

Αθλητική Διατροφή Θεωρία

Dr Αναστάσιος Βαμβάκης

Κλινικός – Αθλητικός
Διαιτολόγος – Διατροφολόγος

Εκπαιδευτής Ανθρωπομετρίας ISAK



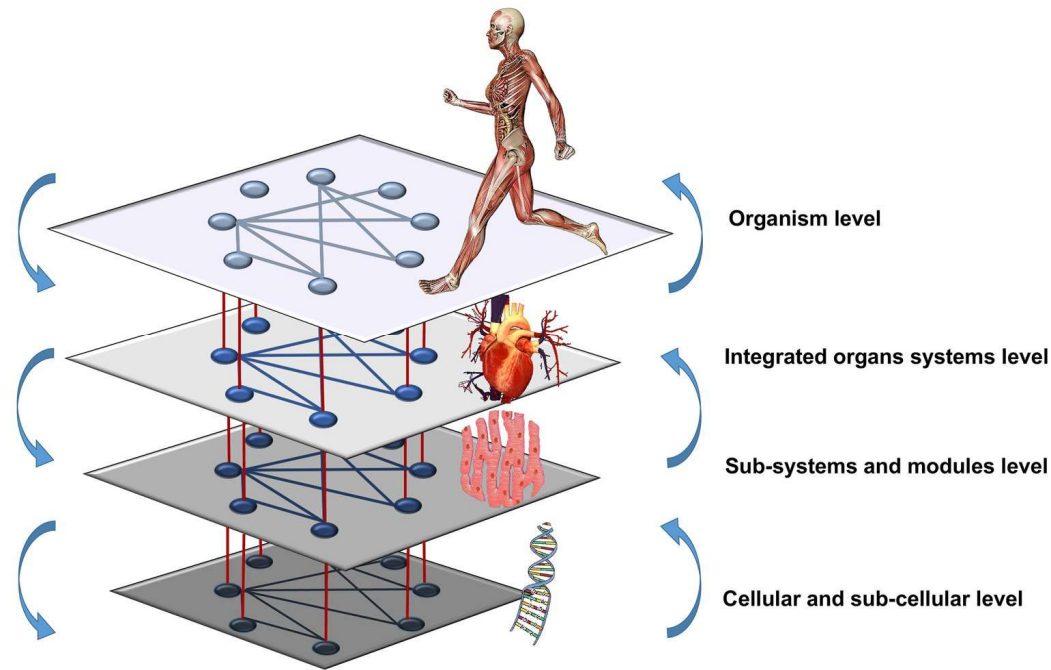
Ενεργειακά Υποστρώματα και Συστήματα
Παραγωγής Ενέργειας στην Άσκηση



Ο ρόλος της διατροφής στην άσκηση και στην άθληση

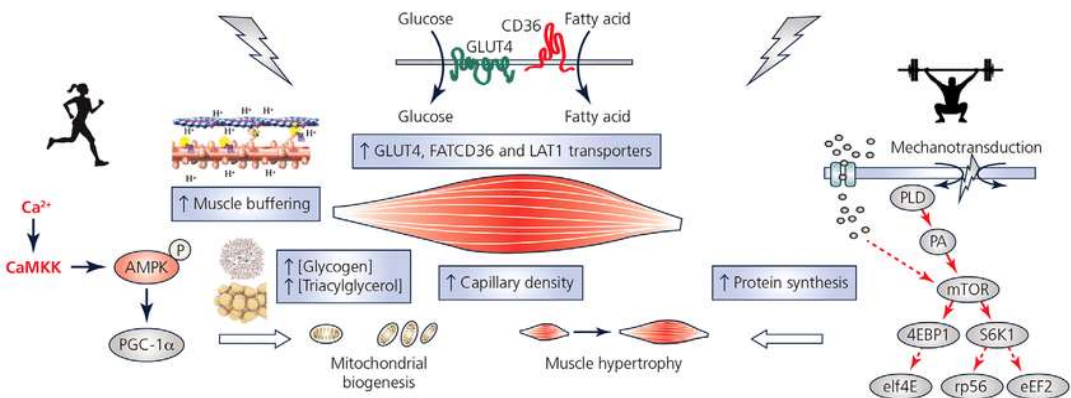
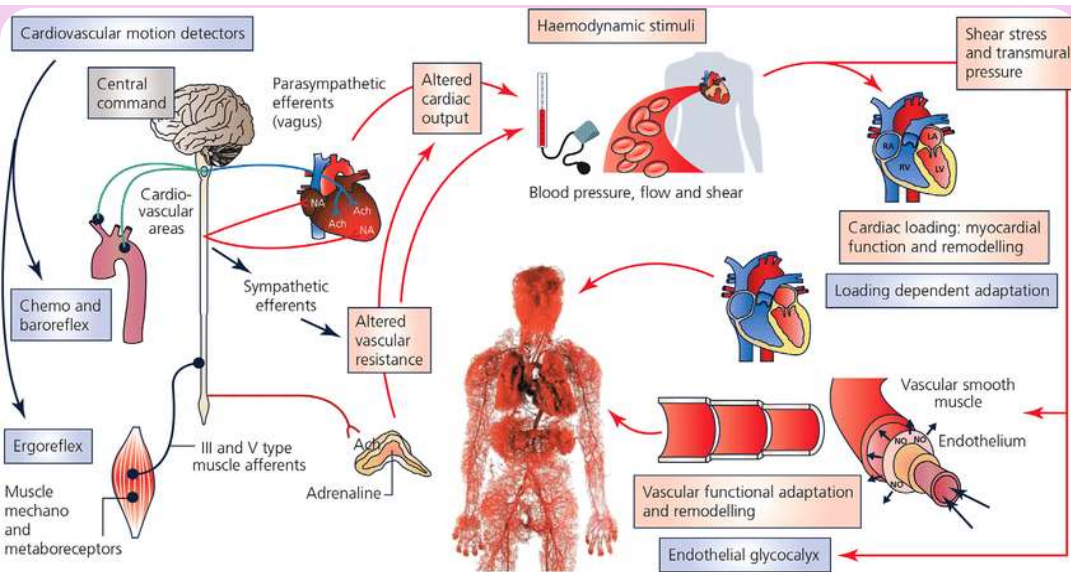
Για την εφαρμογή των αρχών της αθλητικής διατροφής, θα πρέπει να έχει κανείς βασικές γνώσεις:

- των βιοχημικών και φυσιολογικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στα κύτταρα και στους ιστούς
- του τρόπου με τον οποίο οι διεργασίες αυτές συνδυάζονται σε όλο το σώμα



Προσαρμογές στην άσκηση (Α)

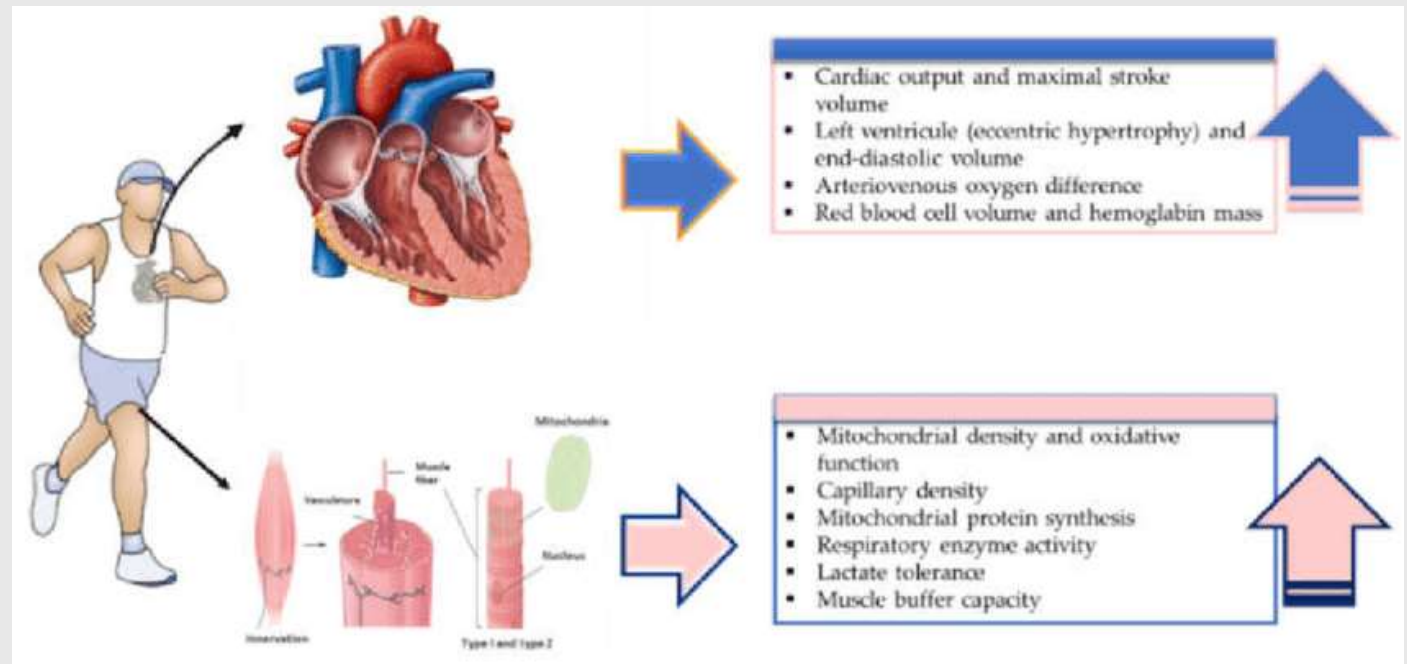
Η προπόνηση τροποποιεί τη μεταβολική απόκριση στην άσκηση

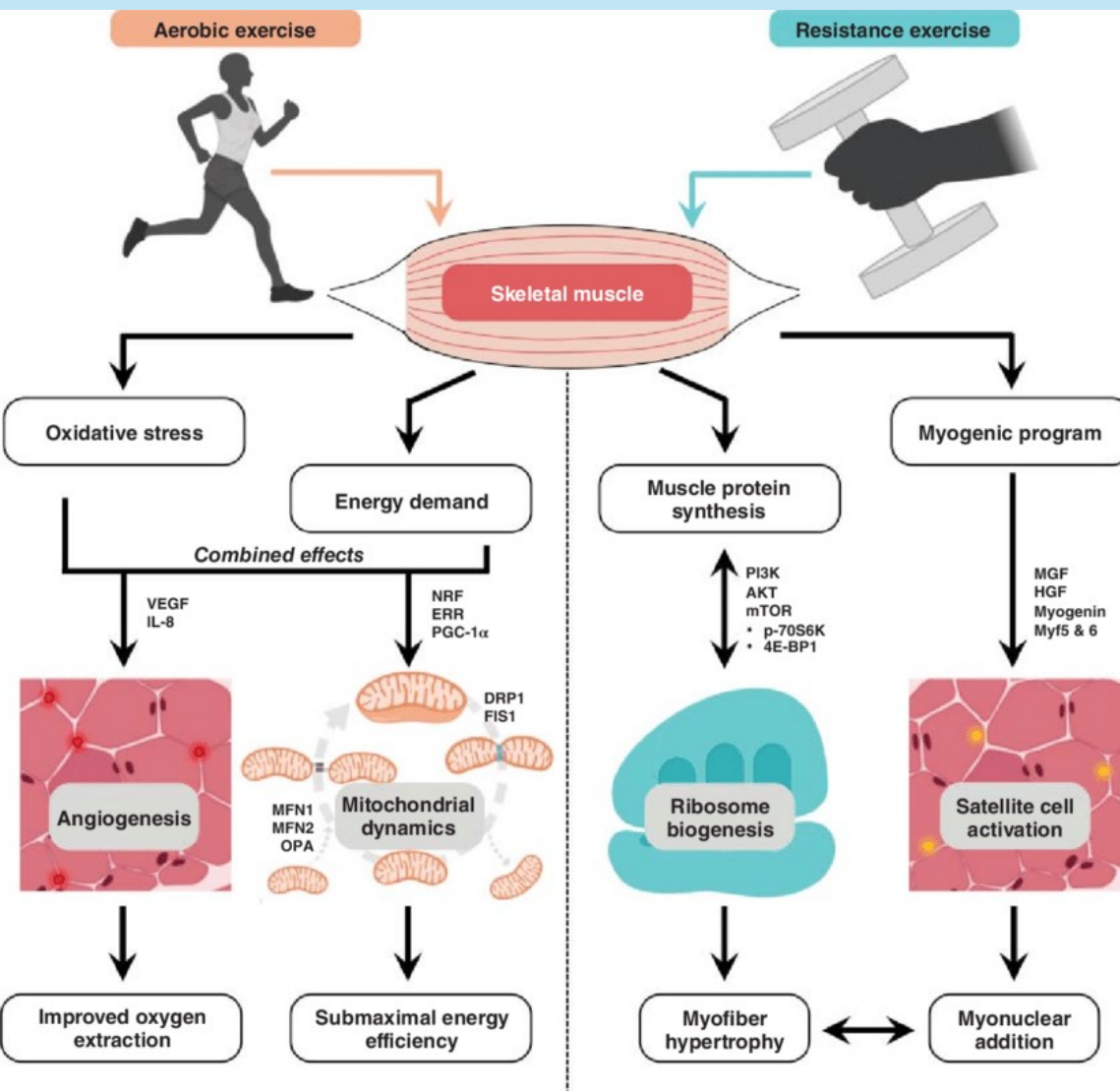


Stimulus	Sensor	Downstream effector
P _O ₂	PHDs	HIF-1α
NAD ⁺ :NADH	SIRT6	PGC-1α, FOXO1, p53
AMP:ATP	AMPK	HDAC, PGC-1α, CREB, SIRT1, HIF-1α
Mechanical stress	MAPKs	PGC-1α, CREB, ATF2
[Ca ²⁺] _i	CaMKs	HDAC, CREB, SRF
Mechanosensation	FAK	mTOR, p70 ^{S6K}
Sarcolemmal disruption	PA	Akt, mTOR, FOXO1

Προσαρμογές στην άσκηση (B)

- Οι προσαρμογές λόγω της προπόνησης περιλαμβάνουν:
 - βιοχημικές αποκρίσεις (π.χ. αλλαγές στη γονιδιακή έκφραση, περιεκτικότητα πρωτεΐνης, ενζυμικές δραστηριότητες)
 - φυσιολογικές αποκρίσεις (π.χ. αλλαγές στο τοπικό τριχοειδές δίκτυο, μέγιστη καρδιακή παροχή, μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου)
- Η διατροφή πριν και κατά τη διάρκεια της άσκησης επηρεάζουν τις ορμονικές και μεταβολικές αποκρίσεις κατά την άσκηση

