

Ηλεκτρικός Ερεθισμός Εννευρωμένων Μυών

Συγκριτική αξιολόγηση των κινητικών και αισθητικών αποτελεσμάτων οκτώ προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού με διαφορετική συχνότητα ρεύματος και διάρκεια παλμού

Γεώργιος Παπαθανασίου, BSc., MSc.

Καθηγητής Εφαρμογών στο Τμήμα Φυσικοθεραπείας του ΤΕΙ Αθήνας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διάφοροι μέθοδοι ηλεκτρικού ερεθισμού (ΗΕ) χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα για την επανεκπαίδευση απονευρωμένων μυών, την πρόληψη ατροφιών, την αύξηση της δύναμης και τη βελτίωση της αντοχής φυσιολογικά εννευρωμένων μυών. Η αξία του ΗΕ, τόσο στην επανεκπαίδευση απονευρωμένων μυών όσο και στην διατήρηση αλλά και αποκατάσταση της λειτουργικής ικανότητας των εννευρωμένων μυών, (π.χ. μετά από κάκωση ή χειρουργική επέμβαση), είναι αναμφισβήτητη και τεκμηριωμένη με πολλές κλινικές και ερευνητικές εργασίες.

Αντίθετα, η προσεκτική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας οδηγεί τον αναγνώστη στο συμπέρασμα ότι, δεν είναι ενιαία παραδεκτή η αποτελεσματικότητα του ΗΕ στην αύξηση της δύναμης "υγιών" εννευρωμένων μυών. Πολλές εργασίες αναφέρουν την υπεροχή των προγραμμάτων ενεργητικής άσκησης στην αύξηση της μυϊκής δύναμης, άλλες δίνουν το προβάδισμα στον ηλεκτρικό ερεθισμό με ειδικά διαμορφωμένα ηλεκτρικά ρεύματα, ενώ άλλου υ-

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των κινητικών αποτελεσμάτων 8 προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού (ΗΕ). Χρησιμοποιήθηκαν συχνότητες κοντά στα 100 HZ, ενώ η διάρκεια παλμού του ρεύματος κυμαινόταν μεταξύ των 0.7 ms και 1 ms. Τα 8 προγράμματα ΗΕ εφαρμόστηκαν με τυχαία σειρά σε 17 σπουδαστές του τμήματος Φυσικοθεραπείας του ΤΕΙ Αθήνας. Τα προγράμματα ΗΕ με διάρκεια παλμού 1 MS έδωσαν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ($P < 0.01$) μέγιστης ροπής (Peak Torque) συγκριτικά με τις διάρκειες των 0.7 ms και 0.8 ms. Αντίθετα, καμία σημαντική συσχέτιση δεν φάνηκε να συνδέει την συχνότητα των ρευμάτων και την ένταση των ισομετρικών συστολών όπως μετρήθηκαν με το ισοκινητικό δυναμόμετρο Cybex II. Ανάλογη επεξεργασία των στοιχείων έδειξε ότι η αισθητική αποδοχή των προγραμμάτων ΗΕ είναι ανάλογη με την διάρκεια παλμού του ρεύματος που χρησιμοποιείται. Έτσι, η επιλογή διάρκειας 1 ms συνοδεύτηκε από σημαντικά πιο δυσάρεστο αισθητικό αποτέλεσμα, σε σύγκριση με παλμούς μικρότερης διάρκειας. Αντίθετα η διαφοροποίηση της συχνότητας του ρεύματος δεν επηρέασε σημαντικά την αισθητική αποδοχή του ηλεκτρικού ερεθισμού σε καμία περίπτωση.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικός Μυϊκός Ερεθισμός, Ηλεκτροθεραπεία

Key Words: Electrical Muscle Stimulation, Electrotherapy

ποστηρίζεται ότι ο συνδυασμός ενεργητικής άσκησης με ταυτόχρονο ηλεκτρικό ερεθισμό παρέχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.¹⁶

Είναι φανερό ότι η επίλυση του προβλήματος, όπως προκύπτει από την προηγούμενη αντιπαράθεση απόψεων, παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό αλλά και κλινικό ενδιαφέρον. Για παράδειγμα, στην αθλητική ιατρική, ο ΗΕ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και στους υγιείς αθλητές για την παρόερα βελτίωση της λειτουργικής ικανότητας (δύναμη, αντοχή, ταχύτητα συστολής κλπ.) εξειδι-

κευμένων μυϊκών συστημάτων, ανάλογα με το αγώνισμα ή τη δραστηριότητα.

Για τον μελετητή που θα προσπαθήσει να συγκρίνει τις πλείστες μεθόδους ΗΕ που δημοσιεύονται στην διεθνή βιβλιογραφία, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα η τρομερά μεγάλη ποικιλία παραμέτρων που διαμορφώνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα που χρησιμοποιούνται.

Οι συχνότητες που αναφέρονται σε διάφορες εργασίες που ασχολούνται με τον ΗΕ εννευρωμένων μυών αρχίζουν από τα 20

Hz και φθάνουν τα 200 Hz.¹⁶ Επίσης, αρκετά διαδεδομένη είναι η εφαρμογή της "Ρωσικής Τεχνικής", (από τον Σοβιετικό KOTS), με συχνότητες ανάμεσα στα 2000Hz και 2500 Hz, που με κατάλληλη διαμόρφωση αποδίδει στον μυ, ερεθιστικό ρεύμα με ρυθμό 50 πολυφασικών παλμών ανά δευτερόλεπτο.^{7,9}

Η διάρκεια των παλμών στα ρεύματα που εφαρμόζονται, κυμαίνεται από τα 100μs (0.1 ms) έως τα 10 ms, με συνηθέστερη επιλογή στο φάσμα των 0.5 ms έως 2 ms.¹⁰ Η ένταση του ρεύματος ποικίλει από 15 mA έως 80 mA, προκειμένου για ερεθιστές που χρησιμοποιούν γεννήτριες χαμηλής τάσης. Η μορφή του ρεύματος περιλαμβάνει συνήθως τετράγωνους μονοφασικούς παλμούς, ενώ αναφέρονται και διφασικοί παλμοί με τετράγωνη την ενεργό (ερεθιστική) φάση και τριγωνική - μικρής αιχμής - την αρνητική φάση. Η "ρωσική τεχνική" χρησιμοποιεί πολυφασικό διακοπτόμενο ημιτονοειδές ρεύμα.¹²

Όπως συνάγεται από όσα έχουν ήδη αναφερθεί, είναι πολύ δύσκολη η ανάδειξη ενός συστήματος παραμέτρων ΗΕ στο οποίο θα συμφωνούσαν οι περισσότεροι ερευνητές και το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο νέων δοκιμασιών, ώστε να επαληθευθεί η αποτελεσματικότητα στη βελτίωση της λειτουργικής ικανότητας "υγιών" εννευρωμένων μυών.

