

## ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΚΕΛΕΤΙΚΟΥ ΜΥΟΣ

### Δομή του σκελετικού μυός

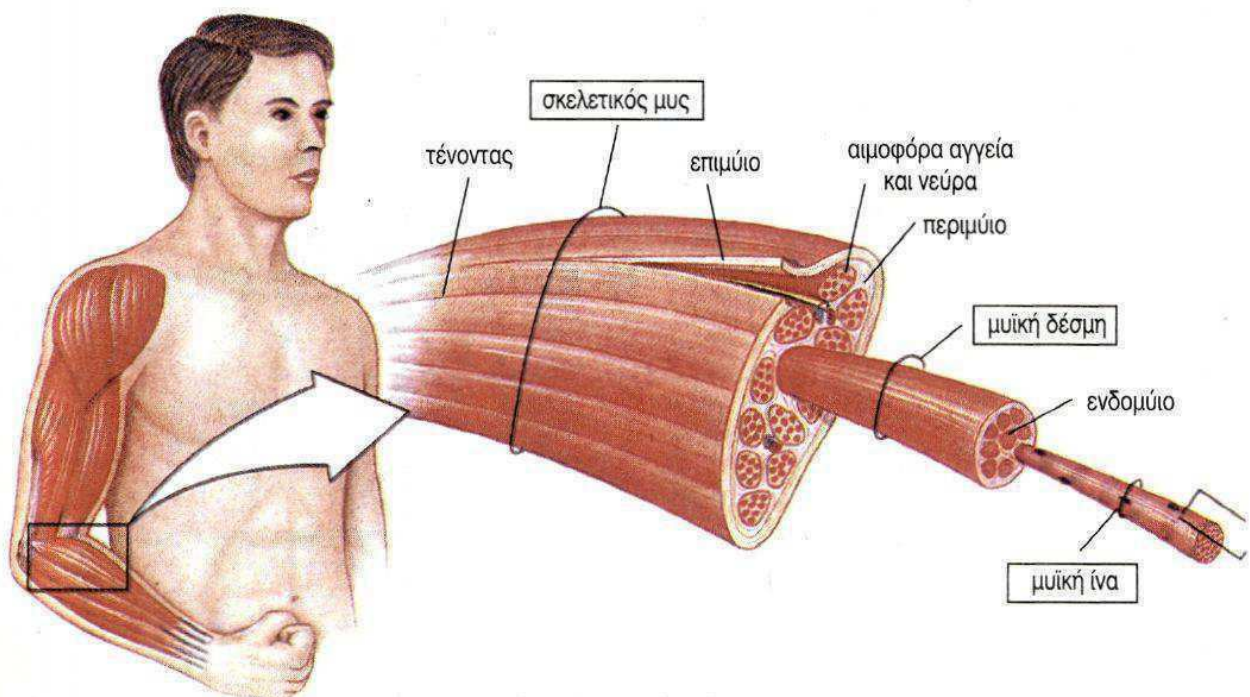
Οι σκελετικοί μύες προσφύονται στα οστά και είναι αυτοτελή όργανα που υπακούουν στη θέλησή μας (εικ. 8.1).

Κάθε γραμμωτός μυς μπορεί να αποτελείται από πολλές χιλιάδες μυϊκές ίνες, οι οποίες δεν αθροίζονται με τυχαίο τρόπο, αλλά διατάσσονται σε δεσμίδες (μυϊκές δέσμες), οι οποίες περιβάλλονται από πυκνό συνδετικό ιστό. Από πυκνό συνδετικό ιστό περιβάλλεται και ο μυς (εικ. 8.2).

