΣΣ ($4,3 \pm 1,9$, 40 - 52 m/s) έναντι του τμήματος ποδοκνημική - ΣΣ ($5,3 \pm 2,2$, $p = 0,05$, 38 - 50 m/s). Στον Πίνακα 1 και στις Εικόνες 1 - 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα προαναφερθέντα αποτελέσματα.

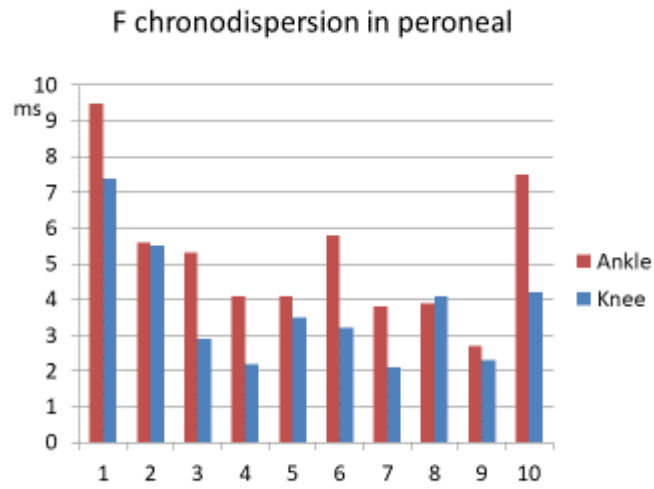
Πίνακας 1

	Ωλένιο ν.			Περοναίο ν.		
	Καρπός	Αγκώνας	P	Ποδοκνημική	Γόνατο	p
Διασπορά λανθανόντων χρόνων (ms)						
Μέση τιμή ± σταθερή απόκλιση	3,8±1,0	2,5±0,7	0,003	5,2±2,0	3,7±1,7	0,003
Μέγιστη – Ελάχιστη τιμή	2,5 -6,1	1,4 -3,2		2,7 -9,5	2,1 -7,4	
Ταχεοδιασπορά (m/s)						
Μέση τιμή ± σταθερή απόκλιση	9,1±2,7	7,3±2,5	0,064	5,3±2,2	4,3±1.9	0,056
Μέγιστη – Ελάχιστη τιμή	6,9-15,3	3,8-10,9		3,1-10,4	2,3-7,9	
Μέγιστη – Ελάχιστη ταχύτητα (m/s)	54-72	56-76		38-50	40-52	

