

ΜΥΣ ΚΑΙ ΜΥΪΚΗ ΣΥΣΤΟΛΗ

Φυσιολογία

PT_103

Επιδιωκόμενες γνώσεις

- Μακροσκοπική και μικροσκοπική περιγραφή των μυών
- Μοριακοί μηχανισμοί στη βάση της μυϊκής συστολής
- Προσδιοριστικοί παράγοντες και ρύθμιση της μυϊκής απόδοσης

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

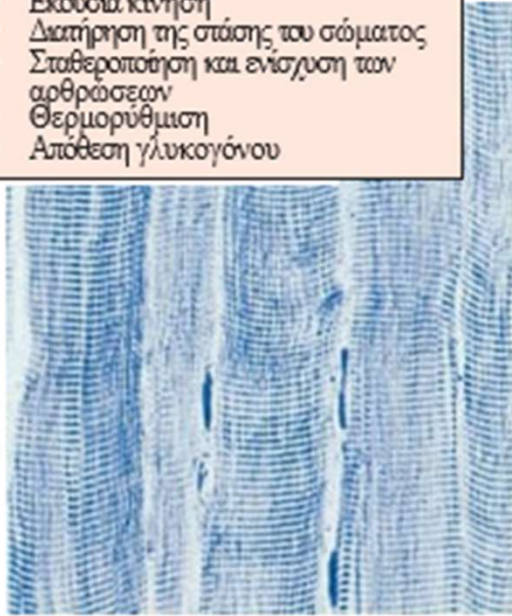
- Οι μύες είναι δομές που μας επιτρέπουν να διατηρούμε τη στάση του σώματος, να τρέχουμε, να σηκώνουμε βάρη, να γράφουμε κ.λπ.
- Είναι επίσης υπεύθυνοι για τις περισταλτικές κινήσεις που επιτρέπουν, για παράδειγμα, τη μετακίνηση ουσιών μέσω του πεπτικού συστήματος.
- Η μυϊκή συστολή αποτελεί τη βάση τόσο των εκούσιων όσο και των ακούσιων λειτουργιών, όπως ο καρδιακός ρυθμός, οι αναπνευστικές διεργασίες και οι εκφράσεις του προσώπου.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

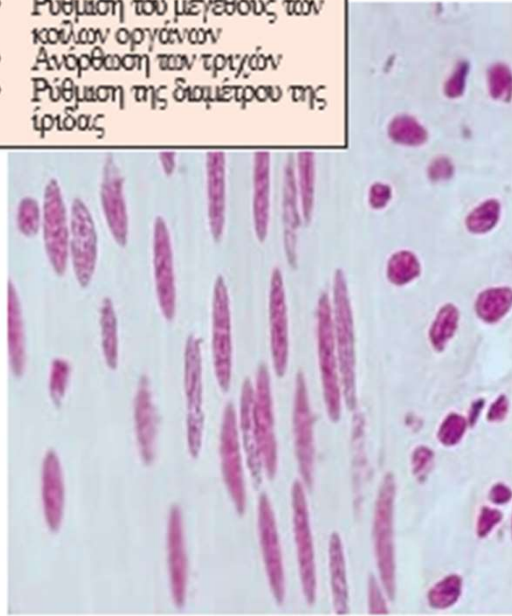
- Με βάση τις ιστολογικές τους ιδιότητες, οι διάφοροι τύποι μυϊκού ιστού μπορούν να διαχωριστούν σε **γραμμωτούς** και **λείους**.
- Αν παρατηρηθεί στο μικροσκόπιο, ο γραμμωτός μυϊκός ιστός παρουσιάζει τακτικά εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ζώνες ως αποτέλεσμα της διάταξης κατά σειρά των συσταλών πρωτεϊνών.
- Οι σκελετικοί μύες είναι γραμμωτοί μύες. Ο λείος μυϊκός ιστός δεν εμφανίζει γραμμώσεις και είναι υπεύθυνος για τη συστολή κοίλων οργάνων, όπως το έντερο και τα αιμοφόρα αγγεία.
- Ο καρδιακός μυϊκός ιστός είναι γραμμωτός, αλλά έχει επίσης ιδιότητες χαρακτηριστικές των λείων μυών

Ιστολογική οργάνωση και λειτουργίες του γραμμωτού σκελετικού, λείου και γραμμωτού καρδιακού μυϊκού ιστού.

- σκελετικός μυς**
- Εκούσια κίνηση
 - Διατήρηση της στάσης του σώματος
 - Σταθεροποίηση και ενίσχυση των αρθρώσεων
 - Θερμορύθμιση
 - Απόθεση γλυκογόνου



- λείος μυς**
- Ρύθμιση του μεγέθους των κοιλων οργάνων
 - Ανόρθωση των τριγώνων
 - Ρύθμιση της διαμέτρου της ίριδας