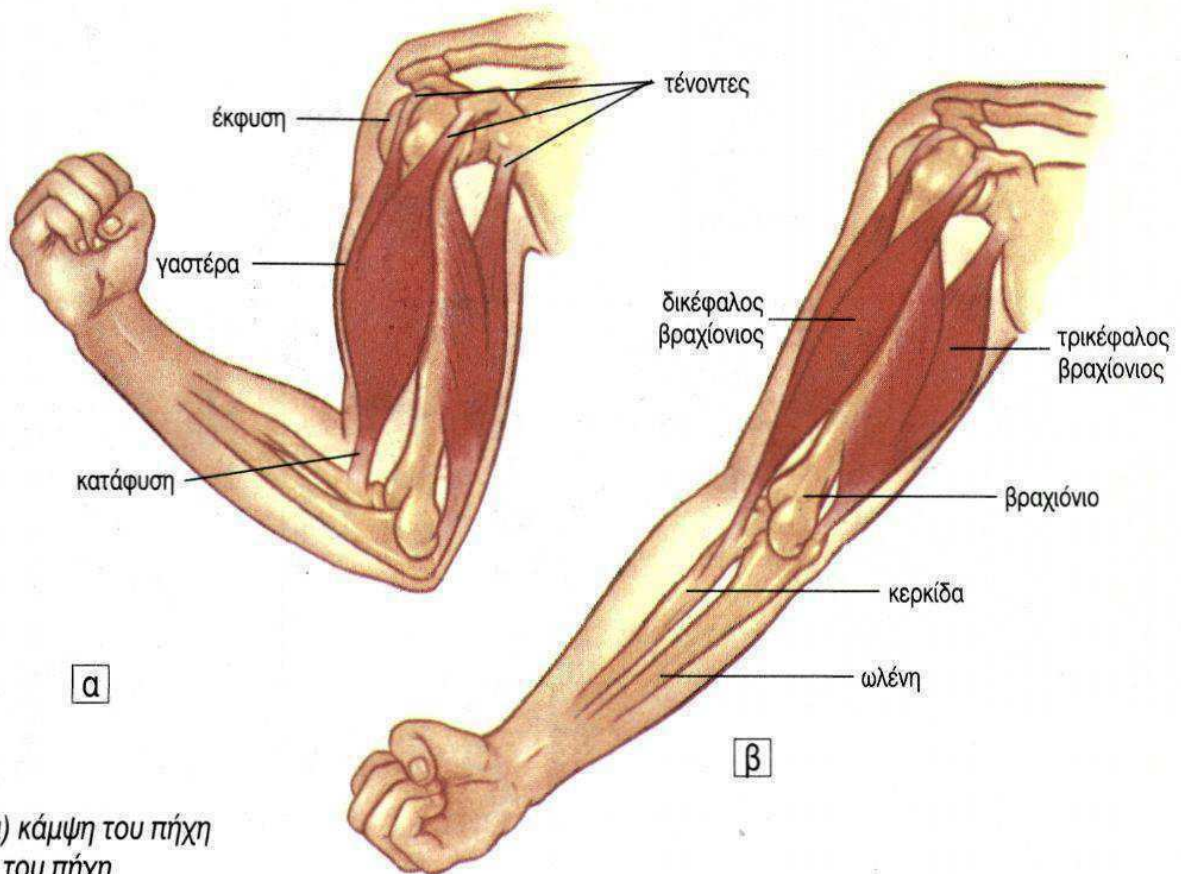
Οι γραμμωτοί μύες, ανάλογα με τη μορφολογία τους, διακρίνονται σε σφιγκτήρες (σφιγκτήρας στόματος), πλατείς (πλατύς ραχιαίος) και μακρούς (τρικέφαλος βραχίονιος). Σε γενικές γραμμές ένας μακρύς σκελετικός μυς έχει σχήμα ατρακτοειδές και αποτελείται από ένα κεντρικό τμήμα, τη **γαστέρα**, και από δύο άκρα, τις **προσφύσεις**. Η κάθε πρόσφυση συνίσταται συνήθως από

συνδετικό ιστό, τον **τένοντα**, συνδέει το μυ με τα οστά. Το ένα άκρο, η **κατάφυση**, προσφύεται στο οστό που ο μυς αυτός κινεί, ενώ το άλλο, η **έκφυση**, προσφύεται στο οστό που δεν κινείται (εικ. 8.3).

Με τη συστολή της γαστέρας ο μυς βραχύνεται και τραβά το ένα οστό (κινητό), ενώ το άλλο παραμένει ακίνητο. Επειδή οι μύες δεν έχουν την ικανότητα να σπρώχνουν αλλά μόνο να έλκουν τα οστά, είναι απαραίτητο για να επιτελέσουν μία κίνηση (π.χ. την κίνηση του πήχη) να συνεργάζονται κατά ζεύγη. Για παράδειγμα, για να γίνει η κάμψη του πήχη, πρέπει να συσταλεί ο δικέφαλος και να χαλαρώσει ο τρικέφαλος, ενώ για την έκτασή του πρέπει να συσταλεί ο τρικέφαλος και να χαλαρώσει ο δικέφαλος (εικ. 8.3).