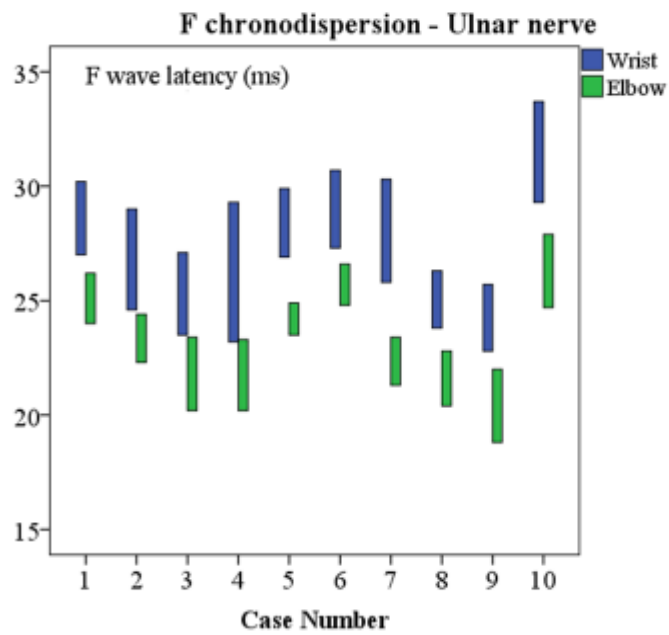
Εικόνα 1



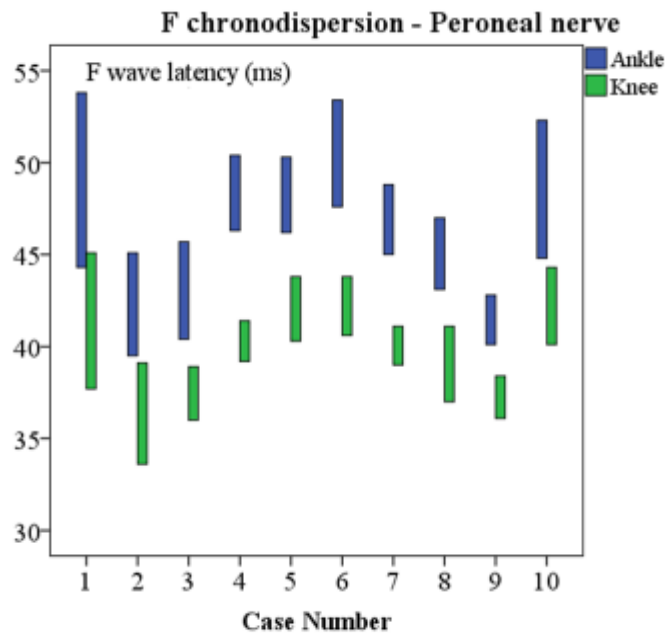
Εικόνα 2



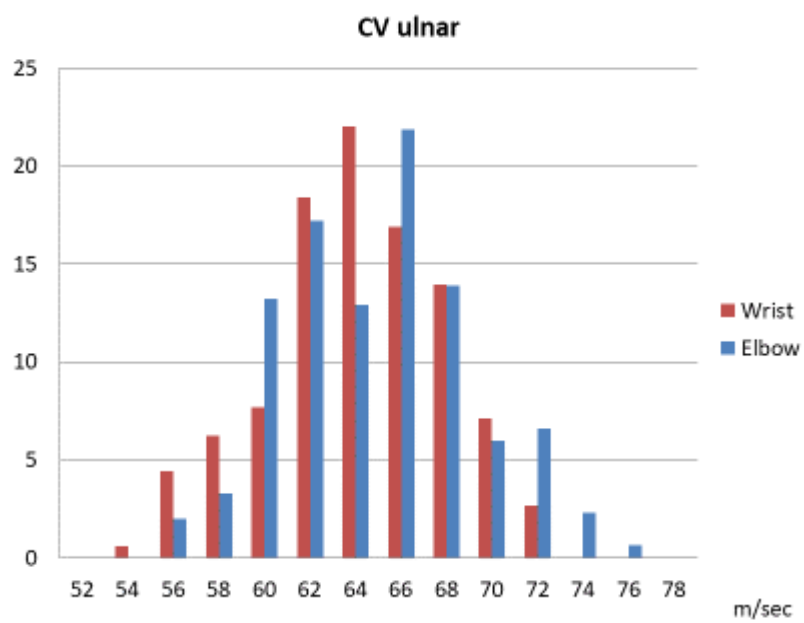
Εικόνα 3



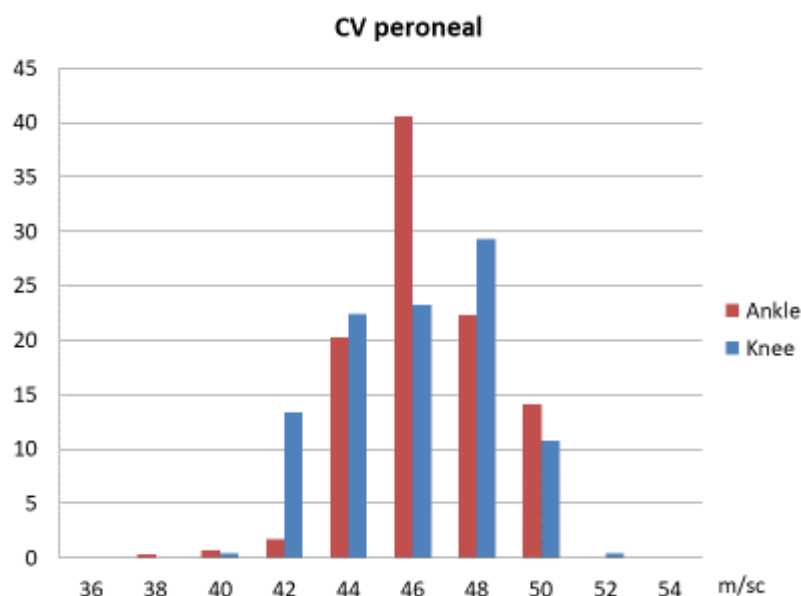
Εικόνα 4



Εικόνα 5



Εικόνα 6



iv. Συζήτηση

Η χρήση του F – wave ως συμπληρωματική εξέταση των συμβατικών μεθόδων υπολογισμού της αγωγιμότητας των περιφερικών νεύρων έχει καταστεί αναγκαία, αφού δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της ταχύτητας των κινητικών ινών καθ' όλο το μήκος αυτών, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που μετρούν την αγωγιμότητα σε ένα περιορισμένο περιφερικό τμήμα των κινητικών νεύρων.^{62,63,64}

Η δυνατότητα αυτή του F – wave είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στα κάτω άκρα, αφού άνωθεν του γόνατος και για ένα πολύ σημαντικό τμήμα των νεύρων από το σημείο αυτό έως το νωτιαίο μυελό δεν υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης της αγωγιμότητας αυτών μέσω των συμβατικών μεθόδων. Ο λανθάνων χρόνος όμως του F – wave ποικίλει από το ένα ερέθισμα στο επόμενο. Ως εκ τούτου έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με τον καλύτερο τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να εκφραστεί η κινητική αγωγιμότητα των νεύρων. Η μέτρηση του μικρότερου λανθάνοντα χρόνου έχει προταθεί ως μέσο για τον καθορισμό της παθολογίας σε ένα συγκεκριμένο

