

# ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

ΦΑΤΟΥΡΟΣ Γ. ΙΩΑΝΝΗΣ, Ph.D.  
Τ.Ε.Φ.Α.Α., Δ.Π.Θ.

ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ  
ΤΟΥ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΥ  
ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ

# TAINIA 1

# Υδατάνθρακες

- Βιολογικές ενώσεις με κοινό χαρακτηριστικό την παρουσία C,H,O. Ο γενικός τύπος είναι:  $(CH_2O)$

# Ρόλος των υδατανθράκων

- Άμεση πηγή (γλυκόζη) και αποθήκευση ενέργειας (άμυλο και γλυκογόνο).
- Απόδοση ενέργειας = 4 θερμίδες ανά γραμμάριο
- Εξωτερική προστασία στα κύτταρα (κυτταρίνη)
- Αναγνώριση μορίων ή κυττάρων
- Παρουσία στα νουκλεϊκά οξέα (ριβόζη και δεοξυριβόζη)

- Μονοσακχαρίτες (τριόζες, πεντόζες, εξόζες)
- Δισακχαρίτες (Σακχαρόζη = γλυκόζη + φρουκτόζη) - Γλυκοσιδική ένωση ( $H + OH = H_2O$ )
- Ολιγοσακχαρίτες (3-10 μονοσακχαρίτες)
- πολυσακχαρίτες (>10 μονοσακχαρίτες)

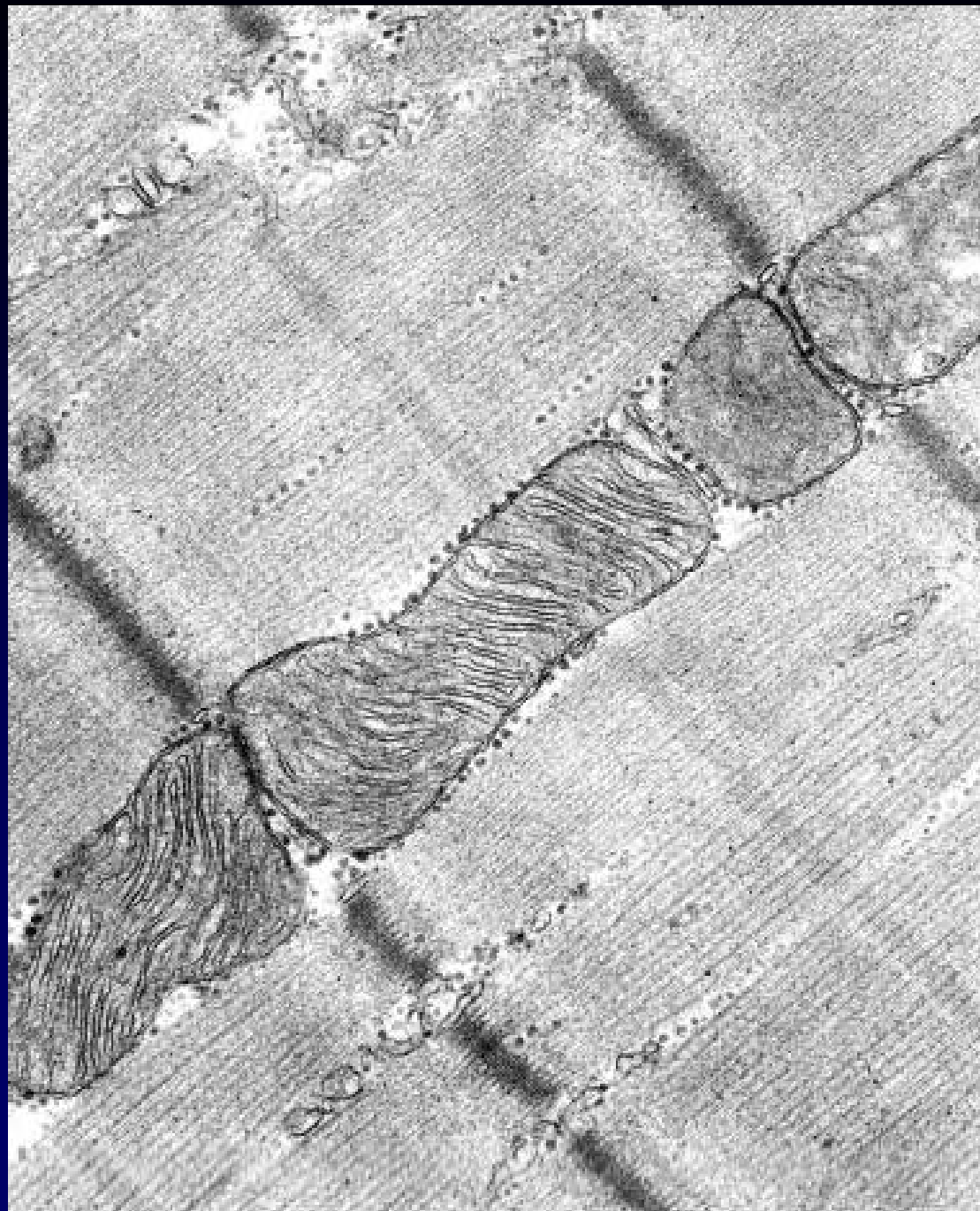
# Μεταβολισμός του γλυκογόνου

Το γλυκογόνο αποθηκεύεται κυρίως στο ήπαρ (3-7% κατά βάρος) και στους μύες (1-1,5% κατά βάρος).

Σε έναν άνδρα 70 kg το ήπαρ του ζυγίζει περίπου 1,8 kg και οι μύες του 28 kg (40% του σωματικού βάρους). Συνεπώς, η μέση ποσότητα σε γλυκογόνο στο ήπαρ θα είναι 90 g και στους μύες 350 g.

