

ΝΩΤΙΑΙΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ

Α.Γ. ΜΠΑΪΚΟΥΣΗΣ

Όταν εκτελούμε μία κίνηση, αλλά και όταν διατηρούμε τη στάση του σώματός μας, όλες οι κινητικές εντολές από το κεντρικό νευρικό σύστημα εκφράζονται ως αλλαγές στο νευρικό ερεθισμό των σκελετικών μυών. Η απάντηση των μυών στο νευρικό ερεθισμό είναι η δημιουργία δύναμης για την πραγματοποίηση ή την αποτροπή μιας κίνησης. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτής της απάντησης εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες και τη μηχανική φόρτιση των μυών, αλλά και από τη φύση του νευρικού ερεθίσματος.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Σχέση μήκους - τάσης

Ο ερεθισμός ενός χαλαρού μύος οδηγεί στη σύσπαση και την παραγωγή μιας δύναμης. Για ένα δεδομένο νευρικό ερεθισμό, η μυική δύναμη αυξάνει όσο αυξάνεται η διάταση του μύος μέχρι ενός σημείου. Μετά από αυτό το σημείο, κάθε πρόσθετη διάταση του μύος δεν αυξάνει τη συσπαστική δύναμή του και δημιουργεί μια στιγμιαία κορυφή το σημείο L_0 , το "μέγιστο φυσιολογικό μήκος" του μύος. Περαιτέρω διάταση του μύος ελαττώνει τη συσπαστική δύναμη παροδικά και στη συνέχεια συνεχίζει να αυξάνεται. Στο σημείο αυτό, όμως, δεν παρατηρείται μόνο η ενεργητική αλλά και η παθητική τάση των ελαστικών στοιχείων του μύος. Ακολουθεί το διάγραμμα της διάτασης ενός χαλαρού μύος. Όταν υποβάλλουμε σε διάταση ένα χαλαρό μυ, δεν παρατηρείται αύξηση της τάσης έως το σημείο L_0 , μετά από το οποίο αυξάνει γρήγορα (εικόνα 1).

Σχέση δύναμης και ταχύτητας

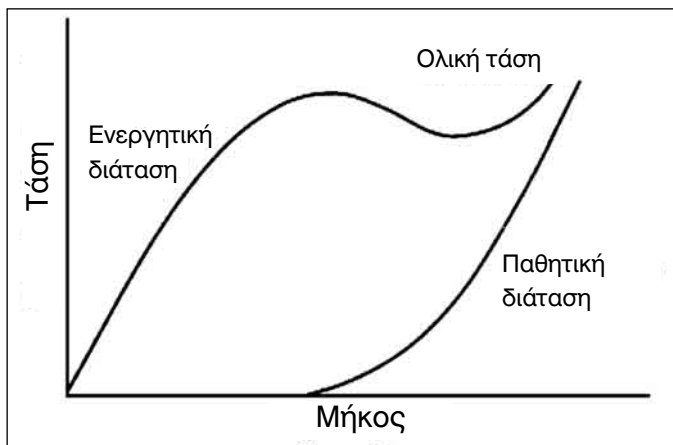
Το μέγεθος της δύναμης που παράγεται από μια μυική συστολή εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία τελείται αυτή η συστολή. Σε μηδενική ταχύτητα (ισομετρική συστολή) έχουμε τη μέγιστη δύναμη (εικόνα 2).

Μηχανική της σύσπασης των μυικών ινών

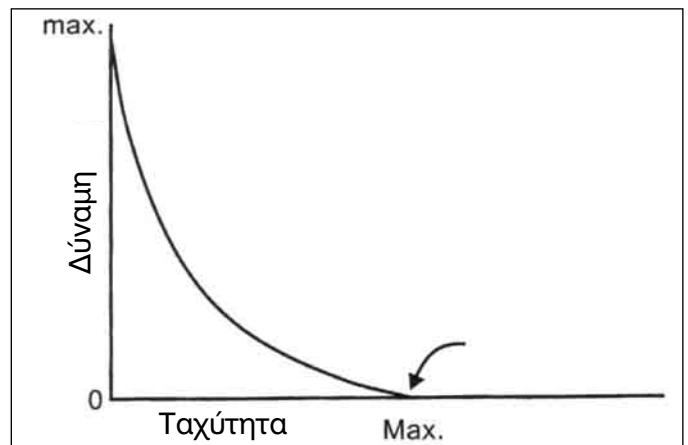
Οι σκελετικοί μύες που ελέγχουν την κίνηση του σώματος αποτελούνται από χιλιάδες μυικές ίνες. Κάθε μυική ίνα είναι μια δομή ικανή για τη δημιουργία δύναμης με διαφορετικά χαρακτηριστικά χρόνου, έντασης και διάρκειας.