νεύρο. Η δυσκολία όμως στη χρήση του μικρότερου λανθάνοντα χρόνου προκύπτει από το γεγονός ότι αυτή η μελέτη βασίζεται σε μία μιμική ίνα. Εάν υπάρχει μία σημαντική βλάβη στο περιφερικό νευρικό σύστημα αλλά μία ή λίγες από τις ταχύτερα άγουσες ίνες έχει διασωθεί τότε η συγκεκριμένη μελέτη θα εμφανίζεται ως φυσιολογική. Η πιο λογική προσέγγιση θεωρείται ο υπολογισμός της μέσης τιμής μίας ομάδας καταγραφόμενων F - wave. Η μέση έναρξη των λανθανόντων χρόνων 10 ή περισσότερων F – wave πιστεύεται ότι είναι περισσότερο ευαίσθητη από τον καθορισμό του ταχύτερου F – wave.⁶⁵ Το 1979 ο Παναγιωτόπουλος κατέθεσε την άποψη ότι η ποικιλία των F – wave δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της κινητικής ταχύτητας αγωγής όχι μόνο των ταχύτερων ινών αλλά όλου του φάσματος των ινών που άγουν F – wave. Για να περιγράψει τη διασπορά ή το διασκορπισμό των σχετικών λανθανόντων χρόνων στατιστικώς σημαντικού αριθμού διαδοχικών F – wave, εισήγαγε τη μέθοδο της F – χρονοδιασποράς.⁴¹ Με τη μέθοδο αυτή διαπίστωσε μία παθολογικά αυξημένη F – χρονοδιασπορά λόγω της ποικίλης προσβολής των διαφόρων υποπληθυσμών νευρικών ινών, σε νεύρα ασθενών με ουραιμική νευροπάθεια στα οποία η μέγιστη κινητική ταχύτητα υπολογισμένη με τη συμβατική μέθοδο του M δυναμικού ή του F – wave ήταν φυσιολογική.⁶⁶ Σε μία σειρά από μελέτες στη συνέχεια έδειξε ότι η μέθοδος αυτή είναι πιο ευαίσθητη από τις συνηθισμένες τεχνικές, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η μέτρηση του μικρότερου λανθάνοντα χρόνου, στη διερεύνηση ήπιων νευροπαθειών ποικίλης αιτιολογίας.^{67,68,69} Στη μελέτη μας εκτός από την F – χρονοδιασπορά μετρήσαμε και την F – ταχεοδιασπορά η οποία εκφράζει την κατανομή των ταχυτήτων των μεμονωμένων ή μικρών ομάδων κινητικών νευρικών ινών. Η F – χρονοδιασπορά και η F – ταχεοδιασπορά παρότι βασίζονται στις ίδιες αρχές, διαφέρουν μεταξύ τους στο ότι η πρώτη αναφέρεται σε κατανομή σχετικών λανθανόντων χρόνων ενώ η δεύτερη σε κατανομή ταχυτήτων. Επίσης, στην F – χρονοδιασπορά παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ του μικρότερου και καθενός εκ των υπολοίπων λανθανόντων χρόνων. Στην F – ταχεοδιασπορά κάθε ταχύτητα υπολογίζεται από τον αντίστοιχο λανθάνοντα χρόνο, ανεξάρτητα από τις άλλες. Λόγω των διαφορών αυτών, η F – ταχεοδιασπορά παρέχει τη δυνατότητα διαπίστωσης ανωμαλιών των κινητικών ταχυτήτων ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η F – χρονοδιασπορά παρουσιάζεται φυσιολογική, όπως

π.χ. σε δυσανάλογα βαριά προσβολή των ταχέων ινών που οδηγεί σε συνάθροιση ινών με χαμηλές ταχύτητες ή σε περιπτώσεις που ο αριθμός των F – wave είναι μικρός λόγω μειωμένης συχνότητας ή ακολουθούμενης μεθοδολογίας. Μία άλλη διαφορά μεταξύ F – χρονοδιασποράς και F – ταχεοδιασποράς είναι ότι στατιστικά η F – χρονοδιασπορά εξαρτάται άμεσα από τις απόλυτες τιμές των λανθανόντων χρόνων με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απόλυτες τιμές να δικαιολογούν και μεγαλύτερες φυσιολογικές τιμές αυτής. Έτσι, όταν οι τιμές των λανθανόντων χρόνων στο σύνολό τους είναι παθολογικά αυξημένες, αναμένεται αύξηση της τιμής της F – χρονοδιασποράς, ακόμη και όταν δεν υπάρχει δυσανάλογη προσβολή των διαφόρων υποομάδων των κινητικών ινών. Αντίθετα, η επίδραση των απόλυτων τιμών των ταχυτήτων στην τιμή της F – ταχεοδιασποράς δεν είναι τόσο σημαντική, αφού η μεταξύ τους σχέση έχει τροποποιηθεί κατά τον υπολογισμό από τους αντίστοιχους χρόνους (πρόσθεση / αφαίρεση σταθερών παραγόντων). Τέλος, η χρήση ταχυτήτων αντί λανθανόντων χρόνων προσφέρει τη δυνατότητα για απευθείας συγκρίσεις μεταξύ ομάδων με διαφορετικό ύψος. Η χρήση νομογραμμάτων που έχει προταθεί σαν εναλλακτική λύση και στα οποία υπάρχει συσχέτιση ύψους ή μήκους του άκρου για την εκτίμηση του $Flat_{min}$,⁷⁰ δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί και στην εκτίμηση της κατανομής των χρόνων, αφού σε κάθε νεύρο αντιστοιχούν πολλαπλές τιμές. Στη χρησιμοποίηση των ταχυτήτων αντί των λανθανόντων χρόνων έχουν εκφρασθεί αντιρρήσεις, λόγω της πιθανότητας λάθους κατά τη μέτρηση του μήκους του άκρου και των επιπλέον υπολογισμών που απαιτούνται.⁷⁰ Όμως, στην πραγματικότητα η πιθανότητα λάθους δεν είναι μεγαλύτερη από άλλες μετρήσεις μήκους που είναι γενικά αποδεκτές, όπως στη μέτρηση του δυναμικού M ή στην εκτίμηση της τιμής του $Flat_{min}$ με βάση τα νομογράμματα ύψους ή μήκους άκρου.

