

ΑΝΑΤΟΜΙΑ, ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΚΕΛΕΤΙΚΩΝ ΜΥΩΝ

Μ.Κ. ΚΑΣΕΤΑ
Γ. Π. ΤΖΑΓΚΑΡΑΚΗΣ

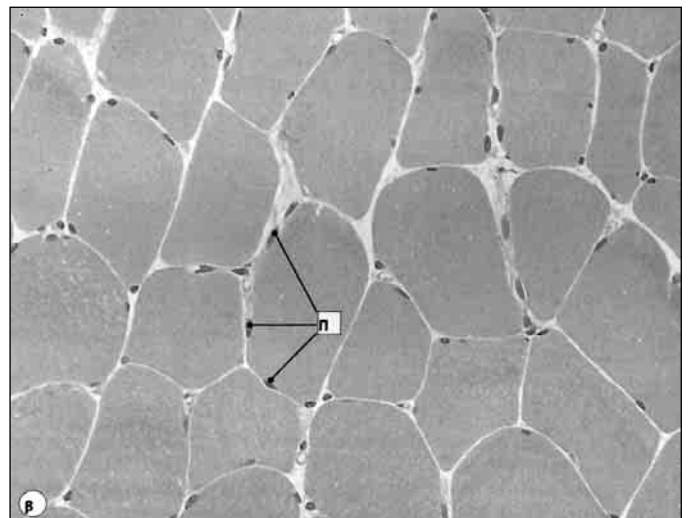
Οι σκελετικοί μύες αποτελούν το 40-45% του βάρους του σώματος. Έχουν αναγνωριστεί 600 διαφορετικοί μύες στο ανθρώπινο σώμα. Ο σκελετικός μυς είναι μια πολύπλοκη κατασκευή, η οποία αποτελείται από μυικά κύτταρα, οργανωμένο δίκτυο αγγείων και νεύρων και εξωκυττάρια θεμέλια ουσία.

ΜΥΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

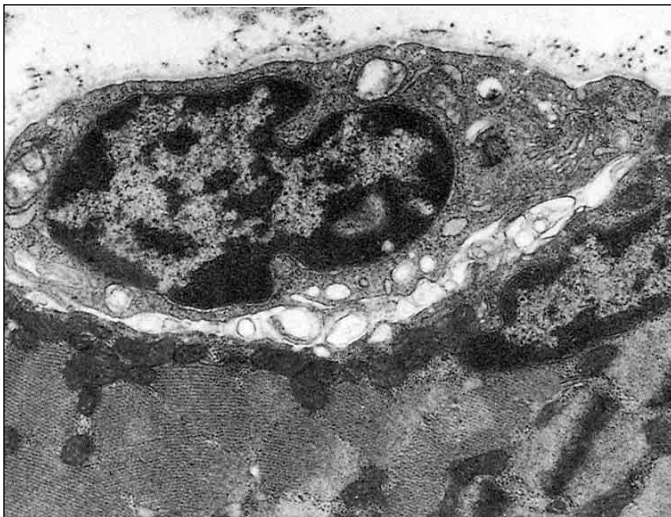
Α. Ιστολογική οργάνωση

Η βασική δομική μονάδα του σκελετικού μύος είναι το γραμμωτό μυικό κύτταρο (εικόνα 1). Επειδή τα μυικά κύτταρα έχουν εξαιρετικά μεγάλο μήκος (έως και 10 cm), είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ο όρος γραμμωτή μυική ίνα, παρά κύτταρο. Κατά την εμβρυογένεση, οι σκελετικοί μύες (γραμμωτοί) αναπτύσσονται από μεσεγχυματικούς ιστούς με την εμφάνιση μικρών ατρακτόμορφων μονοπύρηνων κυττάρων, των ραβδομυοβλαστών. Αργότερα, οι πολυπύρηνες μυικές ίνες σχηματίζονται από τη συνένωση πολυάριθμων μεμονωμένων ραβδομυοβλαστών και αυξάνουν σε μέγεθος, ειδικά μετά τη σύνδεσή τους με το νευρικό σύστημα. Στους γραμμωτούς μύες του ενήλικου παραμένουν μερικά κύτταρα με λειτουργίες ραβδομυοβλαστών, τα οποία ονομάζονται δορυφόρα. Σε περίπτωση καταστροφής μυικού ιστού τα κύτταρα αυτά διαθέτουν την ικανότητα πολλαπλασιασμού και παραγωγής νέων μυικών ινών (εικόνα 2).

Κάθε μυική ίνα αποτελείται από μεγάλο αριθμό μυοϊνιδίων, και πολλές μυικές ίνες μαζί διατάσσονται παράλληλα και σε ευθεία και σχηματίζουν έναν μυ. Μέσω αυτής της διάταξης, όταν συστέλλονται, ασκούν δύναμη προς την ίδια κατεύθυνση. Ως προς τον κατακόρυφο άξονα του μύος, η διάταξη των ινών μπορεί να είναι παράλληλη ή λοξή. Οι λοξές μυικές ίνες σχηματίζουν πτεροειδείς, ημιπτεροειδείς ή ατρακτοειδείς μύες (σχήμα 1). Η κυτταρική επιφάνεια του τελικού τμήματος των



Εικόνα 1. Γραμμωτός μυικός ιστός σε εγκάρσια τομή. Π: πυρήνες.

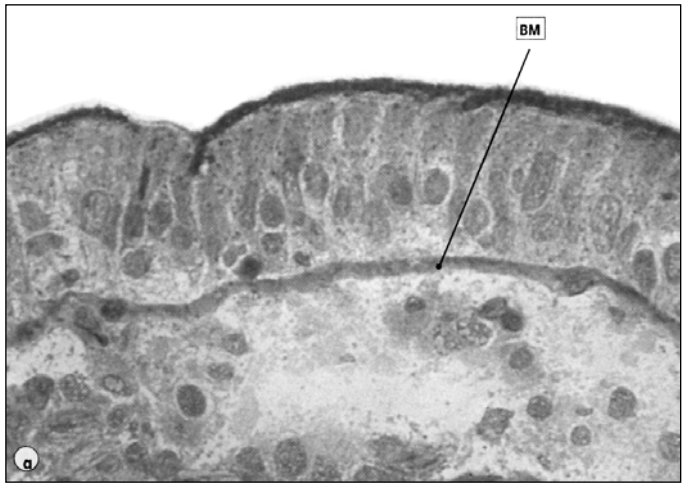


Εικόνα 2. Φωτογραφία ενός δορυφόρου κυτάρου από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Τα ατρακτόμορφα κύτταρα εντοπίζονται ακριβώς κάτω από τη μεμβράνη της μυϊκής ίνας.