Τύποι μυικών ινών

Η βασική λειτουργία μιας μυικής ίνας είναι η σύσπαση μετά από κάθε νευρικό ερεθι-



Εικόνα 1. Η σχέση μήκους-τάσης ενός μύος κατά την ενεργητική και την παθητική διάταση.



Εικόνα 2. Η σχέση δύναμης- ταχύτητας. Στη μηδενική ταχύτητα (ισομετρική συστολή) η μυϊκή δύναμη είναι η μέγιστη.

σμό. Διαφορές στην ανατομία και τη φυσιολογία διαχωρίζουν τις μυϊκές ίνες σε αργές (S) και σε γρήγορες (F), ενώ οι γρήγορες διακρίνονται σε αυτές που υφίστανται εύκολη κόπωση (FF) και σε αυτές που αντέχουν στην κόπωση (FR) (πίνακας 1).

Παραγωγή ενέργειας

Η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP) είναι η βασική πηγή ενέργειας για κάθε μυϊκή συστολή και κάθε μεταβολική δραστηριότητα των μυϊκών ινών.

Το ένζυμο ATPάση βρίσκεται στις κεφαλές των ινιδίων

της μυοσίνης και φαίνεται πως τα επίπεδά του σχετίζονται με την ταχύτητα της μυϊκής συστολής.

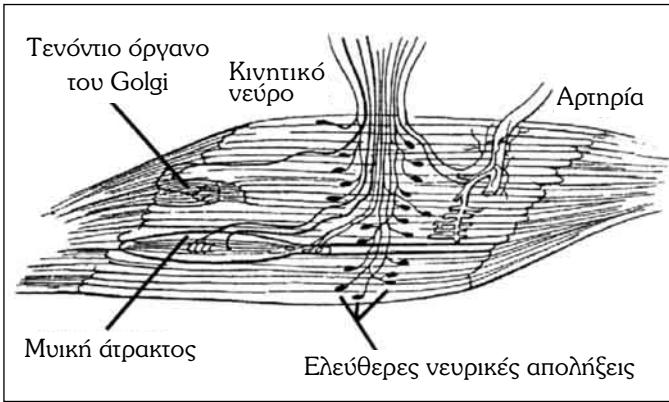
Με ιστοχημικές τεχνικές μπορούμε να διακρίνουμε τις μυϊκές ίνες ανάλογα με την παραγωγή ενέργειας σε δύο τύπους: σε αυτές που χρησιμοποιούν την οξειδωτική φωσφορυλίωση (ενέργεια με οξυγόνο) και σε αυτές που χρησιμοποιούν τη γλυκόλυση (ενέργεια χωρίς οξυγόνο).

Νευρικός ερεθισμός των μυών

Οι κινητικοί νευρώνες που είναι υπεύθυνοι για την τελική κινητική νεύρωση των μυών εντοπίζονται στο πρό-

	Τύπος I	Τύπος IIA	Τύπος IIB
Άλλα ονόματα	Κόκκινες, αργή σύσπαση (ST) Αργή οξείδωση (SO)	Λευκές, γρήγορη σύσπαση (FT) Γρήγορη οξειδωτική γλυκόλυση (FOG)	Γρήγορη γλυκόλυση (FG)
Ταχύτητα σύσπασης	Αργή	Γρήγορη	Γρήγορη
Δύναμη σύσπασης	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Κόπωση	Αντίσταση στην κόπωση	Εύκολη κόπωση	Πολύ εύκολη κόπωση
Αερόβια ικανότητα	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Αναερόβια ικανότητα	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
Μέγεθος κινητικής μονάδας	Μικρή	Μεγαλύτερη	Μέγιστη
Πυκνότητα τριχειδών	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή

Πίνακας 1. Τύποι μυϊκών ινών και τα χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 3. Διάγραμμα διατομής ενός μύος κατά τον επιμήκη άξονα. Εμφανίζονται οι διάφοροι τύποι υποδοχέων και ο τρόπος σύνδεσής τους σε σειρά (όργανο Golgi) ή παράλληλα (μυϊκή άτρακτος).