Το πρόβλημα αυτό επισημαίνεται και στη μελέτη του J.F. Kramer (1987). Η προσπάθεια, όμως, του συγγραφέα αφιερώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση 3 προγραμμάτων ΗΕ που διαφοροποιούνται μόνο στην συχνότητα του ρεύματος (20Hz, 50Hz και 100Hz) και όχι στη διάρκεια του παλμού, που αποτελεί επίσης μια σημαντική

**Σκοπός
της εργασίας αυτής
ήταν η συγκριτική
αξιολόγηση των κινητικών
και αισθητικών
αποτελεσμάτων
οκτώ προγραμμάτων
ηλεκτρικού ερεθισμού
με διαφορετικούς
συνδυασμούς
διάρκειας παλμού
και συχνότητας ρεύματος**

παράμετρο ερεθισμού.¹³ Επικεντρώνοντας την προσοχή μας στο ίδιο ερώτημα, προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε την αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών ρευμάτων με φέρουσα συχνότητα ανάμεσα στα 100Hz έως 200Hz και διάρκεια παλμού μεταξύ των 0.5ms και 2ms.

Σκοπός, λοιπόν, της εργασίας αυτής ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των κινητικών και αισθητικών αποτελεσμάτων οκτώ προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού με διαφορετικούς συνδυασμούς διάρκειας παλμού και συχνότητας ρεύματος. Ειδικότερα, έγινε προσπάθεια να μετρηθεί η ισομετρική δύναμη του τετρακεφάλου μύος που αναπτύσσεται κατά τον ΗΕ με τα διάφορα συστήματα παραμέτρων και να αξιολογηθεί η αισθητική αποδοχή του κάθε προγράμματος ξεχωριστά.

ΜΕΘΟΔΟΣ

Άτομα

Είκοσι νεαροί σπουδαστές του Τμήματος Φυσικοθεραπείας του ΤΕΙ Αθήνας συμμετείχαν στην εργασία έχοντας επιλεγεί τυχαία από μεγαλύτερο δείγμα εθελοντών σπουδαστών. Όλα τα άτομα είχαν φυσιολογικό βάρος για την ηλικία και το ύψος τους, κανένα ιστορικό ορθοπαιδικής κάκωσης, η υγεία τους ήταν σε καλή κατάσταση, ενώ δεν ακολουθούσαν κανένα ιδιαίτερο πρόγραμμα εκγύμνασης. Όλοι οι σπουδαστές έλαβαν μέρος στην μελέτη εθελοντικά, αφού προηγουμένως τους αναλύθηκε με λεπτομέρεια ο σκοπός της εργασίας, οι μέθοδοι και οι σχετικές διαδικασίες, οι πιθανές δυσάρεστες επιπτώσεις και τα οφέλη από την συμμετοχή τους. Στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων συμμετείχαν τελικά 17 σπουδαστές, τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 1. Για δύο άτομα, η έξοδος του ηλεκτρικού ερεθιστή δεν φάνηκε ικανή να προκαλέσει ισχυρές ισομετρικές συσπάσεις ενώ ο τρίτος σπουδαστής δεν μπόρεσε να εξοικειωθεί με την διαδικασία του ερεθισμού παρ' όλες τις προσπάθειες που έγιναν.

Εξοπλισμός

Για τον ηλεκτρικό ερεθισμό του τετρακεφάλου μύος, χρησιμοποιήθηκε το Eltron D της Enraf Nonius. Το μεγάλο μήκος του τετρακεφάλου μύος και τα πολλα-

Πίνακας 1			
Προσωπικά χαρακτηριστικά των ατόμων που συμμετείχαν στην εργασία			
Άτομα N=17	Ηλικία	Ύψος	Βάρος
\bar{x}	21 ετών	1.80M	75 KG
σ	± 2.9	± 0.08	± 7.8
ζώνη	19 -24	1.74 - 1.85	68 - 64

Πίνακας 2

Τα προγράμματα ηλεκτρικού ερεθισμού που εφαρμόστηκαν σε όλα τα άτομα που συμμετείχαν στην εργασία

Παράμετροι	A	B	Γ	Δ	E	Z	H	Θ
Συχνότητα	103HZ	102HZ	100HZ	149HZ	143HZ	213HZ	208HZ	200HZ
Διάρκεια ώσης	0.7MS	0.8MS	1MS	0.7MS	1MS	0.7MS	0.8MS	1MS
Παύση	9MS	9MS	9MS	6MS	6MS	4MS	4MS	4MS
Περιγραφή	0.7/100	0.8/100	1/100	0.7/150	1/150	0.7/200	0.8/200	1/200

πλά κινητικά σημεία που διαθέτει διευκολύνουν την εφαρμογή διπολικής μεθόδου ερεθισμού, η οποία προτιμήθηκε για την εργασία αυτή. Δύο ηλεκτρόδια διαστάσεων 8cm X 12cm χρησιμοποιήθηκαν για τη διέγερση των μυών. Το ένα

μετρικών συστολών που ακολουθούσαν τον ηλεκτρικό ερεθισμό του τετρακεφάλου μυός.

Αιτιολογία

Σε περίοδο δοκιμασίας που προηγήθηκε των μετρήσεων, έγινε

ιδιαίτερα με την υψηλή ένταση των ηλεκτρικών ρευμάτων όλων των προγραμμάτων ερεθισμού. Επίσης μεγάλη προσοχή δόθηκε στην εκπαίδευση των σπουδαστών, ώστε οι καταγραφόμενες ισομετρικές συστολές να είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα του ηλεκτρικού ερεθισμού, χωρίς καμία προσωπική ενεργητική συμμετοχή.

Η τοποθέτηση και σταθεροποίηση των ατόμων, καθώς επίσης και η προσαρμογή - ρύθμιση του δυναμομέτρου, έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες της Cybex, κατάλληλα τροποποιημένες για τους σκοπούς της εργασίας αυτής. Η γωνία του ισχίου με τον κορμό ήταν κο-

Πίνακας 3. Τα προγράμματα ηλεκτρικού ερεθισμού τα οποία εγκαταλείφθηκε η εφαρμογή τους

Παράμετροι	I	K	Λ	M
Συχνότητα	105HZ	100HZ	182HZ	200HZ
Διάρκεια ώσης	0.5MS	2MS	0.5MS	2MS
Παύση	9MS	8MS	5MS	3MS
Περιγραφή	0.5/100	2/100	0.5/200	2/200

ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε λοξά πάνω από το γόνατο κοντά στα κινητικά σημεία του έσω και έξω πλατύ και το άλλο στο άνω τριτημόριο του τετρακεφάλου μυ, κοντά στο κινητικό σημείο του ορθού μηριαίου.