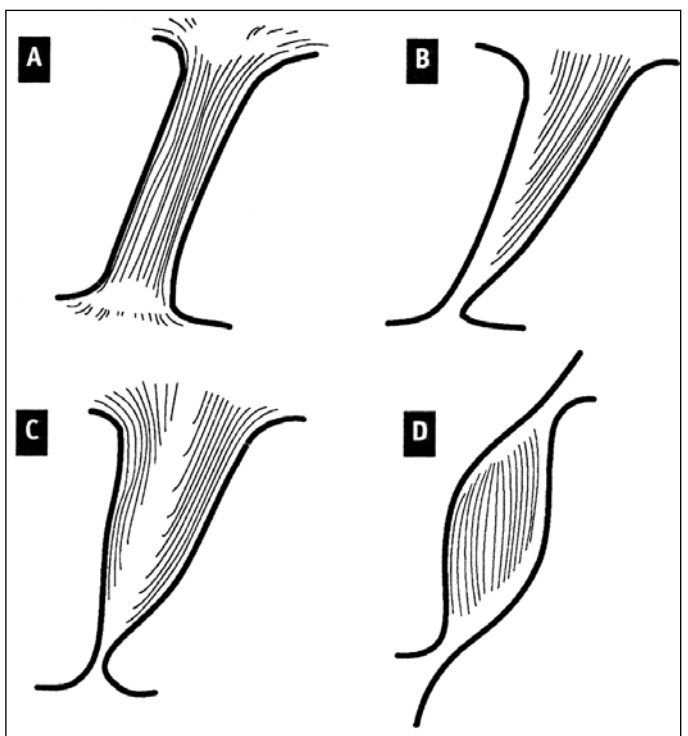
μυϊκών ινών παρουσιάζει ιδιαίτερη διαμόρφωση, συνδεδεμένη με κατάλληλα οργανωμένους ινοκολλαγόνωδεις σπηρικτικούς ιστούς, οι οποίοι συμμετέχουν στη μετάδοση της δύναμης συστολής σε άλλα ανατομικά μέρη. Οι σπηρικτικοί αυτοί ιστοί σχηματίζουν τένοντες ή ευρύτερες καταφυτικές δομές που έχουν την ικανότητα πρόσφυσης σε οστικές επιφάνειες ή σε πέταλα συνδετικού ιστού, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ των ινών γεγονικών μυών και ονομάζονται μυϊκές περιτονίες. Η μεμβράνη που περιβάλλει τη μυϊκή ίνα καλείται ενδομύιο. Πολλές μυϊκές ίνες οργανώνονται σε δεσμίδες από μια μεμβράνη που ονομάζεται περιμύιο, ενώ όλος ο μύς περιβάλλεται από το επιμύιο (σχήμα 2). Αυτοί οι μεμβρανώδεις σχηματισμοί περιβάλλουν το μυ χαλαρά, επιτρέποντας μεγάλες μεταβολές του μεγέθους του κατά τη συστολή και τη χαλάρσή του. Το ίδιο συμβαίνει και με τα πολυάριθμα αγγεία που τροφοδοτούν το μυ κατά τις μεγάλες μεταβολικές του ανάγκες.

Η αρχιτεκτονική των μυϊκών ινών είναι εξειδικευμένη για τη λειτουργία του μύος και καθοριστική για τις συσταλτικές του ιδιότητες. Συνήθως, οι μυϊκές ίνες έχουν λοξή διάταξη ως προς τον άξονα του μύος και είναι βραχύτερες. Η λοξή διάταξη των μυϊκών ινών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυνάμεως που μεταφέρεται στον τένοντα, σε αναλογία με τη γωνία που σχηματίζουν αυτές με τον κάθετο άξονα (σχήμα 3). Επιτρέπει, όμως, να τοποθετηθεί μεγαλύτερος αριθμός ινών σε μικρότερη εγκάρσια διατομή.

Σε γενικές γραμμές, η μέγιστη παραγωγή δύναμης από το μυ είναι ανάλογη της φυσιολογικής του εγκάρσιας διατομής, αλλά η συνολική μείωση του μήκους κατά τη συστολή και η ταχύτητα αυτής είναι ανάλογες του μήκους κά-

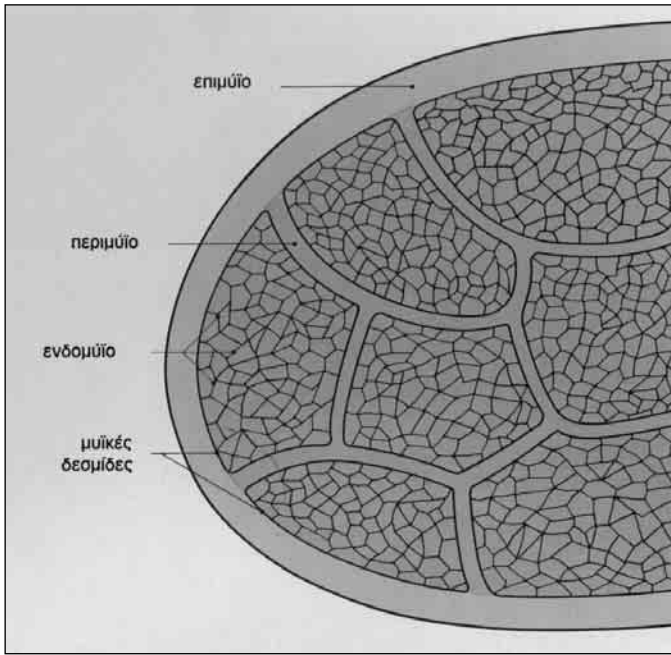


Εικόνα 3. ΒΜ: βασική μεμβράνη.



Σχήμα 1. Αρχιτεκτονική μυϊκών ινών: Α. παράλληλη, Β. πτεροειδής, C. ημιπερωτή, D. ατρακτοειδής.

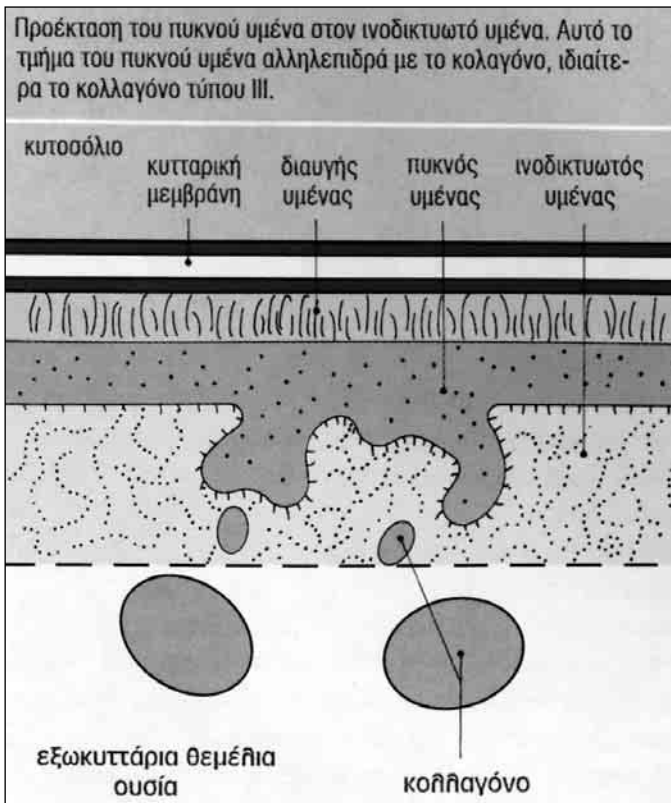
θε μυϊκής ίνας. Ένας μύς που έχει ανάγκη μεγάλης δυνάμεως, θα διαθέτει πολλές βραχείες μυϊκές ίνες διατεταγμένες λοξά, ενώ ο μύς που χρήζει λιγότερης δυνάμεως αλλά μεγαλύτερης μεταβολής μήκους κατά τη συστολή, θα περιέχει λιγότερες αλλά μακρές ίνες. Στην κλινική πράξη αυτό σημαίνει ότι όταν ένας μύς αχρηστευθεί και αντικατασταθεί χειρουργικά από μια άλλη μονάδα μύος-τένοντος, αυτή η μονάδα πρέπει να διαθέτει τα ίδια αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά με τον υπό αντικατάσταση μυ.