εικ. 8.2 Δομή γραμμωτού μυός



εικ. 8.3 α) κάμψη του πήχη  
β) έκταση του πήχη

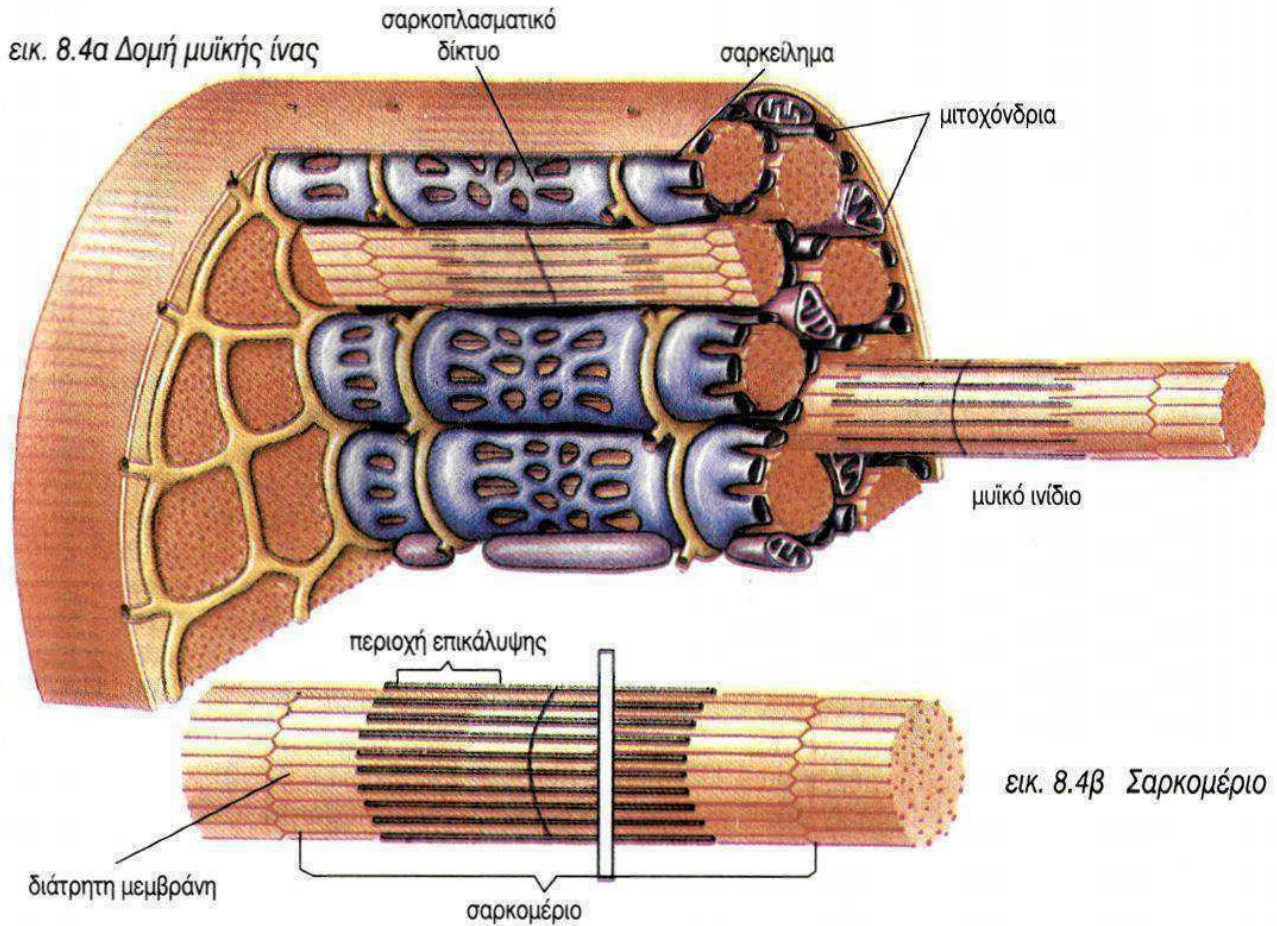
Γενικά οι μύες συνεργάζονται κατά ζεύγη, προκειμένου να επιτελέσουν μια συγκεκριμένη κίνηση. Ο μυς που συστέλλεται προκειμένου να γίνει κάμψη του πήχη ονομάζεται κύριος, ενώ ο μυς που χαλαρώνει ονομάζεται ανταγωνιστής. Η συνεργασία λοιπόν των κύριων και των ανταγωνιστών μυών εξασφαλίζει την αρμονική κίνηση του σώματος.