Τα οκτώ προγράμματα HE που δοκιμάστηκαν σε όλα τα άτομα φαίνονται στον Πίνακα 2. Άλλα τέσσερα προγράμματα HE δοκιμάστηκαν σε αρκετούς σπουδαστές αλλά εγκαταλείφθηκαν στην συνέχεια της εργασίας (Πίνακας 3). Οι συνδυασμοί K και M ήταν πολύ δυσάρεστοι αισθητικά, με συνέπεια να μην επιτρέπουν την άνοδο της έντασης σε υψηλά επίπεδα. Οι υπόλοιποι ήταν μεν ευχάριστα ανεκτοί, αλλά έδωσαν πολύ φτωχά αποτελέσματα.

Το ισοκινητικό δυναμόμετρο της Cybex II+, συνοδευόμενο από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή CDRC, χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή και ανάλυση των ισο-

προσπάθεια να εξοικειωθούν τα άτομα που συμμετείχαν στην εργασία με πρωτόκολλο της έρευνας

Πίνακας 4
Ερευνητικό Πρωτόκολλο

Προετοιμασία

- καθαρισμός - προετοιμασία του δέρματος
- τοποθέτηση ηλεκτροδίων
- τοποθέτηση - σταθεροποίηση του ατόμου στο CYBEX
- προσαρμογή - ρύθμιση του δυναμομέτρου
- οδηγίες για την σωστή εκτέλεση της διαδικασίας

Προθέρμανση

- 2 υπομέγιστες + 1 μέγιστη δοκιμαστική προσπάθεια στις 60°/SEC
- ακινητοποίηση της κνήμης με το γόνατο σε κάμψη 60°
- 2 υπομέγιστες + 1 μέγιστη: δοκιμαστικές ισομετρικές συστολές
- επανέλεγχος της θέσης του ατόμου, ρύθμιση του δυναμομέτρου

Εκτέλεση

- εφαρμογή του πρώτου στη σειρά προγράμματος
- 1 MINUTE ανάπαυση
- δεύτερη εφαρμογή του ίδιου προγράμματος
- 5 MINUTE ανάπαυση
- επανέλεγχος της θέσης του ατόμου, ρύθμιση του δυναμομέτρου
- εφαρμογή του δεύτερου προγράμματος κ.ο.κ.

Πίνακας 5 Κλίμακα κριτηρίων αξιολόγησης του αισθητικού αποτελέσματος των προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού	
Βαθμός	Περιγραφή
1	<ul style="list-style-type: none"> ● πολύ καλά ανεκτός ερεθισμός ● δυνατότητα για πολλές επαναλήψεις
2	<ul style="list-style-type: none"> ● μικρή αισθητική ενόχληση ● δυνατότητα για αρκετές επαναλήψεις
3	<ul style="list-style-type: none"> ● σημαντική αισθητική ενόχληση ● δυνατότητα για λίγες μόνο επαναλήψεις
4	<ul style="list-style-type: none"> ● μεγάλη αισθητική ενόχληση ● δυνατότητα για 1 έως 2 επαναλήψεις
5	<ul style="list-style-type: none"> ● πολύ μεγάλη αισθητική ενόχληση και πόνος ● δεν είναι δυνατή η επανάληψη του ερεθισμού

ντά στις 110 μοίρες, ενώ για την καταγραφή της ισομετρικής συστολής το γόνατο ακινητοποιήθηκε σε γωνία 60 μοιρών, από πλήρη έκταση. Συνεχής έλεγχος των γωνιών, με γωνιόμετρο χειρός, ακολουθούσε όλη την διάρκεια της δοκιμασίας. Πριν από την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γινόταν επιμελής καθαρισμός και προετοιμασία του δέρματος.

Σειρά δοκιμαστικών ισοκινητικών και ισομετρικών προσπαθειών προηγείτο της διοχέτευσης του ηλεκτρικού ρεύματος (Πίνακας 4). Η διάρκεια του ερεθισμού ήταν 7s με μηδενικό χρόνο ανόδου, η ένταση του ρεύματος έφτανε τα $71.4\text{mA} \pm 2.1$ (68mA - 76mA), ενώ η μορφή του παλμού ήταν μονοφασική τετράγωνη ώστε να αποφεύγεται η νευρομυϊκή προσαρμογή και να επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερος ερεθισμός.¹⁶

Κάθε πρόγραμμα ερεθισμού εφαρμόστηκε δύο φορές στο κάθε άτομο με διαλείμματα των δύο λεπτών ανάμεσα στις προσπάθειες. Η καλύτερη από τις δύο συστολές καταγράφηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Κάθε σπουδαστής δέχθηκε όλα τα προγράμματα HE σε μια συνεδρία, με τυ-

χαία σειρά και διαστήματα ανάπαυσης 10 λεπτών μεταξύ τους. Τα διαλείμματα που αναφέρθηκαν (2' και 10') θεωρούνται ικανοποιητικά σε διάρκεια για να επιτρέψουν την αποκατάσταση του μυ στα προηγούμενα φυσιολογικά του επίπεδα λειτουργία (απομάκρυνση των προϊόντων του αναερόβιου μεταβολισμού, επανατροφοδότηση με αίμα κλπ.)

Ιδιαίτερες οδηγίες δόθηκαν σε

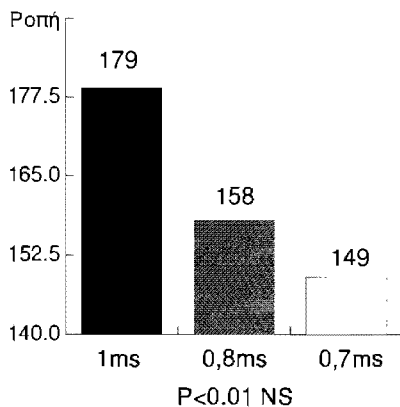
Όσο αυξάνεται η συχνότητα ερεθισμού ενός μυός, αυξάνεται και η ένταση συστολής του. Όταν η συχνότητα φθάσει στο επίπεδο πρόκλησης τέλειου τετάνου, η ένταση της μυϊκής συστολής είναι μέγιστη. Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ερεθισμού δεν πρόκειται να αυξήσει, όπως είναι εννόητο, την ένταση της μυϊκής συστολής.