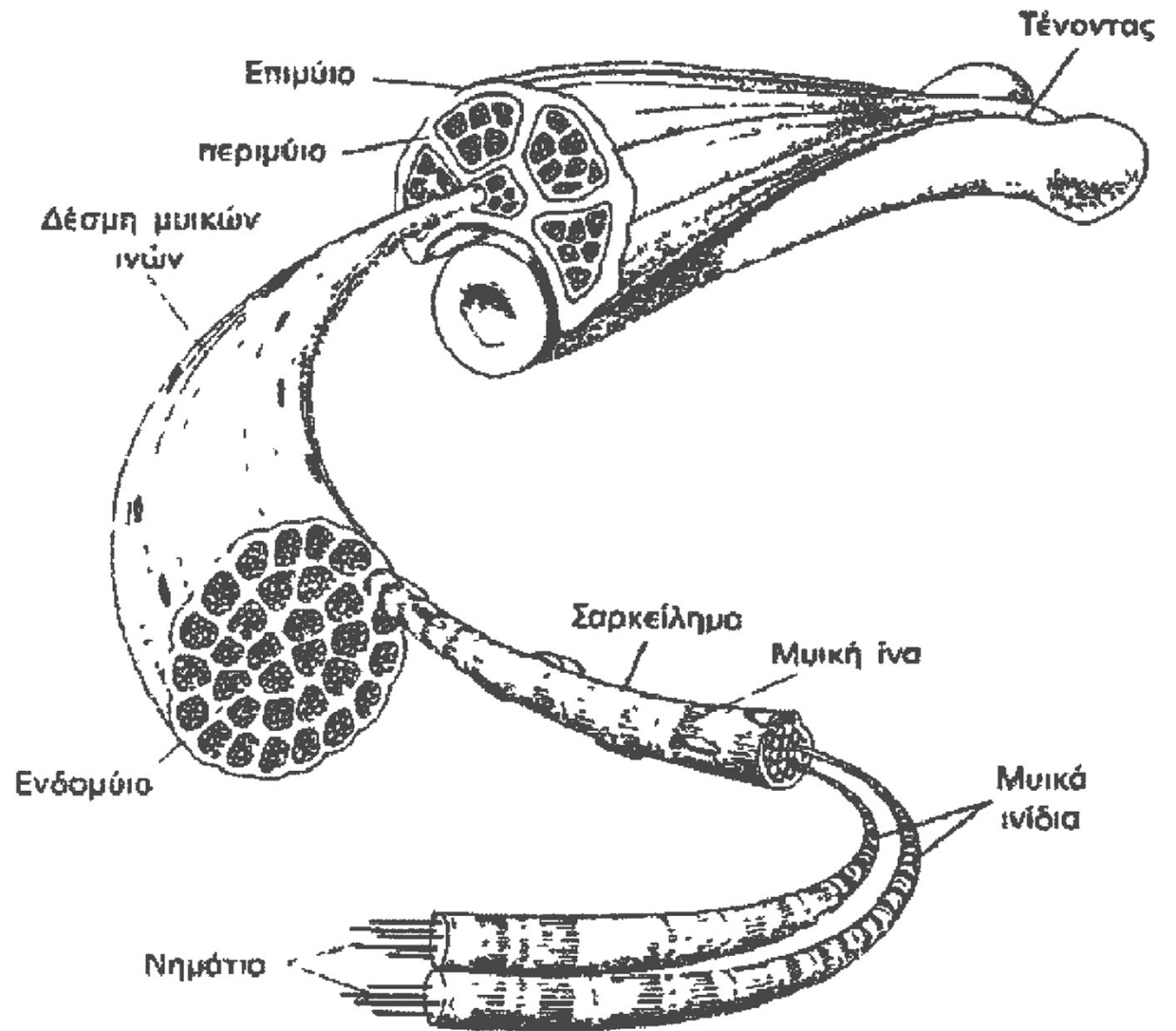


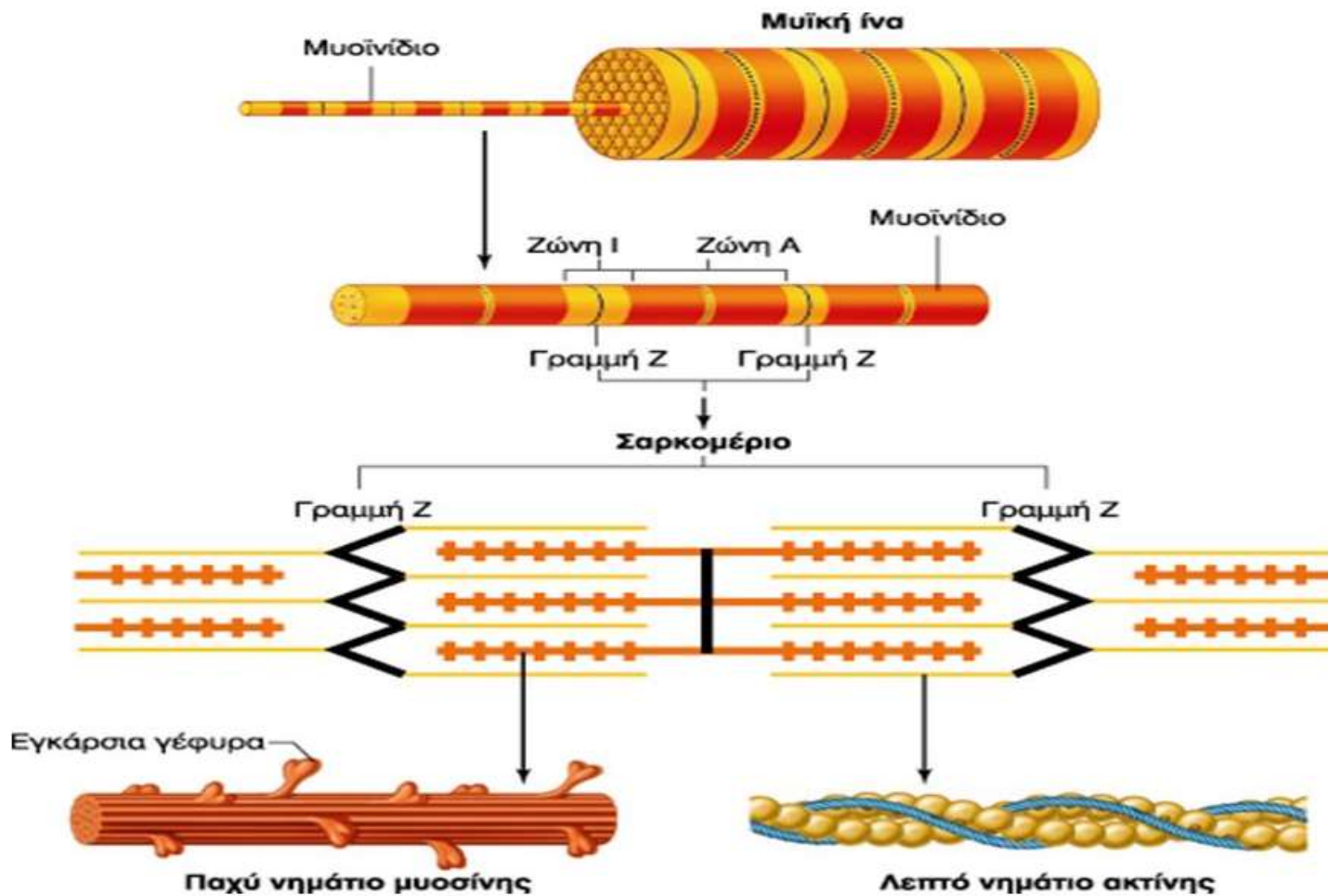


Μυικές προσαρμογές στην άσκηση

- Αυτές οι προσαρμογές καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο άσκησης και την ένταση, τη συχνότητα και τον όγκο του ερεθίσματος της άσκησης
- Όταν καταναλώνονται σε επαρκείς ποσότητες πριν ή κατά τη διάρκεια της άσκησης ή χρόνια κατά τη διάρκεια της προπόνησης, ορισμένα διατροφικά συστατικά μπορεί να έχουν επιδράσεις ενίσχυσης της απόδοσης (**Εργογονικές**)

Δομή Σκελετικού Μυός





Σκελετική Μυϊκή Ίνα

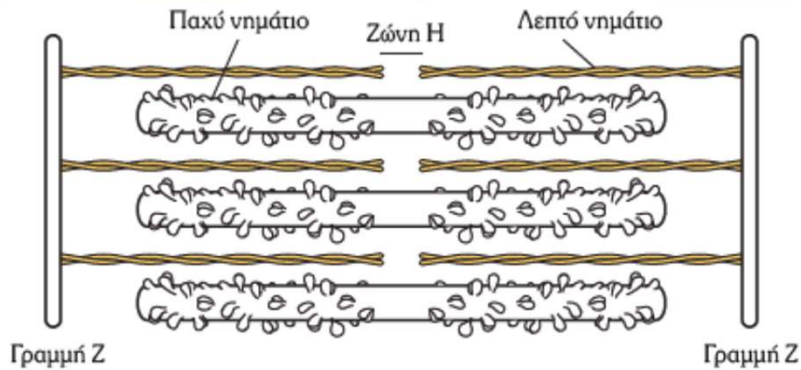
Διάταξη Σύσπασης Μυών

Διάταξη

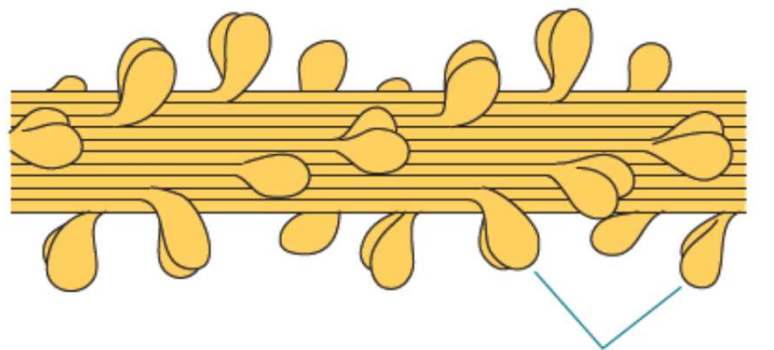
(α) Η διαμήκης διατομή ενός σαρκομερίου δείχνει τα μοριακά συστατικά των μυϊκών ινιδίων και τη διάταξη των παχίων και λεπτών νηματίων μεταξύ δύο γραμμών Z σε ένα μυοϊνίδιο

(β) Τα παχιά νημάτια αποτελούνται από μόρια μυοσίνης. Κάθε μόριο μυοσίνης αποτελείται από μια ραβδόμορφη ουρά και μια σφαιρική κεφαλή. Η τελευταία περιέχει θέσεις δραστηριότητας ATPάσης και θέσεις δέσμευσης της ακτίνης

(γ) Τα λεπτά νημάτια αποτελούνται από μόρια ακτίνης και τις ρυθμιστικές πρωτεΐνες τροπομυοσίνη και τροπονίνη

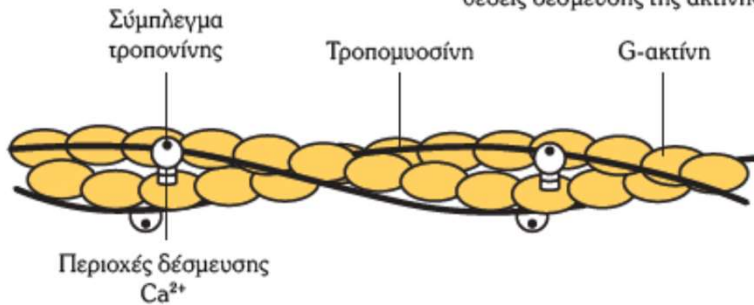


α



β

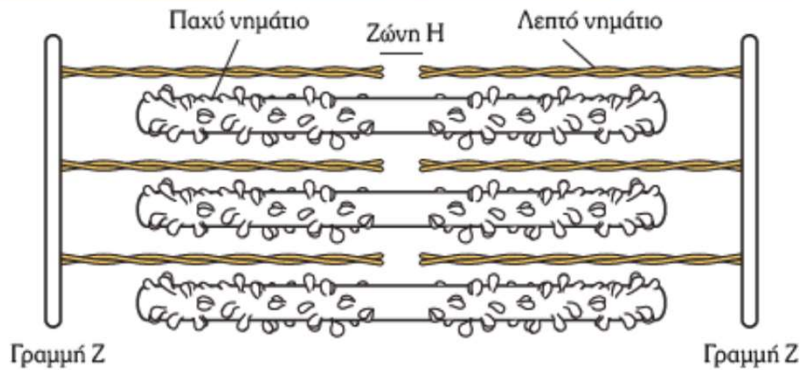
Κεφαλές μυοσίνης όπου υπάρχει δραστηριότητα της ATPάσης και θέσεις δέσμευσης της ακτίνης



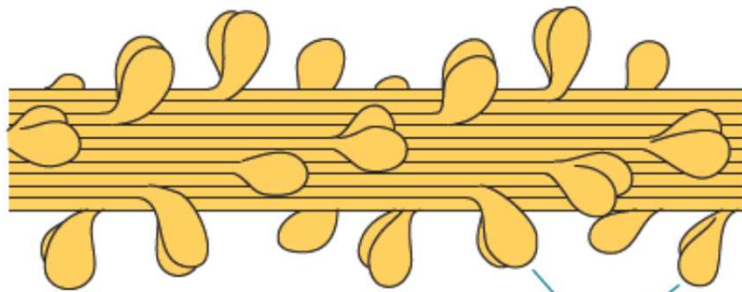
γ

Ενεργειακή Σύσπαση Μυών

- Τα παχιά νημάτια αποτελούνται από μόρια μυοσίνης, καθένα από τα οποία αποτελείται από μια ραβδόμορφη ουρά και μια σφαιρική κεφαλή που περιέχει θέσεις δραστηριότητας **αδενοσινικής τριφωσφατάσης (ΑΤΡάση)** και θέσεις δέσμευσης ακτίνης
- Η ΑΤΡ είναι το ενεργειακό νόμισμα του κυττάρου
- Η διάσπαση της ΑΤΡ σε **διφωσφορική αδενοσίνη (ΑDΡ)** και ανόργανο φώσφορο (P_i) από τη μυοσινική ΑΤΡάση παρέχει την ενέργεια για τη σύσπαση των μυών

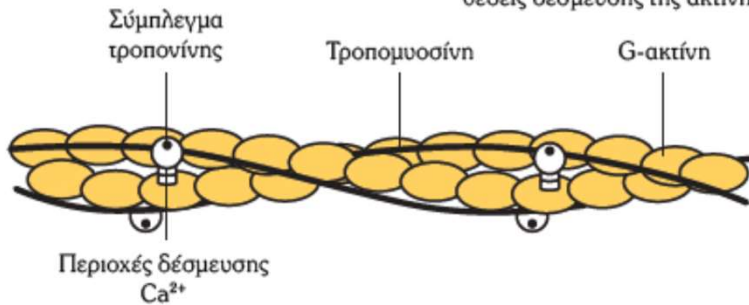


α



β

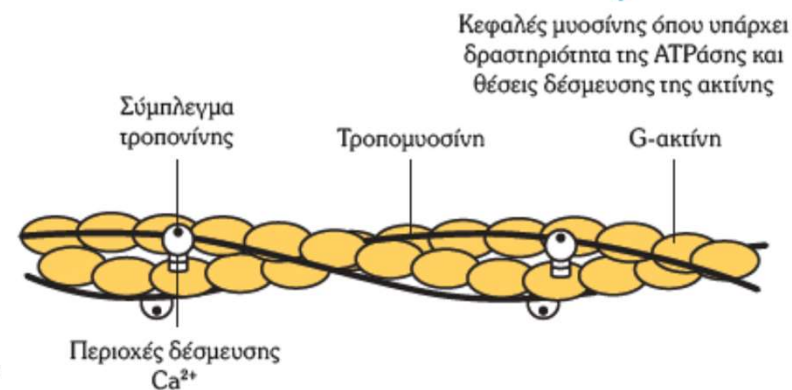
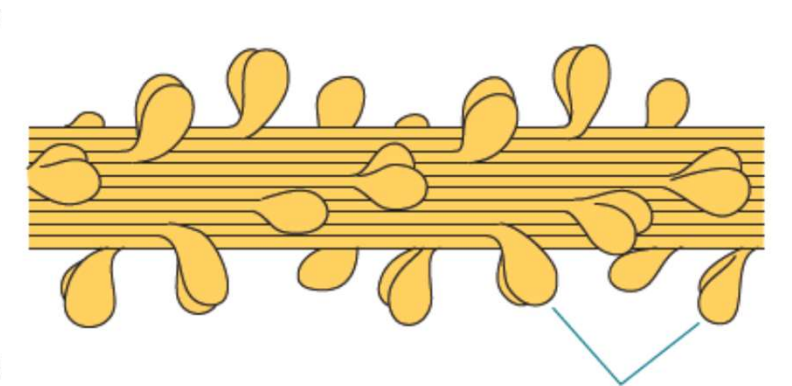
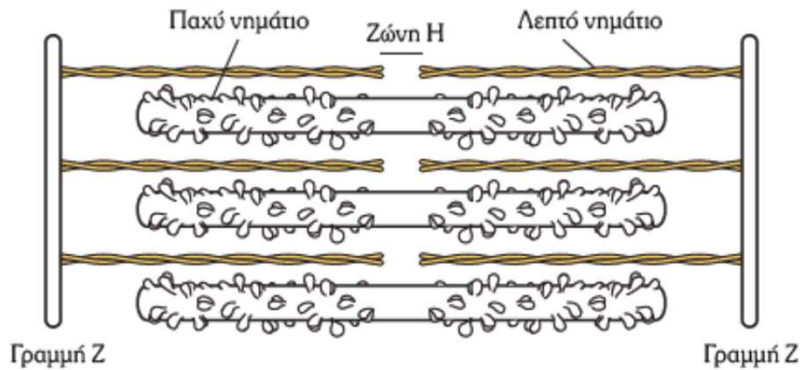
Κεφαλές μυοσίνης όπου υπάρχει δραστηριότητα της ΑΤΡάσης και θέσεις δέσμευσης της ακτίνης



γ

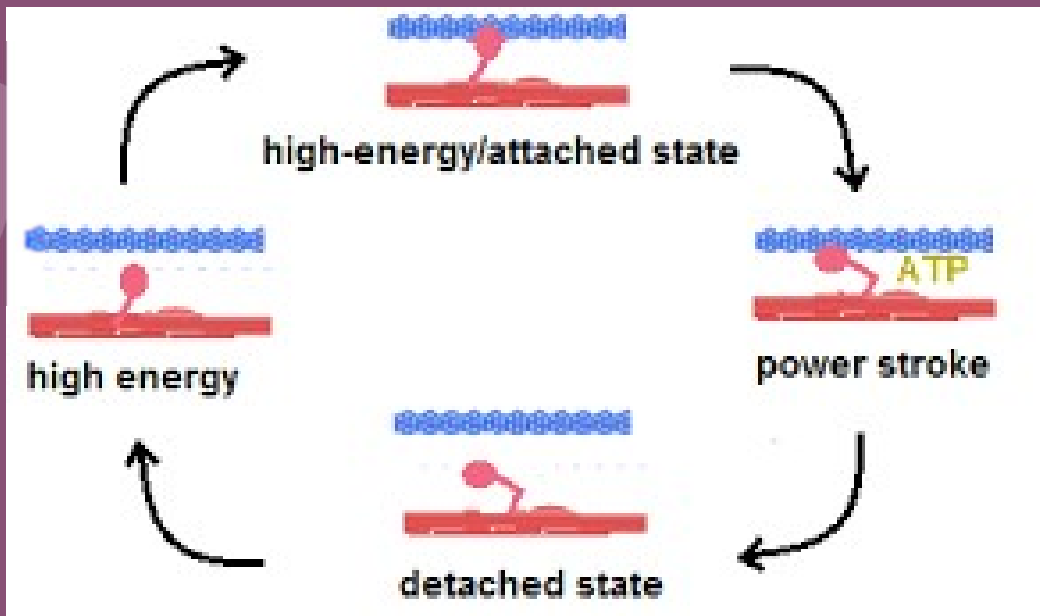
Παραγωγή Δύναμης στους Σκελετικούς Μύες

- Όταν το ασβέστιο και η ATP υπάρχουν σε επαρκείς ποσότητες, τα νημάτια σχηματίζουν ακτομυοσίνη και βραχύνονται διολισθαίνοντας το ένα πάνω στο άλλο
- Η διολίσθηση ξεκινά όταν οι κεφαλές μυοσίνης των παχιών νηματίων σχηματίζουν **εγκάρσιες γέφυρες** (προσωρινές συνδέσεις) που συνδέονται με τις ενεργές θέσεις στις υπομονάδες ακτίνης των λεπτών νηματίων
- Κάθε εγκάρσια γέφυρα προσκολλάται και αποσπάται αρκετές φορές κατά τη διάρκεια μιας συστολής και τραβά τα λεπτά νημάτια προς το κέντρο του σαρκομερίου σε μια δράση που μοιάζει με οδοντωτό τροχό. Όταν μια μυϊκή ίνα συστέλλεται, τα σαρκομεριά της μειώνονται σε όλο το κύτταρο και ολόκληρη η μυϊκή ίνα βραχύνεται



Παραγωγή Δύναμης στους Σκελετικούς Μύες

Οπτικοποίηση σε Βίντεο



https://www.google.com/search?q=skeletal+muscle+energy+contraction&source=lmns&tbm=vid&bih=639&biw=1396&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwil9Pqkx9iEAXVR_rslHcMvB_IQ0pQJKAJ6BAgBEAY#fpstate=ive&vld=cid:a64bcbbb,vid:bjyM13pe9NA,st:0

Τύποι Μυϊκών Ινών & Βιοχημικά Χαρακτηριστικά

Τιμές μεταβολικών
χαρακτηριστικών των
μυϊκών ινών τύπου II σε
σχέση με αυτές που
βρίσκονται στις μυϊκές ίνες
τύπου I.