### Δομή και λειτουργία της γραμμωτής μυϊκής ίνας

Η δομική και λειτουργική μονάδα των γραμμωτών μυών είναι η **γραμμωτή μυϊκή ίνα**. Το σχήμα της είναι κυλινδρικό, ενώ το μήκος της μπορεί να φτάνει από λίγα χιλιοστά έως 15 cm. Η κυτταρική της μεμβράνη, που ονομάζεται **σαρκείλημα**, περιβάλλεται από ινίδια κολλαγόνου (ενδομύιο). Μέσα στη μυϊκή ίνα, αμέσως κάτω από το σαρκείλημα, υπάρχουν διάσπαρτοι πυρήνες, που στις μεγάλες μυϊκές ίνες μπορεί να είναι χιλιάδες. Στο κυτταρόπλασμα της μυϊκής ίνας (σαρκό-

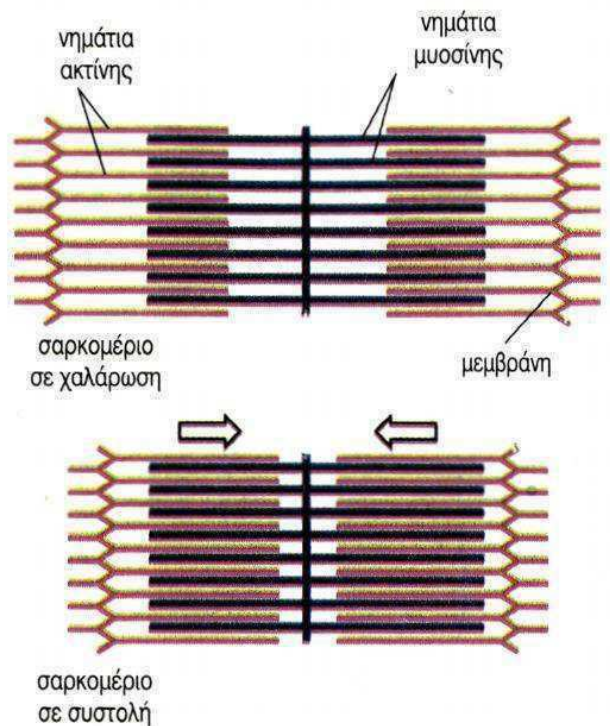
πλασμα) υπάρχουν πολυάριθμα μιτοχόνδρια και αναπτυγμένο ενδοπλασματικό δίκτυο (σαρκοπλασματικό δίκτυο) (εικ. 8.4α).

Στο εσωτερικό της μυϊκής ίνας υπάρχουν μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες μυϊκά ινίδια, που διατάσσονται παράλληλα και εκτείνονται σε όλο της το μήκος. Κάθε ινίδιο αποτελείται από πολλά νημάτια ακτίνης και μυοσίνης. Κατά μήκος των ινιδίων παρεμβάλλονται κάθετα διάτρητες μεμβράνες. Το τμήμα του ινιδίου μεταξύ δύο διαδοχικών μεμβρανών αποτελεί το **σαρκομέριο**. Το κάθε σαρκομέριο συνίσταται από νημάτια ακτίνης προσκολλημένα σε κάθε μία από τις κάθετες μεμβράνες, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται νημάτια μυοσίνης. Τα νημάτια ακτίνης και μυοσίνης διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, ώστε στο μικροσκόπιο να εμφανίζονται εναλλάξ φωτεινές και σκοτεινές ζώνες (εικ. 8.4β). Οι φωτεινές ζώνες αντιστοιχούν μόνο σε νημάτια ακτίνης ή μυοσίνης ενώ οι σκοτεινές σε αλληλοκαλυπτόμενες περιοχές



νηματίων ακτίνης και μυοσίνης. Η εναλλαγή αυτή των φωτεινών και σκοτεινών περιοχών δίνει τις χαρακτηριστικές γραμμώσεις (και το όνομα) στις γραμμωτές μυϊκές ίνες.