όλα τα άτομα, ώστε να δέχονται χαλαρά τον ερεθισμό. Επίσης, τους τονίστηκε ότι, δεν πρέπει να προσπαθούν να δούν την ένδειξη των mA στον ερεθιστή, ούτε την ένδειξη παραγωγής έργου στο δυναμόμετρο. Στα διαστήματα που περιλαμβάνονταν ανάμεσα στα διάφορα προγράμματα, κάθε σπουδαστής αξιολογούσε την αισθητική αποδοχή του ρεύματος σύμφωνα με τα κριτήρια που εμφανίζονται στο Πίνακα 5.

Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Η καλύτερη τιμή της ισομετρικής δύναμης για κάθε συνδυασμό παραμέτρων εκφράστηκε σε απόλυτες τιμές έργου, ροπής (ft.pds η Torque), αλλά και σε ποσοστό επί της μέγιστης εκούσιας συστολής (MVC) που μετρήθηκε σε ξεχωριστή συνεδρία για όλους τους σπουδαστές. Για οικονομία χώρου, η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με τις απόλυτες τιμές τους. Οι ποσοστιαίες τιμές δύναμης των ισχυρότερων ρευμάτων, καθώς επίσης και οι μέγιστες συστολές των σπουδαστών αναφέρονται σε σχετική εργασία.¹⁶

Η ανίχνευση των στατιστικών διαφορών ανάμεσα στις τιμές έντασης των ισομετρικών συστολών που προκάλεσε η εφαρμογή των 8 προγραμμάτων HE έγινε με την βοήθεια της τεχνικής ANOVA (μονού δρόμου ανάλυση της μεταβλητότητας, με ανεξάρτητη μεταβλητή το πρόγραμμα ερεθισμού). Ακολούθησε Post-ho ανάλυση με την διαδικασία Student-Newman-Keuls. Οι πιθανές διαφορές ανάμεσα στις ισχυρότερες μεθόδους ερεθισμού, ερευνήθηκαν με ανάλυση κατά ζεύγη με την χρήση του Paired T-test (Two Tail). Τα αισθητικά αποτελέσματα των προγραμμάτων HE αξιολογήθηκαν συγκριτικά με μη παραμετρικές με-



Σχ. 1. Διάρκεια παλμού και μέγιστη ροπή στρέψης (ft.pds)

θόδους όπως η Kruskal-Wallis one way Anova by Ranks to medial test και το Tukey's Quick Test. Τέλος το $P < 0.01$ υιοθετήθηκε σαν το ελάχιστο επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας για όλες τις αναλυτικές διαδικασίες.^{17,18}

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ροπή Στρέψης (TORQUE) και διάρκεια παλμού

Και στις τρεις κατηγορίες συχνοτήτων που επιλέχθηκαν (100Hz, 150Hz, 200Hz) η αλλαγή της διάρκειας παλμού από 0.7ms σε 1 ms φάνηκε να διαφοροποιεί σημαντικά τη μέγιστη ροπή που καταγράφηκε στο ισοκινητικό δυναμόμετρο.

Πιο συγκεκριμένα, στα 100Hz η μέγιστη ισομετρική δύναμη που μετρήθηκε με το Γ πρόγραμμα (1/100) ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από τον μέσο όρο των τιμών του Α προγράμματος (0.7/100). Σε συγκρίσεις κατά ζεύγη που έγιναν ανάμεσα στα προγράμματα Α και Β, και Β και Γ δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές (Πίνακας 6).

Στα προγράμματα Δ και Ε με συχνότητα κοντά στα 150Hz, η αύξηση της διάρκειας παλμού από 0.7ms σε 1 ms ακολουθήθηκε από σημαντική αύξηση της μέγιστης

ροπής κατά 29 ft.pds (πίνακας 6). Στα τελευταία 3 προγράμματα, όπου η συχνότητα έφτασε στα 200 Hz, το Θ πρόγραμμα (1/200) έδωσε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές μέγιστης ισομετρικής δύναμης, σε σύγκριση τόσο με το πρόγραμμα Η (0.8/200) όσο και με το πρόγραμμα Ζ (0.7/200). Η αλλαγή της διάρκειας παλμού από 0.7ms σε 0.8ms δεν συνοδεύτηκε από σημαντική αύξηση στις τιμές της μέγιστης ροπής (Πίνακας 6).

Για την πληρέστερη διερεύνηση της σχέσης ανάμεσα στη διάρκεια παλμού και την μέγιστη ροπή, οι τιμές της ισομετρικής δύναμης που καταγράφηκαν από το Cybex, χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με την διάρκεια παλμού του ρεύματος που εφαρμόστηκε (Σχήμα 1). Από την επεξεργασία των δεδομένων φάνηκε ότι:

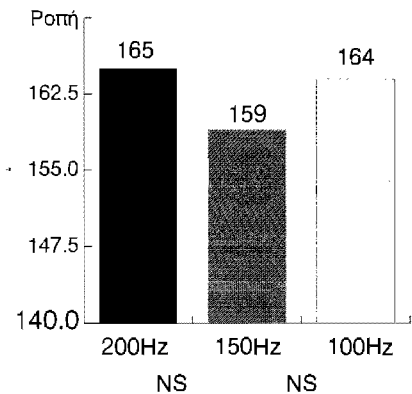
1. Η χρήση διάρκειας παλμού 1ms έσωσε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές δύναμης συγκριτικά με τις διάρκειες των 0.7ms και 0.8ms όπου εφαρμόστηκαν με άλλα προγράμματα ($P < 0.01$).

2. Οι μέσοι όροι των τιμών της μέγιστης ροπής των ομάδων Α (0.7ms) και Β (0.8ms) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

3. Σημαντική θετική συσχέτιση συνδέει την διάρκεια παλμού του ρεύματος που εφαρμόστηκε και τη μέγιστη ροπή που καταγράφηκε ($R = 0.82$, $P < 0.01$). Με άλλα λόγια, με βάση ότι διοχετεύτηκε στους ερεθιζόμενους μύες, όλη ή έξοδος του ερεθιστή, η ένταση της ισομετρικής συστολής βρέθηκε ανάλογη της διάρκειας παλμού του ρεύματος, ανεξάρτητα από τη συχνότητά του.