σθιο κέρασ του νωτιαίου μυελού.

Μυϊκοί υποδοχείς

Οι σκελετικοί μύες διαθέτουν ειδικούς υποδοχείς, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να δίνουν συνεχή αίσθηση της κατάστασης της μυϊκής δραστηριότητας και να βοηθούν στον έλεγχο της ποιότητας της μυϊκής συστολής. Τρεις είναι οι κύριοι μυϊκοί υποδοχείς: η μυϊκή άτρακτος, το τενόντιο όργανο του Golgi και οι ελεύθερες νευρικές απολήξεις (εικόνα 3).

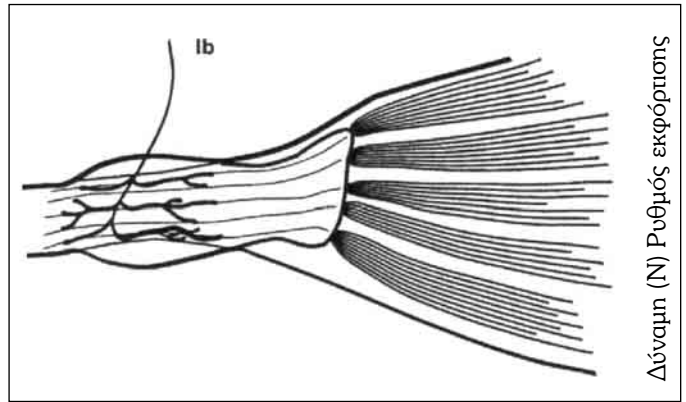
Μυϊκή άτρακτος

Κάθε μυϊκή άτρακτος αποτελείται από μια ομάδα λεπτών μυϊκών ινών (ενδοκαψικές ίνες), οι οποίες περιέχονται σε κάψα με υγρό. Οι ενδοκαψικές μυϊκές ίνες διατρέχουν το μυ από τον τένοντα της έκφυσης έως τον τένοντα της κατάφυσης, παράλληλα με τις σκελετικές μυϊκές ίνες. Έτσι, το προσαγωγό σύστημα της ατράκτου αισθάνεται κάθε διάταση των σκελετικών μυών, ενώ το απαγωγό σύστημα επαναρυθμίζει τη μυϊκή άτρακτο μετά από κάθε μεταβολή.

Οι ενδοκαψικές ίνες της μυϊκής ατράκτου ταξινομούνται ανάλογα με τη θέση των πυρήνων τους (εικόνα 5). Οι περισσότερες από αυτές (4-6 κάθε ατράκτου) έχουν τους πυρήνες κατά μήκος της ίνας. Κάποιες, όμως, (1-2 κάθε ατράκτου) έχουν τους πυρήνες τους συγκεντρωμένους σε σάκο στην περιοχή του ισημερινού.

Λειτουργία του προσαγωγού συστήματος της μυϊκής ατράκτου

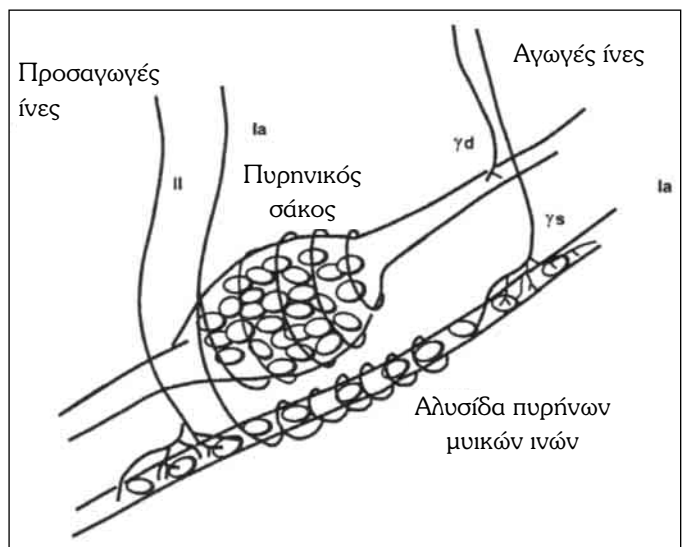
Το προσαγωγό σύστημα της μυϊκής ατράκτου συνίστα-