Η **μυϊκή συστολή** γίνεται με ένα μηχανισμό ολίσθησης των νηματίων της ακτίνης προς τα νημάτια της μυοσίνης, στον οποίο συμμετέχουν και άλλες πρωτεΐνες (εικ. 8.5). Με το μηχανισμό αυτό ελαττώνεται το μήκος των σαρκομερίων και κατ' επέκταση της μυϊκής ίνας. Ιδιαίτερο ρόλο φαίνεται να παίζουν τα ιόντα ασβεστίου, που αποθηκεύονται στο σαρκοπλασματικό δίκτυο και απελευθερώνονται με την επίδραση νευρικού ερεθίσματος. Την ενέργεια για την συστολή του μύος την παρέχει το ATP, όταν διασπάται σε ADP. Το οξυγόνο είναι δεσμευμένο σε μία πρωτεΐνη των μυϊκών κυττάρων, τη μυοσφαιρίνη, που είναι ανάλογη της αιμοσφαιρίνης και ευθύνεται για το βαθύ κόκκινο χρώμα τους.



εικ. 8.5 Αλλαγές στο σαρκομέριο κατά τη διάρκεια της μυϊκής συστολής

Οι σκελετικές μυϊκές ίνες, από μορφολογική και λειτουργική άποψη, κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τις ερυθρές και τις λευκές. Οι **ερυθρές ίνες** έχουν μεγάλη ποσότητα μυοσφαιρίνης και συστέλλονται με βραδύ ρυθμό. Αντλούν ενέργεια από το ATP, που προκύπτει από οξειδωτική φωσφορυλίωση διότι περιέχουν μεγάλο αριθμό μιτοχονδρίων. Οι **λευκές ίνες** έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από τις ερυθρές συστέλλονται γρήγορα αλλά δεν αντέχουν σε συνεχή βαρεία εργασία. Έχουν λιγότερα μιτοχόνδρια, λίγη μυοσφαιρίνη και η ενέργειά τους προέρχεται κυρίως από γαλακτική ζύμωση. Στον άνθρωπο οι γραμμωτοί μύες αποτελούνται συνήθως και από τα δύο αυτά είδη μυϊκών ινών σε διαφορετικές αναλογίες. Για παράδειγμα, οι μύες της πλάτης και της κνήμης αποτελούνται κυρίως από ερυθρές ίνες, ενώ οι μύες του ματιού και του χεριού, κυρίως από λευκές.

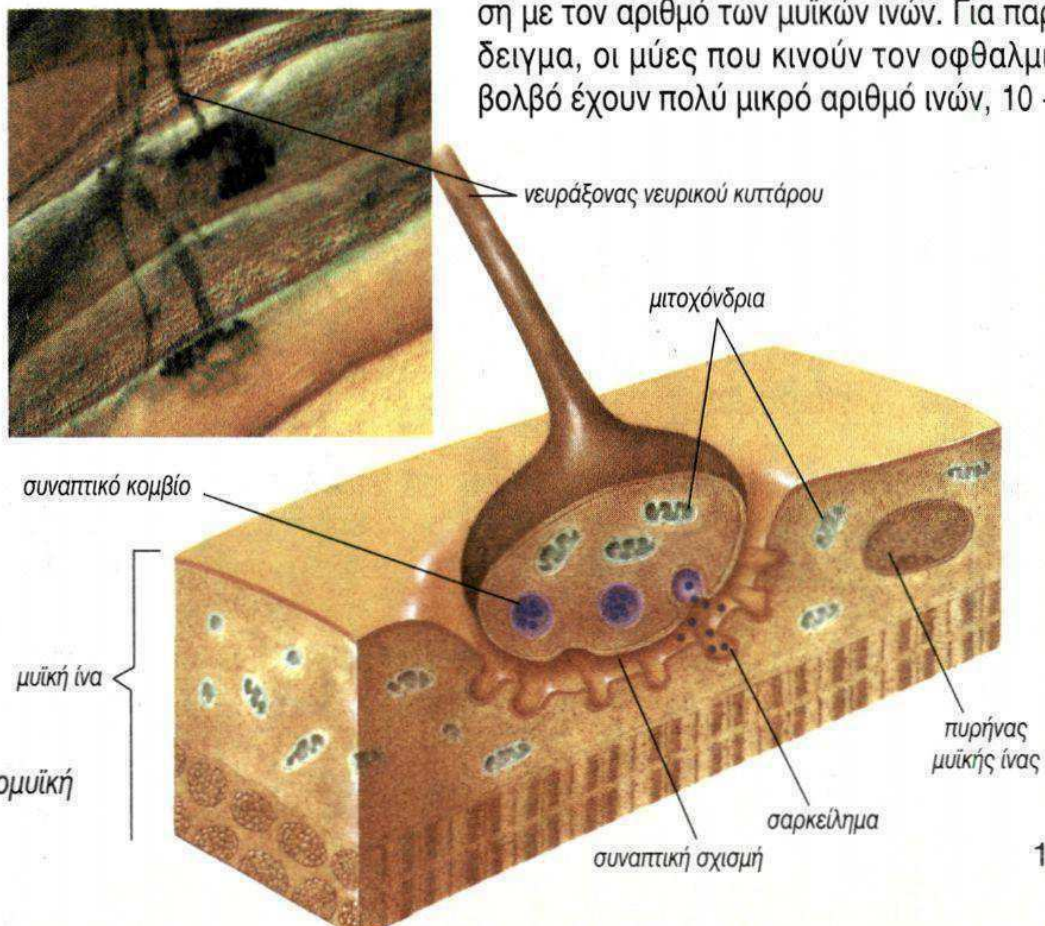
Η σύσταση των μυών ως προς τα δύο αυτά είδη μυϊκών ινών, διαφέρει και από άτομο σε άτομο. Για παράδειγμα μεγάλο ποσοστό ερυθρών μυϊκών ινών διαθέτουν οι δρομείς α