Έρευνες που έχουν γίνει τόσο σε ανθρώπους όσο και σε πειραματόζωα, έχουν αποκαλύψει ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να παραχθούν F – wave από τους συγκριτικά μεγαλύτερους κινητικούς νευρώνες.^{19,22} Οι μεγάλοι κινητικοί νευρώνες καταλήγουν σε σχετικά μεγάλους άξονες οι οποίοι και έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα αγωγής από τους μικρότερους κινητικούς νευρώνες. Επίσης, οι μεγαλύτεροι κινητικοί νευρώνες νευρώνουν

περισσότερες μυϊκές ίνες, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερες κινητικές μονάδες με μεγαλύτερο μέγεθος F – wave. Ως εκ τούτου τα F – wave που καταγράφονται προέρχονται κυρίως από τους νευράξονες με την ταχύτερη αγωγιμότητα και οι οποίοι έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος διαμέτρου. Σε αυτήν την κατανομή των διαμέτρων περιλαμβάνονται άξονες που μεταφέρουν F – wave με ελαφρά διαφορετικές ταχύτητες αγωγής. Η ποικιλία των λανθανόντων χρόνων των F – wave αντιπροσωπεύει την κατανομή των ταχυτήτων αγωγής των αξόνων που μεσολαβούν στις παλίνδρομες απαντήσεις.

Με βάση το δεδομένο ότι το 1 – 2 % των κινητικών νευρώνων έχουν τη δυνατότητα να παράγουν F – wave μετά τις τμηματικές και υπερτμηματικές ανασταλτικές επιδράσεις, θα πρέπει να ερμηνευθεί η προτίμηση προς τους μεγάλους κινητικούς νευρώνες να παράγουν F – wave. Κατά πρώτον, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα οι μεγάλοι κινητικοί νευρώνες μέσω των παράπλευρων αξόνων που ενεργοποιούν τα κύτταρα Renshaw να αναστείλουν τη δράση των μικρότερων κινητικών νευρώνων.⁷¹ Αυτό συμβαίνει επειδή τα αντίδρομα ερεθίσματα που άγονται με μεγαλύτερη ταχύτητα αγωγής στους μεγαλύτερους άξονες (μεγαλύτεροι κινητικοί νευρώνες) φτάνουν στα κύτταρα Renshaw πριν από αυτά των μικρότερων αξόνων (μικρότεροι κινητικοί νευρώνες) με αποτέλεσμα να τα μπλοκάρουν. Κατά κάποιον τρόπο, οι ταχύτεροι άξονες συναγωνίζονται ο ένας τον άλλο για βέλτιστα επίπεδα δυναμικών ηρεμίας της μεμβράνης τους σε επαναλαμβανόμενες διεγέρσεις των κινητικών νευρώνων, αντίθετα οι μικρότεροι κινητικοί νευρώνες έχουν μειωμένη πιθανότητα να παράγουν ένα F – wave. Επίσης, είναι ευκολότερο για τα κύτταρα Renshaw να αναστείλουν τους μικρότερους κινητικούς νευρώνες, καθώς διαθέτουν μικρότερης έκτασης σωματική μεμβράνη που πρέπει να επηρεαστεί.^{26,72} Επίσης, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα βράχυνσης του χρόνου εκπόλωσης του σώματος των μικρότερων κινητικών νευρώνων που οφείλεται σε πτώση του ουδού αυτών πιθανά λόγω υπερτμηματικής επιρροής.⁷³ Είναι γνωστό ότι οι μικρότεροι κινητικοί νευρώνες πυροδοτούνται σε χαμηλότερο ουδό από ότι οι μεγάλοι κινητικοί νευρώνες, δημιουργώντας μία ομαλή επιστράτευση των κινητικών μονάδων (αρχή μεγέθους του Henneman).^{74,75} Συνεπώς, οι μικρότεροι κινητικοί νευρώνες σε