- Καρδιακός μυς**
- Καρδιακός ρυθμός

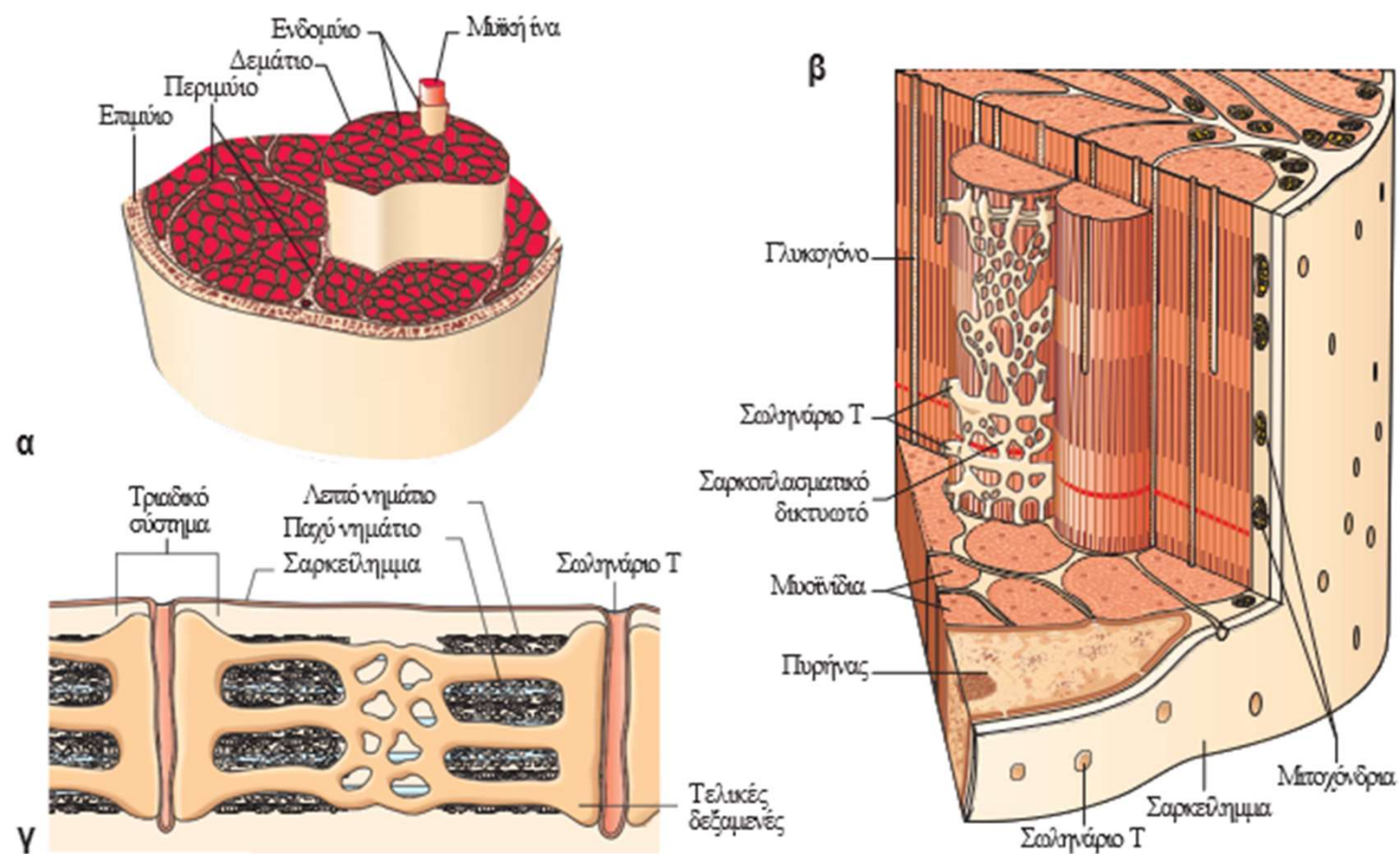


Σκελετικός μυς

- Ο σκελετικός μυς σχηματίζεται από ένα σαρκώδες τμήμα, γνωστό ως **γαστέρα**, που περιβάλλεται από μια μεμβρανώδη συνδετική δομή που ονομάζεται **επιμύιο**. Οι περισσότεροι σκελετικοί μύες καταλήγουν σε τένοντες οι οποίοι διευκολύνουν την ένωσή τους με το σκελετό.
- Οι μυϊκές ίνες που αποτελούν τον σκελετικό μυ είναι διατεταγμένες παράλληλα μεταξύ τους. Οι ομάδες των ινών σχηματίζουν δεμάτια και περιβάλλονται από έναν συνδετικό ιστό γνωστό ως **περιμύιο**.
- Κάθε μυϊκή ίνα περιβάλλεται από συνδετικό ιστό που ονομάζεται **ενδομύιο**

Σκελετικός μυς

- Η μυϊκή ίνα είναι ένα συγκύτιο, ένα πολυπύρρηνο κύτταρο που προέρχεται από τη συγχώνευση προγονικών κυττάρων, που ονομάζονται **μυοβλάστες**.
- Όπως όλα τα κύτταρα, η μυϊκή ίνα περιβάλλεται από μια κυτταροπλασματική μεμβράνη γνωστή ως **σαρκείλημα**.
- Εντός της μυϊκής ίνας, δηλαδή εντός του **σαρκοπλάσματος**, υπάρχουν **μυοϊνίδια** και πολυάριθμα **μιτοχόνδρια** και **κοκκία γλυκογόνου**. Τα μυοϊνίδια διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους και περιβάλλονται από τη μεμβράνη του **σαρκοπλασματικού δικτύου**.
- Το σαρκοπλασματικό δίκτυο αποτελείται τόσο από ένα επίμηκες τμήμα, τα **επιμήκη σωληνάρια** (σωληνίσκους), τα οποία διατρέχουν παράλληλα τα μυοϊνίδια, όσο και από ένα εγκάρσιο τμήμα, τα εγκάρσια σωληνάρια (σωληνίσκοι), το οποίο αποτελείται από τις **τελικές δεξαμενές** και τα **σωληνάρια T** (σωληνίσκοι), τα οποία είναι εγκοιλώσεις του σαρκείληματος και η κύρια λειτουργία τους είναι η ταχεία αγωγή του δυναμικού ενέργειας βαθιά στο εσωτερικό των μυϊκών ινών.
- Οι δύο τελικές δεξαμενές και το σωληνάριο T που τα χωρίζει σχηματίζουν μια ανατομική δομή που ονομάζεται **τριαδικό σύστημα**.
- Τα **μυοϊνίδια** είναι κυλινδρικές δομές διαμέτρου περίπου 1 μm και η τυπική διάταξη των ανοιχτών και σκούρων ζωνών που προκαλεί τις ραβδώσεις της μυϊκής ίνας εξαρτάται από τον τρόπο οργάνωσής τους. Το συστατικό τμήμα στα μυοϊνίδια είναι διατεταγμένο σε δομές γνωστές ως **σαρκομέρια**, τα οποία επαναλαμβάνονται κατά μήκος ολόκληρης της μυϊκής ίνας



Εικόνα 5.3 Σκελετικός μυς. **α**, Διάταξη των μυϊκών ινών και η σχέση τους με τον συνδετικό ιστό που τις περιβάλλει. **β**, Διάταξη της μυϊκής ίνας. **γ**, Διάταξη του σαρκοπλασματικού δικτύου και σχέσεις με τα σωληνάρια T.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΤΩΝ ΣΚΕΛΕΤΙΚΩΝ ΜΥΩΝ: ΤΟ ΣΑΡΚΟΜΕΡΙΟ