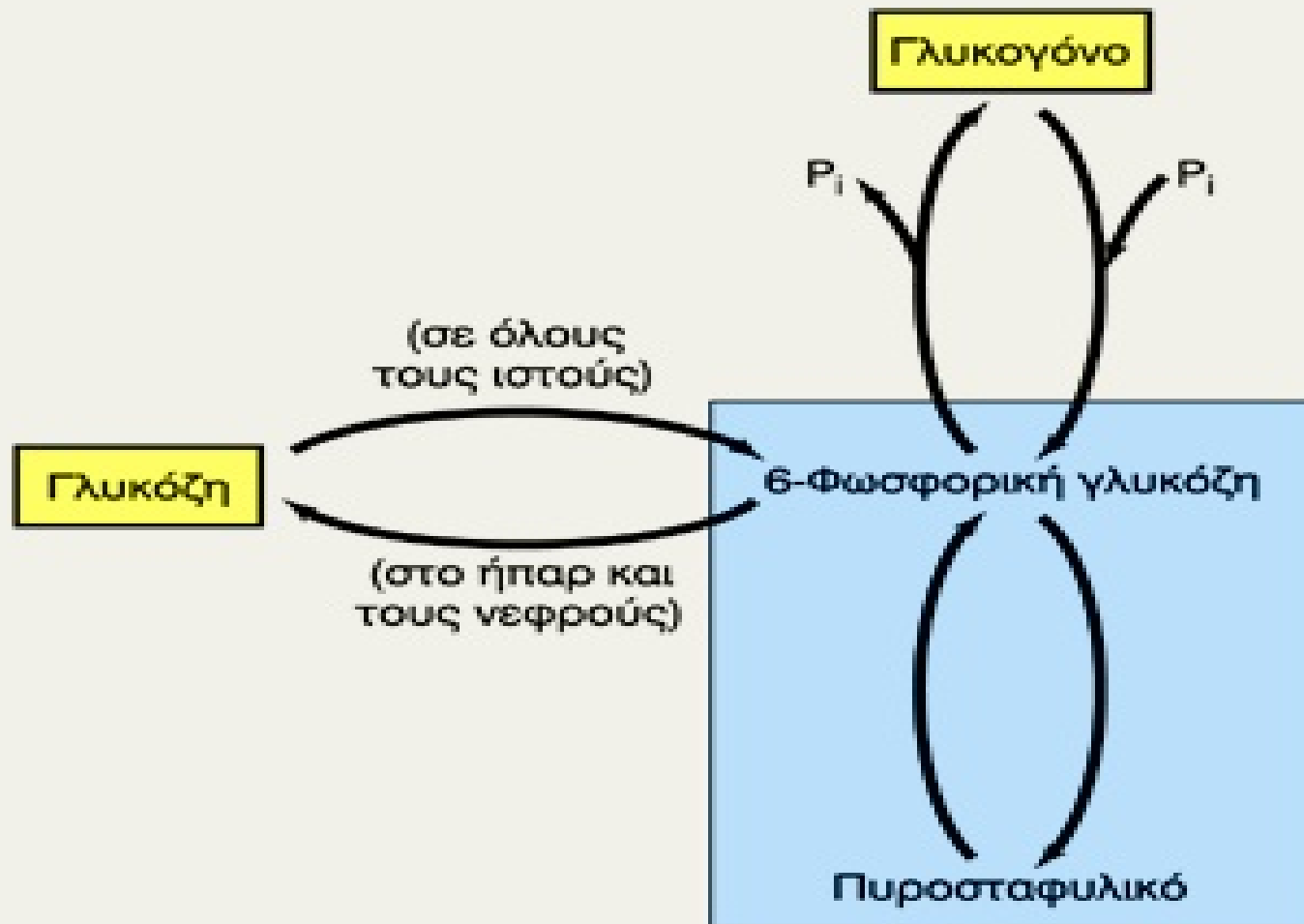


**Το γλυκογόνο βρίσκεται  
στο κυτταρόπλασμα  
των μυϊκών ινών με  
τη μορφή κόκκων**





# Ο ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΛΥΚΟΖΗΣ



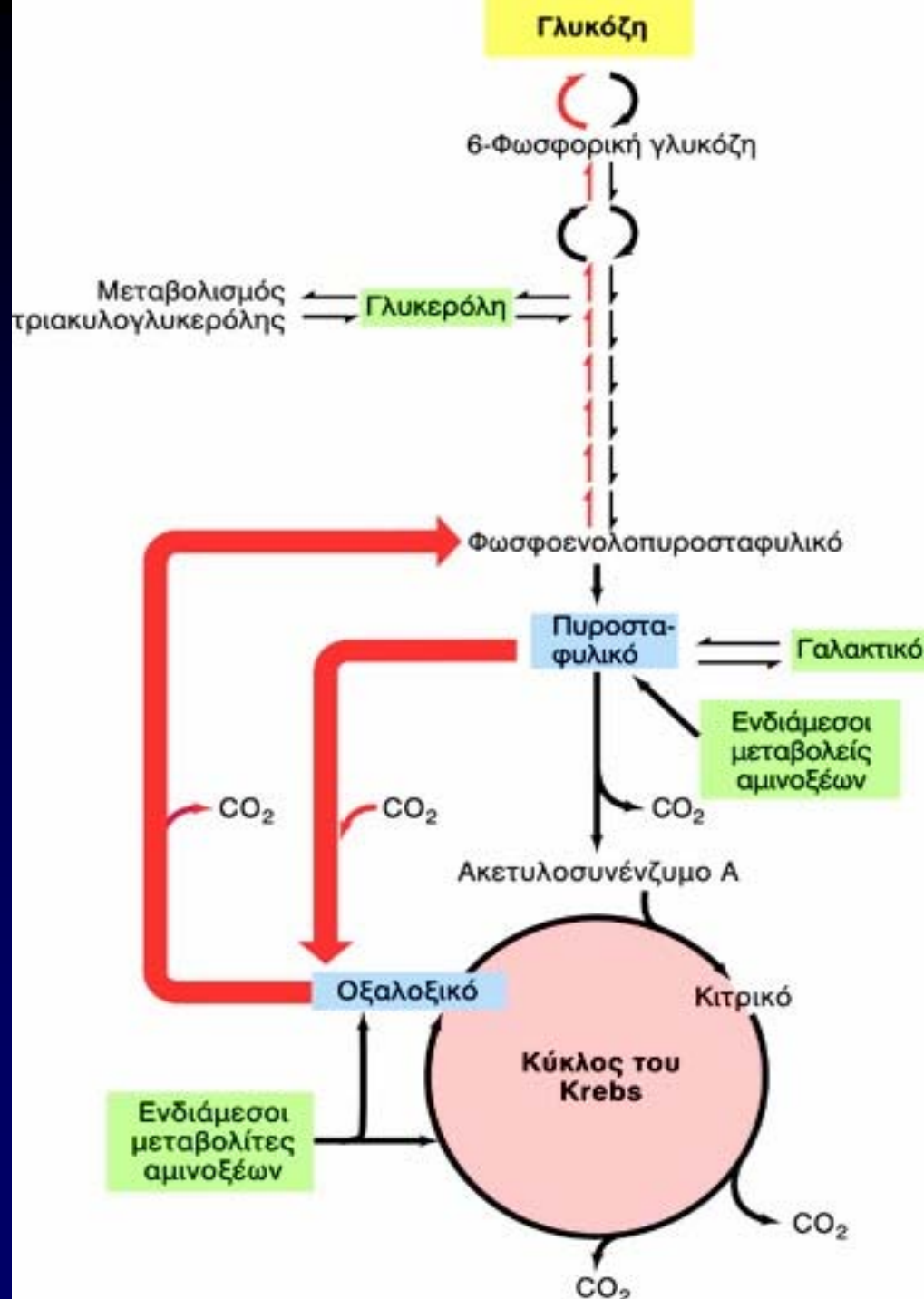
# Ο ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΛΥΚΟΖΗΣ

ΚΝΣ

ΜΥΣ

ΗΠΑΡ

Κ  
Υ  
Κ  
Λ  
Ο  
Φ  
Ο  
Ρ  
Ι  
Α



# Από που προέρχεται το μυϊκό και ηπατικό γλυκογόνο;

Κύρια πηγή είναι οι υδατάνθρακες της τροφής (άμυλο, ζάχαρη, γλυκόζη).



Με την πέψη υδρολύονται οι γλυκοζιδικές συνδέσεις των πολυσακχαριτών και των ολιγοσακχαριτών, οπότε προκύπτουν μονοσακχαρίτες και κυρίως γλυκόζη.