Ροπή Στρέψης (TORQUE) και συχνότητα ρεύματος

Διαδοχικές αναλύσεις των στοιχείων που παρουσιάζονται



Σχ. 2. Συχνότητα ρεύματος και μέγιστη ροπή στρέψης (ft.pds)

στον Πίνακα 7, έδειξαν ότι καμία σημαντική συσχέτιση δεν συνδέει την συχνότητα ρεύματος (στο φάσμα μεταξύ των 100Hz-200Hz) με την ένταση της ισομετρικής συστολής που ακολουθεί. Δηλαδή, σε καμία περίπτωση η διαφοροποίηση της συχνότητας του ρεύματος που διοχετεύτηκε στους μύες δεν επηρέασε σημαντικά τις τιμές της ροπής του τετρακεφάλου μυός.

Στο ίδιο συμπέρασμα οδήγησε η σύγκριση ανάμεσα στις τρεις ομάδες τιμών μέγιστης ροπής που φαίνονται στο Σχήμα 2. Οι ομάδες αυτές δημιουργήθηκαν με την ταξινόμηση των τιμών ανάλογα με την φέρουσα συχνότητα του

**Τα 50μs (0.05ms)
αναφέρονται
σαν η ελάχιστη τιμή
της διάρκειας παλμού
που απαιτείται
για να ληφθούν
ικανοποιητικής
έντασης κινητικές
απαντήσεις**

Πίνακας 6 Διάρκεια παλμού και κινητικό αισθητικό αποτέλεσμα των προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού			
Πρόγραμμα	100Hz		
	0.7ms	0.8ms	1ms
Ροπή* (\bar{x})	148	161	180
Αίσθηση (\bar{x})	2.3	2.5	3.3
Πρόγραμμα	200Hz		
	0.7ms	0.8ms	1ms
Ροπή* (\bar{x})	151	155	182
Αίσθηση (\bar{x})	2.0	2.4	3.2
Πρόγραμμα	150Hz		
	0.7ms	1ms	
Ροπή* (\bar{x})	147	176	
Αίσθηση (\bar{x})	2.1	3.1	
* Η μέγιστη ροπή στρέψης εκφράστηκε σε ft.pds			
Σημείωση: Η μέγιστη εκούσια ισομετρική συστολή (χωρίς παρεμβολή ηλεκτρικού ερεθισμού) ήταν 217 FT.PDS (\bar{x} για τα 17 άτομα).			

ρεύματος, ανεξάρτητα από την διάρκεια του παλμού. Και εδώ, η αλλαγή της συχνότητας από τα 100Hz στα 150Hz και 200 Hz, δεν έφερε καμία σημαντική μεταβολή στην ισομετρική δύναμη των ερεθιζομένων μυών.

Αξιολόγηση του αισθητικού αποτελέσματος

Το αισθητικό αποτέλεσμα των 8 προγραμμάτων ΗΕ αξιολογήθηκε συγκριτικά με διαδικασίες παρόμοιες με αυτές που ήδη έχουν αναφερθεί. Η ιδιομορφία, όμως, των κλιμάκων που χρησιμοποιήθηκαν επέβαλλε τη χρήση μη παραμετρικών μεθόδων στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων που ακολουθούν. Έτσι, έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η σχέση ανάμεσα στη διάρκεια παλμού ή τη φέρουσα συχνότητα του ρεύματος που εφαρμόζεται και στο αισθητι-

Πίνακας 7 Διάρκεια παλμού και κινητικό αισθητικό αποτέλεσμα των προγραμμάτων ηλεκτρικού ερεθισμού			
Πρόγραμμα	0.7ms		
	100Hz	150Hz	200Hz
Ροπή* (\bar{x})	148	147	151
Αίσθηση (\bar{x})	2.3	2.1	2.0
Πρόγραμμα	1.0ms		
	100Hz	150Hz	200Hz
Ροπή* (\bar{x})	180	176	182
Αίσθηση (\bar{x})	3.3	3.1	3.2
Πρόγραμμα	0.8ms		
	100Hz	200Hz	
Ροπή* (\bar{x})	161	155	
Αίσθηση (\bar{x})	2.5	2.4	
* Η μέγιστη ροπή στρέψης εκφράστηκε σε ft.pds			
Σημείωση: Η μέγιστη εκούσια ισομετρική συστολή (χωρίς παρεμβολή ηλεκτρικού ερεθισμού) ήταν 217 ft.pds (\bar{x} για τα 17 άτομα).			

κό αποτέλεσμα του ερεθισμού που προκαλείται.

Και στις τρεις συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν (100Hz, 150Hz, 200Hz) η αύξηση της διάρκειας παλμού των ρευμάτων από 0.7s και 0.8ms σε 1.0ms, οδήγησε σε σημαντική μεταβολή του αισθητικού αποτελέσματος. Με άλλα λόγια, η επιλογή παλμού διάρκειας 1ms συνοχούτηκε από σημαντικά πιο δυσανεκτό αισθητικό αποτέλεσμα σε σύγκριση με παλμούς μικρότερης διάρκειας, όπως αυτοί των 0.7ms και 0.8ms (Πίνακας 6).

Αντίθετα, η διαφοροποίηση της συχνότητας του ρεύματος μεταξύ των 100Hz και 200Hz δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την αισθητική αποδοχή του ηλεκτρικού ερεθισμού σε καμία περίπτωση, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Συχνότητα και κινητικό αποτέλεσμα

Είναι γνωστό ότι ο ερεθισμός μιας μυϊκής ίνας με επαναλαμβανόμενα ερεθίσματα προκαλεί εντονότερη συστολή συγκριτικά με τη συστολή που ακολουθεί τον ερεθισμό της ίδιας μυϊκής ίνας με απλό-μόνο ερέθισμα.^{19,20} Η ένταση της συστολής των μυϊκών ινών είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας με την οποία διεγείρονται. Όταν η συχνότητα ερεθισμού φθάσει στο υψηλό εκείνο επίπεδο που είναι ικανό για την πρόκληση τέλειου μυϊκού τετάνου, τότε η ένταση της συστολής που ακολουθεί είναι η μέγιστη για την συγκεκριμένη πάντα ομάδα μυϊκών ινών.²¹

Η συχνότητα στην οποία επιτυγχάνεται τέλειος τέτανος ποικίλει ανάλογα με το χρόνο εκπόλωσης της μυϊκής ίνας και κατά συνέπεια με τον τύπο της κινητικής μονάδας στην οποία "ανήκει". Οι τύπου I (slow twist) κινητικές μονάδες φθάνουν σε τέλειο τέτανο με συχνότητες ερεθισμού μικρότερες των 30 Hz, ενώ οι τύπου II (fast twitch) κινητικές μονάδες απαιτούν συχνότητες υψηλότερες των 50Hz-60Hz.^{20,21}

Έχει παρατηρηθεί ότι, κατά

Οι τύπου I (slow twist) κινητικές μονάδες φθάνουν σε τέλειο τέτανο με συχνότητες ερεθισμού μικρότερες των 30 Hz, ενώ οι τύπου II (fast twitch) κινητικές μονάδες απαιτούν συχνότητες υψηλότερες των 50Hz-60Hz.