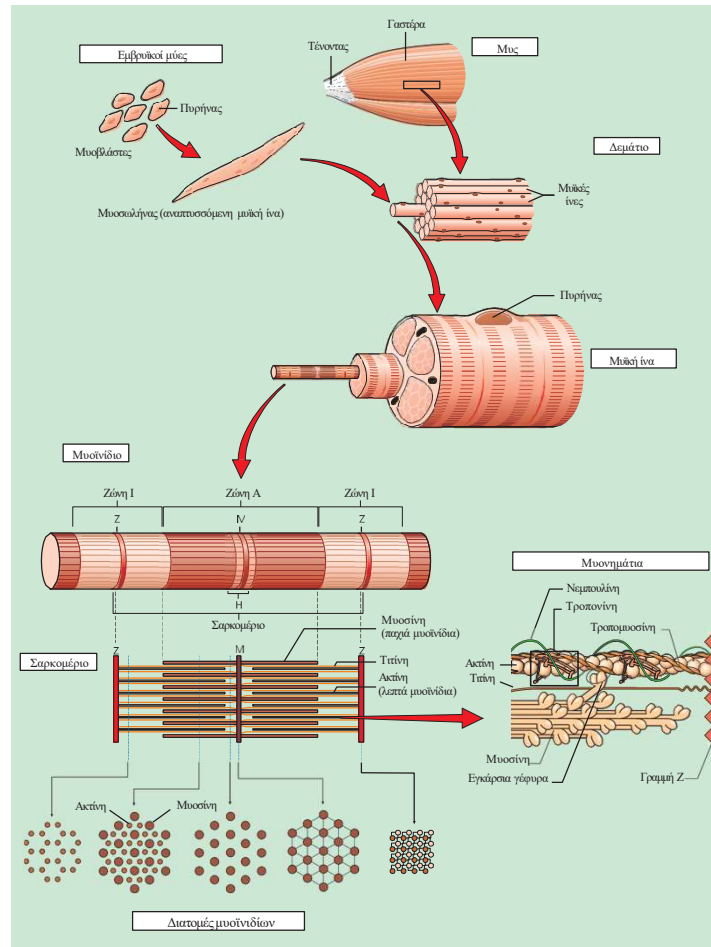
- Ο γραμμωτός σκελετικός μυϊκός ιστός είναι ο πιο άφθονος στο ανθρώπινο σώμα και αποτελεί τον κυρίαρχο ιστό στο εσωτερικό των **σκελετικών μυών**. Αυτοί συνδέονται με τένοντες με το σκελετό, σχηματίζοντας το **κινητικό σύστημα**.
- Το **σαρκομέριο** είναι η λειτουργική μονάδα του γραμμωτού μυϊκού ιστού και έχει μήκος ηρεμίας που κυμαίνεται από 2 έως 2,5 μm .
- Στο σαρκομέριο, τα **παχιά νημάτια**, που σχηματίζονται από τη συσσώρευση μορίων μυοσίνης, και τα **λεπτά νημάτια**, που είναι πολυμερή G-ακτίνης, διαχωρίζονται.
- Κάθε σαρκομέριο οριοθετείται από δύο γειτονικές **γραμμές Z**, από το αρχικό γράμμα της Γερμανικής λέξης *zwischen*, που σημαίνει «μεταξύ» ενός σαρκομερίου και ενός άλλου. Τα λεπτά μυοϊνίδια (ακτίνη) ξεκινούν από τις γραμμές Z.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΤΩΝ ΣΚΕΛΕΤΙΚΩΝ ΜΥΩΝ: ΤΟ ΣΑΡΚΟΜΕΡΙΟ

- Η **γραμμή M**, από τη Γερμανική λέξη *mitten* (που σημαίνει «κέντρο»), μπορεί να παρατηρηθεί στο κέντρο του σαρκομερίου. Η γραμμή M χωρίζει επίσης στη μέση τα παχιά νημάτια (μυοσίνη)
- Σε σχέση με το υπόλοιπο σαρκομέριο, το τμήμα που περιέχει τα νημάτια μυοσίνης έχει υψηλότερο και πιο διπλοθλαστικό δείκτη διάθλασης στο μικροσκόπιο πολωμένου φωτός - ειδικά λόγω της ανισοτροπίας του, ονομάζεται **ζώνη A**.
- Στις περιοχές της ζώνης A, όπου υπάρχει επικάλυψη των λεπτών και παχέων ίνιδίων, το σφαιρικό τμήμα της μυοσίνης, γνωστό ως **κεφαλή μυοσίνης**, αλληλεπιδρά με το ινίδιο ακτίνης για να σχηματίσει τη λεγόμενη **εγκάρσια γέφυρα**.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΤΩΝ ΣΚΕΛΕΤΙΚΩΝ ΜΥΩΝ: ΤΟ ΣΑΡΚΟΜΕΡΙΟ

- Στο κέντρο της ζώνης A, η περιοχή όπου τα παχιά μυονημάτια δεν επικαλύπτουν τα λεπτά μυονημάτια εμφανίζεται λιγότερο πυκνή από τα γειτονικά τμήματα και χαρακτηρίζεται ως **ζώνη H**, από τη Γερμανική λέξη hell, που σημαίνει «διαυγής».
- Το τμήμα του σαρκομερίου που σχηματίζεται αποκλειστικά από λεπτά νημάτια και εκτείνεται πάνω στις γραμμές Z έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης και είναι λιγότερο διπλοθλαστικό (επομένως πιο ισότροπο) και για το λόγο αυτό είναι γνωστό ως **ζώνη I**.
- Οι διαφορετικές οπτικές ιδιότητες των ζωνών A και I είναι υπεύθυνες για τη γραμμωτή εμφάνιση που δίνει το όνομά της στον μυ.
- Σε κάθε σαρκομέριο, οι συσταλτές πρωτεΐνες διαπλέκονται σε μια διατεταγμένη επιμήκη και εγκάρσια διάταξη. Οι εγκάρσιες τομές του σαρκομερίου δείχνουν, όπως στην ζώνη I, απλά νημάτια ακτίνης τακτικά διατεταγμένα.
- Στη ζώνη A, όπου τα νημάτια ακτίνης και μυοσίνης επικαλύπτονται, κάθε νημάτιο ακτίνης περιβάλλεται από τρία νημάτια μυοσίνης και κάθε παχύ νημάτιο (μυοσίνη) περιβάλλεται, με τη σειρά του, από έξι νημάτια ακτίνης.
- Στο επίπεδο της ζώνης H, υπάρχουν μόνο παχιά νημάτια μυοσίνης, τα οποία είναι τακτικά διατεταγμένα

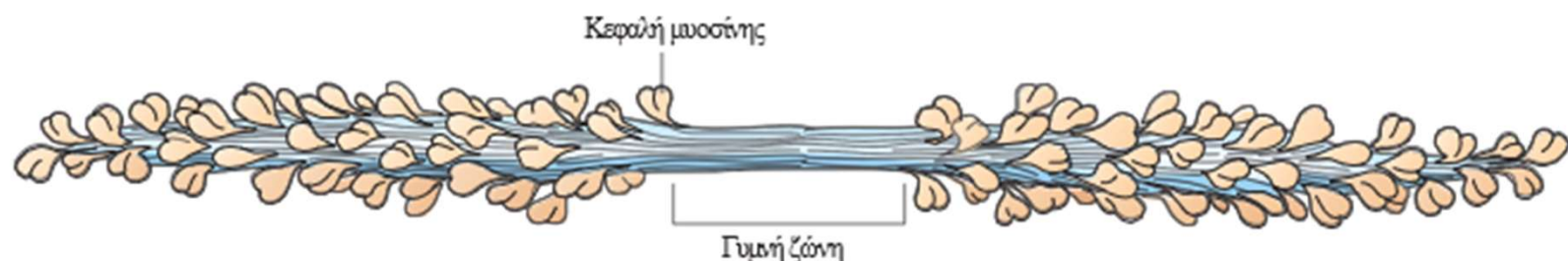


Εικόνα 5.2 Σκελετικός μύς: ιεραρχική οργάνωση.

ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ ΣΑΡΚΟΜΕΡΙΟΥ

- Οι πρωτεΐνες που σχηματίζουν το σαρκομέριο μπορούν να χωριστούν σε **συσταλτές, ρυθμιστικές και δομικές**

| Πρωτεΐνη | Κατηγορία | Θέση | Λειτουργία |
|--------------|------------|---------------|--|
| Ακτίνη | Συσταλτή | Λεπτό νημάτιο | Αλληλεπιδρά με τη μυοσίνη στη διαδικασία της μυϊκής συστολής |
| Τροπομυοσίνη | Ρυθμιστική | Λεπτό νημάτιο | Αποτρέπει ή καθιστά αδύνατη την αλληλεπίδραση ακτίνης-μυοσίνης |
| Τροπονίνη | Ρυθμιστική | Λεπτό νημάτιο | Με τη δέσμευση του ασβεστίου, επηρεάζει τη δραστηριότητα της τροπομυοσίνης |
| Μυοσίνη | Συσταλτή | Παχύ νημάτιο | Αλληλεπιδρά με την ακτίνη στη διαδικασία της μυϊκής συστολής |
| Μυομεσίνη | Δομική | Γραμμή Μ | Σημείο πρόσδεσης για την τιτίνη |
| Τιτίνη | Δομική | Παχύ νημάτιο | Ρυθμίζει τη στοιχίση των παχέων νηματίων κατά τη διάρκεια της μυϊκής συστολής και καθορίζει το μήκος των σαρκομερίων σε ηρεμία |
| Νεμπουλίνη | Δομική | Λεπτό νημάτιο | Ελέγχει τον αριθμό των μονομερών ακτίνης που σχηματίζουν το λεπτό νημάτιο |



Εικόνα 5.5 Παχύ νημάτιο: διαθεσιμότητα μορίων μυοσίνης. Οι κεφαλές μυοσίνης είναι προσανατολισμένες προς αντίθετες κατευθύνσεις στα δύο μισά του νηματίου.



Εικόνα 5.6 Λεπτό μυοϊνίδιο: πολλά μόρια G-ακτίνης συσσωρεύονται για να σχηματίσουν ένα νημάτιο F-ακτίνης. Δύο αλυσίδες ακτίνης συσσωρεύονται και διαπλέκονται για να σχηματίσουν ένα λεπτό νημάτιο. Απεικονίζονται επίσης οι ρυθμιστικές πρωτεΐνες τροπονίνη και τροπομυοσίνη.

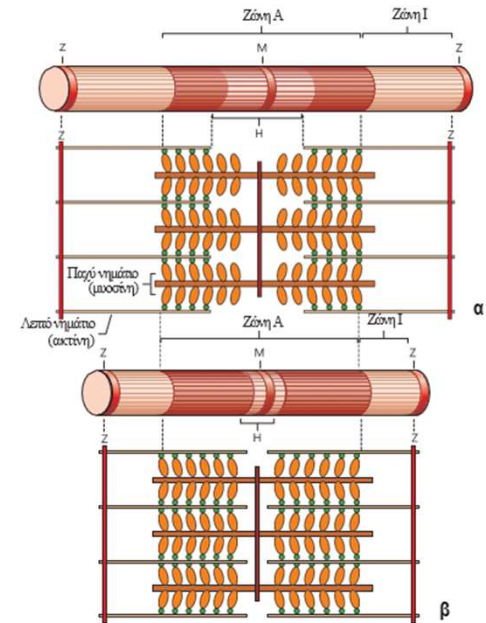
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΟΛΗΣ

• Θεωρία διολίσθησης των νηματίων

- Κατά τη διάρκεια της συστολής, το μήκος των παχέων και λεπτών νηματίων δεν αλλάζει, αλλά επικαλύπτονται, ολισθαίνοντας το ένα πάνω στο άλλο.

• Χημειομηχανικός κύκλος ή κύκλος εγκάρσιας γέφυρας

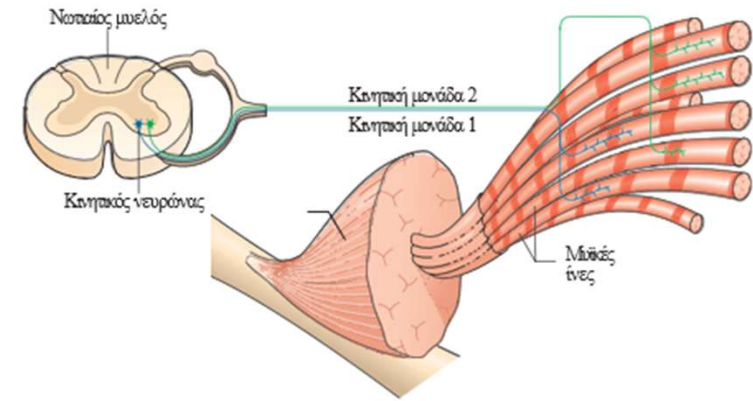
- Περιγράφει τους μοριακούς μηχανισμούς στη βάση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτίνης και μυοσίνης κατά τη διάρκεια της μυϊκής συστολής.
- Τα στοιχεία του χημειομηχανικού κύκλου είναι:
 - το παχύ νημάτιο, που αποτελείται από μόρια μυοσίνης,
 - το λεπτό νημάτιο, που αποτελείται από μονομερή ακτίνης,
 - οι ρυθμιστικές πρωτεΐνες του σαρκομερίου, τροπομυοσίνη, η οποία βρίσκεται στην αύλακα που σχηματίζουν τα νημάτια ακτίνης, και τροπονίνη,
 - το ιόν ασβεστίου (Ca^{2+}) και η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP), δύο μόρια απαραίτητα για τη διαδικασία της συστολής



Εικόνα 5.7 Μηχανισμός της συστολής του σαρκομερίου και η θεωρία της διολίσθησης των νηματίων. α, Χαλαρός μύς. β, Μύς σε συστολή. Η βράχυνση του σαρκομερίου δεν οφείλεται σε μεταβολή του μήκους των πρωτεϊνικών νηματίων, αλλά στην ολίσθηση των νηματίων ακτίνης προς το μέσο του σαρκομερίου.

ΣΥΖΕΥΞΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ-ΣΥΣΤΟΛΗΣ

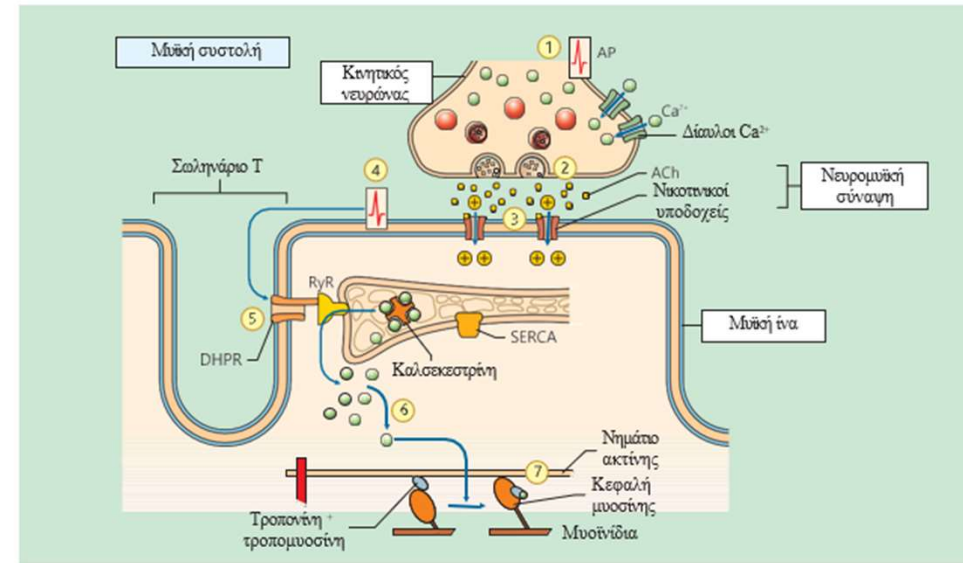
- Κάθε μεμονωμένος κινητικός νευρώνας μπορεί να εννευρώσει αρκετές μυϊκές ίνες. Ο συνδυασμός των κινητικών νευρώνων με όλες τις ίνες που νευρώνουν ονομάζεται **κινητική μονάδα**.
- Η **σύζευξη διέγερσης-συστολής** είναι το σύνολο όλων των διεργασιών που, ξεκινώντας από την ενεργοποίηση μιας μυϊκής ίνας από τη νευρομυϊκή σύναψη, παράγει μια **μυϊκή συστολή**.
- Το κρίσιμο στοιχείο στη σύζευξη διέγερσης-συστολής είναι η άρση του αποκλεισμού της αλληλεπίδρασης ακτινής-μυοσίνης από τις ρυθμιστικές πρωτεΐνες, **την τροπονίνη και την τροπομυοσίνη**, που προκαλείται από την **αύξηση της κυτταρο-πλάσματικής συγκέντρωσης ασβεστίου**.



Μυϊκή κινητική μονάδα.

ΣΤΑΔΙΑ ΜΥΪΚΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗΣ

1. Η ενεργοποίηση του κινητικού νευρώνα δημιουργεί δυναμικά ενέργειας (AP) τα οποία εξαπλώνονται από το κυτταρικό σώμα προς τη νευρομυϊκή σύναψη
2. Η άφιξη του δυναμικού ενέργειας προκαλεί την εκπόλωση του συναπτικού άκρου, με αποτέλεσμα το άνοιγμα των τάσεοελεγχόμενων διαύλων Ca^{2+} , την εισροή Ca^{2+} και την αύξηση της προσυναπτικής συγκέντρωσής του. Αυτό προκαλεί έναν καταρράκτη γεγονότων, του οποίου το τελικό αποτέλεσμα είναι η απελευθέρωση νευροδιαβιβαστή (ακετυλοχολίνη, ACh) στη συναπτική σχισμή.
3. Η ACh προσδένεται στους διαύλους των νικοτινικών υποδοχέων της μετασυναπτικής μεμβράνης, επιτρέποντας την είσοδο των ιόντων νατρίου και την έξοδο των ιόντων καλίου, δημιουργώντας έτσι ένα εντοπισμένο δυναμικό (δυναμικό τελικής πλάκας).
4. Το δυναμικό τελικής πλάκας εκπολώνει τη μυϊκή ίνα, προκαλώντας έτσι ένα μυϊκό δυναμικό ενέργειας. Το δυναμικό ενέργειας διαδίδεται και προς τις δύο κατευθύνσεις, εκπολώνοντας τη μυϊκή ίνα και φτάνοντας στα ενδότερα τμήματα της ίνας μέσω των σωληναρίων T.

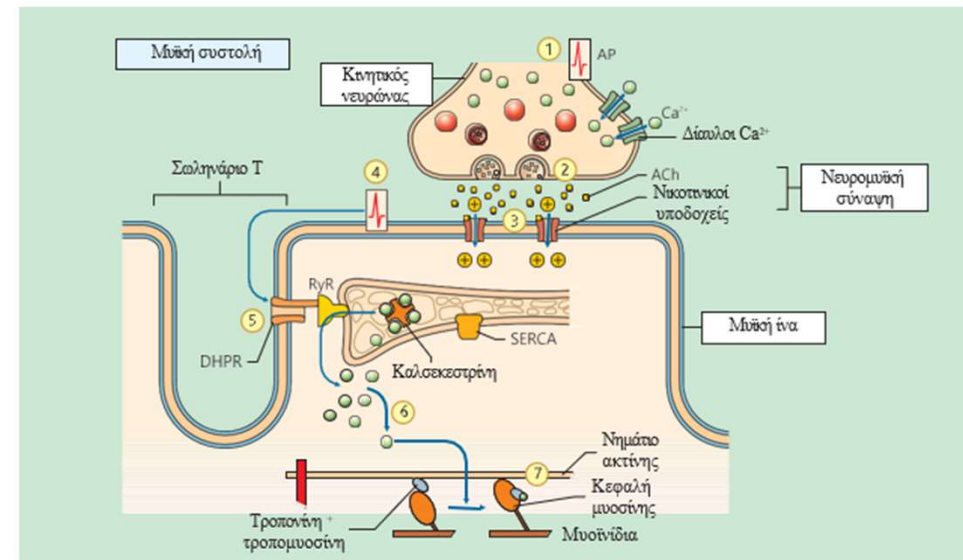


ΣΤΑΔΙΑ ΜΥΪΚΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗΣ - Συνέχεια

3. Οι τάσεοελεγχόμενοι υποδοχείς διυδροπυριδίνης Ca^{2+} (DiHydro-Pyridine Receptors, DHPR) εντοπίζονται κατά μήκος των μεμβρανών των σωληναρίων T. Στον σκελετικό μυ συνδέονται μηχανικά με τους υποδοχείς ρυανοδίνης (Ryanodine Receptors, RyR) που υπάρχουν στη μεμβράνη του σαρκοπλασματικού δικτύου. Οι RyR είναι εκλεκτικοί δίαυλοι υποδοχέων Ca^{2+} οι οποίοι ενεργοποιούνται με τη δέσμευση Ca^{2+} (απελευθέρωση ασβεστίου που προκαλείται από ασβέστιο, Calcium-Induced Calcium Release, CICR). Η εκπόλωση των σωληναρίων T προκαλεί μια αλλαγή διαμόρφωσης του DHPR, η οποία, επιδρώντας άμεσα στον RyR, προκαλεί την απελευθέρωση του Ca^{2+} από το σαρκοπλασματικό δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται από την CICR που ενεργοποιείται από το ίδιο Ca^{2+} που εξέρχεται από το σαρκοπλασματικό δίκτυο.