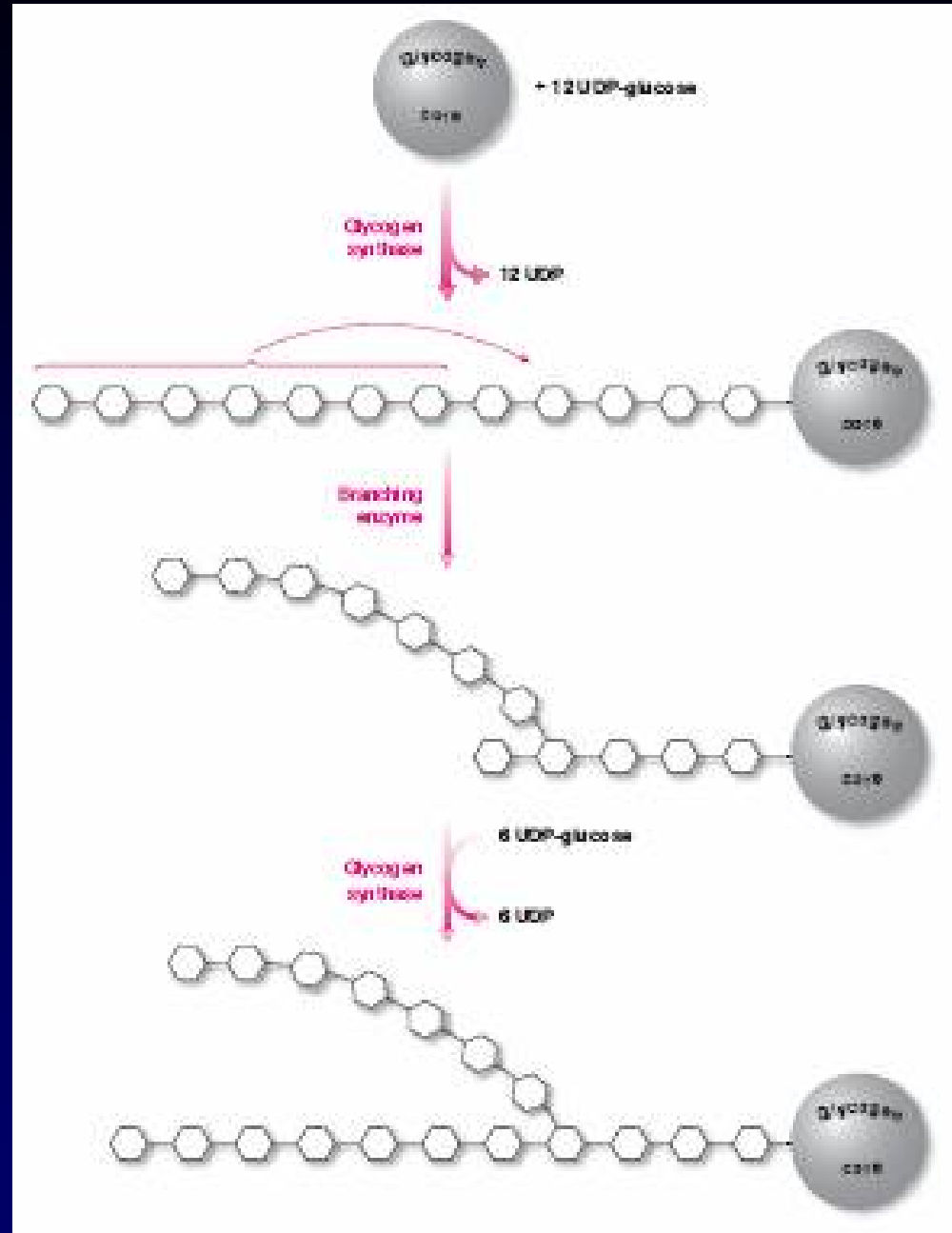
Η γλυκόζη εισέρχεται στην κυκλοφορία και προσλαμβάνεται από τα κύτταρα.



Η προσλαμβανόμενη γλυκόζη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση γλυκογόνου μέσω της γλυκογονοσύνθεσης.

# Γλυκογονοσύνθεση

Η γλυκογονοσύνθεση συνίσταται στη διαδοχική προσθήκη μονάδων γλυκόζης σε μια επιμηκυνόμενη αλυσίδα μονάδων γλυκόζης