την έναρξη των μέγιστων και γρήγορων συστολών η συχνότητα εκπόλωσης των μυϊκών ινών μπορεί να φθάσει έως και τα 150Hz για να πέσει σε σύντομο χρονικό διάστημα σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.²³ Σε σχετικά παρατεταμένες όμως, συστολές μέγιστης έντασης, η συχνότητα εκπόλωσης των μυϊκών ινών δεν ξεπερνάει τα 35Hz.^{21,24}

Όπως συνάγεται από τα προαναφερόμενα στοιχεία, όσο αυξάνεται η συχνότητα ερεθισμού ενός μυός, αυξάνεται και η ένταση συστολής του. Όταν η συχνότητα φθάσει στο επίπεδο πρόκλησης τέλειου τετάνου, η ένταση της μυϊκής συστολής είναι μέγιστη. Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ερεθισμού δεν πρόκειται να αυξηθεί, όπως είναι ευνόητο, την ένταση της μυϊκής συστολής.

Οι Sugai et al. αναφέρουν σε σχετική εργασία τους ότι η δύναμη του προσαγωγού του αντίχειρα σταθεροποιείται πάνω από τα 40-50Hz, μεγιστοποιείται στα 75Hz και δεν αλλάζει μέχρι τα 100Hz.²⁵ Οι Edwards et al. γράφουν ότι η δύναμη που αναπτύσσουν οι τετρακέφαλος και προσαγωγός του αντίχειρα σταθεροποιείται πάνω από τα 50Hz και δεν μεταβάλλεται μέχρι τα 100Hz.¹ Ο Kramer παρατηρεί ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στη ροπή στρέψης που αποδίδει ο τετρακέφαλος ερεθιζόμενος με 50Hz και 100Hz. Στα 20 Hz, όμως η ροπή του ίδιου μυός είναι σημαντικά χαμηλότερη.¹³

Σε όλες τις μελέτες που αναφέρθηκαν, το φάσμα των συνηθισμένων που εξετάσθηκε δεν ξεπέρασε τα 100Hz. Η εργασία αυτή επιβεβαιώνει τις προηγούμενες παρατηρήσεις και στο φάσμα των 100Hz έως 200Hz. Η ροπή που αναπτύσσει ο τετρακέφαλος ερεθιζόμενος με 100Hz, 150Hz και

**Πολλές εργασίες
αναφέρουν την υπεροχή
των προγραμμάτων
ενεργητικής άσκησης
στην αύξηση
της μυϊκής δύναμης,
άλλες δίνουν
το προβάδισμα
στον ηλεκτρικό ερεθισμό
με ειδικά διαμορφωμένα
ηλεκτρικά ρεύματα,
ενώ άλλου υποστηρίζεται
ότι ο συνδυασμός
ενεργητικής άσκησης
με ταυτόχρονο ηλεκτρικό
ερεθισμό παρέχει
τα καλύτερα δυνατά
αποτελέσματα.**

200Hz είναι σταθερή, καθώς δεν αυξάνεται ούτε μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι, η παρούσα μελέτη, όπως άλλωστε και οι περισσότερες σχετικές εργασίες που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, εξετάζουν ένα μικρό σχετικά δείγμα ατόμων και εφαρμόζουν διάφορα πρωτόκολλα ηλεκτρικού ερεθισμού σε ορισμένες μόνο μυϊκές ομάδες (π.χ. τετρακέφαλος, προσαγωγός του αντίχειρα κλπ.). Ετσι κάθε γενίκευση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να αποφεύγεται. Επίσης, η διαπίστωση ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα με συχνότητα 50-200Hz εκλύουν παρόμοιας έντασης μυϊκές συστολές, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι τα ρεύματα αυτά

έχουν και την ίδια κλινική αξία, μια και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλοί άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή των παραμέτρων ηλεκτρικού ερεθισμού (σκοπός θεραπείας, κόπωση των μυών, δερματικός ερεθισμός, κλπ.).

Διάρκεια παλμού και κινητικό αποτέλεσμα

Η ένταση συστολής ενός μυός διαβαθμίζεται ανάλογα με την συχνότητα ερεθισμού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αλλά και με τον αριθμό των κινητικών μονάδων (ΚΜ) που επιστρατεύονται.¹⁹ Στον ερεθισμό εννευρωμένου μυός, με σταθερή τη συχνότητα διέγερσης, η ένταση της συστολής θα εξαρτηθεί από τον αριθμό των ΚΜ που θα επιστρατευθούν. Όταν ο σκοπός του ηλεκτρικού ερεθισμού είναι η διατήρηση ή η αύξηση της μυϊκής δύναμης, τότε είναι απαραίτητη η μεγαλύτερη δυνατή επιστράτευση ΚΜ σε επιθυμητές συχνότητες εκπόλωσης.

Με βάση τις σκέψεις αυτές, επιλέγησαν οι παράμετροι των ερεθιστικών ρευμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής (Πίνακες 2 και 3). Σημειώνεται εδώ, ότι τα 50μs (0.05ms) αναφέρονται σαν η ελάχιστη τιμή της διάρκειας παλμού που απαιτείται για να ληφθούν ικανοποιητικές έντασης κινητικές απαντήσεις.¹⁰ Πολλοί όμως ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάρκειες ώσεις μεταξύ των 0.1 - 0.3ms^{6,26,27} ενώ άλλοι κινούνται στο φάσμα των 0.5 - 2ms^{3,13,15,28}.

Για την μελέτη αυτή, η επιλογή παλμού διάρκειας από 0.5ms έως 2ms (τελικά 0.7 - 1ms) έγινε με το σκεπτικό ότι μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να ερεθίσουν ΚΜ που βρίσκονται στα βαθύτερα στρώματα του

τετρακεφάλου μυ, οι οποίες ίσως δεν θα επιστρατευόντουσαν με βραχύτερες ώσεις. Η εφαρμογή της διπολικής μεθόδου ερεθισμού (μειονεκτεί στην αποτελεσματική επιστράτευση των εν τω βάθει ΚΜ) ενίσχυσε την επιλογή σχετικά μεγάλων σε διάρκεια παλμών.