ντοχής, ενώ οι δρομείς ταχύτητας διαθέτουν μεγάλο ποσοστό λευκών μυϊκών ινών.

## Νευρομυϊκή σύναψη

Οι μυϊκές ίνες δέχονται απλά φυσιολογικά ερεθίσματα, που είναι τα νευρικά ερεθίσματα, μπορούν όμως να διεγερθούν και από μη φυσιολογικά ερεθίσματα, π.χ. από ηλεκτρικό ρεύμα. Το ερέθισμα μεταφέρεται από ένα κινητικό νευρώνα, ο νευράξονας του οποίου όταν φτάσει στο μυ διακλαδίζεται. Κάθε διακλάδωση καταλήγει στο μέσον περίπου μιας μυϊκής ίνας και σχηματίζεται νευρομυϊκή σύναψη, ή **τελική κινητική πλάκα** (εικ. 8.6). Όταν το ερέθισμα φθάσει στην άκρη της κάθε διακλάδωσης μεταδίδεται στις μυϊκές ίνες με τον ίδιο τρόπο που μεταδίδονται οι νευρικές ώσεις στις νευρικές συνάψεις.

Ο κινητικός νευρώνας μαζί με τις μυϊκές ίνες που νευρώνει αποτελούν μια λειτουργική μονάδα, που λέγεται **κινητική μονάδα**. Ο αριθμός των μυϊκών ινών μιας κινητικής μονάδας εξαρτάται από το είδος του μυός. Η λεπτότητα των κινήσεων που επιτελεί έχει σχέση με τον αριθμό των μυϊκών ινών. Για παράδειγμα, οι μύες που κινούν τον οφθαλμικό βολβό έχουν πολύ μικρό αριθμό ινών, 10 -12



εικ. 8.6 Νευρομυϊκή σύναψη

σε κάθε κινητική μονάδα (λεπτές κινήσεις), αντίθετα με τους μυς της ράχης και των κάτω άκρων, που έχουν μεγάλο αριθμό ινών, 600 - 1000 ανά κινητική μονάδα (αδρές κινήσεις).