σύγκριση με τους μεγαλύτερους έχουν επίπεδα ηρεμίας της μεμβράνης που βρίσκονται κοντά στον ουδό εκπόλωσης. Αυτό μπορεί να αποτελεί ένα σημαντικό μηχανισμό στην αναστολή των επαναλαμβανόμενων εκφορτίσεων αφού το 70 - 80 % αυτών διαθέτει παλίνδρομους παράπλευρους κλάδους, συνεπώς μόνο το 20 – 30% που απομένουν δεν υπόκεινται σε παλίνδρομη (recurrent) αναστολή.⁷⁶ Αν ο ουδός είναι χαμηλότερος στους μικρότερους κινητικούς νευρώνες, αυτοί θα εκπολώνονται μάλλον γρήγορα, παράγοντας ένα δυναμικό δράσης στην περιοχή του σώματος – δένδριτη και ως εκ τούτου στη δημιουργία ενός τοπικού ηλεκτρικού κυκλώματος το οποίο δε θα έχει τη δυνατότητα να διεγείρει το λοφίσκο του άξονα επειδή αυτός θα βρίσκεται ακόμη σε ανερέθιστο περίοδο. Οι ανωτέρω μηχανισμοί ή η συνεργασία αυτών μπορεί να είναι ο λόγος που υπάρχει μία προτίμηση στην ενεργοποίηση των μεγαλύτερων κινητικών νευρώνων στην παραγωγή ανιχνεύσιμων F – wave. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να καταγραφεί ένας ικανός αριθμός F – wave προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το δείγμα των διαθέσιμων κινητικών νευρώνων που παράγουν F – wave είναι αντιπροσωπευτικό, αν και ο ακριβής αριθμός αυτών των αναγκαίων F – wave δεν είναι γνωστός. Πρακτικά, κατά το συνήθη ΗΔΓ έλεγχο σύμφωνα με πολλούς ερευνητές συνιστάται η καταγραφή 10 – 20 F – wave από κάθε θέση ερεθισμού, αφού η συγκέντρωση μεγαλύτερου αριθμού F – wave μπορεί μεν να αποφέρει κάποια λίγα με μικρότερο λανθάνοντα χρόνο, όμως η διαγνωστική τους αξία σε σχέση με το δαπανώμενο χρόνο και την ενόχληση του ασθενούς θεωρείται ως απαγορευτική.²⁵ Σε μία όμως ερευνητική μελέτη όπως η δική μας κατά την οποία πρέπει να διερευνηθεί λεπτομερώς και ακριβώς η διασπορά των λανθανόντων χρόνων των F – wave, (F – χρονοδιασπορά) προφανώς απαιτείται η καταγραφή μεγαλύτερου αριθμού αυτών. Έτσι στη μελέτη μας καταγράψαμε 40 F – wave από κάθε θέση ερεθισμού.

Στη μελέτη μας οι τιμές ταχύτητας αγωγής των F – wave, καθώς και οι τιμές της ταχεοδιασποράς συμφωνούν με τις ανωτέρω αναφερόμενες απόψεις σχετικά με τη μεγαλύτερη πιθανότητα που έχουν οι μεγαλύτεροι κινητικοί νευρώνες να παράγουν και να μεταφέρουν F – wave. Από την άλλη πλευρά, όσο μικρότερη απόσταση πρέπει να διανύσουν τα F – wave με διαφορετική ταχύτητα αγωγής, τόσο μικρότερες θα είναι και οι διαφορές στο λανθάνοντα

χρόνο αυτών. Αντίθετα, όταν διανύονται μεγαλύτερες αποστάσεις, οι διαφορές στους λανθάνοντες χρόνους θα είναι μεγαλύτερες, συνεπώς μεγαλύτερη θα είναι και η χρονοδιασπορά των F – wave. Αυτό αποτέλεσε και τη βάση της σκέψης μας προκειμένου να αποδείξουμε ότι ο βαθμός της χρονοδιασποράς οφείλεται στη διαφορά με την οποία άγεται το F – wave από τους διάφορους νευρώνες. Πράγματι, ο κεντρικότερος ερεθισμός του ωλενίου νεύρου στον αγκώνα και του περονιαίου νεύρου στην κεφαλή της περόνης, μας έδωσαν χαμηλότερη χρονοδιασπορά σε σχέση με τον ερεθισμό τους στον καρπό και την ποδοκνημική αντίστοιχα. Η άποψη που διατυπώθηκε από τον E. Stålberg ότι η χρονοδιασπορά μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της διαφορετικής απόστασης που έχουν οι κινητικές μονάδες από τη θέση καταγραφής και όχι από τις διαφορές στην αγωγιμότητα, δεν αποδεικνύεται από τη μελέτη μας. Αν είχε βάση η άποψη που διατύπωσε ο E. Stålberg, τότε θα έπρεπε η χρονοδιασπορά και στις δύο θέσεις ερεθισμού των νεύρων, κεντρική και περιφερική να είναι ίδια, αφού και στις δύο περιπτώσεις οι διαφορές απόστασης των κινητικών μονάδων από τη θέση καταγραφής θα παρέμεναν ίδιες. Καθώς οι μυϊκές ίνες που ανήκουν σε μία δεδομένη κινητική μονάδα έχουν ταυτόσημα ιστολογικά χαρακτηριστικά, σε ιστοχημικές μελέτες έχει αποδειχτεί ότι σε εγκάρσιες τομές των μυών υπάρχει μία τυχαία κατανομή ινών διαφορετικού ιστολογικού τύπου. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι υπάρχει μία σημαντική αλληλεπικάλυψη σε περιοχές γειτονικών μονάδων, οι μυϊκές ίνες των κινητικών μονάδων δεν είναι ομαδοποιημένες στο χώρο. Έτσι εξασφαλίζεται το πλεονέκτημα της ομαλής σύσπασης του μυός και η αναπλήρωση των απολεσθέντων κινητικών μονάδων.^{77,78} Η αλληλεπικάλυψη αυτή των κινητικών μονάδων από την άλλη πλευρά, σημαίνει ότι οι αποστάσεις αυτών από το σημείο καταγραφής, ιδιαίτερα στους μικρούς μυς όπως ο απαγωγός του μικρού δακτύλου ή ο βραχύς εκτείνων τους δακτύλους, είναι μικρές και ως εκ τούτου δε δικαιολογούν μεγάλες διαφορές στους λανθάνοντες χρόνους. Μία άλλη παράμετρος που θα καθιστούσε ίσως προβληματική την άποψη ότι η χρονοδιασπορά οφείλεται στη διαφορά της απόστασης από το σημείο καταγραφής, θα μπορούσε να είναι το γεγονός ότι αυτές οι διαφορές, ιδιαίτερα στους μικρούς μυς από τους οποίους γίνεται η καταγραφή των F – wave, αποτελούν ένα ελάχιστο μέρος του συνολικού μήκους που έχουν να διανύσουν αυτά, δηλαδή από το σημείο ερεθισμού