Χαρακτηριστικά	Τύπος I	Τύπος IIa	Τύπος IIx
Ονοματολογία	Αργές, κόκκινες, ανθεκτικές στην κούραση, οξειδωτικές	Γρήγορες, κόκκινες, ανθεκτικές στην κούραση, οξειδωτικές ή γλυκολυτικές	Γρήγορες, λευκές, μη ανθεκτικές στην κούραση, γλυκολυτικές
Πυκνότητα τριχοειδών αγγείων	1.0	0.8	0.6
Πυκνότητα Μιτοχονδρίων	1.0	0.7	0.4
Περιεκτικότητα μυοσφαιρίνης	1.0	0.6	0.3
Δραστηριότητα φωσφορυλάσης	1.0	2.1	3.1
Δραστηριότητα φωσφοφρουκτοκινάσης	1.0	1.8	2.3
Δραστηριότητα κιτρικής συνθετάσης	1.0	0.8	0.6
Δραστηριότητα ηλεκτρικής αφυδρογονάσης	1.0	0.7	0.4
Περιεκτικότητα μυϊκού γλυκογόνου	1.0	1.3	1.5
Περιεκτικότητα Τριακυλογλυκερόλης	1.0	0.4	0.2
Περιεκτικότητα φωσφοκρεατίνινης	1.0	1.2	1.2
Δραστηριότητα μυοσινικής ΑΤΡάσης	1.0	>2	>2

Ενέργεια για παραγωγή σύσπασης μυϊκών ινών

- Η ATP είναι η μόνη πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη σύσπαση των μυών και όλες τις άλλες διαδικασίες που απαιτούν ενέργεια στο κύτταρο, όπως η ενεργητική μεταφορά διαμέσου των μεμβρανών και η σύνθεση μακρομορίων από τους προδρόμους τους
- Στις μυϊκές ίνες, η ενέργεια από την υδρόλυση του ATP από τη μυοσινική ATPάση ενεργοποιεί συγκεκριμένες θέσεις στα συστατικά στοιχεία, προκαλώντας τη βράχυνση της μυϊκής ίνας

Ενέργεια για παραγωγή σύσπασης μυϊκών ινών

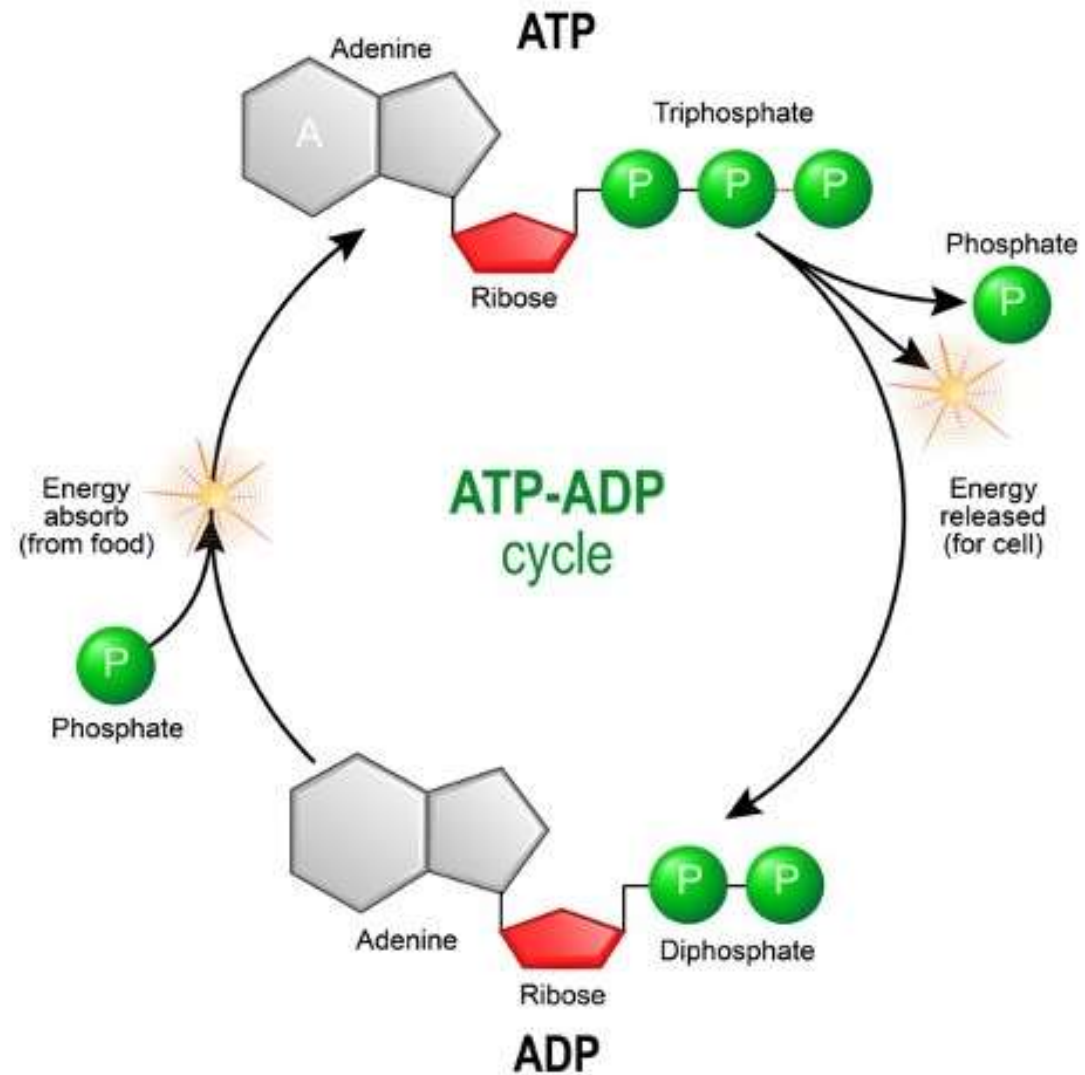
Η υδρόλυση της ATP αποδίδει περίπου 31 kJ (7 kcal) ελεύθερης ενέργειας ανά mole ATP (ένα mole είναι ισοδύναμο με το μοριακό βάρος σε γραμμάρια) που διασπάται σε ADP και P_i :



Η ενεργή επαναπρόσληψη ιόντων ασβεστίου από το σαρκοπλασματικό δίκτυο απαιτεί επίσης ATP, όπως και η αποκατάσταση του δυναμικού της μεμβράνης του μυϊκού κυττάρου μέσω της δράσης της $Na^+ - K^+ - ATPase$ (κοινώς γνωστής ως αντλία νατρίου).

Τριφωσφορική Αδενοσίνη Adenosine Triphosphate (ATP)

- Ο διαχωρισμός μιας ομάδας φωσφορικών από το ATP παρέχει την ενέργεια για τη σύσπαση των μυών
- Το ATP μετασχηματίζεται από το ADP με ένα φωσφορικό άλας από φωσφοκρεατίνη (PCr)
- Τα μακροθρεπτικά συστατικά από τα τρόφιμα είναι οι πηγές καυσίμου που μεταβολίζονται για την παραγωγή ATP



Ένεργειακές
πηγές που
μεταβολίζονται
για παραγωγή ATP

Υδατράνθρακες

Λίπη

Πρωτεΐνες

Υδατάνθρακες

Ενέργεια: 4 kcal/g

Υπάρχουν στο σώμα ως γλυκόζη

Η γλυκόζη του αίματος παρέχει ενέργεια στον εγκέφαλο και τους ιστούς

Γλυκογόνο = μορφή αποθήκευσης γλυκόζης στους μυς και στο ήπαρ

Λίπη

Ενέργεια: 9
kcal/g



Υψηλή απόδοση
ενέργειας αλλά η
διαδικασία
παραγωγής ATP
είναι πιο αργή από
αυτή των
υδατανθράκων

Πρωτεΐνες

Ενέργεια: 4 kcal/γραμμάριο

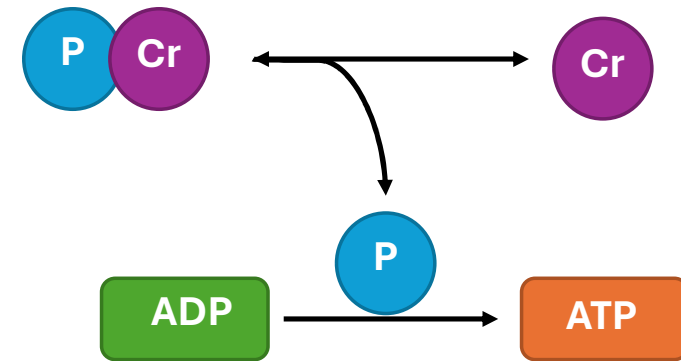
Ενώ τα αμινοξέα από την πρωτεΐνη παίζουν μεγάλο ρόλο στη δομή διαφόρων συστατικών του σώματος (μύες, ορμόνες κ.λπ.), ο ρόλος τους για την παραγωγή ενέργειας είναι περιορισμένος

Η οξείδωση αμινοξέων για καύσιμο συμβαίνει κυρίως μόνο όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες άλλες πηγές καυσίμου

ΠΗΓΕΣ ΑΤΡ ΓΙΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΜΥΪΚΗΣ
ΔΥΝΑΜΗΣ

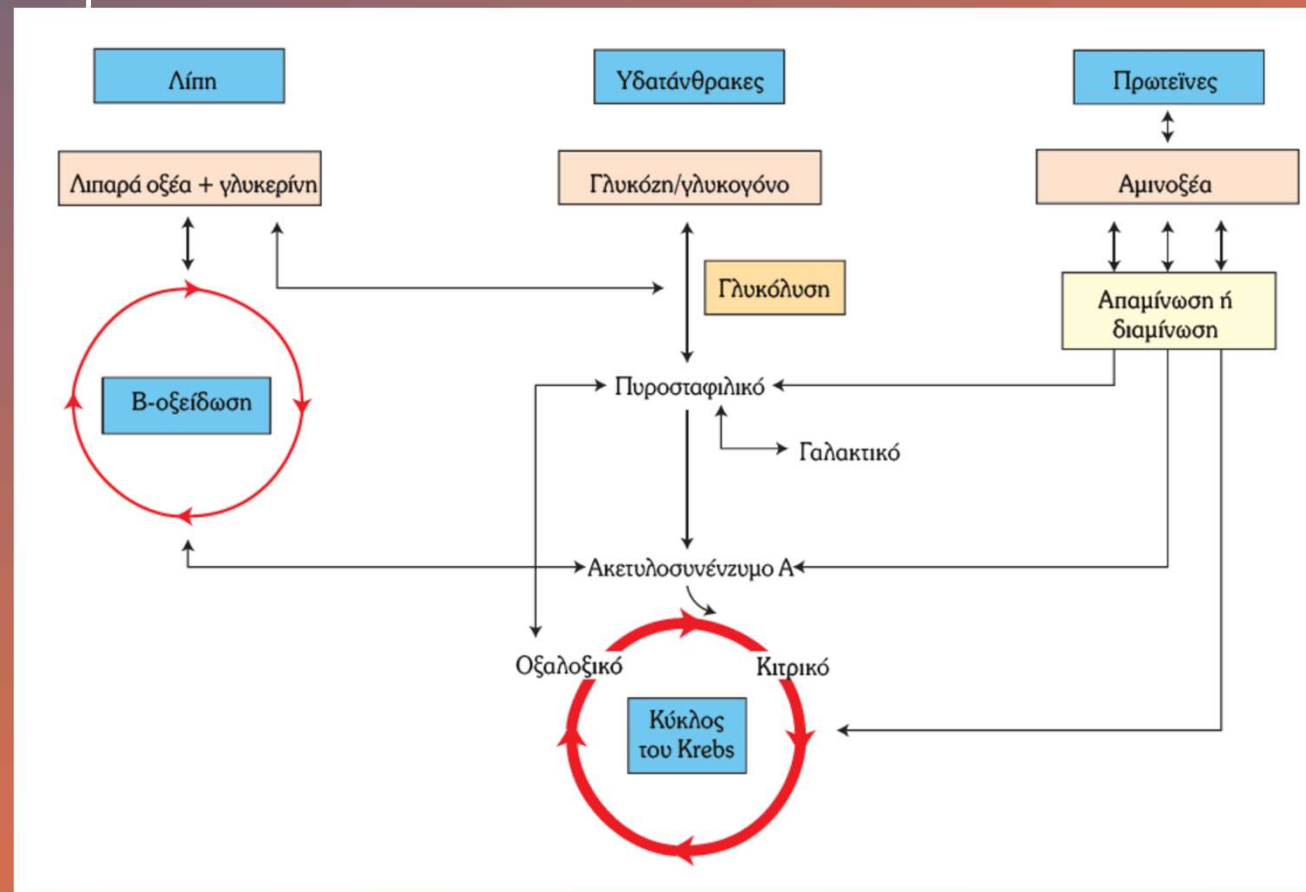
1. Υδρόλυση φωσφοκρεατίνης: Ταχεία απελευθέρωση ενέργειας χωρίς την ανάγκη οξυγόνου (αναερόβιος μεταβολισμός). Πραγματοποιείται στο σαρκόπλασμα.
2. Γλυκόλυση: Η ενέργεια που διατίθεται από τη διάσπαση της γλυκόζης (αναερόβιος μεταβολισμός) μέσω της πρόσληψης από το αίμα. Η διάσπαση του μυϊκού γλυκογόνου, η γλυκολυτική οδός (Εικόνα 3.3), πραγματοποιείται στο σαρκόπλασμα.
3. Οξειδωτική φωσφορυλίωση: Οι υδατάνθρακες, τα λίπη και οι πρωτεΐνες οξειδώνονται (αερόβιος μεταβολισμός). Πραγματοποιείται στο μιτοχόνδριο.

Φωσφοκρεατίνη (PCr)



- Η φωσφοκρεατίνη (PCr) βρίσκεται κυρίως στους μυς, η ομάδα φωσφορικών (P) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ATP από το ADP
- Χρησιμοποιείται για πολύ μικρή διάρκεια (~5 δευτερόλεπτα ή λιγότερο) υψηλής έντασης μυϊκή σύσπαση
- Η κρεατίνη παράγεται στο σώμα (~1-2 g/ημέρα)
- Κρέατα, ιδιαίτερα κόκκινο κρέας, και ψάρια όπως ο σολομός και ο τόνος είναι πλούσιοι σε κρεατίνη
- Η κρεατίνη μπορεί επίσης να καταναλωθεί από συμπληρώματα

Οι κύριες οδοί του ενεργειακού μεταβολισμού χρησιμοποιώντας υδατάνθρακες, λιπίδια και πρωτεΐνες ως πηγές ενέργειας.



Η Φωσφοκρεατίνη στον Αναερόβιο Μεταβολισμό

Μέρος της ενέργειας για την επανασύνθεση της ATP παρέχεται γρήγορα και χωρίς την ανάγκη παρουσίας οξυγόνου

Εντός της μυϊκής ίνας, η συγκέντρωση της φωσφοκρεατίνης είναι τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της ATP

Όταν η φωσφοκρεατίνη διασπάται σε κρεατίνη και P_i με τη δράση του ενζύμου κρεατινική κινάση (CK), απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ελεύθερης ενέργειας (43 kJ [10 kcal] ανά mole φωσφοκρεατίνης)

Κατά τη διάρκεια έντονης άσκησης, η συγκέντρωση της φωσφοκρεατίνης πέφτει γρήγορα και μπορεί να εξαντληθεί μέσα σε 10 έως 20 δευτερόλεπτα.



Αναερόβια Παραγωγή ATP

	Χωρητικότητα (mmol ATP/κιλό w.w.)	Ισχύς (mmol ATP/κιλό w.w./s)
Σύστημα φωσφαγόνων	14-24	2.3
Γλυκολυτικό σύστημα	48-75	1.1
Σε συνδυασμό	62-93	2.8

Οι τιμές εκφράζονται ανά κιλό υγρού βάρους (w.w.) μυός και βασίζονται σε εκτιμήσεις παροχής ATP κατά τη διάρκεια της άσκησης υψηλής έντασης.

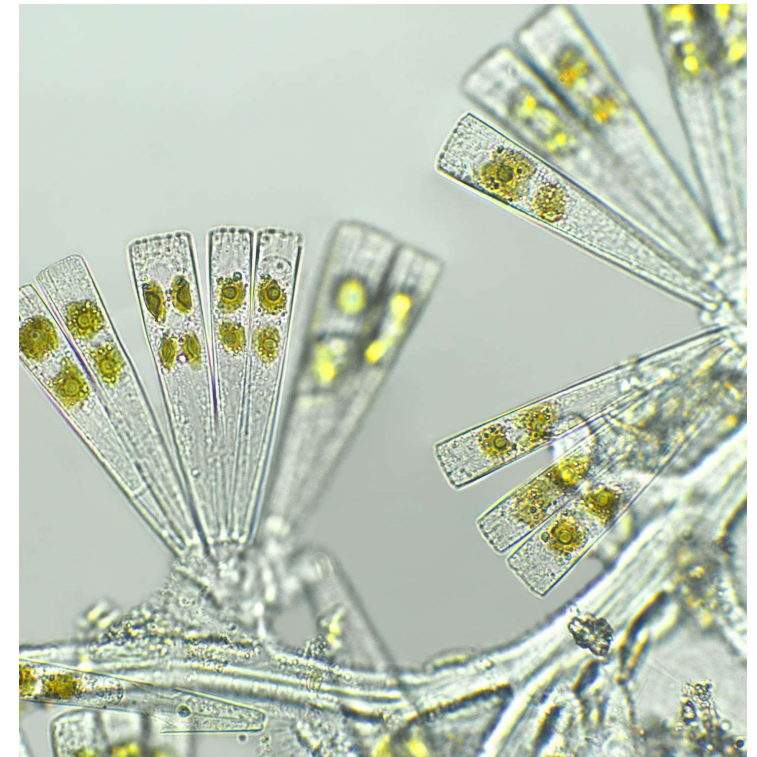
Επανασύνθεση ATP από Αναερόβιο και Αερόβιο Μεταβολισμό

Κατά προσέγγιση χρόνος καθυστέρησης πριν επιτευχθούν οι μέγιστοι
ρυθμοί μετά την έναρξη της άσκησης

	Μέγιστος ρυθμός επανασύνθεσης ATP (mmol ATP/κιλό w.w./s)	Χρόνος καθυστέρησης*
Διάσπαση φωσφοκρεατίνης	2.25	Στιγμιαία
Γλυκόλυση	1.10	5-10 δευτερόλεπτα
Οξείδωση γλυκογόνου	0.70	1-3 λεπτά
Οξείδωση γλυκόζης (από το αίμα)	0.35	~90 λεπτά
Οξείδωση λίπους	0.25	>2 ώρες