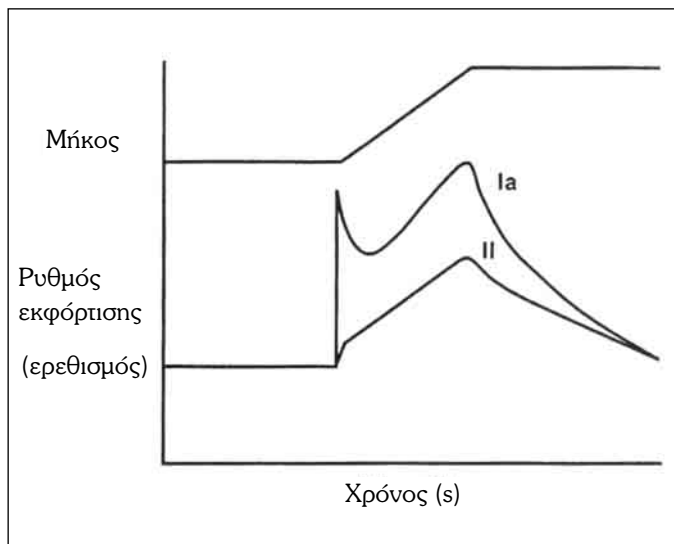
Εικόνα 4. Το όργανο Golgi. Η δομή αυτή βρίσκεται μεταξύ μιας ομάδας μυϊκών ινών και του τένοντα.

ται σε δύο τύπους εξειδικευμένων αισθητικών απολήξεων. Το πρωτογενές, το οποίο είναι και το μεγαλύτερο, σπειροειδούς σχήματος περιβάλλει το κεντρικό μέρος όλων των ενδοκαψικών ινών της μυϊκής ατράκτου και ονομάζεται Ia. Ένα μικρότερο προσαγωγό σύστημα, δευτερογενές, βρίσκεται γύρω από τους πόλους της ατράκτου και λέγεται II.

Σε μια σχετικά αργή, σταθερής ταχύτητας διάταση του μύος, το πρωτογενές προσαγωγό σύστημα Ia δίνει οξεία και σημαντική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της δυναμικής φάσης και στη συνέχεια μειώνεται η δραστηριότητά του όταν επιτυγχάνεται σταθερό μήκος. Αντίθετα, η δραστηριότητα του δευτερογενούς συστήματος είναι βραδύτερη και μικρότερου μεγέθους. Αυτό δείχνει ότι το πρω-



Εικόνα 5. Μυϊκή άτρακτος. Το προσαγωγό και το απαγωγό σύστημα.



Εικόνα 6. Η εκφόρτιση του προσαγωγού συστήματος. Άμεση και μεγάλη η δραστηριότητα του πρωτογενούς, μικρότερου μεγέθους και πιο αργή του δευτερογενούς, μετά από μια μυϊκή διάταση.

τογενές σύστημα είναι ευαίσθητο σε μεταβολές της ταχύτητας, ενώ το δευτερογενές παρακολουθεί τη μεταβολή του μήκους (εικόνα 6).

Λειτουργία του απαγωγού συστήματος της μυϊκής ατράκτου

Όλες οι μυϊκές ατράκτοι έχουν κινητική νεύρωση από μικρής διαμέτρου, χαμηλής ταχύτητας εμμύελες ίνες, οι οποίες εξέρχονται από το πρόσθιο κέρασ του νωτιαίου μυελού και ονομάζονται ίνες γ. Μετά από τη συστολή ενός σκελετικού μύος με μεταβολή του μήκους του, οι ίνες γ ενεργούν συνήθως ταυτόχρονα με τις ίνες α (που προκαλούν τη μυϊκή συστολή) και προσαρμόζουν τις μυϊκές ατράκτους στις νέες συνθήκες, ώστε να είναι κάθε φορά ευαίσθητες στις μεταβολές.