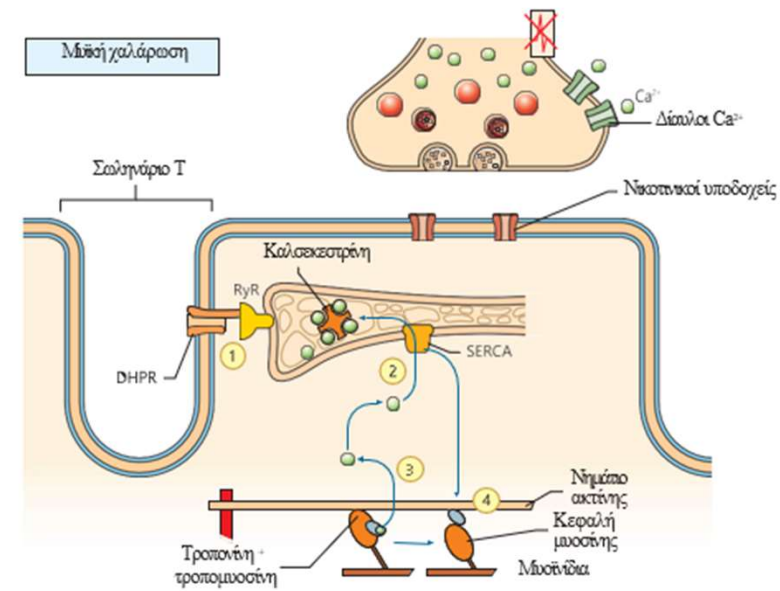
4. Η αύξηση της ενδοκυττάριας συγκέντρωσης του Ca^{2+} επιτρέπει τη σύνδεση των ιόντων αυτών με την τροπονίνη C, προκαλώντας μια στερεοχημική αλλαγή στην τροπομυοσίνη, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την άρση του αποκλεισμού που η τροπομυοσίνη ασκεί στα νημάτια ακτίνης.

5. Οι κεφαλές μυοσίνης είναι πλέον σε θέση να αλληλεπιδράσουν με τα νημάτια ακτίνης για να προκαλέσουν τη μυϊκή συστολή.



ΣΤΑΔΙΑ ΜΥΪΚΗΣ ΧΑΛΑΣΗΣ

- Η μυϊκή χάλαση αρχίζει όταν ο κινητικός νευρώνας δεν διεγείρεται πλέον και συνεπώς δεν μπορεί να ενεργοποιήσει άλλο τη νευρομυϊκή σύναψη. Σε αυτές τις συνθήκες συμβαίνουν τα ακόλουθα γεγονότα:
- Το Ca^{2+} δεν απελευθερώνεται πλέον από το σαρκοπλασματικό δίκτυο.
- Οι αντλίες ATPάσης SERCA που βρίσκονται στη μεμβράνη του σαρκοπλασματικού δικτύου συνεχίζουν να μεταφέρουν το Ca^{2+} εντός του ίδιου του δικτύου, όπου συσσωρεύεται, συνδεδεμένο με την πρωτεΐνη καλσεκεστρίνη.
- Η κυτταροπλασματική συγκέντρωση Ca^{2+} μειώνεται. Στη συνέχεια απελευθερώνεται από την τροπονίνη.
- Τα ρυθμιστικά μόρια τροπονίνη και τροπομοσίνη μετακινούνται, εμποδίζοντας τη σύνδεση ακτινής-μυοσίνης και η σύστολη τερματίζεται.



Μυϊκή χάλαση: ακολουθία γεγονότων στους σκελετικούς μύες.

ΜΥΪΚΗ ΣΥΣΤΟΛΗ

Υπάρχουν τέσσερις αναγνωρίσιμοι τύποι μυϊκής συστολής:

1. Η ισομετρική,
2. Η μειομετρική (σύγκεντρη),
3. Η πλειομετρική (έκκεντρη) και
4. Η ισοκινητική



Ανάλυση των παραγόντων που καθορίζουν τη μυϊκή δύναμη σε επίπεδο μεμονωμένων ινών

- Σε επίπεδο μιας μεμονωμένης μυϊκής ίνας, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ισομετρική δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί.

Διάμετρος μυϊκών ινών

- Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ίνας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μυοϊνιδίων που μπορεί να περιέχει και, κατά συνέπεια, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αλληλεπιδράσεων ακτίνης - μυοσίνης.
- Η αύξηση της μυϊκής μάζας μπορεί να συμβεί μέσω δύο διαδικασιών: αύξηση του μεγέθους των μεμονωμένων μυϊκών ινών (**υπερτροφία**) ή αύξηση του αριθμού των μυϊκών ινών (**υπερπλασία**).

Μήκος του σαρκομέριου

- υπάρχει ένα βέλτιστο μήκος του σαρκομέριου στο οποίο η δύναμη που παράγεται μετά από τετανική διέγερση είναι μέγιστη. Το μήκος αυτό κυμαίνεται μεταξύ 2 και 2,25 μm .

Ανάλυση των καθοριστικών παραγόντων της μυϊκής δύναμης στο σύνολο του μυός

Η συνολική ισχύς ενός μυός εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

- **Αριθμός κινητικών μονάδων**
- **Μέγεθος των κινητικών μονάδων**
- **Τύπος κινητικών μονάδων.** Σύμφωνα με την ταξινόμηση των λειτουργικών τύπων με βάση τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά, μπορούν να διακριθούν τρεις τύποι κινητικών μονάδων: S (αργές, πολύ ανθεκτικές στην κόπωση), FR (γρήγορες, ανθεκτικές στην κόπωση) και FF (γρήγορες, λίγο ανθεκτικές στην κόπωση)

| Χαρακτηριστικά | Τύποι μυϊκών ινών | | |
|---|---|---|---|
| | S (αργές) | FR (γρήγορες, ανθεκτικές στην κόπωση) | FF (γρήγορες, με μικρή αντοχή στην κόπωση) |
| Ανοχή στην κόπωση | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή |
| Μέγεθος (αριθμός μυϊκών ινών) | Μικρό (λίγες ίνες) | Ενδιάμεσο | Υψηλό (πολλές ίνες) |
| Ταχύτητα συστολής | Αργή | Γρήγορη | Γρήγορη |
| Ουδός διεγερσιμότητας κινητικού νευρώνα | Χαμηλός (εύκολα διεγερσιμος) | Ενδιάμεσος | Υψηλός |
| Ουδός ενεργοποίησης κινητικών μονάδων | Χαμηλός (εύκολα ενεργοποιήσιμος) | Ενδιάμεσος | Υψηλός |
| Σειρά ενεργοποίησης | Πρώτες | Δεύτερες | Τρίτες |
| Χρήση | Παρατεταμένη μυϊκή δραστηριότητα Ασκήσεις χαμηλής έντασης Ασκήσεις ενδιάμεσης έντασης Ασκήσεις υψηλής έντασης Παραδείγματα: διατήρηση της στάσης του σώματος, περπάτημα | Ασκήσεις μέτριας έντασης Ασκήσεις υψηλής έντασης | Δραστηριότητα που απαιτεί μεγάλη μυϊκή δύναμη Ασκήσεις υψηλής έντασης Παραδείγματα: τρέξιμο, άλματα, άρση βαρών |