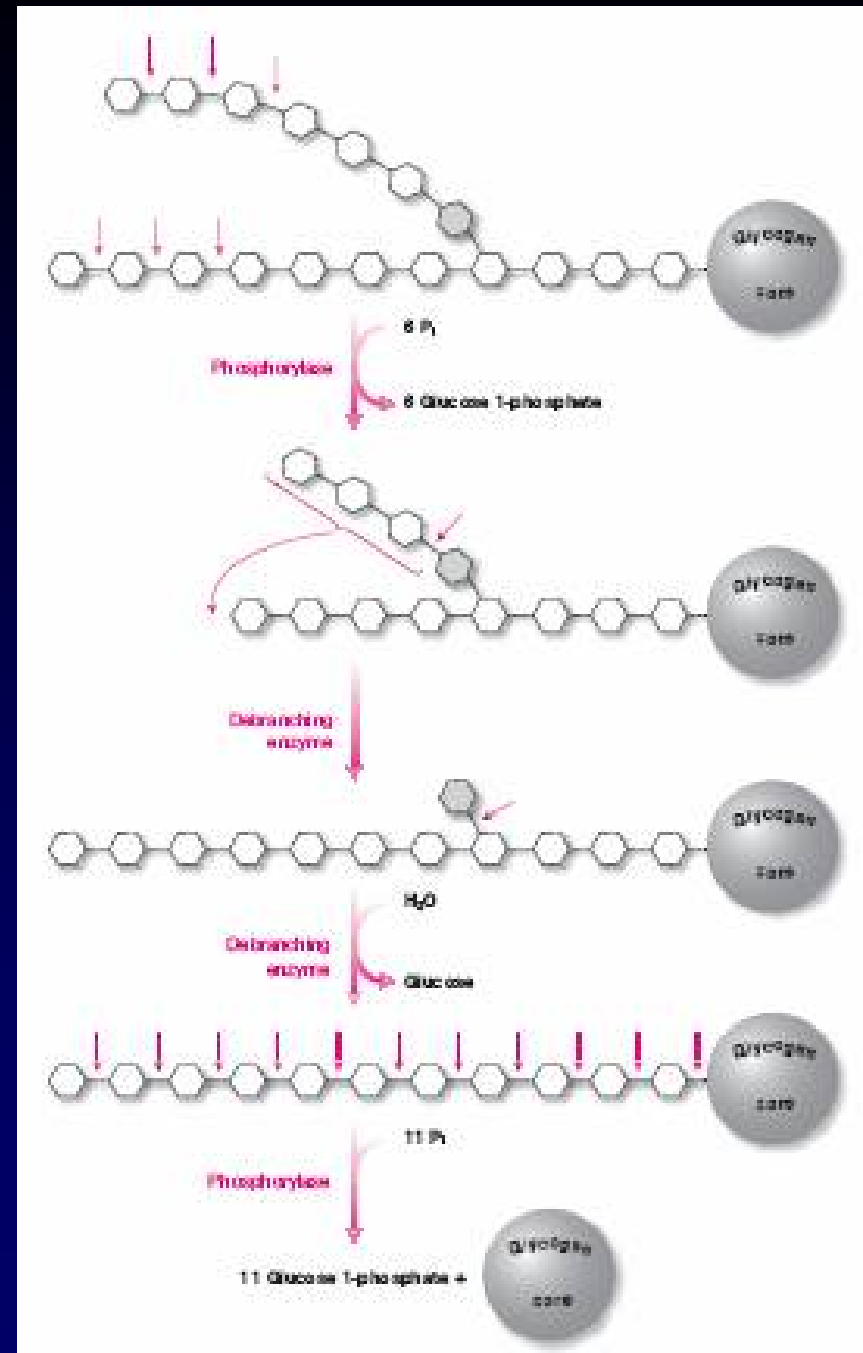


# Διάσπαση υδατανθράκων

- Γλυκόλυση = Διάσπαση της γλυκόζης (αναερόβια - αερόβια)
- Γλυκογονόλυση = Διάσπαση του γλυκογόνου (ηπατικού - μυϊκού)

# Γλυκογονόλυση

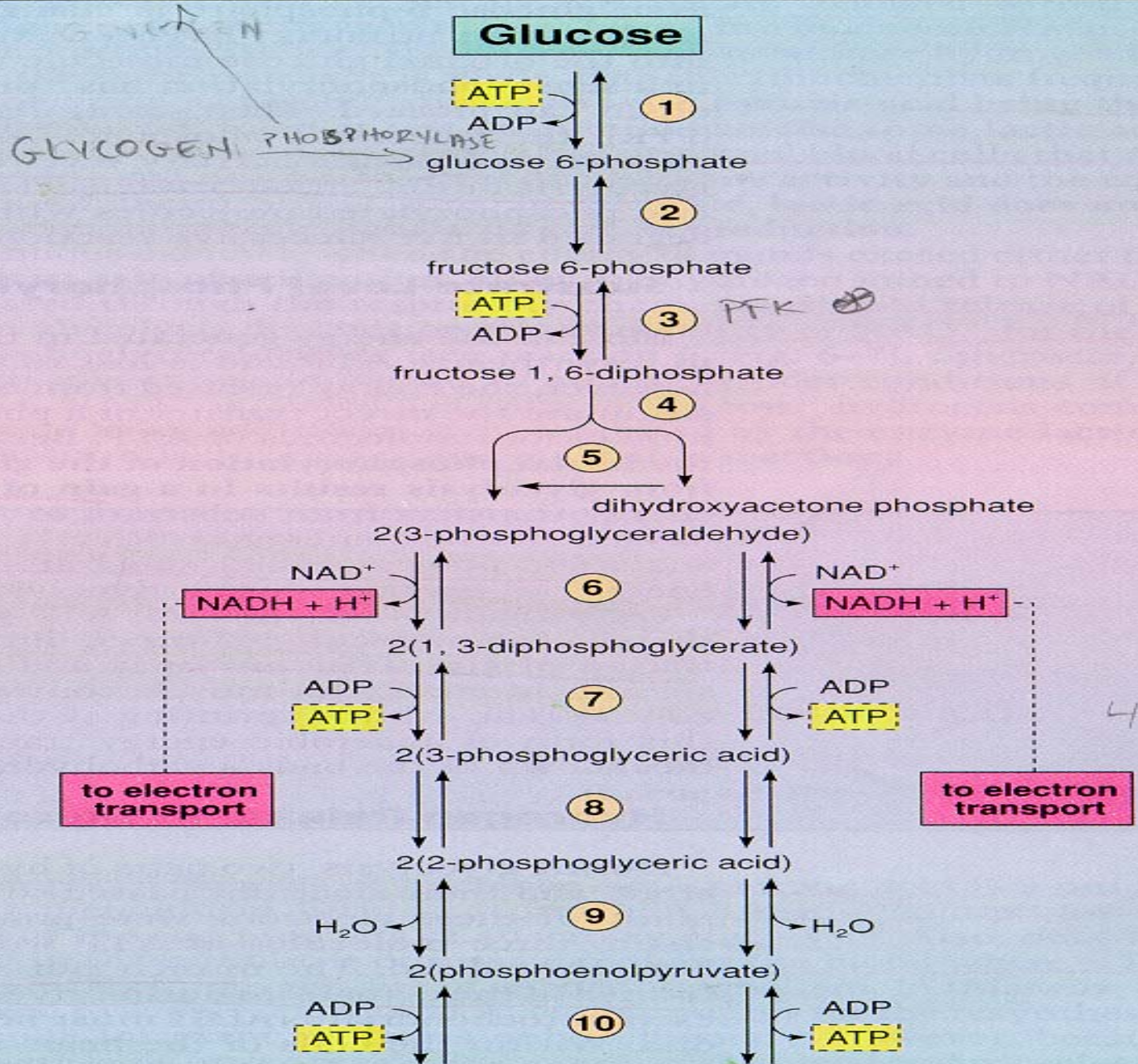
Η γλυκογονόλυση συνίσταται στη διάσπαση του γλυκογόνου προς γλυκόζη και 1-φωσφορική γλυκόζη



# Γλυκόλυση

- 10 αντιδράσεις με κατάληξη το πυροσταφυλικό οξύ
- πραγματοποιείται στο κυτταρόπλασμα
- λειτουργεί σε όλα τα κύτταρα (RBC)
- 1η αντίδραση είναι φωσφορυλίωση (έγκλιση γλυκόζης στο κύτταρο)
- Η άσκηση αυξάνει το ρυθμό γλυκόλυσης
- Σε παρατεταμένη άσκηση η γλυκόζη του αίματος παρέχει περισσότερη ενέργεια στο μυ απ' ότι το μυϊκό γλυκογόνο και η γλυκόζη του σαρκοπλάσματος