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δεν ανέδειξε σχετικές έρευνες στις οποίες να συγκρίνονται τα κινητικά αποτελέσματα ρευμάτων ίδιου τύπου και συχνότητας, με διαφορετική όμως διάρκεια παλμού. Εξαιρέση ίσως, αποτελεί η εργασία των Hultman et al. στην οποία αναφέρεται ότι η αύξηση της διάρκειας παλμού από 0.2ms έως 1ms προκάλεσε ισχυρότερες μυϊκές συστολές.²⁹ Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, φαίνεται ότι δικαίωσαν τις επιλογές μας στον καθορισμό διάρκειας παλμού του ρεύματος. Τα προγράμματα με 1ms ώση έδωσαν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές ροπής σε σχέση με όσα χρησιμοποίησαν παλμούς διάρκειας 0.7ms και 0.8ms, ενώ τα προγράμματα με ώση 0.5ms δεν συμπεριελήφθησαν στις μετρήσεις γιατί προκάλεσαν φτωχές κινητικές απαντήσεις.

Έχει αναφερθεί ότι όσο αυξάνεται το βάθος των ιστών μέσα από τους οποίους πρέπει να περάσει το ηλεκτρικό ρεύμα, τόσο αλλοιώνεται η μορφή του ρεύματος και μειώνεται η έντασή του.³⁰ Έτσι, οι ΚΜ που βρίσκονται βαθύτερα, απαιτούν μεγαλύτερες διάρκειες ώσης για να επιστρατευθούν, μια και η ένταση του ρεύματος "φθάνει" εκεί μειωμένη (καμπύλη έντασης-διάρκειας αποτελεσματικού ερεθισμού).¹⁴ Είναι λοιπόν πιθανό, ότι ηλεκτρικό ερέθισμα διάρκειας 1ms διεγείρει εν τω βάθει ΚΜ, για τις οποίες ερεθίσματα βραχύτερης διάρκειας είναι υποβαλβιδικά. Σαν συνέπεια, από την στιγμή που το πρόγραμ-

**Η δυσάρεστη
αισθητική αντίληψη
που συνοδεύει
- συνήθως -
τον ηλεκτρικό
ερεθισμό οφείλεται
σε μεγάλο ποσοστό
στις χημικές μεταβολές
που παρατηρούνται
στην περιοχή
εφαρμογής
των ηλεκτροδίων,
καθώς επίσης
και στα
θερμικά φαινόμενα
που ακολουθούν
τη διέλευση
του ρεύματος
μέσα από τους ιστούς**

μα ΗΕ με διάρκεια 1ms μπορεί να επιστρατεύσει περισσότερες ΚΜ συγκριτικά με τα προγράμματα των 0.8ms και 0.7ms, θα προκαλέσει και μεγαλύτερης έντασης συστολές.

Είναι φανερό ότι για να τεκμηριωθούν οι προηγούμενες διαπιστώσεις θα πρέπει να ακολουθήσουν και άλλες σχετικές προσπάθειες ώστε να φωτισθεί το ενδιαφέρον αυτό πρόβλημα από κάθε δυνατή πλευρά.

Αισθητικό αποτέλεσμα

Η αισθητική αντίληψη του ηλεκτρικού ρεύματος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την επιτυχία κάθε προγράμματος ηλεκτρικού ερεθισμού ιδιαίτερα όταν ο σκοπός της θεραπείας είναι η διατήρηση ή η αύξηση της μυϊκής δύναμης.

Έντονα δυσανεκτό ερέθισμα περιορίζει την ένταση του ρεύματος σε χαμηλά επίπεδα με συνέπεια να μην προκαλούνται ισχυρές κινητικές απαντήσεις, ενώ εμποδίζει τον ασθενή να αποδώσει το μέγιστο των δυνατοτήτων του.

Είναι γνωστό ότι η δυσάρεστη αισθητική αντίληψη που συνοδεύει - συνήθως - τον ηλεκτρικό ερεθισμό οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στις χημικές μεταβολές που παρατηρούνται στην περιοχή εφαρμογής των ηλεκτροδίων, καθώς επίσης και στα θερμικά φαινόμενα που ακολουθούν τη διέλευση του ρεύματος μέσα από τους ιστούς (προκειμένου πάντα για μονοφασικά παλμικά συνεχή ρεύματα). Τόσο τα χημικά όσο και τα θερμικά αυτά αποτελέσματα είναι ευθέως ανάλογα με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που διοχετεύεται στους ιστούς, με άλλα λόγια είναι συνάρτηση του γινομένου της έντασης επί το χρόνο εφαρμογής του ρεύματος.³¹

Στην περίπτωση που εφαρμόζονται ηλεκτρικά ρεύματα ίδιου τύπου, σταθερής διάρκειας και παρόμοιας έντασης, θα περίμενε κανείς ότι η αύξηση της συχνότητας ερεθισμού από τα 100 Hz στα 200 Hz θα διαφοροποιούσε και την αισθητική αποδοχή του ρεύματος. Κάτι τέτοιο όμως, δεν παρατηρήθηκε στη διάρκεια της εργασίας αυτής (Πίνακας 7). Μπορούμε ίσως να υποθέσουμε ότι, για εφαρμογές τόσο μικρών χρόνων, η μεταβολή της συχνότητας από τα 100Hz στα 200Hz δεν επηρέασε σημαντικά τα θερμοχημικά αποτελέσματα του ερεθισμού.

Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της διάρκειας παλμού από τα 0.7ms στο 1ms προκάλεσε σημαντικά πιο δυσάρεστη αίσθηση σε όλα τα άτομα (Πίνακας 6). Πέρα από την αναμενόμενη, εδώ, αύξηση των φυσικοχημικών μεταβο-

λών στη διάρκεια του ερεθισμού (μεγαλύτερος χρόνος εφαρμογής της κάθε ώσης), η πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στους ιστούς, διεγείρει τις εν τω βάθει μικρής διαμέτρου και μεγαλύτερης χροναξίας κεντρομόλες ίνες του πόνου, μεγενθύνοντας έτσι το δυσανεκτό αισθητικό αποτέλεσμα.³⁰ Επίσης, όπως αναφέρεται σε σχετικές εργασίες, τα ερεθιστικά ρεύματα που δίνουν ισχυρές μυϊκές συσπάσεις προξενούν ιδιαίτερες αισθητικές ενοχλήσεις που πηγάζουν από την μεγάλη ένταση συστολής (Cramping and tearing feelings).^{27,28} Παρόμοια συσχέτιση θα μπορούσε ίσως να βρει εφαρμογή και στα δικά μας αποτελέσματα, μια και τα προγράμματα ΗΕ με μεγαλύτερη διάρκεια παλμού ήταν μεν πιο δυσάρεστα αισθητικά, αλλά προκάλεσαν και ισχυρότερες κινητικές απαντήσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ένταση της ισομετρικής συστολής που ακολούθησε τον ηλεκτρικό ερεθισμό του τετρακεφάλου μύ ήταν ανάλογη της διάρκειας του παλμού του ρεύματος.