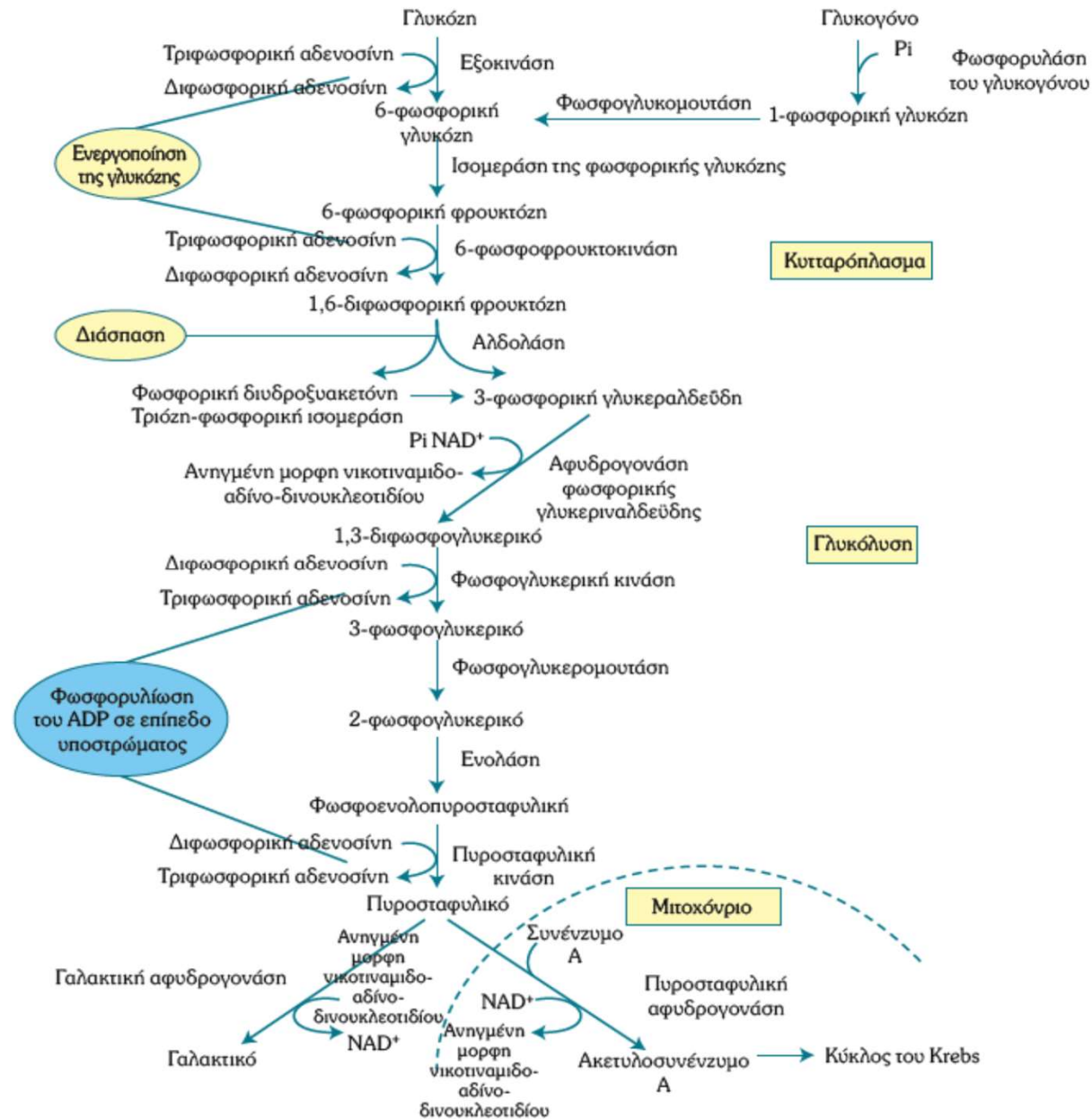
Η Γλυκόλυση στον Αναερόβιο Μεταβολισμό

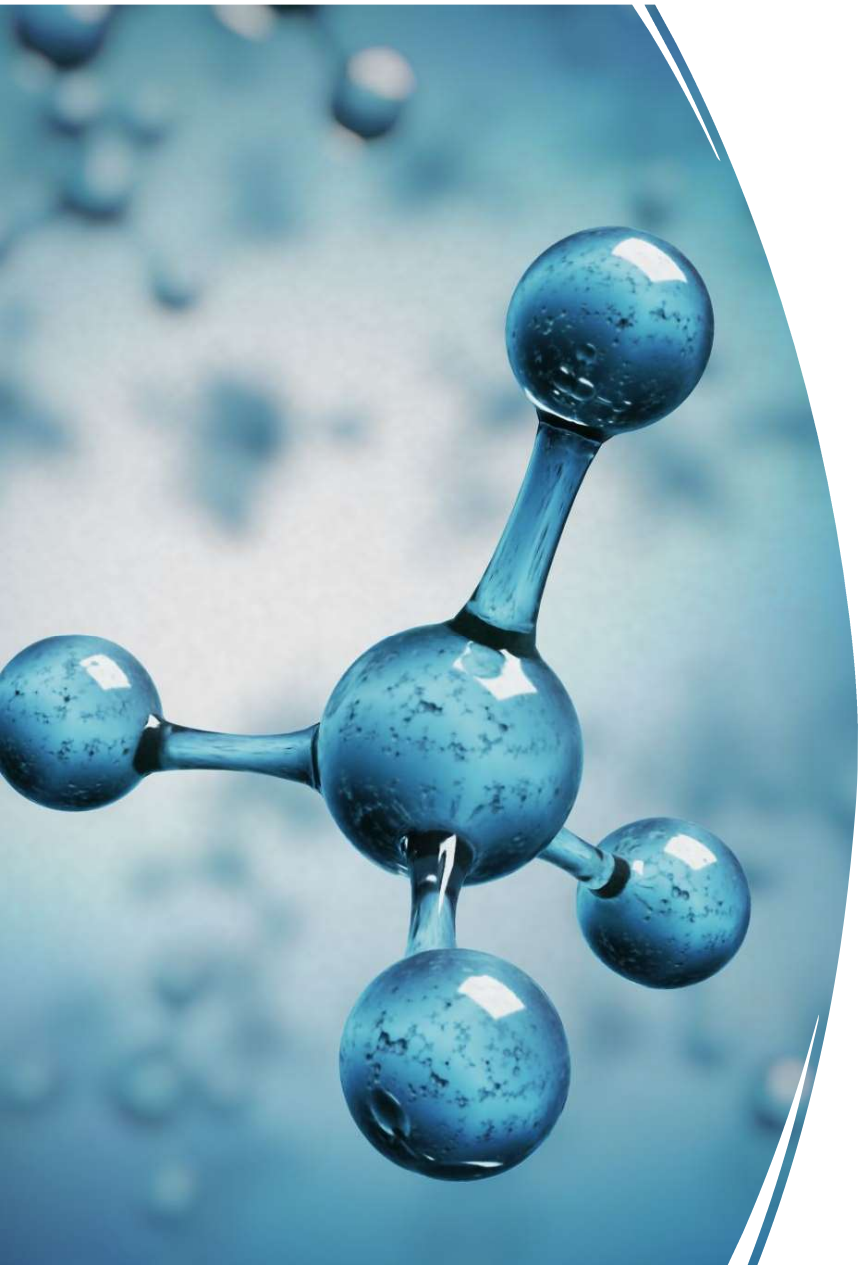
- Υπό κανονικές συνθήκες, οι μύες δεν κουράζονται μετά από λίγα μόνο δευτερόλεπτα προσπάθειας, επομένως πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη πηγή ενέργειας εκτός από την ATP και τη φωσφοκρεατίνη
- Η διαθέσιμη αυτή πηγή είναι η γλυκόλυση, η οποία περιλαμβάνει τη διάσπαση της γλυκόζης (ή του γλυκογόνου) σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων που παράγουν πυροσταφυλικό
- Αυτή η διαδικασία δεν απαιτεί οξυγόνο, αλλά έχει ως αποτέλεσμα η ATP να είναι διαθέσιμη στον μυ από αντιδράσεις που περιλαμβάνουν φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος



Η γλυκολυτική οδός

Η γλυκόλυση καθιστά διαθέσιμα δύο μόρια ATP για κάθε μόριο γλυκόζης που διέρχονται από το μονοπάτι ή τρία μόρια ATP εάν το μυϊκό γλυκογόνο είναι η αρχή του υποστρώματος

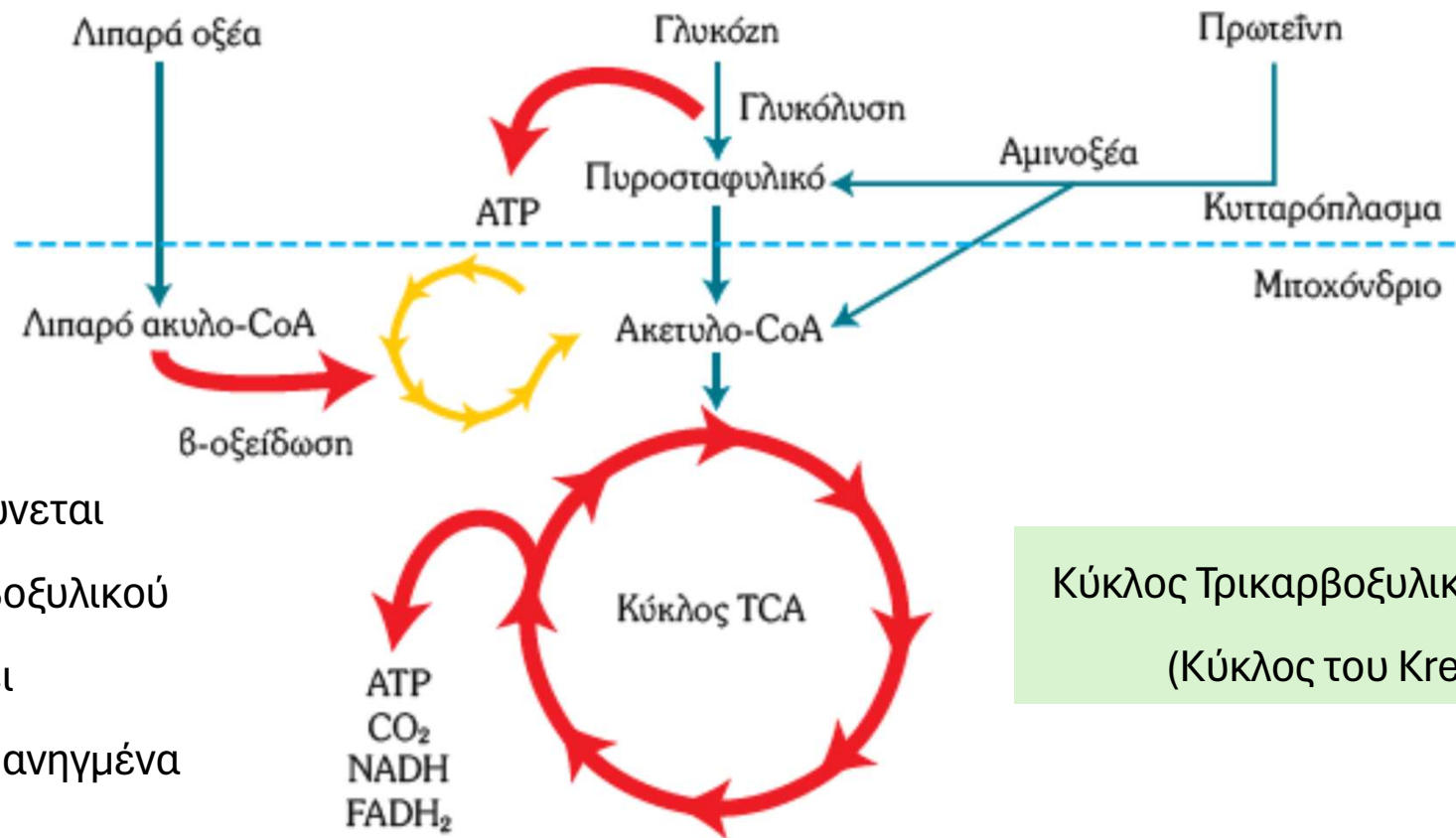




Οξείδωση Υδατανθράκων στον Αερόβιο Μεταβολισμό

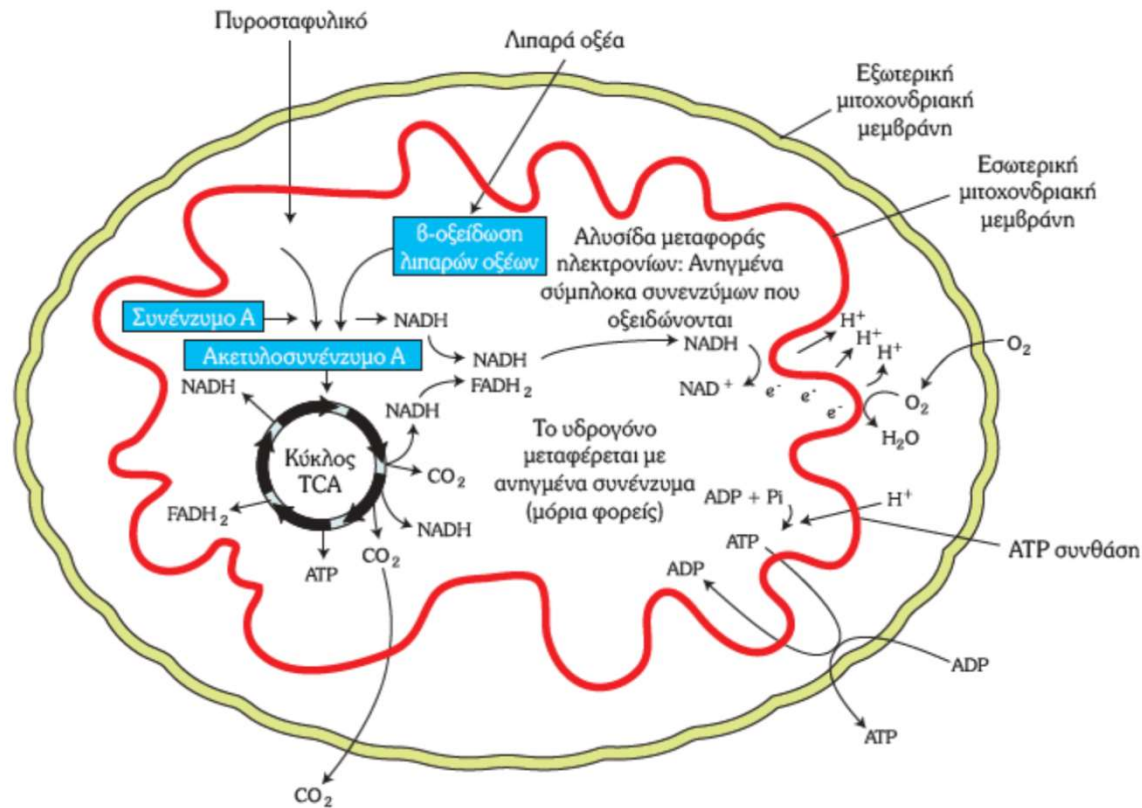
- Το πυροσταφυλικό μπορεί επίσης να υποβληθεί σε οξειδωτικό μεταβολισμό αποδίδοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό
- Αυτή η διαδικασία συμβαίνει μέσα στο μιτοχόνδριο και το πυροσταφυλικό που παράγεται στο σαρκόπλασμα μεταφέρεται μέσω της μιτοχονδριακής μεμβράνης από μια συγκεκριμένη πρωτεΐνη φορέα (μεταφορέας μονοκαρβοξυλικού οξέος)
- Το πυροσταφυλικό τριών ανθράκων, μετατρέπεται με οξειδωτική αποκαρβοξυλίωση σε μια ομάδα οξικών δύο ανθράκων, η οποία συνδέεται με θειοεστερικό δεσμό στο συνένζυμο Α (CoA) για να σχηματίσει το ακετυλοσυνένζυμο Α (Ακετυλο- CoA)

Ο σχηματισμός ακετυλο-CoA προκύπτει από τον καταβολισμό υδατανθράκων, λιπών και πρωτεϊνών



Κύκλος Τρικαρβοξυλικού Οξέος
(Κύκλος του Krebs)

Το ακετυλο-CoA οξειδώνεται
στον κύκλο του τρικαρβοξυλικού
οξέος, ο οποίος παράγει
διοξείδιο του άνθρακα, ανηγμένα
συνένζυμα και ATP



- Ο κύκλος TCA δημιουργεί τα ανηγμένα συνένζυμα NADH και FADH₂
- Η οξείδωση αυτών των συνενζύμων στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων απελευθερώνει ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επανασύνθεση της ATP
- Αυτή η διαδικασία ονομάζεται οξειδωτική φωσφορυλίωση

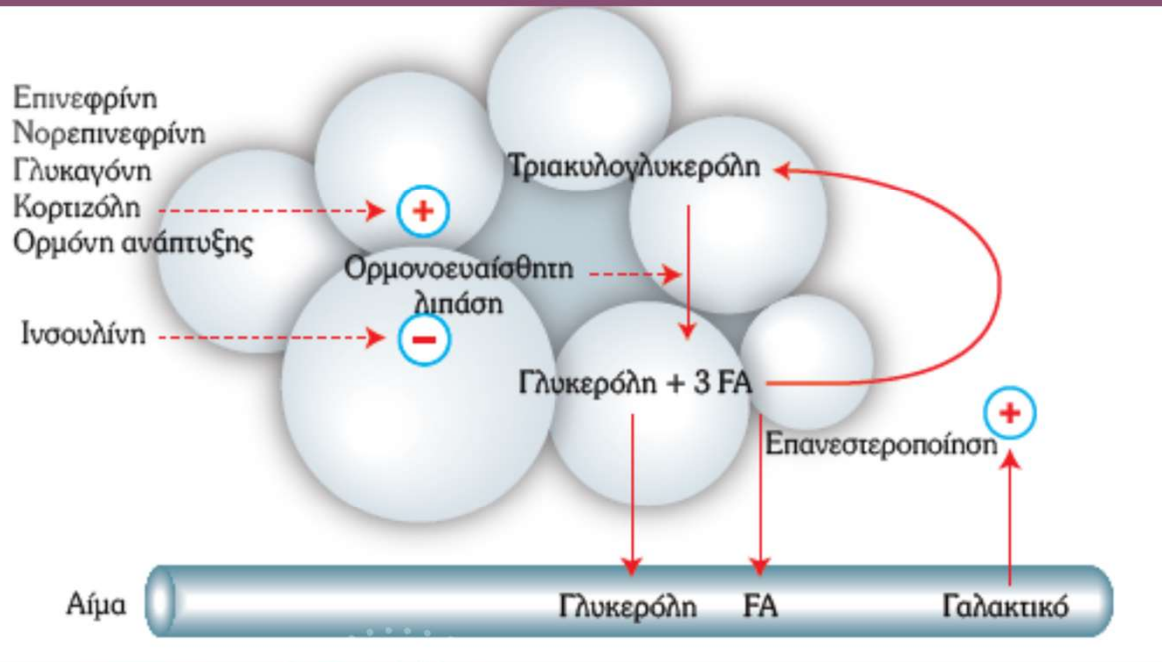
Επανασύνθεση ATP κατά την πλήρη οξείδωση της γλυκόζης