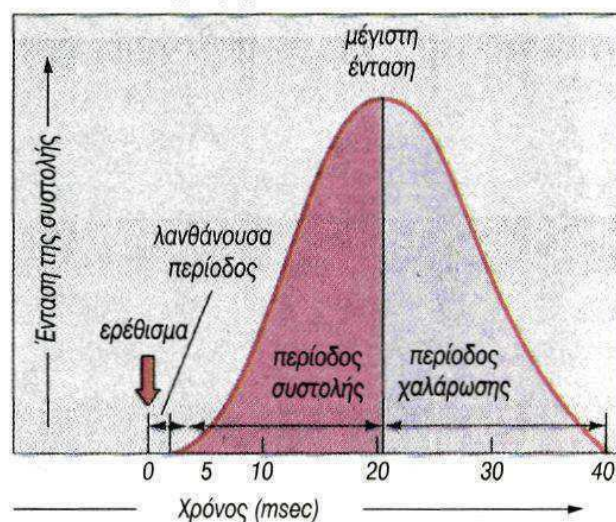
Για να συσταλεί μια μυϊκή ίνα, πρέπει το ερεθίσμα που θα δεχτεί να έχει ορισμένη ένταση. Σε μικρότερης έντασης ερεθίσματα δε θα αντιδράσει καθόλου, ενώ σε μεγαλύτερης έντασης δε θα συμβεί επιπλέον σύσπαση. Δηλαδή οι μυϊκές ίνες ακολουθούν το νόμο του "όλα ή τίποτα", που σημαίνει ότι αν μία μυϊκή ίνα διεγερθεί, η ένταση της συστολής της είναι πάντα η ίδια.

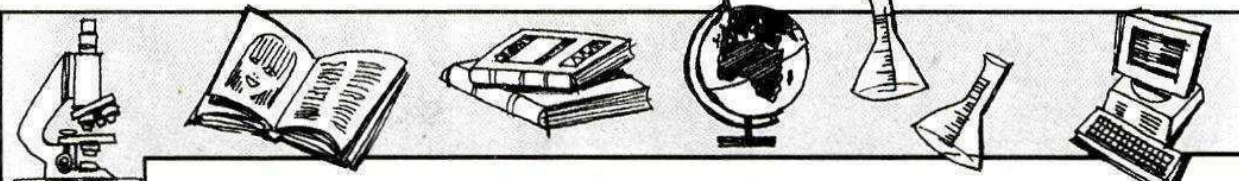
## Μυϊκή συστολή

Η γραμμωτή μυϊκή ίνα υπό την επίδραση ενός απλού ερεθίσματος επιτελεί μία **απλή μυϊκή συστολή**, η οποία εξελίσσεται σε τρία στάδια, όπως φαίνεται στο μυογράφημα (εικ. 8.7). Το πρώτο στάδιο, λανθάνων χρόνος, διαρκεί 5 msec και είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που το ερέθισμα φτάνει στη μυϊκή ίνα έως την έναρξη της συστολής της. Ο χρόνος αυτός είναι απαραίτητος για την απελευθέρωση των ιόντων ασβεστίου και την ενεργοποίηση των ινιδίων της ακτίνης. Το δεύτερο στάδιο, περίοδος συστολής, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από

την έναρξη της συστολής έως την επίτευξη της μέγιστης τιμής της και διαρκεί περίπου 40 msec. Η διάρκεια της περιόδου συστολής εξαρτάται από το είδος της μυϊκής ίνας και από το μήκος της. Το τελευταίο στάδιο, περίοδος χαλάρωσης, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη μέγιστη συστολή έως την πλήρη χαλάρωση και η διάρκειά της είναι περίπου 50 msec. Αν κατά τη διάρκεια της απλής μυϊκής συστολής επιδράσουν αλληπάληλα ερεθίσματα με συγκεκριμένη συχνότητα, η μυϊκή συστολή ενισχύεται και παρατείνεται και η κατάσταση αυτή ονομάζεται **τετανική συστολή**.

εικ. 8.7 Μυογράφημα





### Ηλεκτρομυογράφημα

Όταν το δυναμικό ενέργειας διατρέχει τη μυϊκή ίνα, ένα μέρος του φτάνει μέχρι το δέρμα. Αν συστέλλονται ταυτόχρονα πολλές μυϊκές ίνες, τα ηλεκτρικά δυναμικά που φτάνουν στο δέρμα αθροίζονται. Τα δυναμικά αυτά είναι δυνατό να καταγραφούν, αν τοποθετηθούν δύο ηλεκτρόδια στο δέρμα ή εισαχθούν στο μυ (ηλεκτρομυογράφημα). Τα ηλεκτρομυογραφήματα χρησιμοποιούνται στην πράξη για τον εντοπισμό διαταραχών της απόκρισης των μυϊκών κυττάρων σε ερεθίσματα.