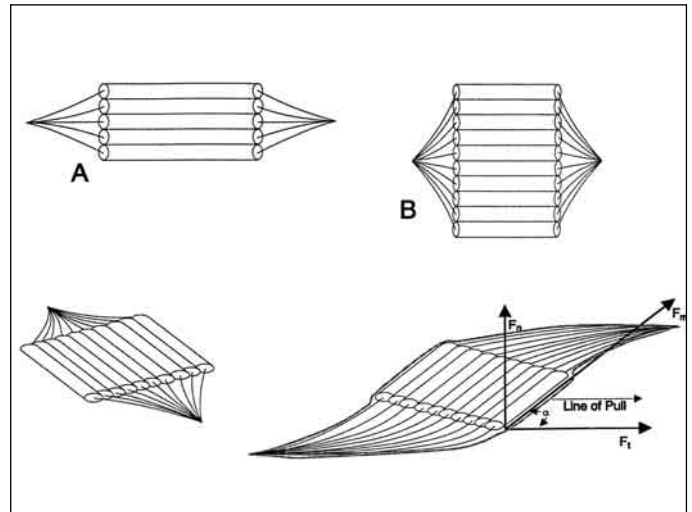
Σχήμα 2. Οργάνωση μυϊκών ινών σε διακριτούς μύες.

B. Κυτταρολογικά χαρακτηριστικά

Στο μυϊκό κύτταρο, η κυτταρική μεμβράνη (πλασματική μεμβράνη) ονομάζεται σαρκειλήμμα. Εξωτερικά του σαρκειλήμματος υπάρχει η βασική μεμβράνη (εικόνα 3), μια δομή συνδετικού ιστού πάχους 100-200 nm. Η "φυλλοειδής"



Σχήμα 4. Υμένες βασικής μεμβράνης.

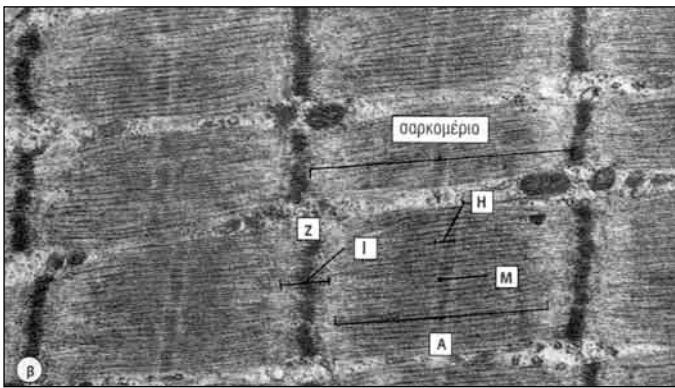


Σχήμα 3. Το μήκος του A είναι διπλάσιο του B. Η εγκάρσια διατομή του A είναι ίση με του B. Η μέγιστη δύναμη του A είναι η μισή αυτής του B, ενώ η μέγιστη μεταβολή του μήκους του A είναι διπλάσια αυτής του B. Η λοξή διάταξη των μυϊκών ινών μειώνει τη δύναμη ανάλογα με το μέγεθος της γωνίας α.

αυτή δομή δρα ως ενδιάμεσος χώρος ανάμεσα στα παρεγχυματικά κύτταρα και τους σπληνικούς ιστούς. Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο φαίνεται ότι η μεμβράνη αυτή αποτελείται από τον πυκνό υμένα (Π) μεταξύ αυτού και του συνδεδεμένου κυτάρου, από το διαυγή υμένα (Δ), ενώ εξωτερικά του πυκνού υμένα υπάρχει ο ινοδικτυωτός υμένας (ΙΔ) που συγκωνεύεται με τις ινώδεις πρωτεΐνες της εξωκυττάριας θεμέλιας ουσίας (σχήμα 4). Το σύνολο αυτών των δομών συνιστά το ενδομύιο.

Η βασική μεμβράνη αποτελείται από κολλαγόνο τύπου IV, λαμινίνη, θειική ηπαράνη, εντακτίνη, ινονεκτίνη και άφθονα συστατικά πρωτεϊνών και γλυκοζαμινογλυκανών που δεν έχουν τυποποιηθεί πλήρως.

Κάθε μυϊκή ίνα περιέχει μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες μυϊκά ινίδια και, κάθε μυϊκό ινίδιο έχει περίπου 1500 μικκύλια μουσίνης (σχήμα 5) και 3000 μικκύλια ακτίνης (σχήμα 6) τοποθετημένα το ένα πλάι στο άλλο. Τα μικκύλια αυτά είναι μεγάλα μόρια πολυμερισμένης πρωτεΐνης, υπεύθυνα για τη συστολή του μύος. Τα μικκύλια της μουσίνης αντιπαρατίθενται με τα μικκύλια της ακτίνης, με αποτέλεσμα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο να διακρίνονται φωτεινές και σκοτεινές ζώνες (εικόνα 4). Στις φωτεινές ζώνες (ζώνες I) περιέχονται μόνο μικκύλια ακτίνης, ενώ στις σκοτεινές ζώνες (ζώνες A) περιέχονται μικκύλια μουσίνης καθώς και τα άκρα των μικκυλίων της ακτίνης στις περιοχές αλληλοκάλυψης αυτών. Στα πλάγια των μικκυλίων της μουσίνης (εκτός του κεντρικού τμήματος αυτών) υπάρχουν μικρές προεξοχές που ονομάζονται εγκάρσιες γέφυρες. Τα άκρα των μικκυλίων της ακτίνης προσφύονται σε δίσκο (Z). Από το δίσκο αυτό τα



Εικόνα 4. Φωτεινές και σκοτεινές ζώνες στο μικροσκόπιο.