**Lactic acid**  $\longleftrightarrow$  **2(Pyruvic acid)**  $\longleftrightarrow$  **Lactic acid**

2-1  
2-4

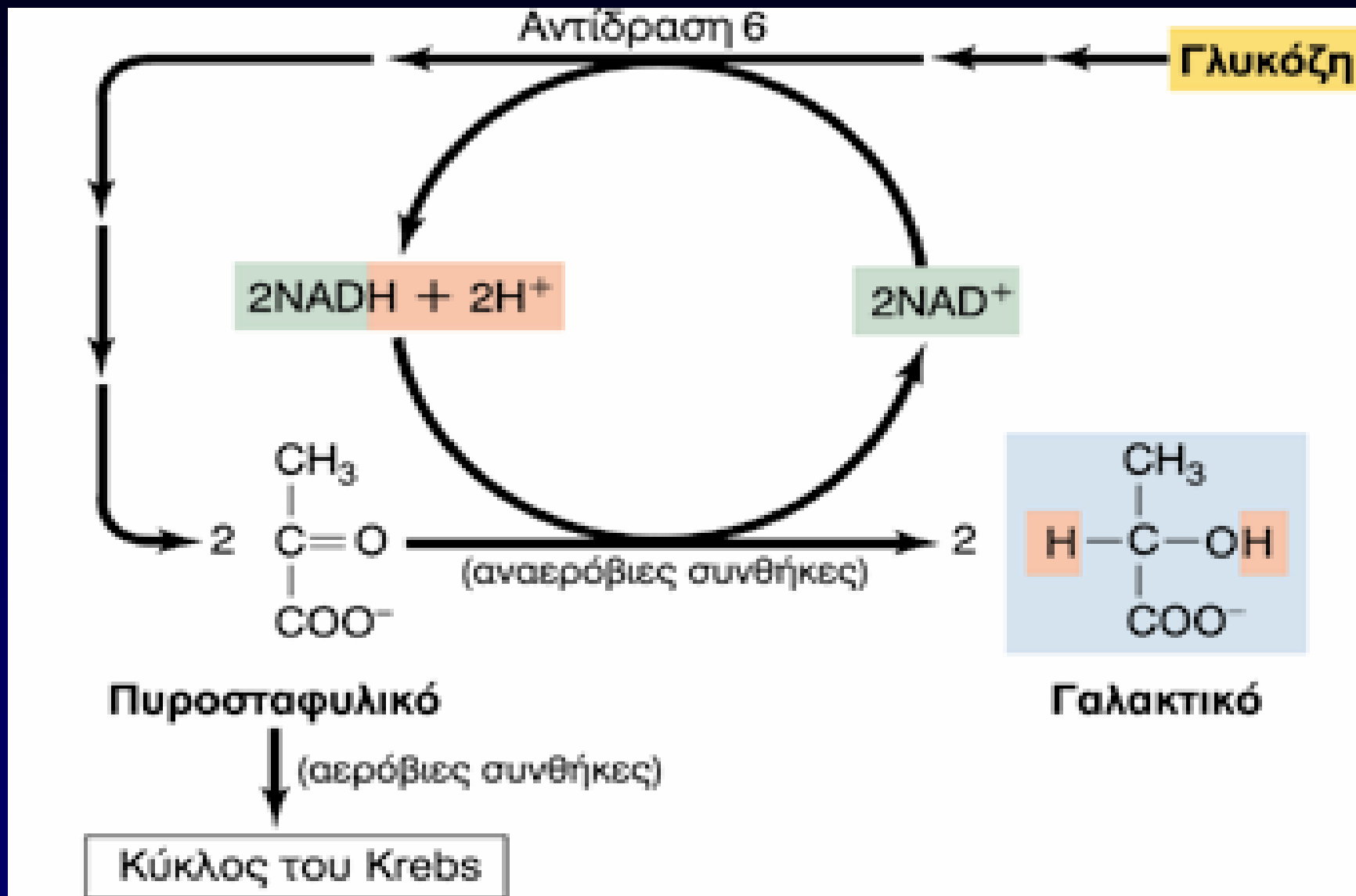


# TAINIA 2

# Παραγωγή γαλακτικού οξέος

- Αναερόβιες προσπάθειες
- NADH από 6η αντίδραση. Σημαίνει αναγέννηση NAD και κατά συνέπεια συνέχεια της γλυκόλυσης
- Χρησιμοποιείται σε ανάγκες για γρήγορη ανασύνθεση ATP

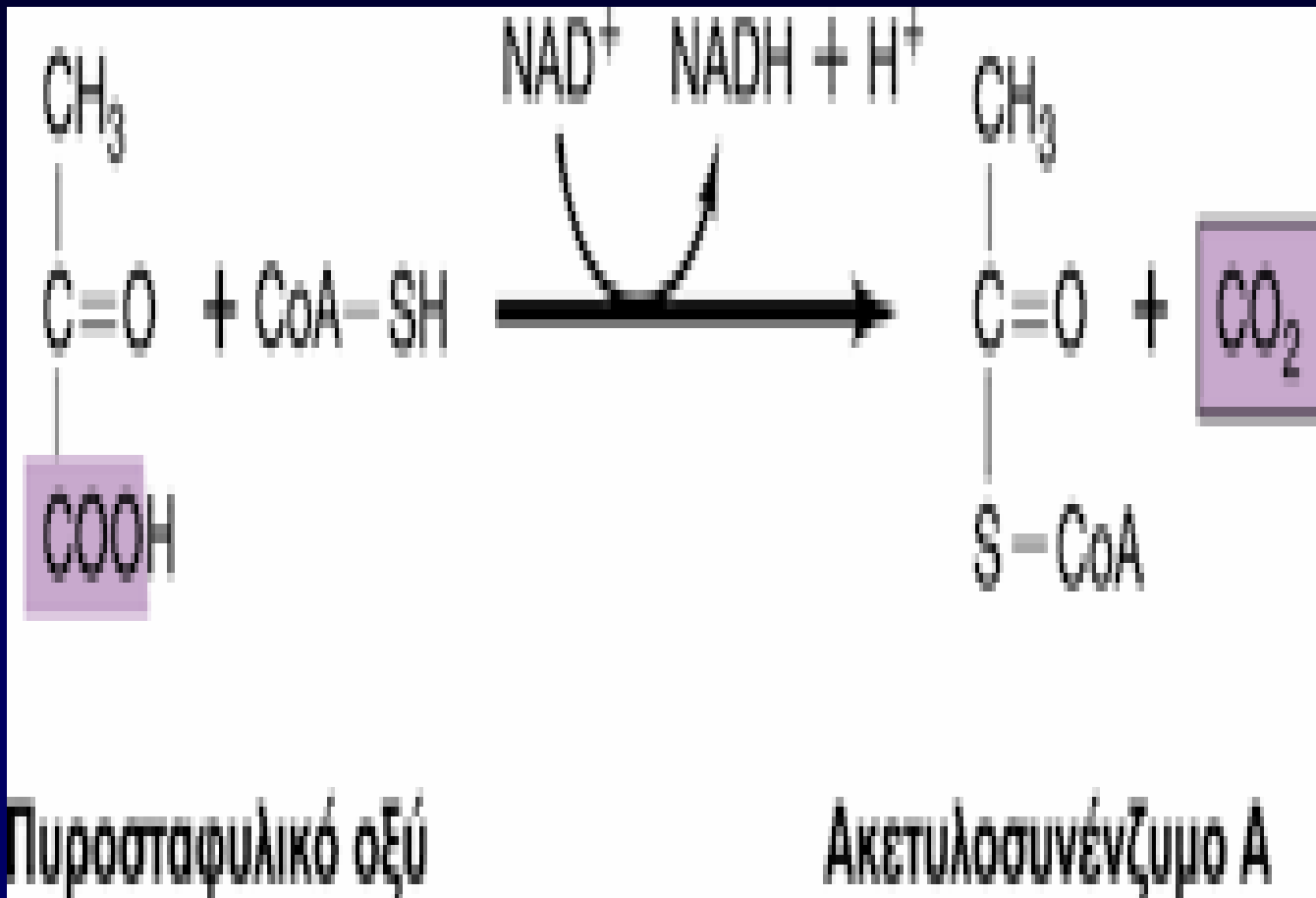
# Παραγωγή Γ.Ο. από πυροσταφυλικό οξύ NADH και H<sup>+</sup>