Η συνολική σύνθεση ATP των 38 μορίων ανά mole οξειδωμένης γλυκόζης προέρχεται κυρίως από την οξείδωση ανηγμένων συνενζύμων στο τερματικό αναπνευστικό σύστημα

Αριθμός μορίων ATP που συντέθηκαν ανά μόριο γλυκόζης που οξειδώθηκε	Πηγή	
2	Φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος	Στη γλυκόλυση
6	NADH	Στη γλυκόλυση
24	NADH	Στον κύκλο TCA
4	FADH ₂	Στον κύκλο TCA
2	GTP	Στον κύκλο TCA
38	Σύνολο	

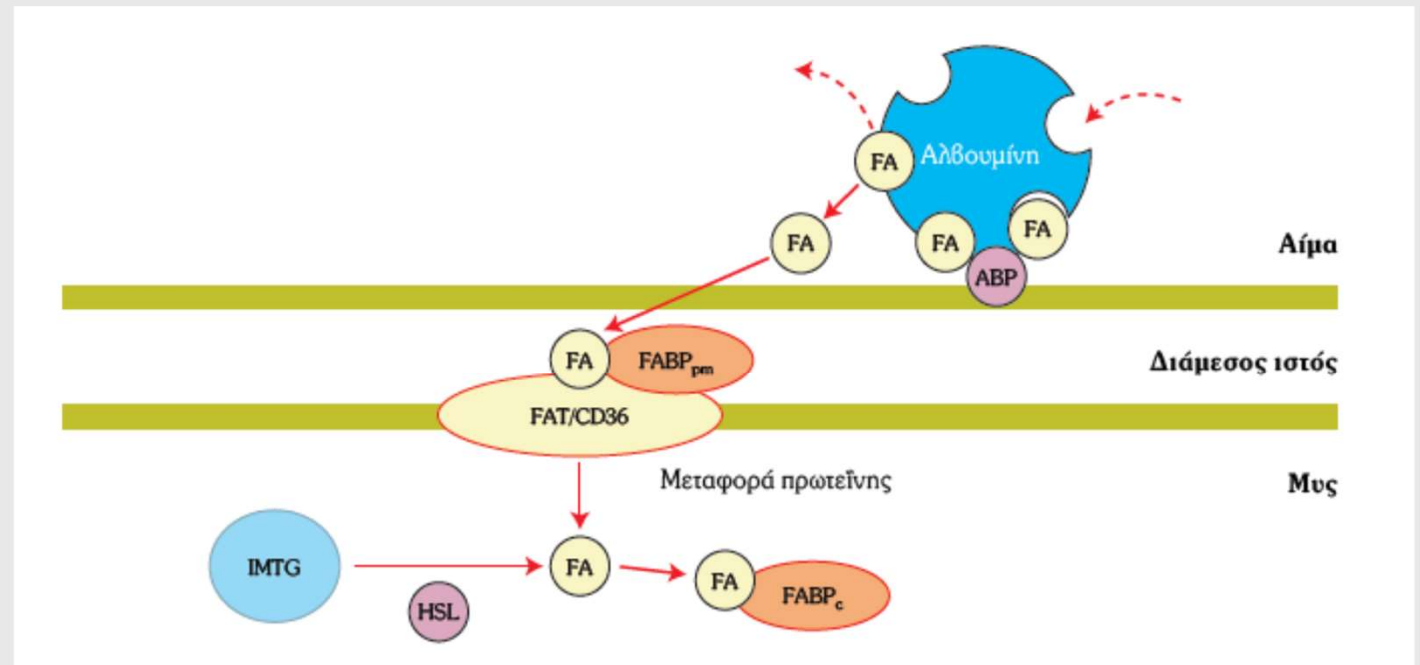
Οξείδωση Λίπους στον Αερόβιο Μεταβολισμό

- Το λίπος και οι υδατάνθρακες είναι τα κύρια θρεπτικά συστατικά που παρέχουν ενέργεια για τη μυϊκή σύσπαση
- Για να δημιουργηθούν οι ομάδες ακετυλίου δύο ανθράκων από το λίπος, πρέπει να πραγματοποιηθούν διάφορα μεταβολικά στάδια
- Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη διάσπαση της μορφής αποθήκευσης του λίπους, της τριακυλογλυκερόλης, στα συστατικά των λιπαρών οξέων και γλυκερόλης (Λιπόλυση)



Πρόσληψη λιπαρών οξέων από τους σκελετικούς μυς

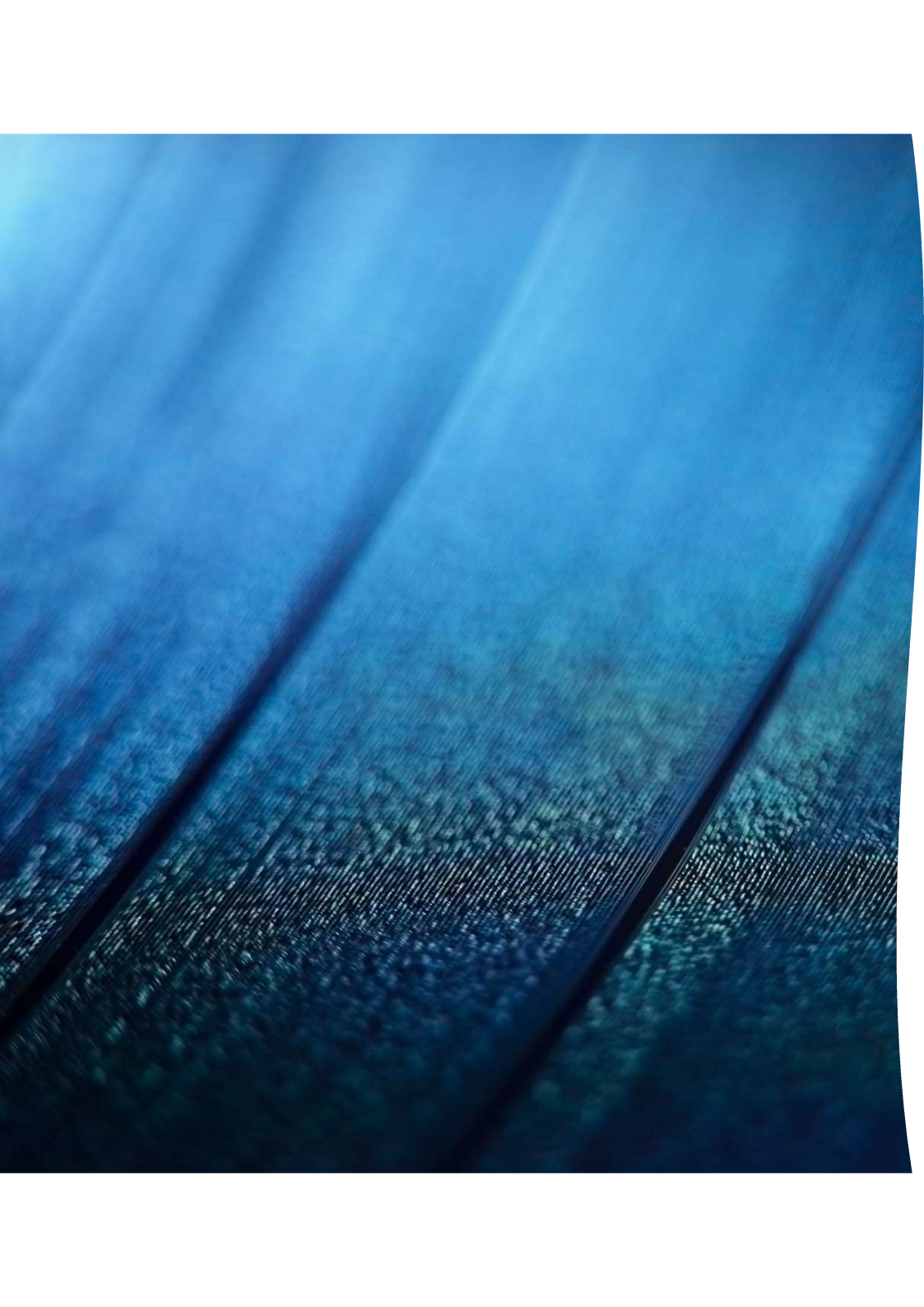
- ABP = πρωτεΐνη που δεσμεύει αλουμίνη
- FABP = πρωτεΐνη που δεσμεύει λιπαρά οξέα
- FAT = μεταφορέας λιπαρών οξέων
- IMTG = ενδομυϊκή τριακυλογλυκερόλη
- HSL = ορμονοευαίσθητη λιπάση



Οξείδωση Αμινοξέων στον Αερόβιο Μεταβολισμό

Ο πρωτεϊνικός καταβολισμός μπορεί να παρέχει έως και 20 διαφορετικά αμινοξέα, μερικά από τα οποία μπορεί τελικά να οξειδωθούν, αλλά αυτό συνήθως συνεισφέρει λιγότερο από το 5% της παροχής ενέργειας για τη σύσπαση των μυών κατά τη διάρκεια της φυσικής δραστηριότητας

Κατά τη διάρκεια νηστείας και όταν τα αποθέματα γλυκογόνου εξαντλούνται, ο καταβολισμός των πρωτεϊνών μπορεί να γίνει μια ολοένα και πιο σημαντική πηγή ενέργειας για τη μυϊκή δραστηριότητα



Γλυκογένεση

Διαδικασία μετατροπής της γλυκόζης σε γλυκογόνο

Το γλυκογόνο μπορεί να αποθηκευτεί στο ήπαρ και τους μυς σε περιορισμένη χωρητικότητα

Μυϊκό γλυκογόνο (~460-520 g) – χρησιμοποιείται μόνο από τους μυς για ενέργεια

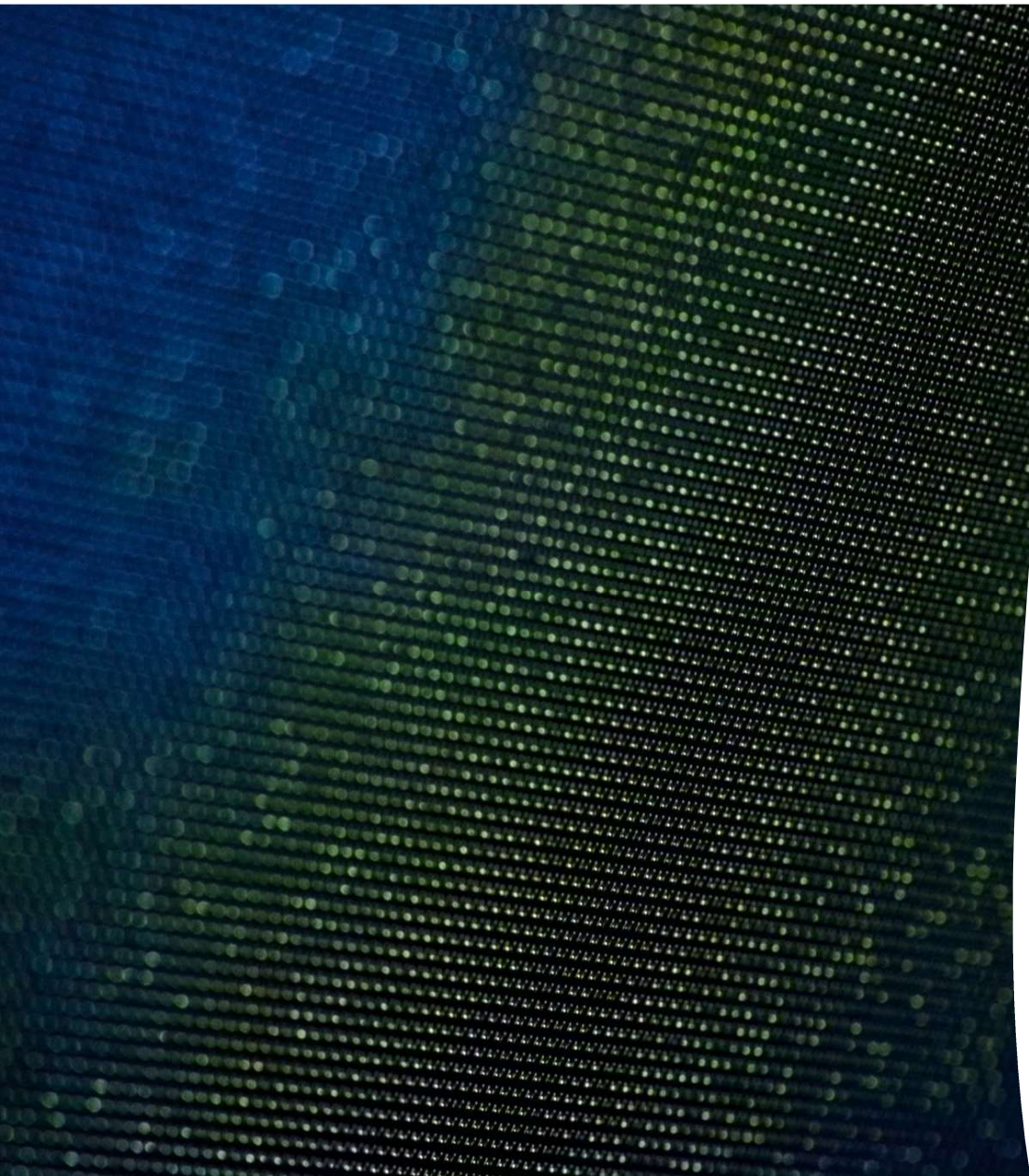
Ηπατικό γλυκογόνο (~80 g) – μπορεί να αφήσει το συκώτι ως γλυκόζη αίματος για να χρησιμοποιηθεί από τον εγκέφαλο και άλλους ιστούς

Λιπογένεση

Διαδικασία μετατροπής της περίσσειας γλυκόζης σε τριγλυκερίδια (λίπος)

Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν γεμίσουν τα αποθέματα γλυκογόνου και καταναλωθεί περίσσεια υδατανθράκων

Το λίπος μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορες θέσεις σε όλο το σώμα, συμπεριλαμβανομένου του υποδόριου λίπους, του σπλαχνικού λιπώδους ιστού και των μυών



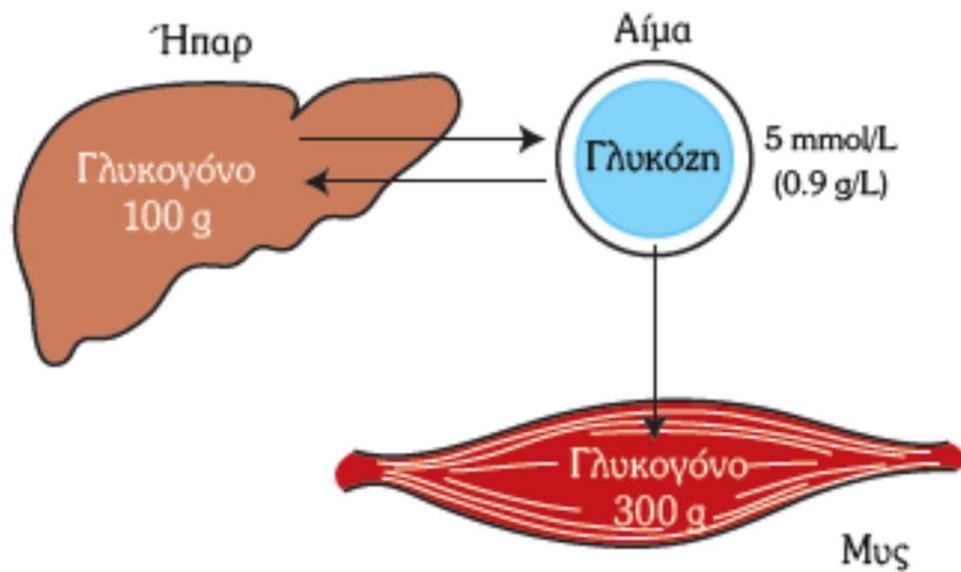
Διαχείριση αποθηκών ενεργειακών υποστρωμάτων καυσίμων με άσκηση και δίαιτα

Μια προσαρμογή που συμβαίνει με την προπόνηση άσκησης, ιδιαίτερα την προπόνηση άσκησης αντοχής, είναι μια βελτιωμένη ικανότητα αποθήκευσης γλυκογόνου

Για να επωφεληθούν πλήρως από αυτή την προσαρμογή, οι αθλητές πρέπει να καταναλώνουν επαρκείς υδατάνθρακες