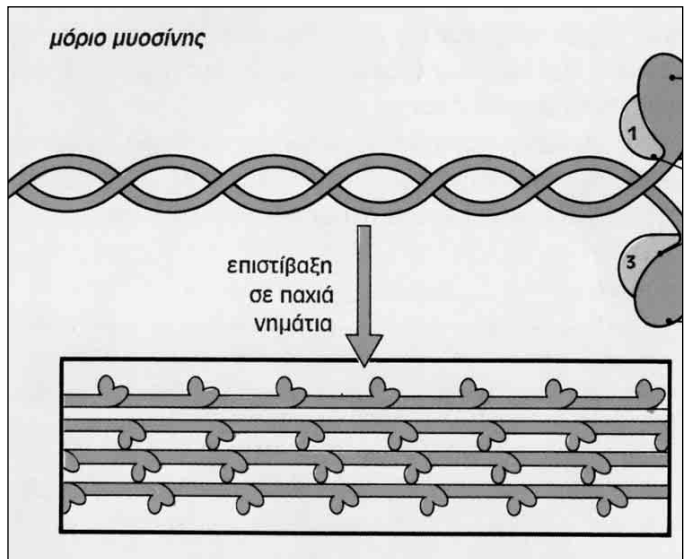
μικκύλια της ακτίνης εκτείνονται και προς τις δύο κατευθύνσεις για να αντιπαρατεθούν προς τα μικκύλια της μυοσίνης (σχήμα 7).

Τα μυικά ινίδια μέσα στη μυική ίνα περιβάλλονται από το σαρκόπλασμα (κυτταρόπλασμα), που περιέχει τα συνήθη ενδοκυττάρια στοιχεία. Το υγρό του σαρκοπλάσματος περιέχει μεγάλα ποσά καλίου, μαγνησίου, φωσφορικών αλάτων και πρωτεϊνικών ενζύμων. Περιέχει, επίσης, σε μεγάλο αριθμό μιτοχόνδρια, τα οποία βρίσκονται ενδιάμεσα και παράλληλα με τα μυικά ινίδια. Δύο πολύ σημαντικά οργανίδια είναι το σύμπλεγμα Golgi και το σαρκοπλασματικό (ενδοπλασματικό) δίκτυο.

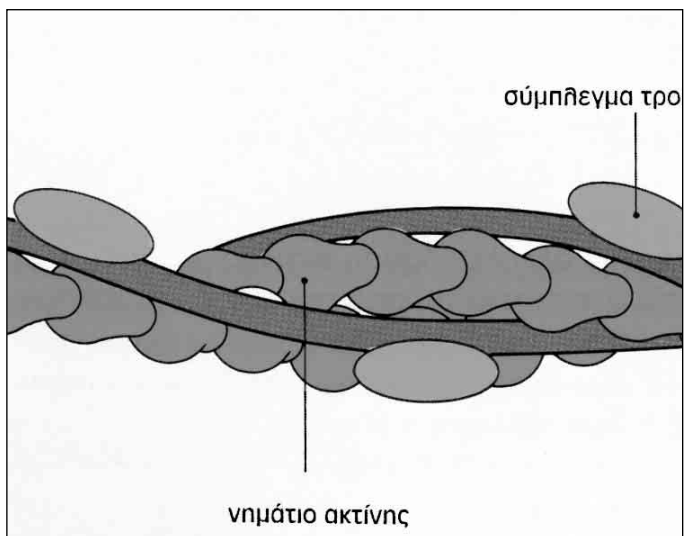
Η μυική ίνα περιέχει πολυάριθμους πυρήνες τοποθετημένους περιφερικά της, αμέσως κάτω από το σαρκίλημα (εικόνα 1). Στην περιφέρεια κάθε ίνας εντοπίζονται τα δορυφόρα κύτταρα.

ΝΕΥΡΟΜΥΙΚΗ ΣΥΝΑΨΗ

Οι νευρικές ίνες των σκελετικών μυών δέχονται νύρωση από παχιές εμμύελες νευρικές ίνες, οι οποίες ξεκινούν από τους μεγάλους κινητικούς νευρώνες των προσθίων κεράτων του νωπιαίου μυελού. Κάθε νευρική ίνα φυσιολογικά διακλαδίζεται πολλές φορές και διεγείρει τρεις έως και μερικές εκατοντάδες μυικές ίνες των σκελετικών μυών. Η νευρική απόληξη πραγματοποιεί μια σύνδεση με τη μυική ίνα κοντά στο μέσον της, η οποία ονομάζεται νευρομυική σύνδεση, το δε δυναμικό ενεργείας μεταδίδεται και στις δύο κατευθύνσεις, προς τα άκρα της μυικής ίνας. Με εξαίρεση το 2% μόνο των μυικών ινών, σε κάθε μυική ίνα υπάρχει μία μόνο νευρομυική σύνδεση (νευρομυική σύναψη). Οι μυικές ίνες που ανήκουν σε μια κινητική μονάδα (νευράξονας και οι μυικές ίνες που νευρώνει) δεν είναι απαραίτητα παρακείμενες και μπορεί γειτονικές μυικές ίνες να ανήκουν σε διαφορετικές κινητικές μονάδες. Όταν ένας μυς εκτελεί κινήσεις λεπτές και συγχρονισμένες, μπορεί κάθε κινητική μονάδα να αποτελείται από δέκα μόνο μυικές ίνες. Σε μεγαλύτερους μυς, όπως ο γαστροκνήμιος, κάθε κινη-

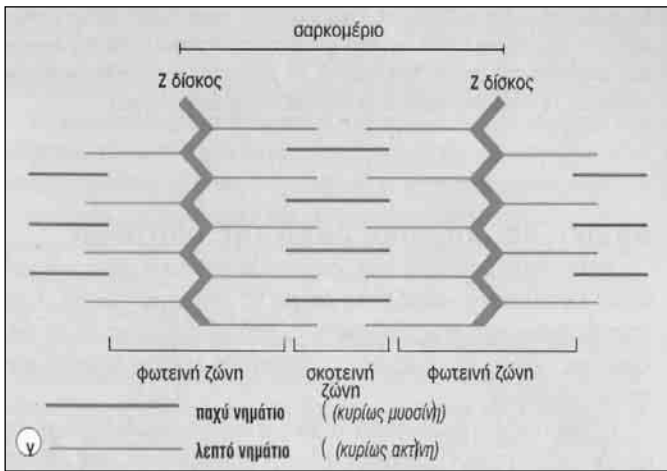


Σχήμα 5. Μόριο μυοσίνης.