# Σύνδεση γλυκόλυσης και κύκλου του Krebs's

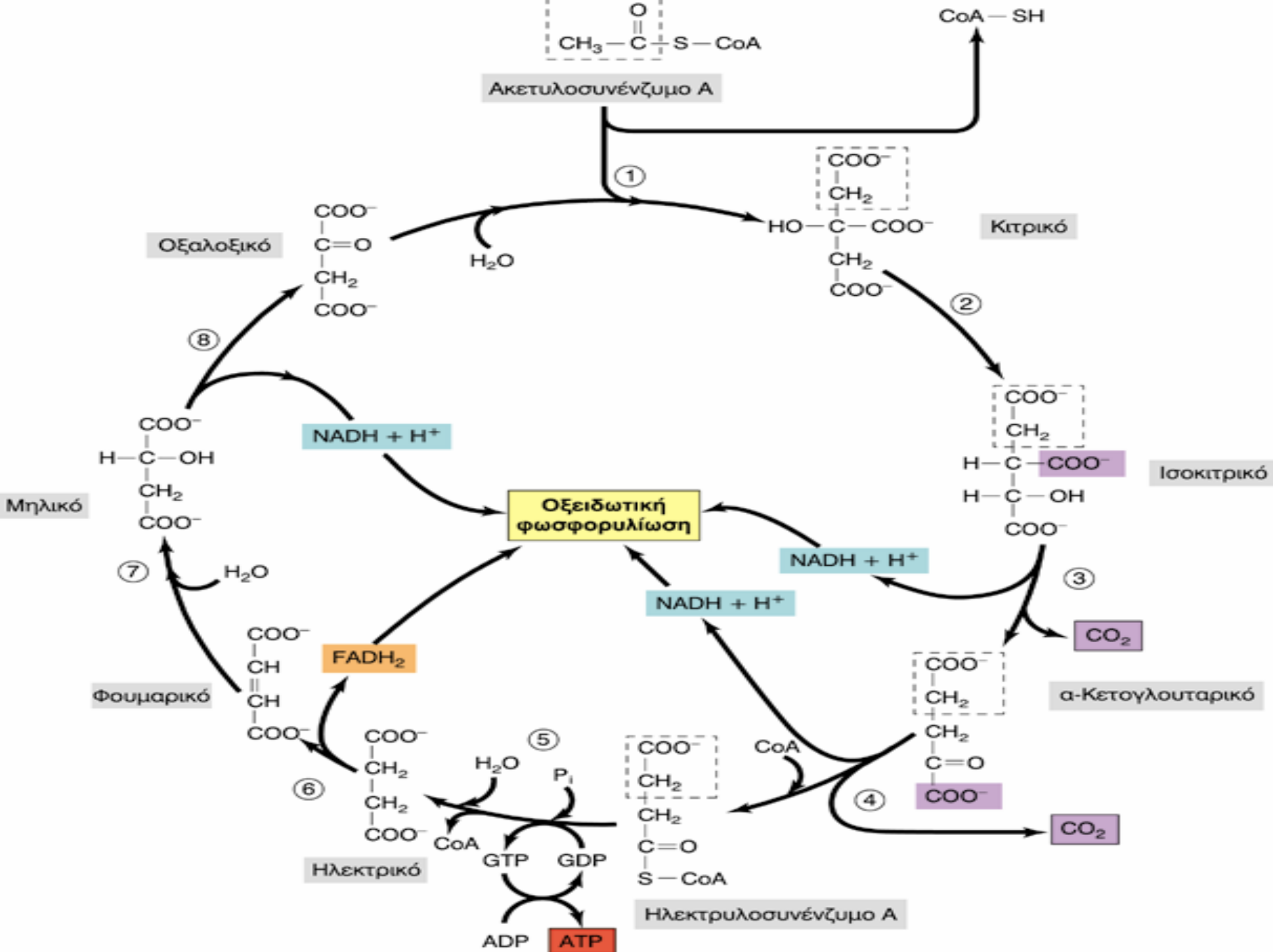
- Πέρασμα Πυροσταφιλικού οξέος από το κυτταρόπλασμα στο εσωτερικό των μιτοχονδρίων μέσω του συνενζύμου A
- $\text{Π.Ο.} + \text{coA} = \text{Ακετυλ coA} + \text{CO}_2 + \text{NADH}$

# Δημιουργία Ακετυλοσυνένζυμου Α από πυροσταφυλικό οξύ (CO<sub>2</sub>-NADH)



# Κύκλος του Kreb's

- 9 συνολικά αντιδράσεις κατά τις οποίες παράγονται 3 NADH, 1 FADH<sub>2</sub> και 1 GTP
- Ακετυλ coA + οξαλοξικό οξύ =\* κιτρικό οξύ
- \* συνθάση του κιτρικού οξέος. Ένζυμο το οποίο χρησιμοποιείται για ένδειξη αερόβιων προσαρμογών



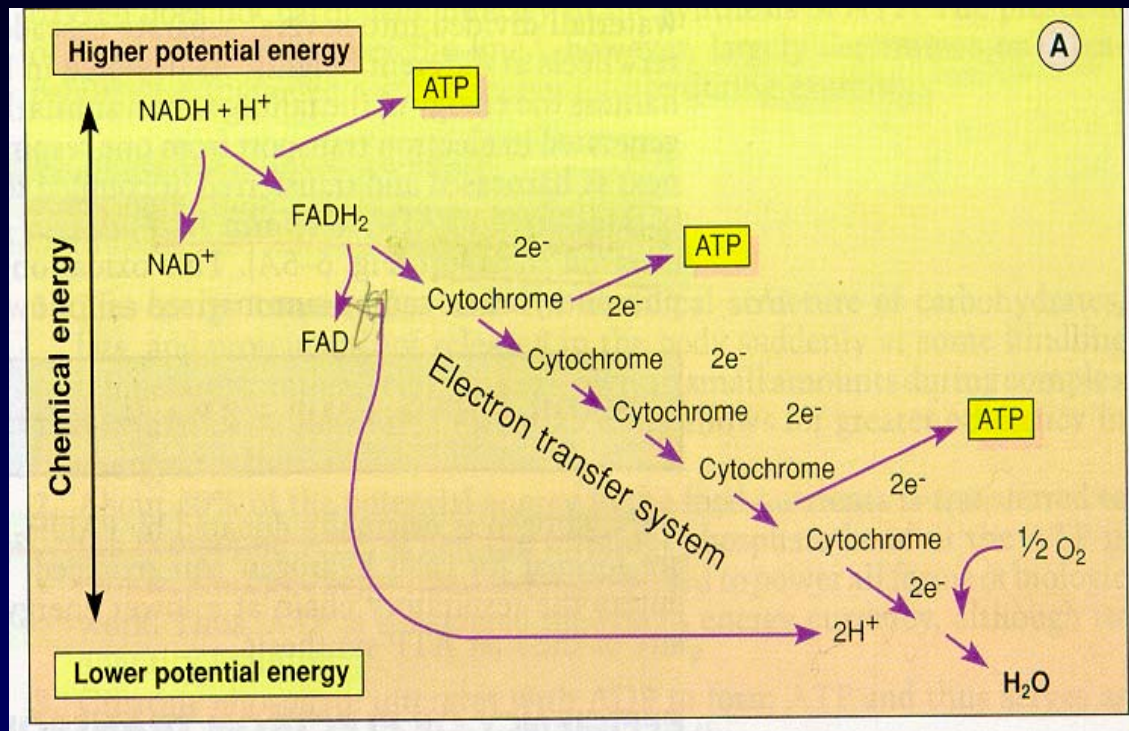
- Η πρώτη και η έκτη αντίδραση του κύκλου καταλύονται από τη συνθάση του κιτρικού οξέος και την σουξινική ή ηλεκτρική αφυδρογονάση.
- Και τα δύο μόρια χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επιτυχίας ενός αερόβιου προπονητικού προγράμματος.