Τενόντια όργανα Golgi

Τα τενόντια όργανα Golgi είναι καψικές δομές που βρίσκονται μεταξύ του τένοντα και των μυϊκών ινών. Οι νευρικές απολήξεις εντοπίζονται ανάμεσα σε ίνες κολληγόνου και ελαστικές ίνες, ενώ οι μυϊκές ίνες που συνδέονται με κάθε όργανο είναι λίγες, 10-15 στους μεγάλους μύες. Τα όργανα Golgi δεν ανιχνεύουν μεταβολή του μήκους αλλά της τάσης. Η δράση τους είναι ανασταλτική και προστατεύουν από ρήξη ή βλάβη του μύος (εικόνα 4).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι νωτιαίοι μηχανισμοί

ελέγχου της κίνησης δρουν αρχικά με τη δραστηριοποίηση των κινητικών νευρώνων και τη διέγερση των μυών.

Στη συνέχεια, μέσω των μυϊκών υποδοχέων έχουμε αίσθηση του μήκους των μυών και της τάσης και με τη δράση ενδιάμεσων νευρώνων ελέγχεται η ποιότητα της μυϊκής απάντησης στο νευρικό ερεθισμό. Τα αντανακλαστικά και η δημιουργία στερεότυπων κινήσεων ολοκληρώνουν τον έλεγχο και την ομαλοποίηση της κίνησης ως προς το νωτιαίο επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bodine - Fowler S, Garfinkel A, Roy RR, Edgerton VR. Spatial distribution of muscle fibers within the territory of a motor unit. *Muscle Nerve* 1990, 13:1133 - 1145.
2. Bottinelli R, Pellegrino MA, Canepari M, Rossi R, Reggiani C. Specific contributions of various muscle fibre types to human muscle performance: An in vitro study. *J Electromyogr Kinesiol* 1999, 9:87-95.
3. Burke D. Muscle spindle function during movement. *Trends Neurosci* 1980, 3:251-253.
4. Burke RE, Levine DN, Tsairis P, Zajac FE III. Physiological types and histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius. *J Physiol (Land)* 1973, 234:723-748.
5. Burke RE, Tsairis P. Histochemical and physiological profile of a skeletofusimotor (beta) unit in cat soleus muscle. *Brain Res* 1977, 129:341-345.
6. Burke RE. Physiology of motor units, in Engle AG (ed): *Myology; Basic Clinical*. New York, NY McGraw-Hill, 1986, 1:419-443.
7. Crago PE, Houk JC, Rymer WZ. Sampling of total muscle force by tendon organs. *J Neurophysiol* 1982, 47:1069-1083.
8. Gordon AM, Huxley AJR Julian FJ. The length-tension diagram of single vertebrate striated muscle fibres. *J Physiol* 1964, 171:28P-30R
9. Hunt CC. Mammalian muscle spindle: Peripheral mechanisms. *Physiol Rev* 1990, 70:643-663.
10. Huxley A. Muscular contraction. *Annu Rev Physiol* 1988, 50:1-16.
11. Huxley A, Niedergerke R. Structural changes in muscle during contraction: Interference microscopy of living fibres. *Nature* 1954, 173:971-973.
12. Huxley H, Hanson J. Changes in the cross-striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature* 1954, 173:973-976.
13. Jami L. Golgi tendon organs in mammalian skeletal muscle: Functional properties and central actions. *Physiol Rev* 1992, 72:623-666.
14. Lieber RL (ed). *Skeletal Muscle Structure and Function: Implications for Rehabilitation and Sports Medicine*. Baltimore, MD, Williams & Wilkins, 1992.
15. Nichols TR, Houk JC. Improvement in linearity and regulation of stiffness that results from actions of stretch reflex. *J Neurophysiol* 1976, 39:119-142.
16. Vallbo AB. Discharge patterns in human muscle spindle afferents during isometric voluntary contractions. *Acta Physiol Scand* 1970, 80:552-566.