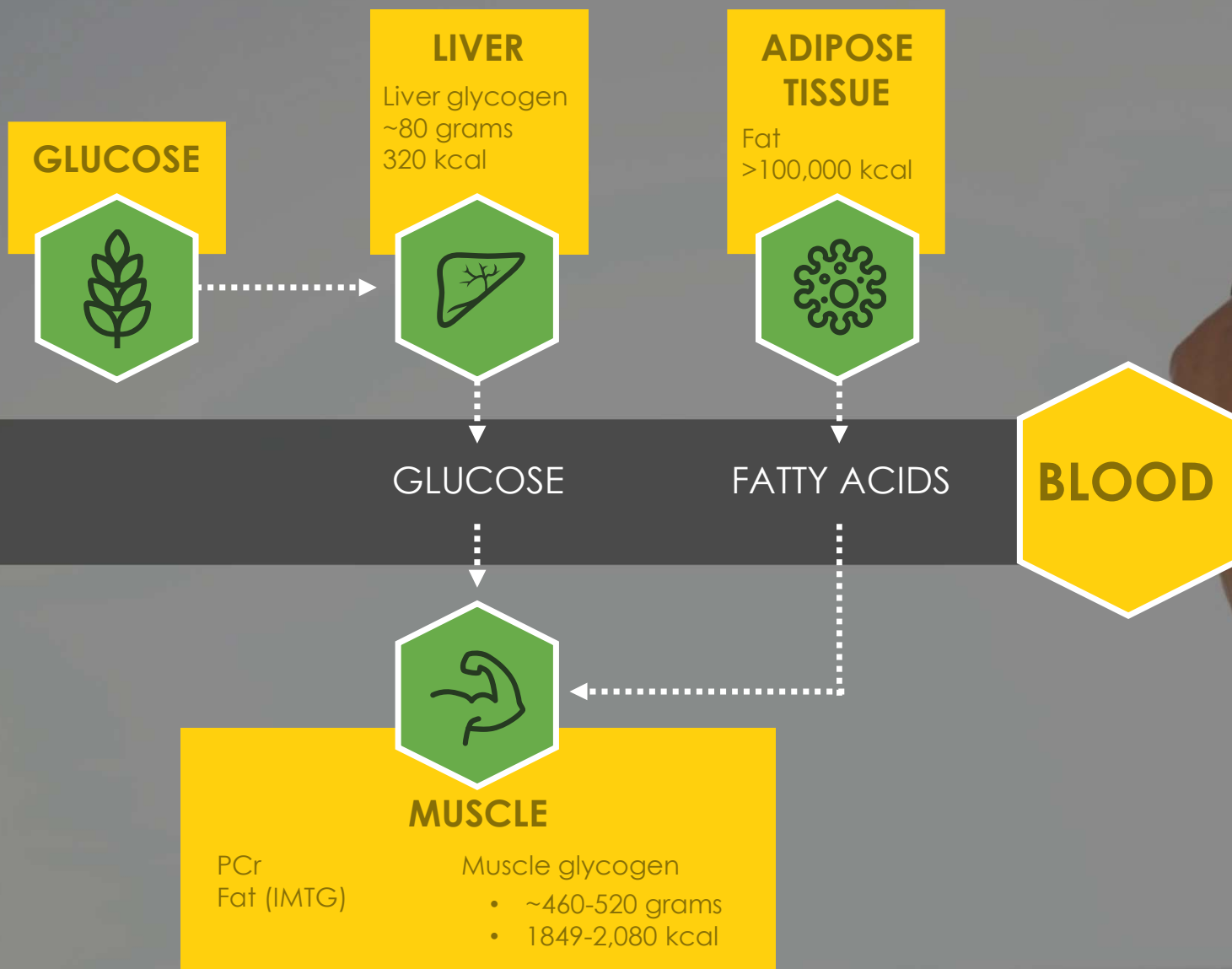
Αποθήκες λίπους

- Το λίπος μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορες θέσεις σε όλο το σώμα, συμπεριλαμβανομένου του υποδόριου λίπους, του σπλαχνικού λιπώδους ιστού και των μυών
- Τα ενδομυϊκά τριγλυκερίδια (IMTG) είναι μια πηγή καυσίμου για τους μύες για την παραγωγή ATP, κυρίως κατά τη διάρκεια της άσκησης αντοχής
- ~200 g (1800 kcal) αποθηκεύονται στους μύς
- Η διάσπαση του IMTG παρέχει ελεύθερα λιπαρά οξέα για οξείδωση κατά τη διάρκεια άσκησης χαμηλής και μέτριας έντασης, σπριντ και ασκήσεων αντίστασης



Αποθήκες Καυσίμων στον Σκελετικό Μυ

Διαθεσιμότητα
υδατανθράκων στο
ήπαρ, το αίμα και
τους μυς για άσκηση



Αποθήκες ενέργειας στον μέσο άνθρωπο

Τύπος καυσίμου	Μάζα	Διαθέσιμη ενέργεια	Χρόνος άσκησης (λεπτά)
Ηπατικό γλυκογόνο	0.10 kg	1,600 kJ (382 kcal)	20
Μυϊκό γλυκογόνο	0.40 kg	6,400 kJ (1,530 kcal)	80
Γλυκόζη αίματος	0.01 kg	160 kJ (38 kcal)	2
Λίπη	10.5 kg	390,000 kJ (93,212 kcal)	4,900
Πρωτεΐνη	8.5 kg	142,000 kJ (33,939 kcal)	1,800

- Ο πίνακας υποθέτει μάζα σώματος 70 kg, περιεκτικότητα σε λίπος 15% της μάζας σώματος και περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη περίπου 12% της μάζας σώματος
- Η τιμή για τη γλυκόζη του αίματος περιλαμβάνει την περιεκτικότητα σε γλυκόζη του εξωκυττάριου υγρού
- Οι χρόνοι άσκησης είναι οι κατά προσέγγιση χρόνοι που θα διαρκούσαν αυτές οι αποθήκες, εάν ήταν η μόνη διαθέσιμη πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της άσκησης με ρυθμό μαραθωνίου τρεξίματος (που ισοδυναμεί με ενεργειακή δαπάνη περίπου 80 kJ [19 kcal]/min)



Γαλακτικό οξύ

- Ιστορικά, το γαλακτικό θεωρούνταν απλώς ένα παραπροϊόν του αερόβιου μεταβολισμού και οδηγούσε σε κόπωση και μυϊκό πόνο
 - Είναι πλέον κατανοητό ότι το γαλακτικό που παράγεται από τον αερόβιο μεταβολισμό γίνεται το ίδιο πηγή ενέργειας για την καρδιά, τον εγκέφαλο, τα νεφρά και το ήπαρ και μπορεί να μετατραπεί σε γλυκόζη
-

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΡΥΘΜΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΝΤΑΣ ΤΙΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΝΖΥΜΩΝ

Ενδοκυτταρικοί Παράγοντες

Λόγος ATP/ADP

Pi

AMP

Ιόντα ασβεστίου (Ca^{2+})

Συμπαθητικό νευρικό σύστημα

Νορεπινεφρίνη (νοραδρεναλίνη)

Ορμόνες

Επινεφρίνη (αδρεναλίνη)

Ινσουλίνη

Γλυκαγόνη

Κορτιζόλη

Αυξητική ορμόνη

Κυτοκίνες

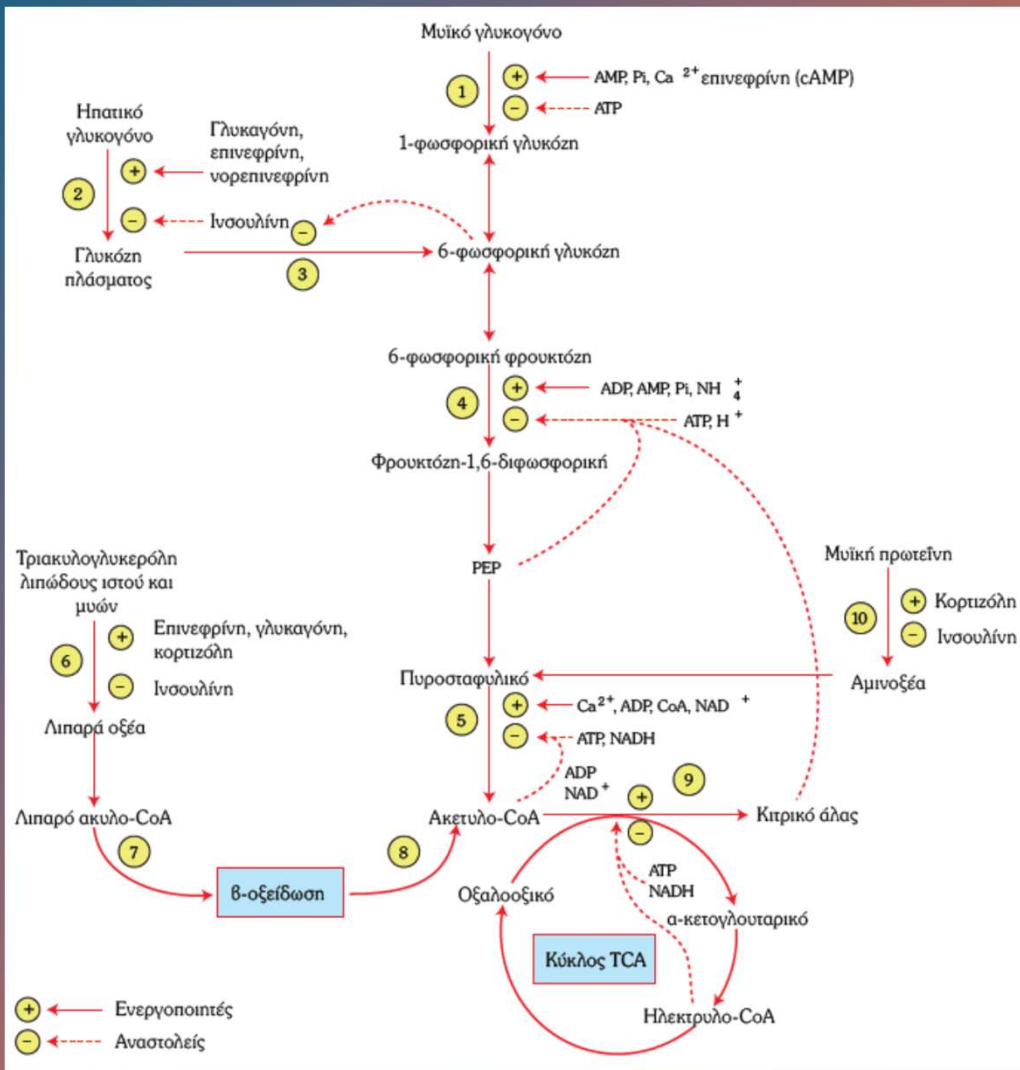
Ιντερλευκίνη-6

Ρύθμιση του Ενεργειακού Μεταβολισμού

Οι μεταβολικές οδοί είναι σημαντικές για την παροχή ενέργειας κατά τη διάρκεια της άσκησης

Κύριες θέσεις ρύθμισης και οι κύριοι ορμονικοί και αλλοστερικοί ενεργοποιητές και αναστολείς

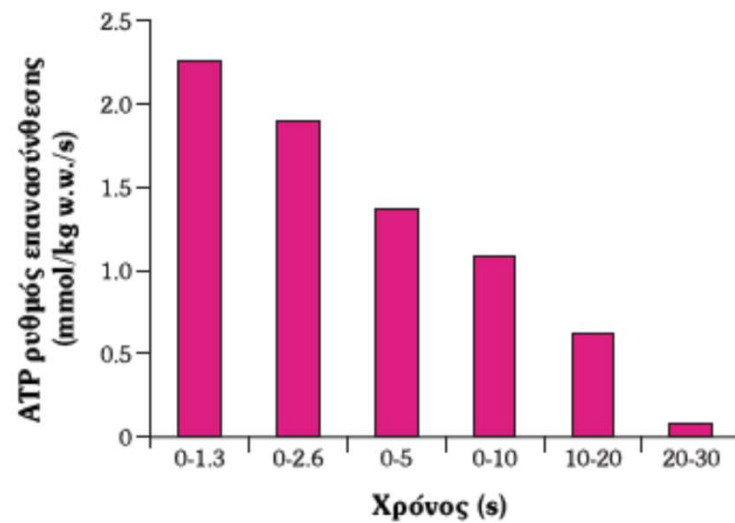
- 1 και 2 = φωσφορύλαση
- 3 = εξοκινάση
- 4 = φωσφοφρουκτοκινάση
- 5 = πυροσταφυλική αφυδρογονάση
- 6 = ορμονοευαίσθητη λιπάση
- 7 = ακυλοτρανσφεράση της καρνιτίνης
- 8 = λιπαρή ακυλο-CoA αφυδρογονάση
- 9 = κιτρική συνθάση
- 10 = πρωτεάσες



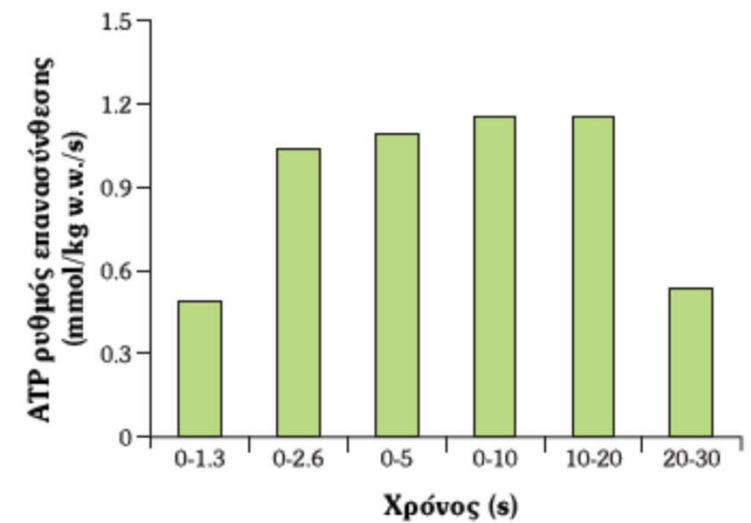
Ρόλος των
Κύριων
Ορμονών στη
Ρύθμιση του
Ενεργειακού
Μεταβολισμού

Ορμόνη	Πηγή	Ερέθισμα που προκαλεί την έκκριση	Δράσεις
Ινσουλίνη	β-κύτταρα των παγκρεατικών νησίδων	Αύξηση της γλυκόζης στο αίμα και των αμινοξέων	Διεγείρει την πρόσληψη γλυκόζης από το ήπαρ, τους μυς και τον λιπώδη ιστό Αναστέλλει τη λιπόλυση Διεγείρει την πρόσληψη αμινοξέων από τους μυς. Αναστέλλει τη διάσπαση των πρωτεϊνών
Γλυκαγόνη	α-κύτταρα των παγκρεατικών νησίδων	Πτώση της γλυκόζης στο αίμα	Διεγείρει τη διάσπαση του ηπατικού γλυκογόνου και τη γλυκονεογένεση
Επινεφρίνη	Μυελός επινεφριδίων	Στρες και πτώση της γλυκόζης στο αίμα	Διεγείρει τη διάσπαση του γλυκογόνου και τη λιπόλυση στον λιπώδη ιστό
Νορεπινεφρίνη	Συμπαθητικές νευρικές απολήξεις	Στρες και πτώση της γλυκόζης του αίματος ή της αρτηριακής πίεσης	Διεγείρει τη διάσπαση του γλυκογόνου και τη λιπόλυση στον λιπώδη ιστό
Κορτιζόλη	Επινεφριδιακός φλοιός	Στρες, αδρενοκορτικοτροφική ορμόνη, Ιντερλευκίνη 6	Διεγείρει τη διάσπαση των πρωτεϊνών και τη γλυκονεογένεση Διεγείρει τη λιπόλυση στον λιπώδη ιστό
Αυξητική ορμόνη	Πρόσθια υπόφυση	Στρες	Διεγείρει τη λιπόλυση στον λιπώδη ιστό
Ιντερλευκίνη 6	Συστολή των σκελετικών μυϊκών ινών	Αυξημένη ενδοκυτταρική συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου και μειωμένη διαθεσιμότητα γλυκογόνου	Διεγείρει τη διάσπαση του γλυκογόνου του ήπατος Διεγείρει τη λιπόλυση στον λιπώδη ιστό Διεγείρει την έκκριση κορτιζόλης

Μεταβολικές Αποκρίσεις στην Άσκηση



Ρυθμοί αναερόβιας επανασύνθεσης ATP από υδρόλυση της φωσφοκρεατίνης κατά τη διάρκεια της μέγιστης ισομετρικής συστολής σε ανθρώπινο σκελετικό μυ.



Ρυθμοί αναερόβιας επανασύνθεσης ATP από γλυκόλυση κατά τη διάρκεια της μέγιστης ισομετρικής συστολής στον ανθρώπινο σκελετικό μυ.

Διαφορές φύλλου στον ενεργειακό μεταβολισμό

Με την ίδια σχετική ένταση, τα θηλυκά χρησιμοποιούν μεγαλύτερο ποσοστό καυσίμου από λίπος

Τα θηλυκά έχουν χαμηλότερη μέγιστη χωρητικότητα γλυκολυτικών ενζύμων και μεγαλύτερη εξάρτηση από το IMTG κατά τη διάρκεια της άσκησης

Πιθανώς σχετίζεται με τα επίπεδα οιστρογόνων

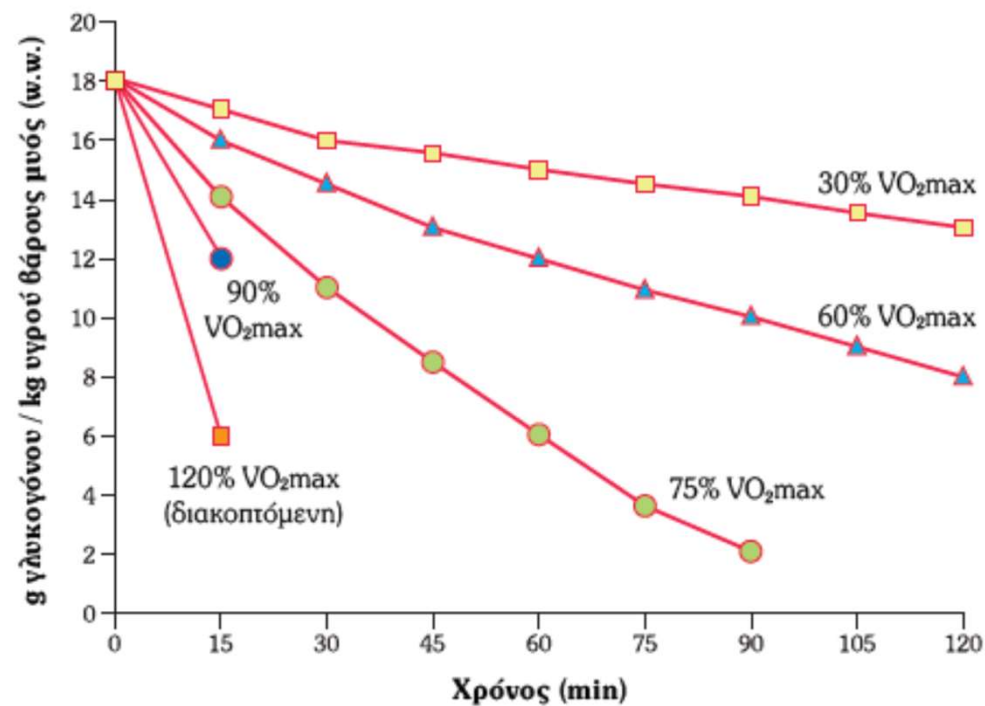
Περιορισμοί στην αναερόβια παραγωγή ενέργειας

- Η παραγωγή H^+ μειώνει το pH των μυών
- Η βελτίωση της ρυθμιστικής ικανότητας του μυός για τον καλύτερο χειρισμό των αλλαγών στο pH συμβάλλει στην προώθηση της αναερόβιας παραγωγής ενέργειας
- Προπόνηση: η διαλειμματική προπόνηση υψηλής έντασης αυξάνει την ικανότητα ρυθμίσεως των μυών και την απόδοση άσκησης υψηλής έντασης

Θρέψη:

- Η φόρτωση διττανθρακικών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση κατά τη διάρκεια εξαντλητικής άσκησης που διαρκεί από 1 έως 7 λεπτά. Η γαστρεντερική δυσφορία έχει περιορίσει τη χρήση διττανθρακικών, αλλά οι επαναλαμβανόμενες δόσεις για αρκετές ημέρες πριν από τον αγώνα μπορεί να μειώσουν τα προβλήματα.
- Η βήτα-αλανίνη μπορεί να βελτιώσει τη μυϊκή ρυθμιστική ικανότητα και την απόδοση άσκησης υψηλής έντασης
- Η κρεατίνη όχι μόνο παρέχει υπόστρωμα στο σύστημα ATP-PCr αλλά βελτιώνει την ικανότητα αποθήκευσης
- Η βελτιωμένη απόδοση μετά από παρεμβάσεις που αυξάνουν τη ρυθμιστική ικανότητα καταδεικνύει ότι η οξέωση που σχετίζεται με υψηλούς γλυκολυτικούς ρυθμούς είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην κόπωση