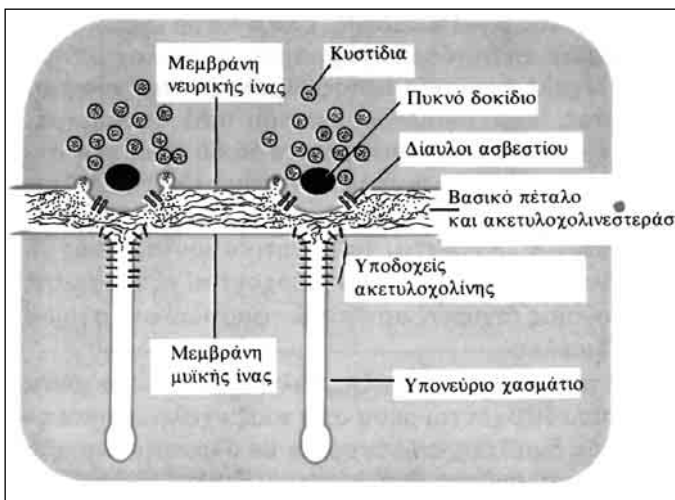
Σχήμα 6. Η τροπομυοσίνη είναι ένα μόριο που περιβάλλει και σταθεροποιεί την ακτίνη. Το σύμπλεγμα τροπονίνης ρυθμίζει τη σύνδεση ακτίνης-μυοσίνης και αποτελείται από τρία πολυπεπίδια, T, I και C. Η τροπονίνη T συνδέει το σύμπλεγμα με την τροπομυοσίνη και το τοποθετεί πάνω στο νημάτιο ακτίνης στη θέση που φυσιολογικά θα δεσμευόταν με τη μυοσίνη. Η τροπονίνη I εμποδίζει τη σύνδεση ακτίνης και μυοσίνης. Η τροπονίνη C δεσμεύει Ca και προκαλεί αλλαγή στη στερεοδιάταξη του συμπλέγματος της τροπονίνης, επιτρέποντας έτσι στη μυοσίνη να διατηρεί πρόσβαση στο νημάτιο της ακτίνης.

τική μονάδα μπορεί να αποτελείται από 1.000 μυικές ίνες. Κάθε κινητική μονάδα για να συσταθεί διεγείρεται από μια ηλεκτρική ώση που ξεκινά από το σώμα του νευρικού κυττάρου. Η σύναψη του νεύρου με το μυ γίνεται σε μια ειδική περιοχή που ονομάζεται τελική κινητική πλάκα (σχήμα 8).

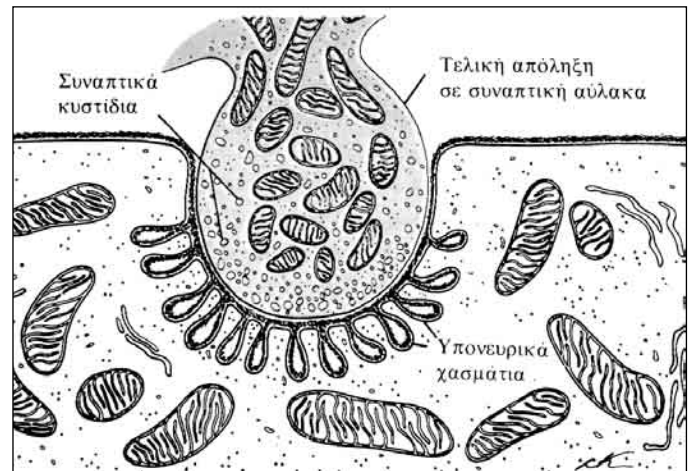


Σχήμα 7. Οι φωτεινές και οι σκοτεινές ζώνες σχηματικά.

Η ηλεκτρική ώση μεταδίδεται από τη νευρική στη μυική ίνα με χημικούς διαβιβαστές (ακετυλοχολίνη). Η ακετυλοχολίνη επιδρά τοπικά στη μεμβράνη της μυικής ίνας και προκαλεί τη διάνοιξη πρωτεϊνικών διαύλων (σχήμα 9). Η διάνοιξη αυτή επιτρέπει τη διαρροή προς το εσωτερικό της μυικής ίνας μεγάλου ποσού ιόντων νατρίου στο σημείο της νευρομυικής σύναψης, γεγονός που προκαλεί την έναρξη του δυναμικού ενεργείας στη μεμβράνη της μυικής ίνας. Το δυναμικό αυτό προκαλεί εκπόλωση της μεμβράνης της μυικής ίνας, αλλά μεταφέρεται και βαθιά μέσα στη μυική ίνα με ένα εκτεταμένο δίκτυο μεμβρανών (σχήμα 10). Έτσι, απελευθερώνεται μεγάλος αριθμός ιόντων ασβεστίου από το σαρκοπλασματικό δίκτυο. Τα ιόντα ασβεστίου διεγείρουν την ανάπτυξη ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των μυοκυλίων της ακτίνης και της μυοσίνης με αποτέλεσμα τη διολίσθηση μεταξύ τους, γεγονός που αποτελεί τη μυική συστολή. Μετά από κλάσμα δευτερολέπτου, τα ιόντα ασβεστίου αντλούνται πίσω προς το σαρ-



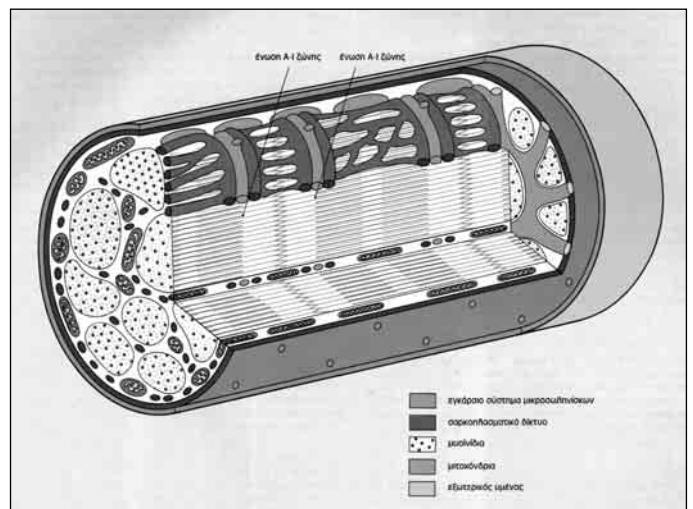
Σχήμα 9. Απελευθέρωση ακετυλοχολίνης από τα συναπτικά κυστίδια.



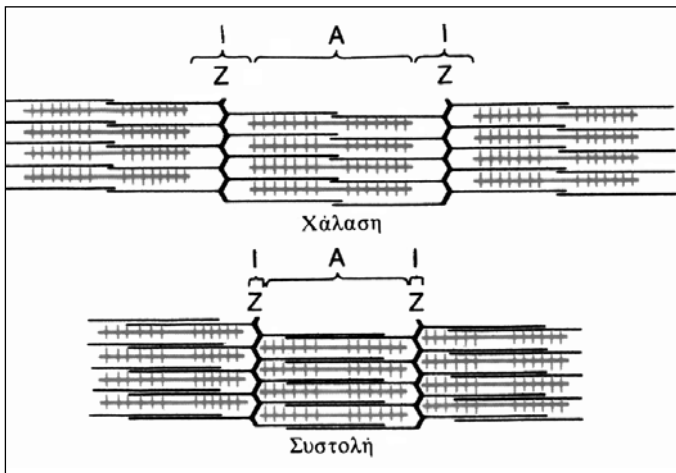
Σχήμα 8. Διάφορες όψεις της τελικής κινητικής πλάκας.