Τα προγράμματα με διάρκεια παλμού 1ms προκάλεσαν τις ισχυρότερες μυϊκές συσπάσεις, συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα που χρησιμοποίησαν ρεύματα, με ώσεις 0.7ms και 0.8ms.

Η διαφοροποίηση της συχνότητας του ρεύματος ανάμεσα στα 100Hz, 150Hz και 200Hz δεν επηρέασε σημαντικά τις τιμές της ροπής στρέψης (Torque) του τετρακεφάλου μυ.

Η επιλογή διάρκειας παλμού 1ms συνοδεύτηκε από σημαντικά πιο δυσανεκτό αισθητικό αποτέλεσμα σε σύγκριση με τους παλμούς των 0.7ms και 0.8ms.

Η διαφοροποίηση της συχνότητας του ρεύματος ανάμεσα στα 100Hz, 150Hz και 200Hz δεν επηρέασε σημαντικά την αισθητική αποδοχή του ηλεκτρικού ερεθισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Edwards R., Young A., et al., "Human skeletal muscle function: Description of tests and normal values", *Clin Sci Mol Med.*, 52:283-290, 1977
2. Currier D.P., Lehman J., Lightfoot P., "Electrical stimulation in exercise of the quadriceps femoris muscle", *Physical Therapy*, 59:1508-1512, 1979
3. Kramer J.F., Wessel J., "Electrical activity and torque following electrical stimulation and voluntary contractions of quadriceps", *Physiotherapy Can.*, 37:283-287, 1985
4. Lainey C.G., Walmsley R.P., Antrew G.M., "Effectiveness of exercise alone versus exercise plus electrical stimulation in strengthening the quadriceps muscle", *Physiotherapy Can.*, 35:5-11, 1983
5. Eriksson E., Haggmark T., Comparison of isometric muscle training and electrical stimulation and supplementing isometric muscle training in the recovery after major knee ligament surgery". *Am. J. Sports Med.*, 7:169-171, 1979
6. Alon G., McCombe S.A., et al., Comparison of the effects of electrical stimulation of muscles and exercise of the abdominal musculature", *J. Orthop Sports Phys Ther.*, 8:567-573, 1987
7. Kots Y.M., Training with the method of electric tetanic stimulation of muscles by orthogonal impulses". *Theory and Practice of Physical Culture*, 4:66-72, 1971
8. Selkowitz D.M., "Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation", *Physical Therapy*, 65:186-196, 1985
9. Cheng-Lun Soo, Currier D.P., Threlkeld A.J., Augmenting voluntary torque of healthy muscle by optimizing of electrical stimulation", *Physical Therapy*, 68:333-337, 1988
10. Μπάκας Ε., "Φυσική ιατρική και αποκατάσταση", Αθήνα: Ιατρ. Εκδ. Ζήτα, Τόμος 1ος, 147-165, 218-221, 1985
11. Γιόκαρης Π., "Κλινική Ηλεκτροθεραπεία", Αθήνα: 77-90, 114-117, 1988
12. Kramer J.F., Mendryk S.W., "Electrical stimulation as a strength improvement technique: A review", *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 4:91-98, 1987
13. Kramer D.F., "Effect of electrical stimulation current frequencies on isometric knee extension torque", *Physical Therapy*, 67:31-38, 1987
14. Ganog W.F., "Ιατρική Φυσιολογία", Αθήνα: Επιστ. Εκδ. Γρ. Παρισιάνος, 45, 1985
15. Cox A.M., Mendryk S.W., et al., "Effect of electrode placement and rest interval between contractions on isometric knee extension torque: induced by electrical stimulation at 100Hz", *Physiotherapy Can.*, 38:20-27, 1986
16. Παπαθανασίου Γ., Γεργάνης Γ., Αντζολιδάκης Στ., "Ισομετρική δύναμη του τετρακεφάλου μύ μετά από ηλεκτρικό ερεθισμό και μέγιστη εκούσια συστολή", Ανακοίνωση στο 8ο Συμπόσιο Φυσικοθεραπείας, Ε.Ε.Ε.Φ., 1994.
17. Currier D.P., "Elements of research in physical therapy", Baltimore: Williams & Wilkins Co., 1979
18. Daniel W.W., "Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences", New York: John Wiley Co., 1979
19. Ganog W.F., "Ιατρική Φυσιολογία", Αθήνα: Επιστ. Εκδ. Γρ. Παρισιάνος, 64-68, 1985
20. Dowben R.M., "Contractility" in V.B. Mountcastle (ed) "Medical Physiology", St Louis The C.V. Mosby Co, 91-92, 1980
21. Freund H.S., "motor unit and muscle activity in voluntary motor control", *Physiol. Rev.*, 63:387-436, 1983
22. Astrand P.O., Rodahl K., "Textbook of work physiology", New York: McGraw-Hill Book Co., 94, 1977
23. Marsden C.D., Meadows J.C., Merton P.A., "Isolated single motor unit in human muscle and their rate of discharge during maximal voluntary effort", *J. Physiology (London)*, 217:12p-13p, 1971
24. Basmajian J.V., "Muscles alive", Baltimore: Williams & Wilkins Co., 5-7, 1979
25. Sugai N., Worsley R., Payne J.P., "Tetanic force development of adductor pollicis muscle in anesthetized Man", *J. Appl. Physiol.*, 39:714-717, 1975
26. Stefanovska A., Vodnik L., "Changes in muscle force following electrical stimulation", *Scand. J. Rehab Med.*, 17:141-146, 1985
27. Waalmsley R.P., Letts G., Vogue J., "A comparison of torque generated by knee extension with maximal voluntary muscle contraction vis-a-vis electrical stimulation", *J. Orthop Sports Phys. Ther.*, 6:10-17, 1984
28. Kramer J., Lindsay D. et al., "Comparison of voluntary electrical stimulation contraction torques", *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 6:324-331, 1984
29. Hultman E. et al., "Evaluation of methods for electrical stimulation of human muscle in situ", *Pflugers Arch.*, 398:139-141, 1983
30. Howson D.C., "Peripheral neural excitability", *Physical Therapy*, 58:1467-1473, 1978
31. Παπαθανασίου Γ., Γεργάνης Γ., "Ηλεκτρικός ερεθισμός υψηλής τάσης", *Φυσικοθεραπεία*, Γ' Πεφ. (No 2): 6-12, 1988.