Επίδραση της
έντασης της
άσκησης στον
ρυθμό χρήσης του
μυϊκού γλυκογόνου



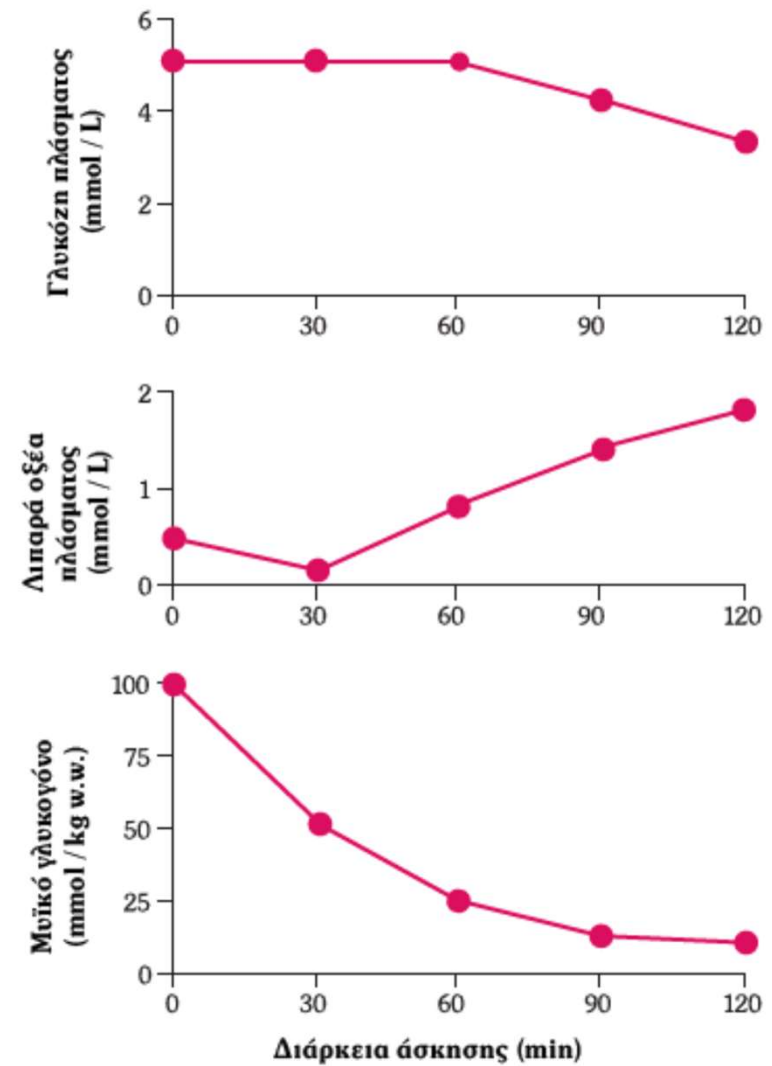
Μεταβολές στις συγκεντρώσεις

(α) γλυκόζης πλάσματος

(β) λιπαρών οξέων πλάσματος

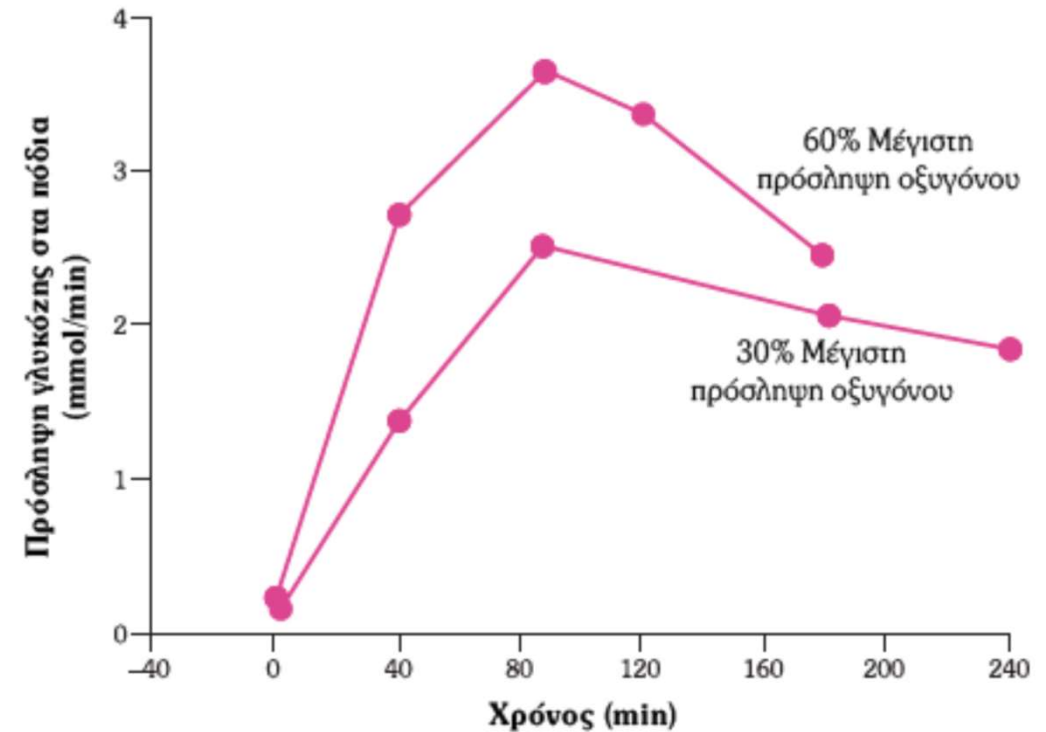
(γ) μυϊκού γλυκογόνου

κατά τη διάρκεια συνεχούς άσκησης σε
ένταση ισοδύναμη με 70% O_2max



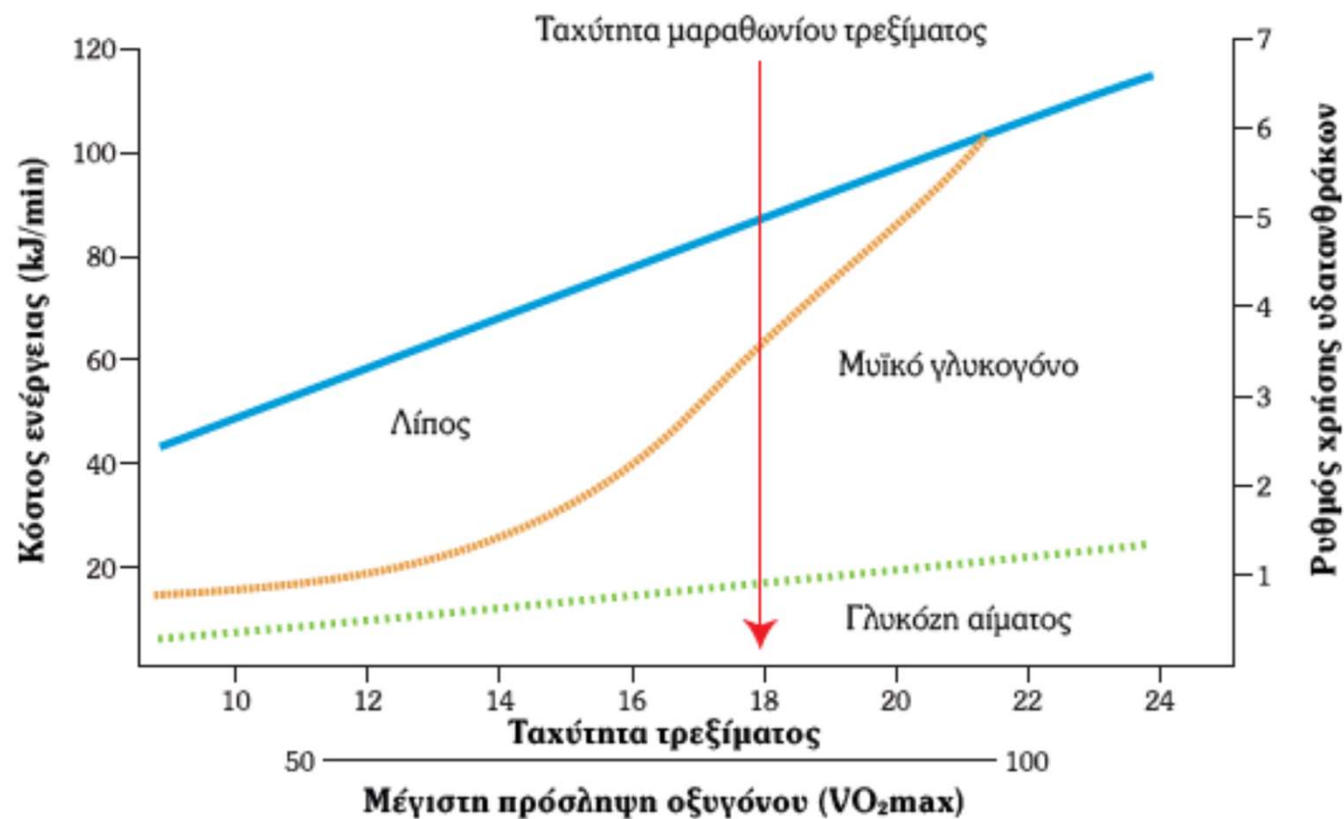
Ρυθμός πρόσληψης γλυκόζης από το αίμα από τους μυς κατά τη διάρκεια της άσκησης στο 30% της $\text{VO}_{2\text{max}}$ και στο 60% της $\text{VO}_{2\text{max}}$

Η μέγιστη πρόσληψη εμφανίζεται μετά από περίπου 90 λεπτά άσκησης

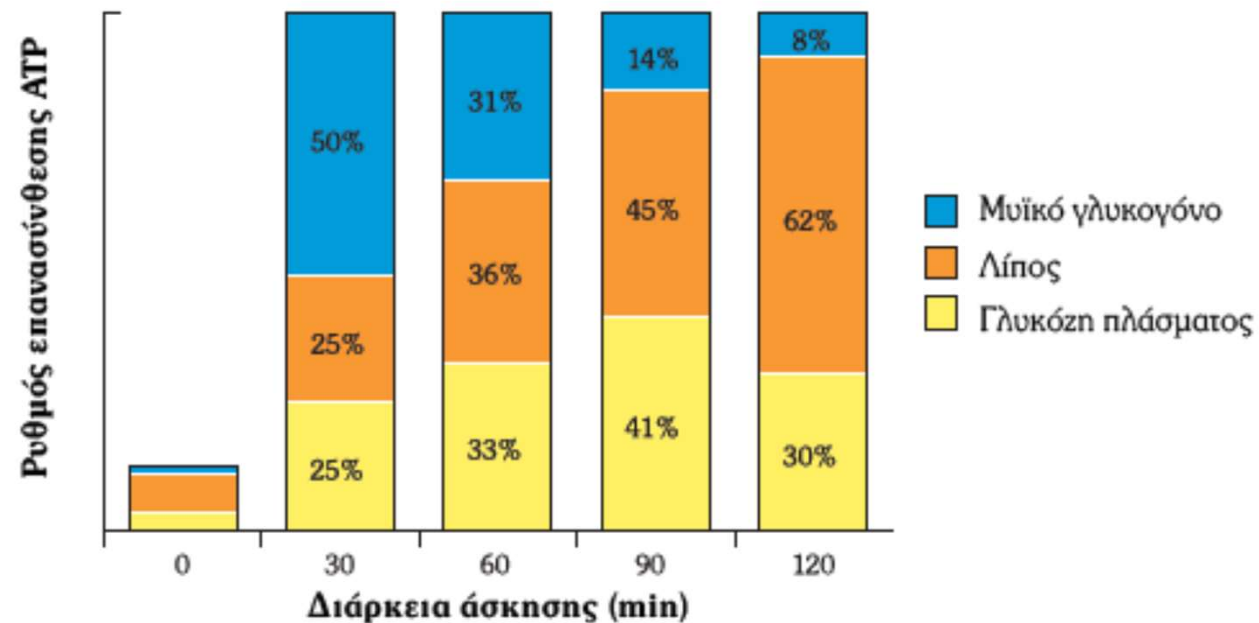


Αλλαγές στη σχετική
συνεισφορά των κύριων πηγών
καυσίμου στην επανασύνθεση
ΑΤΡ κατά τη διάρκεια
λειτουργίας σε διάφορες
ταχύτητες

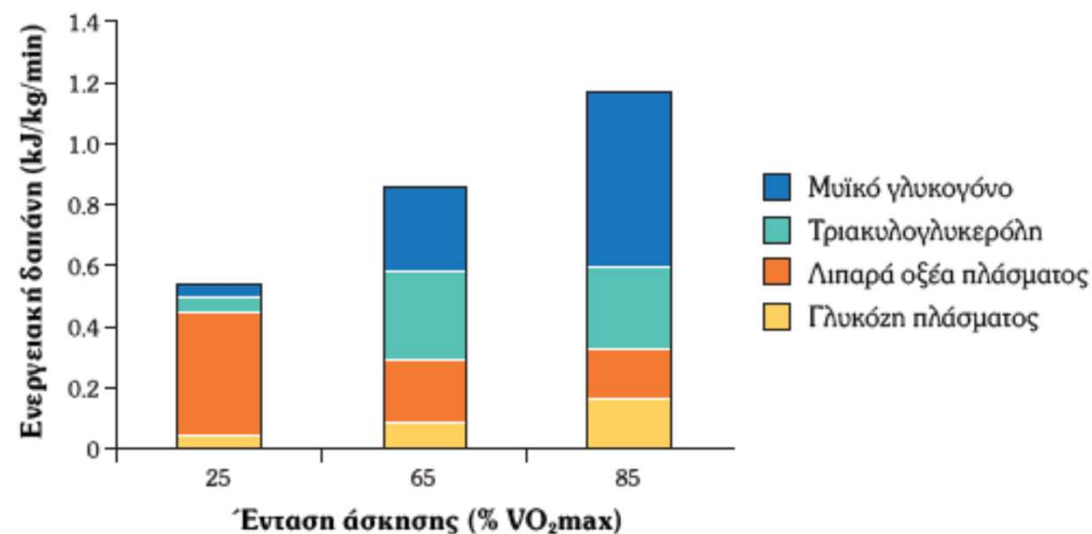
Στην ταχύτητα του μαραθωνίου
τρεξίματος ενός επίλεκτου
αθλητή αντοχής, ο ρυθμός
οξειδωσης των υδατανθράκων
είναι περίπου 3,5 g/min

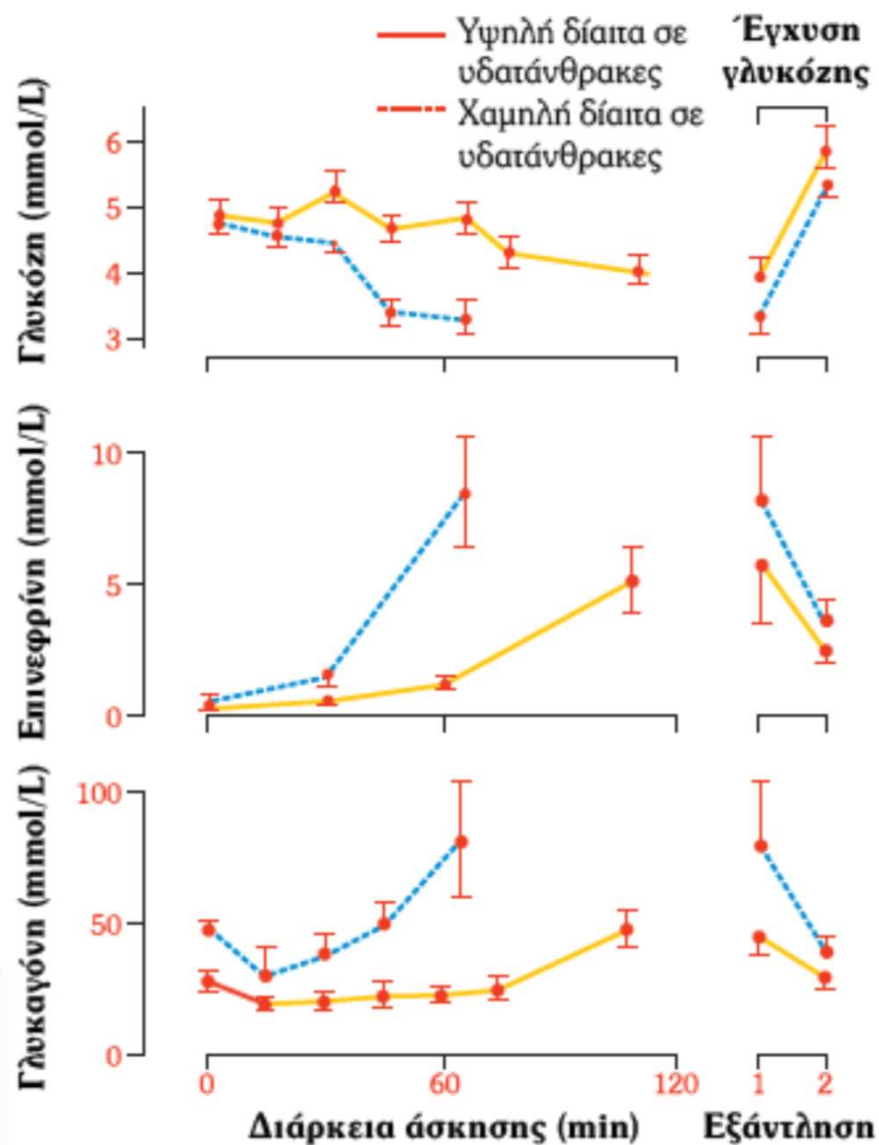


Αλλαγές στη σχετική συνεισφορά των κύριων πηγών καυσίμου στην επανασύνθεση ATP κατά τη διάρκεια παρατεταμένης υπομέγιστης άσκησης σε ένταση που ισοδυναμεί με περίπου 60% της VO_{2max} (περίπου 10 φορές τον μεταβολικό ρυθμό ηρεμίας)