κοπλασματικό δίκτυο, όπου και παραμένουν αποθηκευμένα μέχρι την άφιξη νέου δυναμικού ενεργείας. Έτσι, η μυική συστολή τελειώνει (σχήμα 11).

Υπάρχουν τέσσερα είδη μυικής συστολής : η ισομετρική, η μειομετρική (συγκεντρική), η πλειομετρική (εκκεντρική) και η ισοκινητική. Στην ισομετρική συστολή βραχύνονται τα συσταλτά στοιχεία του μύος (μυοϊνίδια) και εκτείνονται τα ελαστικά στοιχεία σε σειρά (τένοντες και συνδετικός ιστός που συνδέει τα σαρκομέρια), αλλά το συνολικό του μήκος παραμένει σταθερό (σχήμα 12). Το μηχανικό έργο είναι μηδενικό (τα παράλληλα ελαστικά στοιχεία αναφέρονται στο συνδετικό ιστό που περιβάλλει τα μυοϊνίδια, ενδομύιο, περιμύιο, επιμύιο, και αντιστέκονται στη διάταση όπως ένα λάστιχο).



Σχήμα 10. Η διέγερση του μυικού κυττάρου μεταβιβάζεται από τη μεμβράνη στο εσωτερικό του κυττάρου διαμέσου του εγκάρσιου συστήματος μικροσωληνίσκων, σε κάθε πλευρά των οποίων βρίσκονται δύο τμήματα του σαρκοπλασματικού δικτύου που περιέχουν υψηλή συγκέντρωση Ca.

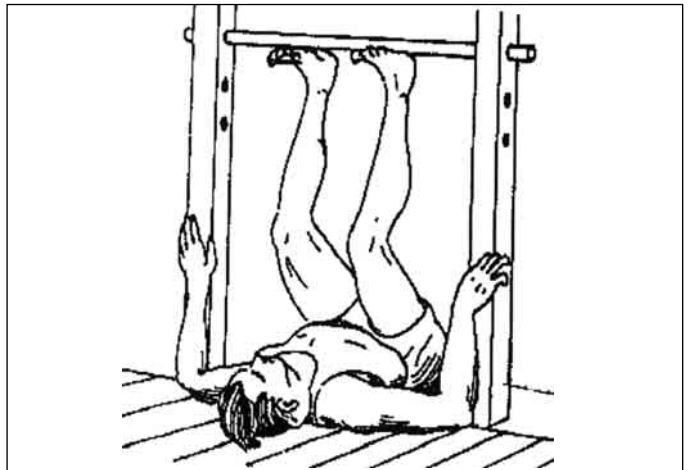


Σχήμα 11. Μυϊκό ινίδιο σε κατάσταση χάλασης και συστολής.

Στη μειομετρική συστολή βραχύνονται όχι μόνο τα συστατικά στοιχεία αλλά και τα ελαστικά, καθώς και το συνολικό μήκος του μυός. Στην περίπτωση αυτή, ο μυς υπερνικά την εξωτερική αντίσταση και παράγεται θετικό μηχανικό έργο.

Στην πλειομετρική συστολή ο μυς επιμηκύνεται αντενεργώντας στην εξωτερική επιβάρυνση που είναι πέρα από τη δύναμή του (σχήμα 13). Με την πλειομετρική συστολή παράγεται η μεγαλύτερη μυϊκή δύναμη, ενώ με τη μειομετρική η μικρότερη. Στην ισομετρική παράγεται ενδιάμεση των δύο άλλων δύναμη.

Η ισοκίνητική μυϊκή συστολή παρατηρείται στην εκτέλεση ειδικών κινήσεων, όπου μπορεί να ρυθμιστεί (με μηχανικό ή με άλλο τρόπο) η εξωτερική επιβάρυνση, δη-



Σχήμα 12. Στατική άσκηση με εκδήλωση ισομετρικής μυϊκής συστολής.

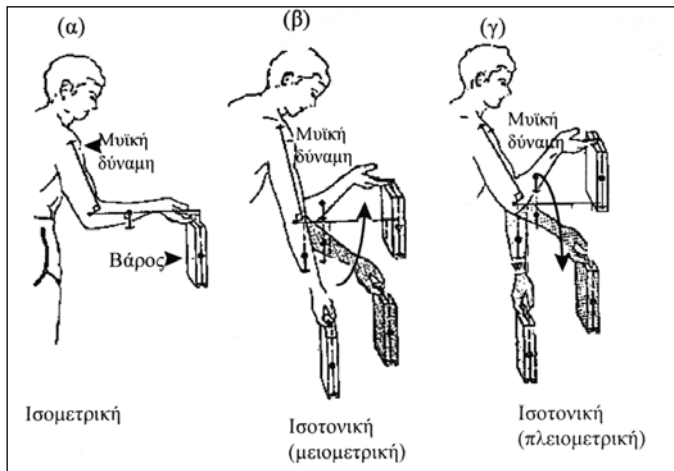
λαδή η αντίσταση στην κίνηση ενός μέλους του σώματος. Η αντίσταση αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της έντασης του μυός.

ΕΙΔΗ ΜΥΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΥΟΣ

Οι μυϊκές ίνες με βάση την ταχύτητα συστολής τους ταξινομούνται σε δυο είδη: τις μυϊκές ίνες βραδείας συστολής και τις μυϊκές ίνες ταχείας συστολής. Με βάση τις ιστοχημικές τους ιδιότητες διακρίνουμε ίνες οξειδωτικές (τύπου I), οξειδογλυκολυτικές (τύπου IIα) και γλυκολυτικές (τύπου IIβ). Τα χαρακτηριστικά τους αναγράφονται συνοπτικά στον πίνακα 1.

Πίνακας 1.

	ΤΥΠΟΣ I	ΤΥΠΟΣ IIΑ	ΤΥΠΟΣ IIΒ
Άλλο όνομα	κόκκινες, αργή σύσπαση-οξειδωση	λευκές, ταχεία σύσπαση-γλ. οξειδωση	ταχεία γλυκόλυση
Ταχύτητα συστολής	αργή	ταχεία	ταχεία
Δύναμη συστολής	χαμηλή	υψηλή	υψηλή
Κόπωση	ανθεκτική	μέτρια	κακή
Αερόβια δυνατότητα	υψηλή	μέτρια	χαμηλή
Αναερόβια δυνατότητα	χαμηλή	μέτρια	υψηλή
Μέγεθος κιν. μονάδας	μικρό	μεγαλύτερο	μέγιστο
Τριχοειδική πυκνότητα	υψηλή	υψηλή	χαμηλή