μέχρι το νωτιαίο μυελό και αντιστρόφως μέχρι το μυ καταγραφής. Άρα, αυτή η διαφορά στην απόσταση των κινητικών μονάδων από το σημείο καταγραφής δε θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις διαφορές στο λανθάνοντα χρόνο και συνεπώς στη χρονοδιασπορά που καταγράψαμε τόσο εμείς όσο και όλες οι άλλες μελέτες στο παρελθόν.

v. Συμπεράσματα

Το F – wave ως καθυστερημένο προκλητό δυναμικό, αποτελεί μέσο εξέτασης των εγγύτερων τμημάτων των περιφερικών νεύρων. Δίνει με αυτόν τον τρόπο πολύτιμες πληροφορίες σε μία σειρά παθολογικών καταστάσεων των περιφερικών νεύρων, ιδίως αυτών με πιο γενικευμένη κατανομή και μάλιστα στα αρχικά τους στάδια, κάτι που ενδεχομένως αποτυγχάνουν να δώσουν οι συμβατικές μελέτες αγωγιμότητας.

Τα F – wave μεταφέρονται κυρίως από τους μεγάλους ταχείας αγωγής κινητικούς νευρώνες, αλλά και από μικρότερους κινητικούς νευρώνες με βραδύτερη αγωγιμότητα. Οι διαφορές στο λανθάνοντα χρόνο των F – wave που εκφράζονται από την F – χρονοδιασπορά, οφείλονται, εν μέρει τουλάχιστον, στη διαφορετική αγωγιμότητα των κινητικών νευρώνων, όπως αυτό αποδείχτηκε από τις διαφορετικές τιμές F – χρονοδιασποράς σε κεντρικό και περιφερικό ερεθισμό. Συνεπώς μέσω της F - ταχεοδιασποράς μπορεί να εκφραστεί το εύρος των κινητικών ταχυτήτων κατά μήκος των περιφερικών νεύρων ανεξάρτητα από την απόσταση των κινητικών μονάδων από το σημείο καταγραφής.

Οι ταχύτητες στα εγγύς τμήματα είναι ελαφρώς μεγαλύτερες απ' ό,τι οι περιφερικές, στοιχείο που συμφωνεί με τις ταχύτητες που υπολογίζονται από το M response.

Βιβλιογραφία

1. Adams F. The Genuine Works of Hippocrates. New York: William Wood & Co., 1849
2. Mc Henry L. C.: Garrisons History of Neurology. Springfield, Illinois: Charles C. Thomas, 1969
3. Daniel R.K. Terzis J.K. Reconstructive Microsurgery. Boston: Little, Brown & Co., 1977
4. Hodes R., Larrabee M.G., German W.: The human electromyogram in response to nerve stimulation and conduction velocity of motor axons. Arch Neurol Psychiatry 60:340, 1948
5. Von Haller A. Elementa physiologiae corporis humani. Lausanne, Grasset, 1762.
6. Von Hellmontz H. Messungen Uber Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Reizes in der nerven. Arch Anat Physiol Med 1852;199
7. Von Hellmontz H. Vorläufiger Bericht über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der nervenreinzug. Arch Anat Physiol Med 1850;71
8. Erlanger J, Gasser HS: The absolute refractory period phase of the alpha, beta and gamma fibers in the sciatic nerve of the frog. Am J Physiol 1927;81:473-474
9. Hodes R: Selective destruction of large motor units by poliomyelitis virus. I. Conduction velocity of motor nerve fibers of chronic poliomyelitis patients. J Neurophysiol 1948;12:257-266
10. Dawson GD, Scott JW: The recording of nerve action potentials through the skin in man. J Neeurol Neurosurg Psychiatry 1949;12:259-267
11. Kimura, J. F - wave velocity in the central segment of the median and ulnar nerves. A study in normal subjects and in patients with Charcot-Marie-Tooth disease. Neurology 24;1974:539-546
12. Magladery, J.W. and McDougal, D.B. Electrophysiological studies of nerve and reflex in normal man. I. Identification of certain reflexes in

the electromyogram and the conduction velocity of peripheral nerves. Bull Johns Hopkins Hospital 86;1950:265-290.