# TAINIA 3

# Αναπνευστική αλυσίδα

- Μεταφορά  $e^-$  από το  $NADH$  και  $FADH_2$  στο  $O_2$



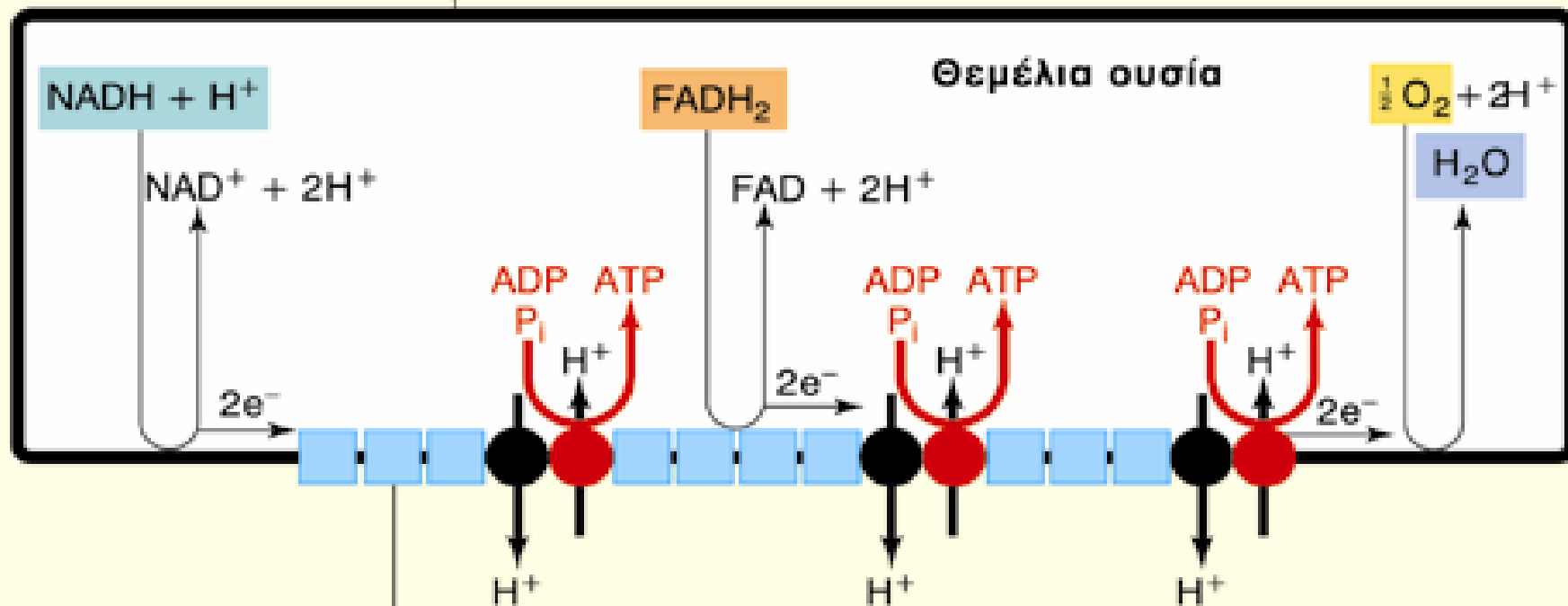
## Οξειδωτική φωσφορυλίωση

Δημιουργία ATP από την ενέργεια της αναπνευστικής αλυσίδας λόγω οξείδωσης του  $NADH$  και  $FADH_2$ .