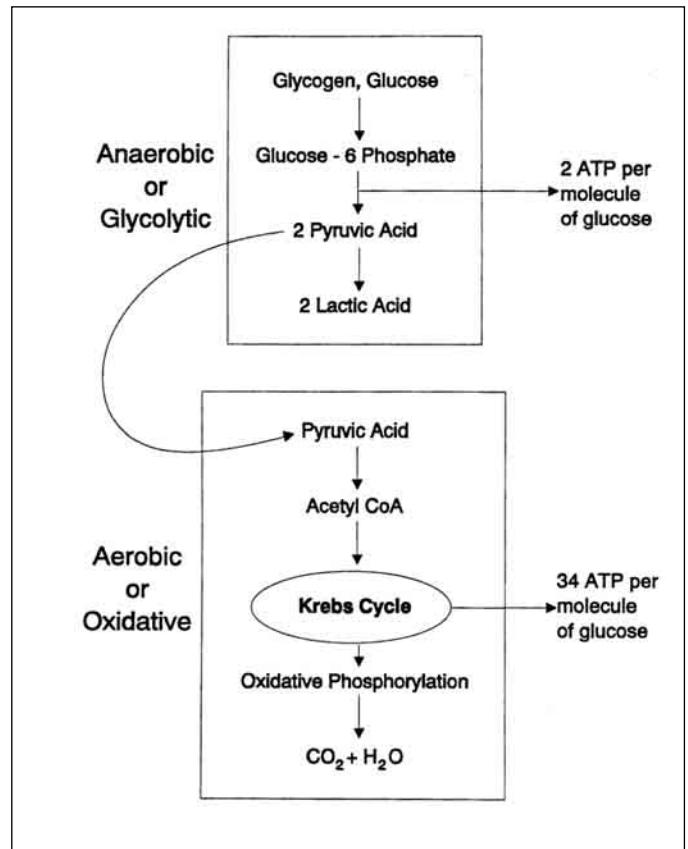
Σχήμα 13. Είδη μυϊκής συστολής.

Υπάρχει μεγάλη διαφορά στο ποσοστό του είδους των μυϊκών ινών από άτομο σε άτομο, αλλά και από σημείο σε σημείο μέσα στον ίδιο μυ. Η μελέτη της αναλογίας των μυϊκών ινών σε έναν μυ γίνεται με το ισοκινητικό δυναμόμετρο και με τη βιοψία. Το κεντρικό νευρικό σύστημα στρατολογεί πρώτα τις μικρές κινητικές μονάδες (τύπου I), ενώ οι μεγάλες κινητικές μονάδες στρατολογούνται πρώτα σε μεγάλης έντασης άσκηση (τύπου IIβ). Οι μεσαίες ίνες (τύπου IIα) έχουν ενδιάμεση θέση στη στρατολόγηση. Ενώ το σχετικό ποσοστό των IIα και IIβ ινών είναι γενετικά προκαθορισμένο, υπάρχουν ενδείξεις ότι με προπόνηση αντοχής μπορεί να αυξηθεί το ποσοστό των IIα, ενώ με προπόνηση δύναμης το ποσοστό των IIβ ινών. Οι ίνες τύπου I μόνο πειραματικά μπορούν να μετασχηματιστούν σε ίνες τύπου II.

Στους αθλητές αγωνισμάτων που απαιτούν ταχύτητα και ισχύ, όπως δρομείς ταχύτητας, άλτες, ρίπτες, αρσιβαρίστες, επικρατούν οι ίνες ταχείας συστολής, ενώ στους αθλητές αγωνισμάτων αντοχής, όπως μαραθωνοδρόμοι, δρομείς αντοχής, βαδιστές, ποδηλάτες, οι βραδείες μυϊκές ίνες.

ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΜΥΟΣ

Η τριφωσφορική αδενοσίνη είναι η άμεση πηγή ενέργειας, το "ενεργειακό νόμισμα" του κυττάρου, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μυϊκού και κάθε μορφής βιολογικού έργου. Από κάθε γραμμομόριο ATP που υδρολύεται, διασπάται ένας φωσφορικός δεσμός υψηλής ενέργειας που αποδεσμεύει περίπου 10 θερμίδες ελεύθερης ενέργειας. Τα αποθέματα της ATP στους μύες αρκούν μόνο για την ενεργειακή προμήθεια 1,7 χιλιοθερμίδων. Αυτό σημαίνει πως για να συνεχιστεί το μυϊκό έργο, η ATP πρέπει να ξαναγεννηθεί από άλλες έμμεσες πηγές ενέργειας. Οι πηγές αυτές είναι η φωσφοκρεατί-



Σχήμα 14. Περίληψη ATP που αποδίδεται κατά τον αερόβιο και τον αναερόβιο καταβολισμό των υδατανθράκων. Η γλυκόλυση και ο αναερόβιος μεταβολισμός επιτελούνται στο σαρκόπλασμα, ενώ η οξειδωτική φωσφορυλίωση στα μιτοχόνδρια.

νη, που προμηθεύει το μέσο άνθρωπο μέχρι 5 χιλιοθερμίδες, οι δεξαμενές γλυκογόνου, που δίνουν περίπου 1.500 χιλιοθερμίδες, και τα λίπη που φθάνουν μέχρι 50.000 χιλιοθερμίδες.

Η ανασύνθεση της ATP από τη φωσφοκρεατίνη γίνεται στιγμιαία, ενώ από το γλυκογόνο και τα λιπαρά οξέα επιτυγχάνεται με μια σειρά αντιδράσεων, όπως οξειδωτική φωσφορυλίωση, όπου το ATP δημιουργείται από ADP και φώσφορο χρησιμοποιώντας ενέργεια που παρέχει ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρονίων. Ιόντα υδρογόνου ενώνονται με οξυγόνο και παράγουν νερό. Τα ιόντα αυτά προέρχονται από την αποδόμηση των λιπών (β-οξείδωση) και των υδατανθράκων (γλυκόλυση). Τα προϊόντα της αποικοδόμησης αυτής ανήκουν στο ακετυλοσυνένζυμο Α. Το συνένζυμο αυτό εισέρχεται στον κύκλο του Krebs, όπου σε κυκλική αλληλουχία χημικών αντιδράσεων παράγονται πρόσθετα ιόντα υδρογόνου και διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τις αερόβιες αυτές διεργασίες παράγονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Ενέργεια, όμως, παράγεται και απευθείας από τη γλυκόλυση, μια αναερόβια διαδικασία που δεν απαιτεί οξυγόνο, αλλά στην περι-

Πίνακας 2.