13. Hagbarth KE: Post-tetanic potentiation in myotatic reflexes in man. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1962;25:1-10
14. Liberson WT: Monosynaptic reflexes and their clinical significance. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1962;(Suppl 22):79-89
15. Gassel MM, Wiesendanger M. Recurrent and reflex discharge in plantar muscles of the cat. Acta Physiol Scand 1965;65:138-142
16. Mayer RF, Feldman RG. Observations on the nature of the F-wave in man. Neurology 1967;17:147-156
17. Wulff, C.H. and Gilliatt, R.W. F-waves in patients with hand wasting caused by a cervical rib and band. Muscle Nerve 2;1979:452-457.
18. Schiller, H.H. and Stålberg, E. F-waves studied with single fibre EMG in normal subjects and spastic patients. J Neurol Neurosurg Psychiatry 41; 1978:45-53.
19. Guiloff, R.J. and Modarres-Sadeghi, H. Preferential generation of recurrent responses by groups of motor neurons in man. Conventional and single unit F-wave studies. Brain 114;1991:1771-1801
20. Renshaw B. Activity in the simplest spinal reflex pathways. J Neurophysiol 1940;3:373-387
21. Eisen A, Odusote K. Amplitude of the F-wave: A potential means of documenting spasticity. Neurology 1979;29:1306-1309
22. Kimura J, Yanagisawa H, Yamada T. et al. Is the F-wave elicited in a select group of motoneurons? Muscle Nerve 1984;7:392-399
23. Schmidt RF: Fundamental of Neurophysiology. New York , Springer-Verlag, 1985
24. Peioglou - Harmoussi S, Fawcett PRW, Howel D, et al: F-response: a study of frequency, shape, and amplitude characteristics in healthy control subjects. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1985;48:1159-1164

25. Dumitru D: *Electrodiagnostic Medicine*. Philadelphia, Hanley & Belfus, 1994
26. Eccles JC, Eccles, R.M., Iggo, A, and Ito, M. Distribution of recurrent inhibition among motoneurons. *J Physiol* 159;1961:479-499.
27. Cullheim, S. and Kellerth, J.O.. A morphological study of the axons and recurrent axon collaterals of cat alpha motoneurons supplying different hind-limb muscles. *J Physiol (London)* 281;1978: 285-299.
28. Burke, D., Gandevia., S.C., and McKeon, B. The afferent volleys responsible for spinal proprioceptive reflexes in man. *J Physiol* 339;1983: 535-552
29. Eccles, J.C., Fatt, P., and Koketsu. Cholinergic and inhibitory synapses in a pathway from motoraxon collaterals to motoneurons. *J Physiol* 126;1954:524-562
30. Dyck, P.J., Jedzcejowski, H., Karnes, J. et al. Reconstruction of motor, sensory and autonomic neurons based on morphometric study of sampled levels. *Muscle Nerve* 2;1979: 399-405.
31. Borg, J., Grimby, L., and Hannerz, S. Axonal conduction velocity and voluntary discharge properties of individual short toe extensor motor units in man. *J Physiol (Lond)* 277;1978:143-152.
32. Doherty, T.J. and Brown, W.F. A method for the longitudinal study of human thenar motor units. *Muscle Nerve* 17;1994:1029-1036.
33. Peiroglou-Harmoussi S, Howel D, Fawcett PRW, Barwick DD. F-response behaviour in a control population. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1985;48:1152-8
34. Petajan, J.H. F - waves in neurogenic atrophy. *Muscle Nerve* 1985;8: 609-696.
35. Bischoff, C., Stålberg, E., Falck, B, and Puksa, L. Significance of A - waves recorded in routine motor nerve conduction studies. *Electroenceph clin Neurophysiol* 101;1996: 528-533.

36. Puksa, L., Stålberg, E., Falck, B. Occurrence of A - waves in F - wave studies of healthy nerves. *Muscle Nerve* 28;2003:626-629.
37. Panayiotopoulos, C.P. and Chroni E. F-waves in clinical neurophysiology: a review, methodological issues and overall value in peripheral neuropathies. *Electroenceph clin Neurophysiol* 101;1996:365-374.
38. Fisher, M.A. F-wave latency determination. *Muscle Nerve* 5;1982:730-734
39. Taniguchi, M.H., Hayes, J., and Rodriguez, A.A. Reliability determination of F mean response latency. *Arch Phys Med Rehabil* 74;1993:1139-1143.
40. Chroni, E., Taub, N., and Panayiotopoulos, C.P. The importance of sample size for the estimation of F-wave latency parameters in the peroneal nerve. *Electroencephal clin Neurophysiol* 101;1996:375-378.
41. Panayiotopoulos, C.P. F chronodispersion: a new electrophysiologic method. *Muscle Nerve* 2;1979:68-72.
42. Fisher MA. Cross-correlation analysis of F response variability and its physiological significance. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1983;23:329-39.
43. Chroni, E. and Panayiotopoulos, C.P. F tachodispersion. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 56;1993:1103-1108.
44. Puksa, L., Stålberg, E., and Falck, B. Reference values of F-wave parameters in healthy subjects. *Clin Neurophysiol* 114;2003:1079-1090.
45. Wang FC, De Pasqua V, Delwaide PJ. Age related changes in fastest and lowest conducting axons of the thenar motor units. *Muscle Nerve* 1999;22:1022.