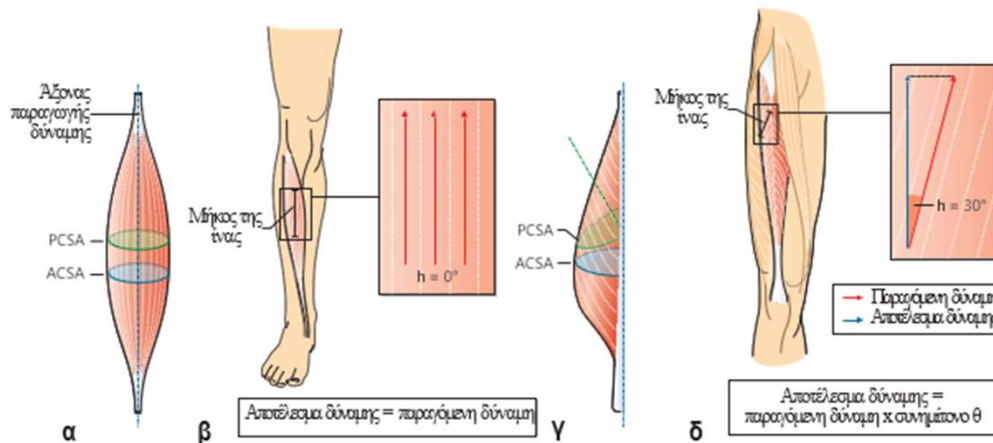
Τύποι ισομορφών μυοσίνης που υπάρχουν στις μυϊκές ίνες

- Οι μυϊκές ίνες χωρίζονται γενικά σε τρεις κατηγορίες: **ίνες I** (αργές, με κυρίως οξειδωτικό μεταβολισμό), **ίνες IIA** (ταχείες και οξειδωτικές) και **ίνες IIX** (ταχείες και γλυκολυτικές)

| Χαρακτηριστικά | Τύπος I | Τύπος IIA | Τύπος IIX |
|--|-----------|--------------------------------|------------------------------------|
| Χρώμα | Κόκκινο | Κόκκινο | Λευκό |
| Δραστηριότητα ΑΤΡάσης μυοσίνης | Χαμηλή | Υψηλή | Υψηλή |
| Ικανότητα της αντλίας ασβεστίου του σαρκοπλασματικού δικτύου | Ενδιάμεση | Υψηλή | Υψηλή |
| Διάμετρος | Μικρή | Μεγάλη | Μεγάλη |
| Γλυκολυτική ικανότητα | Χαμηλή | Ενδιάμεση | Υψηλή |
| Οξειδωτική ικανότητα | Υψηλή | Ενδιάμεση | Χαμηλή |
| Τύπος σχετιζόμενης κινητικής μονάδας | Αργή | Γρήγορη, ανθεκτική στην κόπωση | Γρήγορη, όχι ανθεκτική στην κόπωση |
| Μεμβρανικό δυναμικό (mV) | -90 | -90 | -90 |
| Ταχύτητα συστολής | Αργή | Γρήγορη | Γρήγορη |
| Πυκνότητα μιτοχονδρίων | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή |
| Πυκνότητα τριχοειδών | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή |
| Περιεκτικότητα σε μυοσφαιρίνη | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή |
| Αντοχή στην κόπωση | Υψηλή | Ενδιάμεση | Χαμηλή |
| Παραγόμενη δύναμη | Χαμηλή | Ενδιάμεση | Υψηλή |

Μυϊκή αρχιτεκτονική

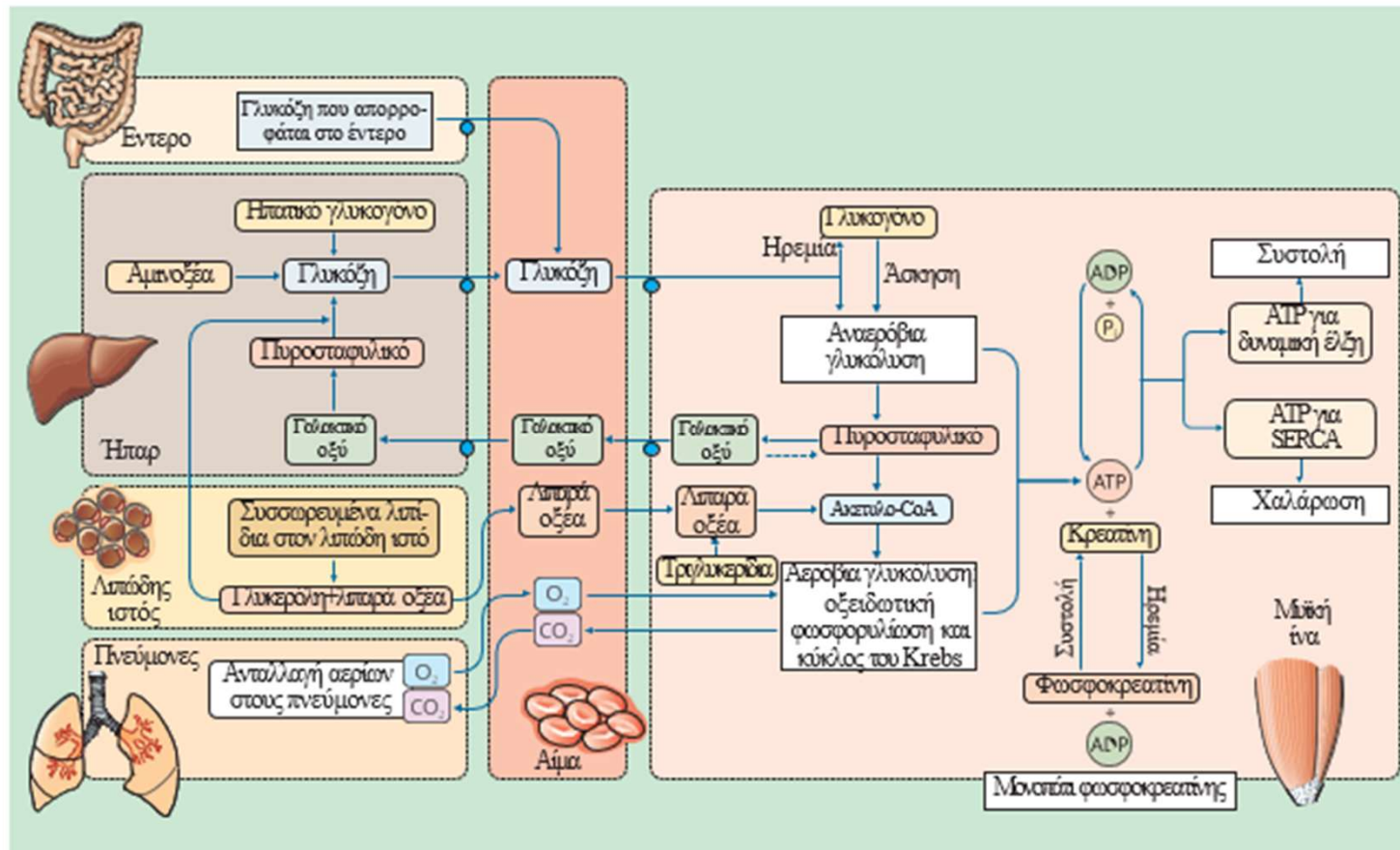
Σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών, οι μύες χωρίζονται γενικά σε τρεις κατηγορίες: αν οι μυϊκές ίνες είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς τον άξονα αυτό, ο μύς ονομάζεται **ατρακτοειδής** (π.χ. στον δικέφαλο βραχιόνιο), αν όλες οι ίνες είναι προσανατολισμένες υπό μια συγκεκριμένη γωνία, γνωστή ως γωνία πτέρωσης των ινών, ο μύς είναι γνωστός ως **πτεροειδής** (π.χ. ο πλάγιος γλουτιαίος), αν ο προσανατολισμός των ινών είναι μεταβλητός, αυτοί είναι **πολυπτεροειδής** (π.χ. ο μεγάλος γλουτιαίος).



ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Η συγκέντρωση του μυϊκού ATP είναι πολύ χαμηλή (περίπου 3 mM), επαρκής για να εγγυηθεί μια σύντομη συστολή (περίπου 2 s).
- Για να μπορέσει ένας μυς να διατηρήσει μια μεγαλύτερη συστολή, είναι απαραίτητο να ανασχηματίζει συνεχώς νέα μόρια ATP μέσω τριών οδών: της **αερόβιας γλυκόλυσης**, της **αναερόβιας γλυκόλυσης** και της οδού της **φωσφοκρεατίνης**.
- Οι ουσίες που παρέχουν ενέργεια στους μυς είναι ουσιαστικά η γλυκόζη και τα λιπαρά οξέα.
- Η γλυκόζη προέρχεται απευθείας από το έντερο μέσω των διαδικασιών πέψης/απορρόφησης, μέσω της διάσπασης του ηπατικού γλυκογόνου, της ηπατικής πρόσληψης γαλακτικού οξέος και γλυκερόλης, που στη συνέχεια μετατρέπονται σε γλυκόζη, και από τη διάσπαση του μυϊκού γλυκογόνου.
- Τα λιπαρά οξέα σχηματίζονται από τη διάσπαση των τριγλυκεριδίων στον λιπώδη ιστό ή απευθείας στη μυϊκή ίνα

Μυϊκός ενεργειακός μεταβολισμός



Ισχύς

- Η **ισχύς** είναι το έργο που παράγεται σε μια μονάδα χρόνου:

$$P = w/t$$

- **Έργο** είναι η δύναμη που απαιτείται για μια κίνηση: $w = F \cdot dx$

- Η ταχύτητα παρέχεται από την κίνηση με βάση το χρόνο:

$$v = dx/t$$

- Αντικαθιστώντας: $P = F \cdot v$

- Επομένως, **η ισχύς ενός μύου εξαρτάται από τη δύναμη που αναπτύσσει και από την ταχύτητα συστολής**. Φτάνει στην μέγιστη τιμή όταν το φορτίο (ή η τάση) και η ταχύτητα είναι ίσες με περίπου το ένα τρίτο της μέγιστης τιμής.

ΜΥΪΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

- Η **μυϊκή κόπωση** είναι μια κατάσταση κατά την οποία ο μυς επιβαρύνεται από την ίδια την απόδοσή του και οδηγεί σε μείωση της δύναμης που αναπτύσει, της διάρκειας και της ταχύτητας της συστολής και σε επιβράδυνση της διαδικασίας χαλάρωσης.
- Η αντοχή μιας ίνας, ενός μυός ή μιας κινητικής μονάδας στην κόπωση παρατηρείται με επαναλαμβανόμενη διέγερση υψηλής συχνότητας και με μέτρηση της παραγόμενης δύναμης
- οι μύες που είναι ανθεκτικοί στην κόπωση διατηρούν σταθερές τιμές της παραγόμενης δύναμης, ενώ εκείνοι που κουράζονται εύκολα παρουσιάζουν ταχεία και σημαντική μείωση.

ΜΥΪΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

- Η εκούσια συστολή ενός σκελετικού μυός ξεκινά από το κεντρικό νευρικό σύστημα, με τη δράση των κινητικών περιοχών (κινητικός φλοιός, προκινητικός φλοιός, βασικοί πυρήνες, παρεγκεφαλίδα κ.λπ.), αλλά επηρεάζεται επίσης από κίνητρα και συναισθηματικά ερεθίσματα.
- Όλες οι νευρικές ώσεις συγκλίνουν στη συνέχεια στους κινητικούς νευρώνες του νωτιαίου μυελού.
- Ο κινητικός νευρώνας επηρεάζει τη δραστηριότητα των μυϊκών ινών μέσω της νευρομυϊκής σύναψης.

ΜΥΪΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

- Η μυϊκή κόπωση που δρα στις νευρικές δομές και τους μηχανισμούς που στέλνουν πληροφορίες από τις κινητικές περιοχές του εγκεφάλου στους κινητικούς νευρώνες ορίζεται ως κεντρική.
- Η περιφερική κόπωση δρα σε επίπεδο νευρομυϊκής σύναψης και άμεσα στις διάφορες διεργασίες και μυϊκές δομές.
- Όλες οι διεργασίες, από την απελευθέρωση του νευροδιαβιβαστή ακετυλοχολίνης έως τη μυϊκή συστολή, μπορούν, αν μεταβληθούν, να προκαλέσουν περιφερική μυϊκή κόπωση.

ΜΥΪΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η μυϊκή κόπωση μπορεί να προκύψει:

- Σε επίπεδο της νευρομυϊκής σύναψης και των προσυναπτικών απολήξεων (κόπωση τελικής πλάκας).
- Σε επίπεδο νευρικών κυττάρων και μυϊκών ινών.
- Σε επίπεδο μυϊκών ινών μετά από αύξηση του αναερόβιου μεταβολισμού, με αποτέλεσμα:
 - παραγωγή γαλακτικού οξέος (αύξηση της οξέωσης εξαιτίας των ιόντων υδρογόνου)
 - αύξηση της συγκέντρωσης των ανόργανων φωσφορικών λόγω της χρήσης PCr - η αύξηση αυτή αναστέλλει την απελευθέρωση φωσφορικών από την κεφαλή της μυοσίνης που απαιτείται για την παραγωγή της δυναμικής έλξης,
 - σε επίπεδο μυϊκής ίνας μετά από υπομέγιστη άσκηση μεγάλης διάρκειας - σε αυτές τις συνθήκες η παροχή γλυκογόνου εξαντλείται, με αποτέλεσμα την αναστολή της απελευθέρωσης ασβεστίου από το σαρκοπλασματικό δίκτυο