Μορφές άσκησης	Χαρακτηριστικά της άσκησης	Παράδειγμα	Αρχικές ενεργειακές πηγές
Αναερόβια (τοπική μυϊκή αντοχή)	Έντονη δραστηριότητα μικρής διάρκειας. Συμμετέχουν συνήθως μικρές μυϊκές ομάδες	Συνεχόμενη άρση βαρών	ΑΤΡ και CP Παραγωγή ΓΟ
Αντοχή ταχύτητας Αντοχή ισχύος (Αναερόβια)	Έντονες δρομικές δραστηριότητες διάρκειας μερικών sec	Δρόμοι διάρκειας μέχρι 6 sec	ΑΤΡ και CP με πιθανότητα παραγωγής ΓΟ
Γαλακτική αντοχή (Αναερόβια)	Έντονες δραστηριότητες διάρκειας από 30 sec έως μερικά min	Δρόμοι μέχρι 800 m	Μετατροπή του μυϊκού γλυκογόνου σε ΓΟ
Τοπική αερόβια αντοχή	Επίμονη δραστηριότητα με συμμετοχή μικρών μυϊκών ομάδων διάρκειας μερικών min	Ασκήσεις των σκελών μεγάλης διάρκειας	Οξειδωση του μυϊκού γλυκογόνου
Αερόβια	Επίμονη δραστηριότητα που διαρκεί αρκετά min, με συμμετοχή μεγάλων μυϊκών ομάδων	Δρόμος, κολύμπι, ποδηλασία	Οξειδωση του μυϊκού γλυκογόνου
Αντοχή μεγάλης διάρκειας	Δραστηριότητες που διαρκούν περισσότερο από μία ώρα	Μεγάλες αποστάσεις, μαραθώνιος, ποδηλασία	Οξειδωση του λίπους

πωση αυτή η ποσότητα ενέργειας είναι μικρή (σχήμα 14).

Σε προσπάθεια μικρής διάρκειας και υψηλής έντασης επικρατεί ο αναερόβιος μηχανισμός, σε έντονη μυϊκή προσπάθεια που διαρκεί περίπου δύομισι λεπτά την απαιτούμενη ενέργεια τη μοιράζονται οι δύο μηχανισμοί και τέλος, σε παρατεταμένη προσπάθεια χαμηλής έντασης κυριαρχεί ο αερόβιος μηχανισμός. Στον πίνακα 2 φαίνεται ο μηχανισμός παραγωγής ενέργειας ανάλογα με το άθλημα.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΥΟΣ

Η συμπεριφορά του μυός εξαρτάται όχι μόνο από τα ιστοχημικά του χαρακτηριστικά, αλλά και από τις μηχανικές του ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές θεωρούνται θεμελιώδεις για την παραγωγή μυϊκής δύναμης, ταχύτητας και ισχύος και αναφέρονται στη σχέση μεταξύ του μήκους του μυός και της δύναμης που παράγει, καθώς και στη σχέση μεταξύ της ταχύτητας της μυϊκής συστολής και της δύναμης.

Για τη μηχανοδυναμική σχέση του μυός έχει βρεθεί ότι,

όταν το αρχικό μήκος του μυός τη στιγμή της διέγερσης αντιστοιχεί στο μήκος της ηρεμίας, ο μυς παράγει την ανώτερη ισομετρική δύναμη. Στο σώμα όπου οι μύες συνδέονται με τα οστά, το μήκος και η απόδοσή τους περιορίζονται από την έκταση της άρθρωσης και δημιουργούνται συστήματα μοχλών. Για να απαντήσουμε στο ερώτημα σε ποια θέση οι μύες παράγουν τη μέγιστη δύναμη, πρέπει να εκτελέσουμε πειράματα. Έχει βρεθεί ότι οι καμπύρες της κνήμης αποδίδουν τη μέγιστη δύναμη όταν το γόνατο βρίσκεται σε γωνία 160°.

Για την ταχοδυναμική σχέση του μυός έχει βρεθεί, μελετώντας μειομετρικές συστολές, ότι όσο πιο γρήγορα συστέλλεται ένας μυς, τόσο πιο λίγη δύναμη παράγει ή ότι ένα ελαφρό αντικείμενο ανυψώνεται γρηγορότερα από ένα βαρύτερο.

Το φαινόμενο της προδιάτασης του μυός έχει μεγάλη πρακτική σημασία και σημαίνει ότι εάν ο μυς σε ένα δεδομένο μήκος διαταθεί αμέσως πριν τη διέγερσή του, παράγει μεγαλύτερη δύναμη. Για να εκδηλωθεί το φαινόμενο παίζει ρόλο η χρονική αλληλουχία μεταξύ διάτασης και προδιέγερσης, καθώς και η ταχύτητα προδιάτασης του μυός.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΠΟΝΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΜΥ

Θα διακρίνουμε τις προσαρμογές του μυός σε δύο είδη προπόνησης, την προπόνηση δύναμης (αναερόβια) και την προπόνηση αντοχής (αερόβια).

Στην προπόνηση δύναμης, όπως η άρση βαρών, η ένταση είναι μεγάλη και η διάρκεια μικρή, από μερικά δευτερόλεπτα έως δυο λεπτά, η αντίσταση μεγάλη και ο αριθμός επαναλήψεων μικρός. Στην περίπτωση αυτή γίνεται κατανάλωση ΑΤΡ, φωσφοκρεατίνης και αναερόβια γλυκόλυση. Το αποτέλεσμα είναι αύξηση της ΑΤΡ, της φωσφοκρεατίνης και των ενζύμων γλυκόλυσης, ενώ μειώνεται ο όγκος των μιτοχονδρίων. Σε αυτό το είδος προπόνησης διαπιστώνεται μυϊκή υπερτροφία σε όλα τα είδη των μυϊκών ινών, καθ' υπερβολή στις τύπου ΙΙ, και αύξηση των συστατικών πρωτεϊνών. Ο συγχρονισμός διέγερσης των κινητικών μονάδων από το ΚΝΣ ανέρχεται από 60% για έναν πτωχά γυμνασμένο μυ, έως και 90% ταυτόχρονης διέγερσης.

Στην προπόνηση αντοχής, οι προσαρμογές αφορούν την προμήθεια ενέργειας και όχι το μέγεθος του μυός, γιατί η πρόκληση που δέχεται ο μυς δεν είναι για να ε-

κτελέσει ένα έργο που ξεπερνά τη δύναμή του, αλλά για να εκτελέσει περισσότερες και ταχύτερες επαναλήψεις πριν την κόπωση. Έτσι, οι προσαρμογές αφορούν το καρδιαγγειακό, την αύξηση της πυκνότητας, του μεγέθους και του αριθμού των μιτοχονδρίων, τη μετατροπή των ινών τύπου ΙΙβ σε ίνες ΙΙα και τη χρήση λιπαρών οξέων αντί γλυκογόνου ως πηγή ενέργειας (διαρκεί για δυο ώρες).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Garrett WE, Best TM. Anatomy, Physiology and Mechanics of skeletal muscle. Basic science in Orthopaedics 683-716.
2. Guyton AG. Ιατρική Φυσιολογία. Τόμος Α, Γ. Παρισιάνος 1992:87-112.
3. Κλεισούρας. Εργοφυσιολογία. έκδοση 6η, Συμμετρία 1997:28-95, 135-184, 165-204.
4. Μπουντόλος. Αθλητική Βιομηχανική 1999:46-50.
5. Stevens A, Lowe J. Ιστολογία. ΠΧ. Πασχαλίδης 1993:42-62, 226-231.
6. Τζιωρτζής Σ. Προπονητική δρομικών αγωνισμάτων κλασικού αθλητισμού 1998:97-104.