46. Ichikawa T, Yokota TF. F wave change by decreased motoneuronal excitability: a sleep study. *Bull Tokyo Med Dent Univ* 1994;41:15–22.
47. Seyal M, Mull B, Gage B. Increased excitability of the human corticospinal system with hyperventilation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1998;109:263–7.
48. Kiers. L., Clouston, P., Zunigz, G., and Cros D. Quantitative studies of F-waves in Guillain-Barré syndrome and chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy. *Electroenceph clin Neurophysiol* 93;1994:255-264.
49. Fraser, J.L. and Olney, R.K. The relative diagnostic sensitivity of different F-wave parameters in various polyneuropathies. *Muscle Nerve* 15;1992 912-918.
50. Kohara, N., Kimura, J., Kaji, R., Goto, Y., and Ishii, J. (1996) Multicenter analysis on intertribal variability of nerve conduction studies: healthy subjects and patients with diabetic neuropathies. In: Kimura. J., Shibishaski, H, editors. *Recent Advances in Clinical Neurophysiology*. Amsterdam: Elsevier; pp 809-815.
51. Andersen, .H, Stålberg, E., and Falck, B. F-wave latency sensitive nerve conduction parameter in patients with diabetes mellitus. *Muscle Nerve* 20;1997:1296-1302
52. Toyokura, M. F-wave duration in diabetic polyneuropathy. *Muscle Nerve* 21;1998:246-249.
53. Sakamoto, Y., Nakamura, T., and Tagaki, K. Functional and morphological changes of lumbar nerve roots induced by mechanical compression of the nucleus pulposus in contact with the root: analysis of fiber-size dependent vulnerability in rabbits. *J Orthop Sci.* 9;2004:598-604.

54. Wilbourn, A.J. , and Aminoff, M.J.. AANEM minimonograph #32: The electrodiagnostic examination in patients with radiculopathies. *Muscle Nerve* 21;1998:1621-1631.
55. Levin, K.H., Maggiano, H.J., and Wilbourn, A.J. Cervical radiculopathies: comparison of surgical and EMG localization of single-root lesions. *Neurology* 46;1996:1022-1025.
56. Berger, A.R., Sharma, K., and Lipton, R.B. Comparison of motor conduction abnormalities in lumbosacral radiculopathy and axonal polyneuropathy. *Muscle Nerve* 22;1999:1053-1057.
57. Scelsa, S.N., Herskovitz, S., and Berger A. R.. The diagnostic utility of F-waves in L5/S1 radiculopathy. *Muscle Nerve* 18;1995:1496-1497.
58. Toyokura, M. and Murakami, K. F-wave study in patients with lumbosacral radiculopathies. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 37;1997:19-26.
59. Toyokura, M., Ishida, A., and Murakami, K. Follow-up study on F-wave in patients with lumbosacral radiculopathy. Comparison between before and after surgery. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 36;1996:207-214.
60. Tullberg, T., Svanborg, E., Isaccsson, J., and Grane, P. A preoperative and postoperative study of the accuracy and value of electrodiagnosis in patients with lumbosacral disc herniation. *Spine* 7;1993:837-842.
61. Weber, F. and Albert, U. Electrodiagnostic examination of lumbosacral radiculopathies. *Electromyogr clin Neurophysiol* 40;2000:231-236.
62. Kimura J, Butzer JF. F-wave conduction velocity in Guillain-Barre syndrome. *Arch Neurol* 1975; 32:524-529.
63. Kimura J. Principles and pitfalls of nerve conduction studies. *Ann Neurol* 1984; 16:415-429.

64. Kimura J. Clinical value and limitations of F-wave determination. A comment. *Muscle & Nerve* 1978; 1:250-251
65. Eisen A, Hoirch M, White J, et al: Sensory group Ia proximal conduction velocity. *Muscle Nerve* 1984;7:636-641 Fisher MA: F response latency determination. *Muscle Nerve* 1982;5:730-734)
66. Panayiotopoulos CP, Scarpalezos S. F wave studies on the deep peroneal nerve. Part 2. 1-Chronic renal failure 2. Limb-girdle muscular dystrophy. *J Neurol Sci* 1977; 31:331-341
67. Argyropoulos CJ, Panayiotopoulos CP, Scarpalezos S, Nastas PE. F-wave and M-response conduction velocity in diabetes mellitus. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1979; 19(5):443-458.
68. Panayiotopoulos CP, Scarpalezos S, Argyropoulos C, Nastas PE. F chronodispersion application of a new electrophysiological method in control subjects and patients with suspected neuropathy. In den Hartog Jager WA, Bruyn GW, Heijstee APJ (Editors): 11th World Congress of Neurology, Amsterdam, Excerpta Medica 1977; 427:19.
69. Panayiotopoulos CP, Chroni E. F-tachodispersion and F-chronodispersion. I: Control subjects. *J Neurol Neurosurg and Psychiatry* 1992; 55:421-422.
70. Young RR, Shahani BT. Clinical value and limitations of F-wave determination *Muscle & Nerve* 1978; 1:248-249.
71. Dumitru D, Walsh NE, Porter LD: Electrophysiologic evaluation of the fascial nerve in Bell's palsy. *Am J Phys Med Rehabil* 1988;67:137-144
72. Granit R, Pascoe JE, Steg G: The behavior of tonic a and g motoneurons as measured by recurrent inhibition. *J Physiol* 1957;138:381-400
73. Renshaw B. Influence of discharge of motoneurons upon excitation of neighboring motoneurons. *J Neurophysiol* 1941;4:167-183

74. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO: Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 1965;28:560-580
75. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO: Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. *J Neurophysiol* 1956;28:599-620
76. Scheibel ME, Scheibel AB: Spinal motoneurons, interneurons and Renshaw cell: a Golgi study. *Arch Ital Biol* 1966;104:328-353
77. Johnson MA, et al. Data on the distribution of fibre types in thirty – six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci* 18:111, 1973
78. Stephens JA, Usherwood TP. The mechanical properties of human motor units with special reference to their fatigability and recruitment threshold. *Brain Res* 125:91, 1977