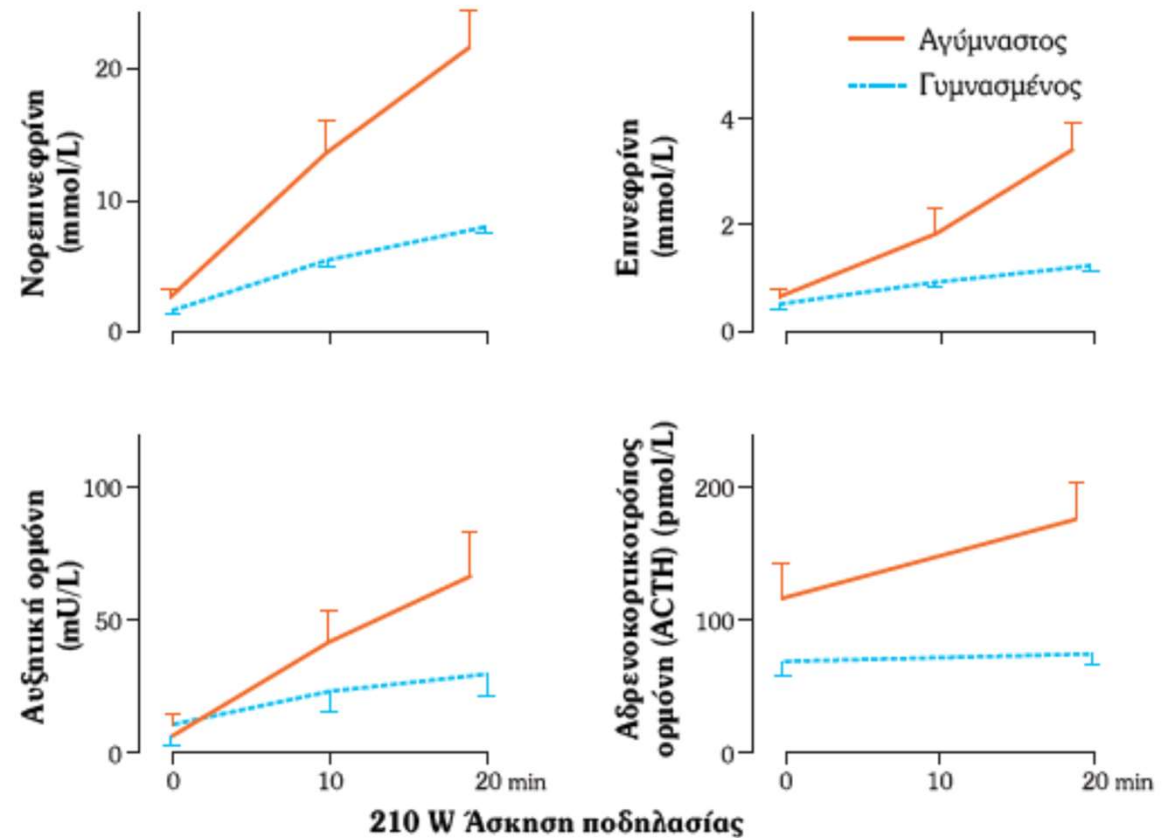
Οι συνεισφορές
διαφορετικών πηγών
καυσίμων στην ενεργειακή
δαπάνη σε τρεις διαφορετικές
εντάσεις άσκησης

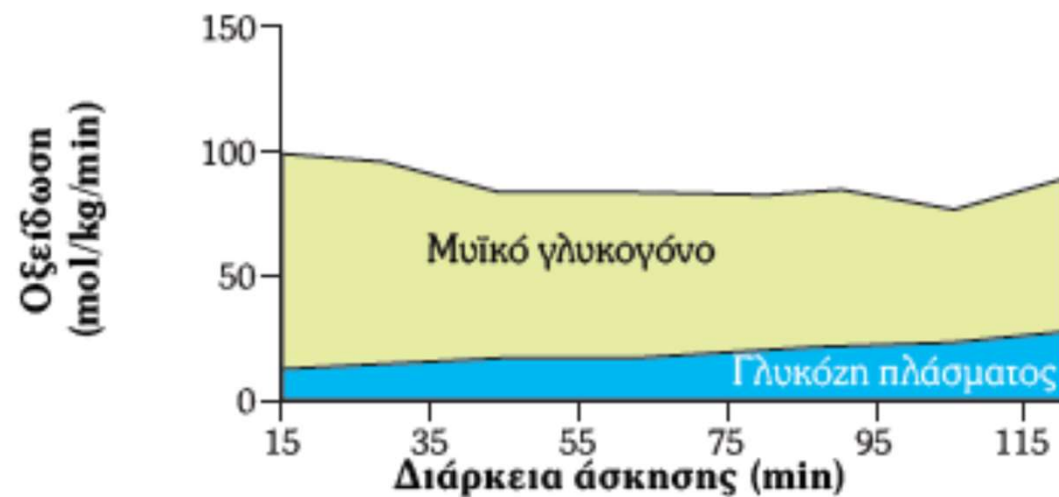
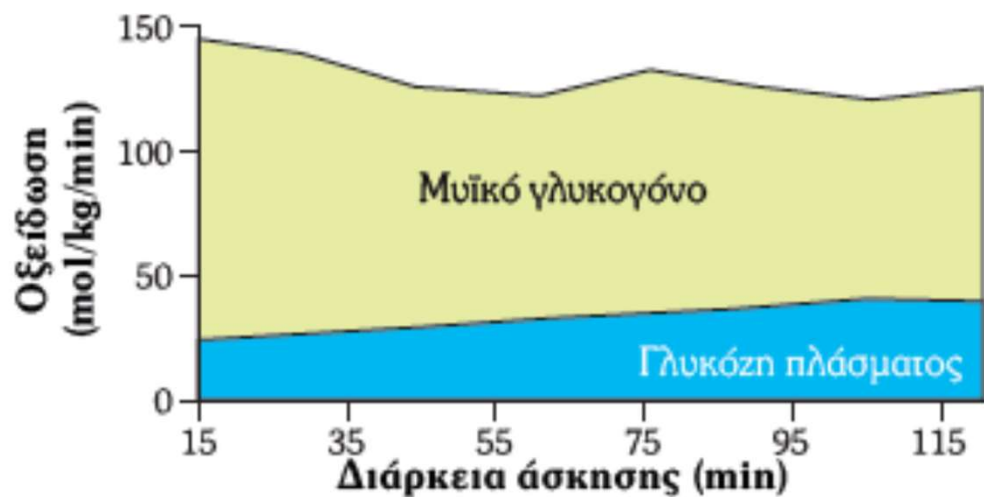




- Επίδραση μιας δίαιτας υψηλής ή χαμηλής περιεκτικότητας σε υδατάνθρακες (για τις προηγούμενες 3 ημέρες) στην ορμονική απόκριση στην παρατεταμένη άσκηση
- Οι μέσες συγκεντρώσεις ορμονών στο πλάσμα φαίνονται για μια ομάδα επτά ατόμων που τρέχουν στο 70% της O_2max μετά από 4 ημέρες σε δίαιτα χαμηλών υδατανθράκων ή υψηλής περιεκτικότητας σε υδατάνθρακες
- Κατά την εξάντληση (1), τα άτομα ενθαρρύνθηκαν να τρέξουν για 10 ακόμη λεπτά (2) με έγχυση γλυκόζης

Επίδραση της προπόνησης αντοχής στην ορμονική απόκριση σε παρατεταμένη άσκηση





Ρυθμοί οξείδωσης του μυϊκού γλυκογόνου και της γλυκόζης του πλάσματος κατά τη διάρκεια 2 ωρών ποδηλασίας στο 60% της O_{2max} πριν από την προπόνηση σε

- (α) μη προπονημένους άνδρες
- (β) στους ίδιους άνδρες

μετά από 12 εβδομάδες προπόνησης άσκησης αντοχής. Σημειώστε τους μειωμένους ρυθμούς χρήσης γλυκογόνου και γλυκόζης μετά την προπόνηση ($P < 0.05$ γυμνασμένοι έναντι αγύμναστων)



ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΠΟΝΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ

Υψηλότερη σχετική συμβολή της οξείδωσης του λίπους (χαμηλότερος **ρυθμός ανταλλαγής αερίων [RER]** και **αναπνευστικό πηλίκο [RQ]**)
Χαμηλότερος ρυθμός χρήσης μυϊκού γλυκογόνου
Μειωμένη χρήση γλυκόζης αίματος από τους μυς
Μικρότερες αυξήσεις στις ορμόνες που κυκλοφορούν (π.χ. επινεφρίνη, κορτιζόλη, αυξητική ορμόνη)
Μικρότερη αύξηση της συγκέντρωσης των ελεύθερων λιπαρών οξέων στο πλάσμα
Αυξημένοι μεταφορείς των ελεύθερων λιπαρών οξέων στη μυϊκή μεμβράνη
Αυξημένη οξείδωση του λίπους σε σχέση με τους υδατάνθρακες
Αυξημένη χρήση των μυϊκών τριγλυκεριδίων
Μειωμένη συσσώρευση του μυϊκού (και αίματος) γαλακτικού οξέος

Food	Complete oxidation ¹ (kcal/gram)	Physiological value ² (kcal/gram)	O ₂ (kcal/liter)	CO ₂ (kcal/liter)	RQ* (V _{CO2} /V _{O2})
Carbohydrate	4.1	4	5.05	5.05	1.00
Protein	5.4	4	4.46	5.57	0.80
Fat	9.3	9	4.74	6.67	0.71
Alcohol	7.1	7	4.86	7.25	0.67
Average			4.83	5.89	0.82

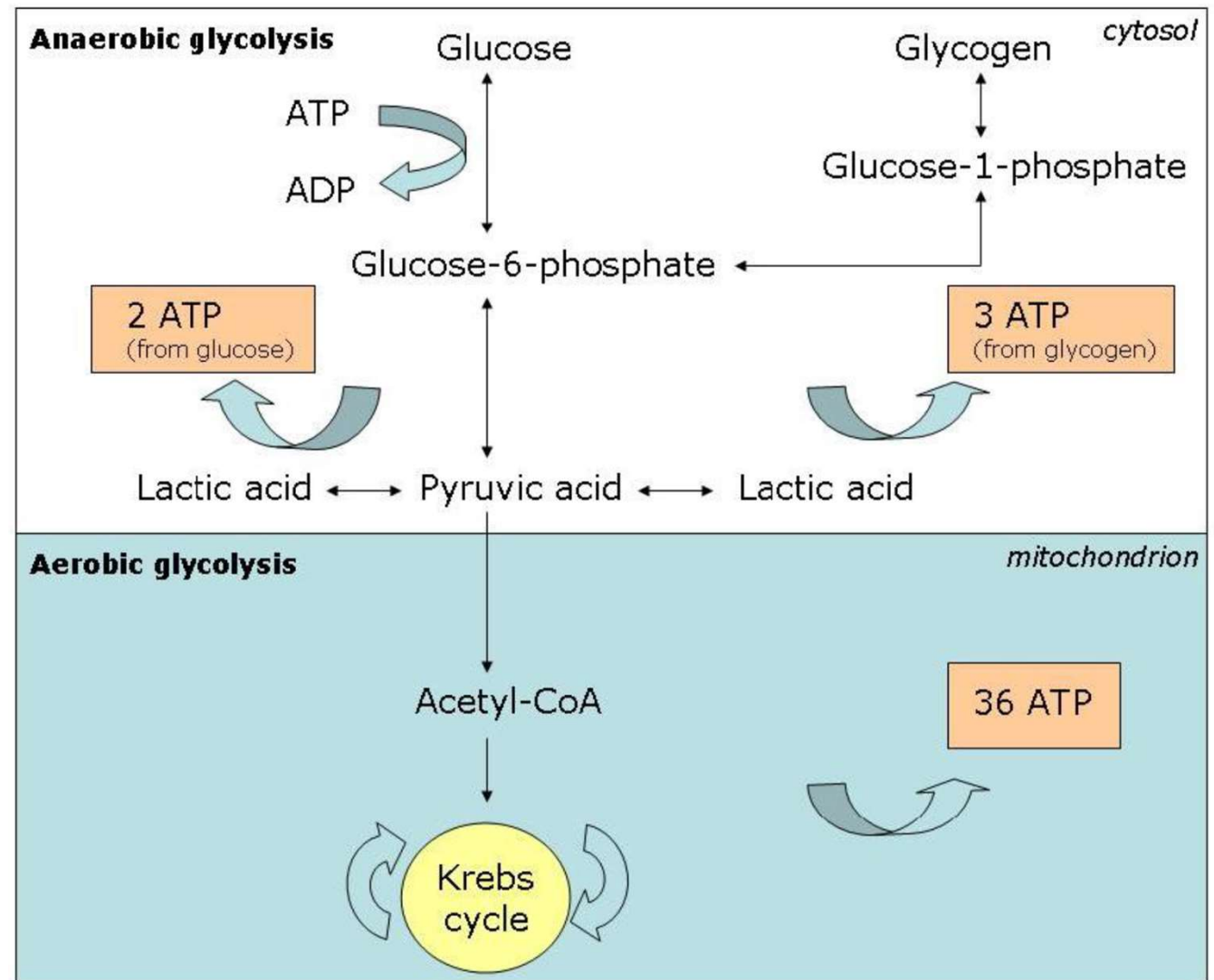
Καύση ενεργειακού υποστρώματος στην ηρεμία

- RQ= Αναπνευστικό πηλίκο = όγκος παραγόμενου CO₂/όγκος O₂ που καταναλώθηκε.
- 1 Πλήρης οξείδωση συστατικού τροφίμου σε θερμιδόμετρο
- 2 Φυσιολογική τιμή καυσίμου της καταναλωμένης τροφής προσαρμοσμένη για την πεπτικότητα (ατελή απορρόφηση)

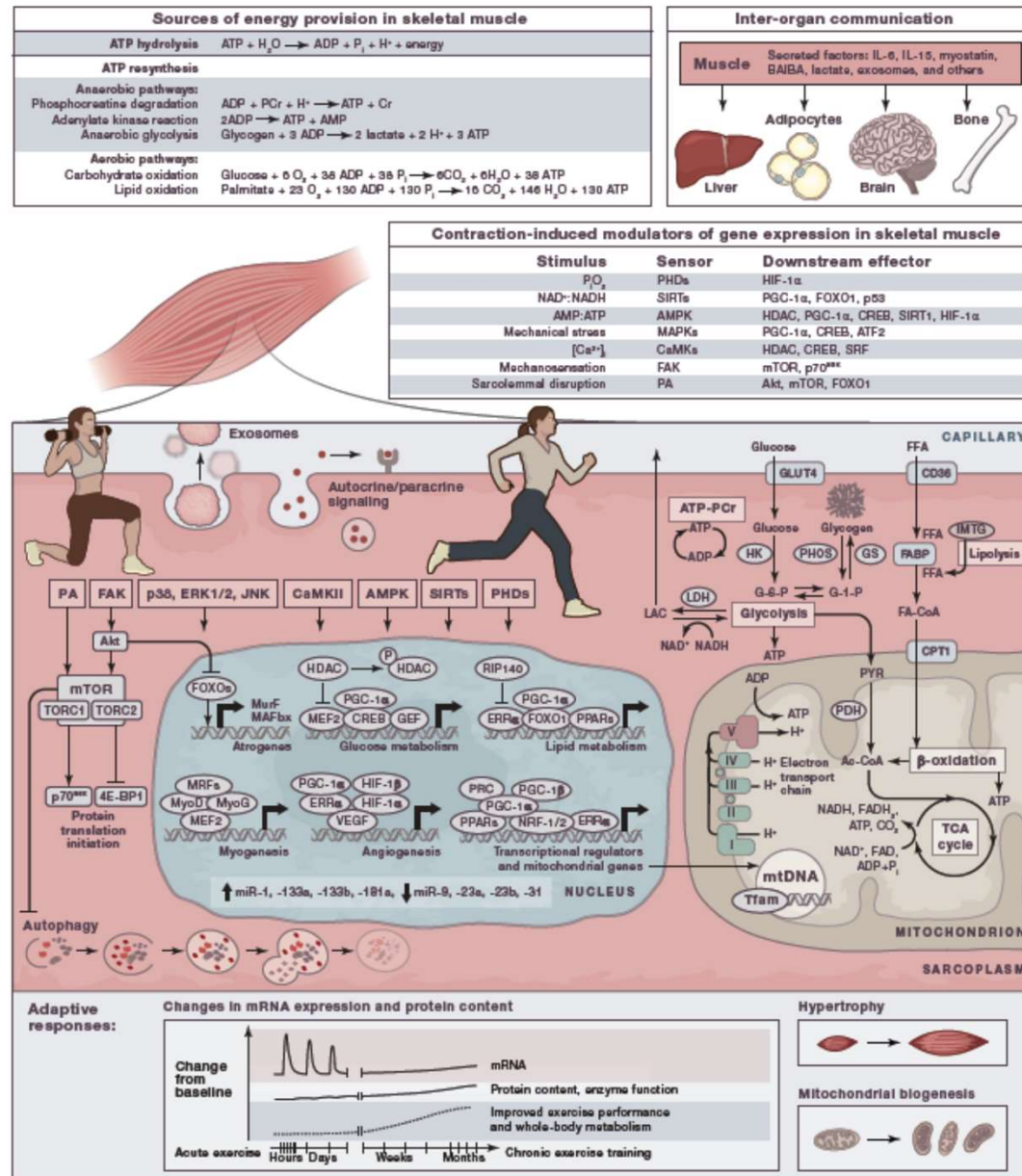
Συμμετοχή οργάνων στην συνολική ενεργειακή δαπάνη ηρεμίας

Organ	Metabolic rate (kcal/kg/day)	Weight (kg)	Organ metabolic rate (kcal/day)	% BMR
1) Brain	240	1.4	336	20
2) Liver	200	1.8	360	21
3) Heart	440	0.3	132	8
4) Kidney	440	0.3	132	8
Total (1-4)	1330	3.8	960	57
5) Muscle	13	28	500	21
Total (1-5)		32	1460	78
70 kg man			1680	100.0

Αναερόβια – Αερόβια Γλυκόλυση (Σύνοψη)



Φυσιολογία της άσκησης (Σύνοψη)



Βιβλιογραφία

- ΑΘΛΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ, Asker Jeukendrup, Michael Gleeson. (66-109)
- Hargreaves, M & Spriet, L. *Nat Metab.* 2020; <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>
- van Loon LJ. *Appl Physiol.* 2004;97(4):1170-1187 <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00368.2004>
- Gatorade Institute of Sport. SPORTS NUTRITION TOOLKIT (2022)
- Sex Differences in Substrate Metabolism and Energy Homeostasis. Ronald N. Cortright and Timothy R. Koves. *Canadian Journal of Applied Physiology*, August 2000. <https://doi.org/10.1139/h00-023>
- The Molecular Mechanisms of Fuel Utilization during Exercise Anna Pi, Sneha Damal Villivalam and Sona Kang . *Biology* 2023, 12, 1450. <https://doi.org/10.3390/biology12111450>