Η συστολή του γραμμωτού μυός είναι αποτέλεσμα της συστολής των μυϊκών ινών. Η ένταση της συστολής του μυός είναι ανάλογη του αριθμού των μυϊκών ινών που συστέλλονται και της συχνότητας των ερεθισμάτων. Εάν ένα ερέθισμα είναι ασθενές, διεγείρεται μικρός αριθμός μυϊκών ινών (λίγες κινητικές μονάδες) και προκαλείται συστολή μικρής έντασης. Σε ισχυρότερο ερέθισμα διεγείρεται μεγαλύτερος αριθμός μυϊκών ινών (περισσότερες κινητικές μονάδες) με αποτέλεσμα συστολή μεγαλύτερης έντασης. Συνήθως οι μυϊκές ίνες ενός μυός δε συστέλλονται συγχρόνως και έτσι ο μυς δεν κουράζεται συνολικά. Κατά κανόνα η συστολή των μυών προκαλείται από αλληπάλληλα συχνά ερεθίσματα, δηλαδή είναι τετανική συστολή.

Η συστολή μπορεί να είναι **ισοτονική**, αν ο μυς βραχύνεται και παράγει μηχανικό έργο, ή **ισομετρική**, όταν ο μυς δε βραχύνεται, δηλαδή το μήκος του δε μεταβάλλεται. Οι μυϊκές συστολές μπορεί να είναι ισοτονικές ή ισομετρικές. Οι περισσότερες όμως είναι μεικτές, όπως για παράδειγμα, κατά τη βάδιση, οι ισομετρικές βοηθούν τα άκρα να κρατηθούν άκαμπτα, όταν τα πόδια πατούν στο έδαφος, ενώ οι ισοτονικές να κινηθούν.

### Γνωρίζετε ότι:

Η δύναμη που αναπτύσσεται από τους σκελετικούς μυς κατά τη συστολή τους μπορεί να φτάσει τα 30-40 N ανά  $\text{cm}^2$  της εγκάρσιας διατομής τους. Σε ενήλικα άνδρα οι μύες στο σύνολό τους μπορούν να αναπτύξουν σε ισχυρή ισομετρική τετανική συστολή συνολική δύναμη 200.000 N.

Ακόμα και σε κατάσταση ανάπαυσης του οργανισμού οι μύες βρίσκονται σε διαρκή μικρής έντασης συστολή, που ονομάζεται **μυϊκός τόνος**. Με αυτόν τον τρόπο ο μυς διατηρείται σε ετοιμότητα, ώστε να μπορεί να συσπαστεί αμέσως, όταν χρειαστεί.

Σε έντονη μυϊκή δραστηριότητα οι ενεργειακές ανάγκες του μυός είναι αυξημένες, και δεν επαρκεί το οξυγόνο που φτάνει με το αίμα, για να γίνει η αερόβια κυτταρική αναπνοή. Προκειμένου να εξασφαλιστούν τα απαραίτητα ποσά ενέργειας, γίνεται αναερόβια η διάσπαση της γλυκόζης σε γαλακτικό οξύ (γαλακτική ζύμωση). Το γαλακτικό οξύ που συσσωρεύεται προκαλεί διακοπή της λειτουργίας πολλών κυτταρικών ενζυμικών συστημάτων, με αποτέλεσμα την ολική ή μερική ανικανότητα του μυός για συστολή. Αυτή η κατάσταση χαρακτηρίζεται ως **μυϊκός κάματος**. Ο πόνος που αισθανόμαστε ύστερα από έντονη μυϊκή δραστηριότητα οφείλεται στη συγκέντρωση διάφορων ουσιών όπως το γαλακτικό οξύ, οι οποίες προκαλούν κάματο.

Για να απομακρυνθεί το συσσωρευμένο γαλακτικό οξύ, απαιτείται οξυγόνο. Γι' αυτόν το λόγο ύστερα από έντονη μυϊκή δραστηριότητα εξακολουθούμε να λαχανιάζουμε για λίγα λεπτά. Το γαλακτικό οξύ απομακρύνεται με το αίμα στο ήπαρ, όπου το 20% της ποσότητάς του οξειδώνεται σε διοξειδίο του άνθρακα και νερό. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από αυτήν τη διαδικασία χρησιμοποιείται, για να μετατρέψει το υπόλοιπο 80% σε γλυκόζη για μελλοντική χρήση.