# Χημειωσμητική υπόθεση

Εσωτερική  
μιτοχονδριακή  
μεμβράνη

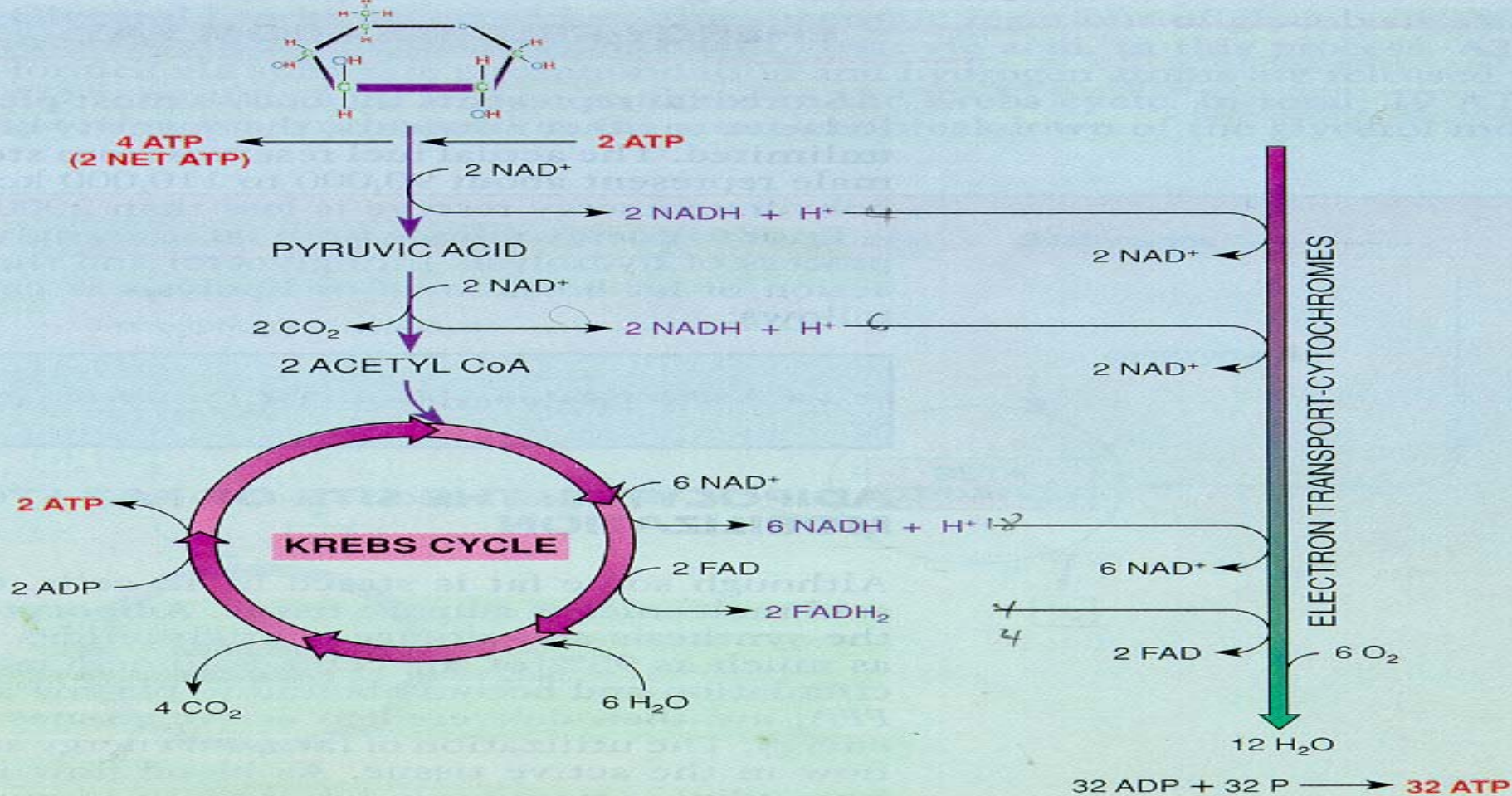
Εξωτερική  
μιτοχονδριακή  
μεμβράνη



Κυτοχρώματα στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων

# TAINIA 4

# TAINIA 5



SOURCE	REACTION	NET ATP
Substrate phosphorylation	Glycolysis	2
	Glycolysis	4
	Pyruvate → Acetyl CoA	6
Substrate phosphorylation	Krebs cycle	2
	Krebs cycle	22
<b>TOTAL</b>		<b>36 ATP</b>

**FIG. 6-11.** Adenosine triphosphate (ATP) yield from energy transfer during the complete oxidation of glucose.



# Ενεργειακή απόδοση του αερόβιου καταβολισμού της γλυκόζης

ΣΤΑΔΙΟ	ΑΠΟΔΟΣΗ	Χ 2	ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΤΡ
ΓΛΥΚΟΛΥΣΗ	1 ΑΤΡ 1 NADH (2 ή 3)		2 ΑΤΡ 4 ή 6 ΑΤΡ
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ Π.Ο. ΣΕ AcylCoA	1 NADH		6 ΑΤΡ
ΚΥΚΛΟΣ Kreb's	3 NADH 1 FADH <sub>2</sub> 1 GTP		18 ΑΤΡ 4 ΑΤΡ 2 ΑΤΡ

# ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΕΣ & ΑΣΚΗΣΗ

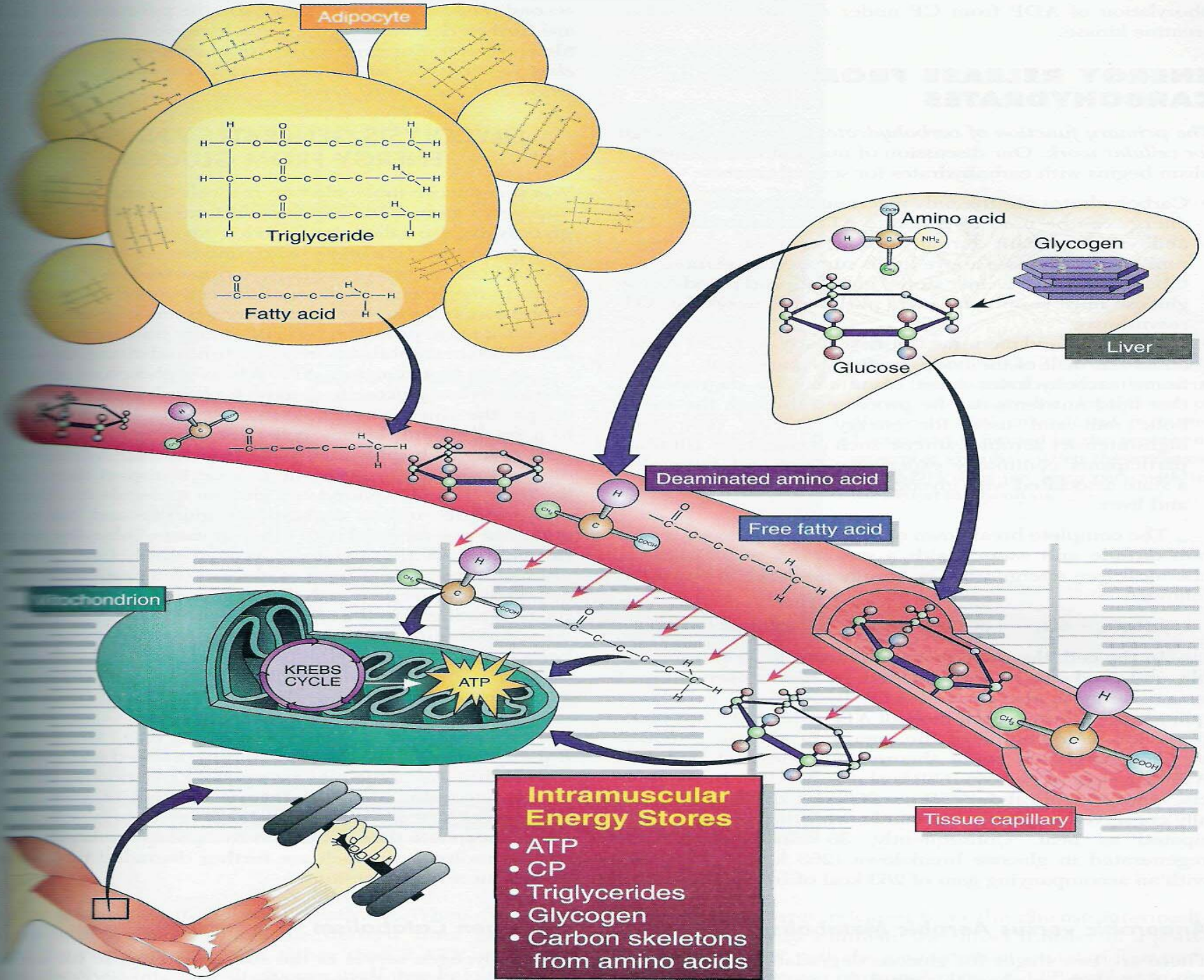


Οι αναβολικές αντιδράσεις χρειάζονται ενέργεια για την σύνθεση γλυκογόνου, τριγλυκεριδίων και πρωτεϊνών

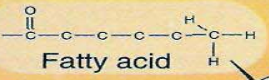
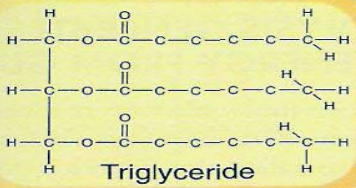


Οι καταβολικές αντιδράσεις απελευθερώνουν ενέργεια από τον καταβολισμό της γλυκόζης, της γλυκερόλης, των λιπαρών οξέων και των αμινοξέων





**Adipocyte**



**Amino acid**



**Glycogen**



**Liver**

**Glucose**

**Deaminated amino acid**

**Free fatty acid**

**Mitochondrion**

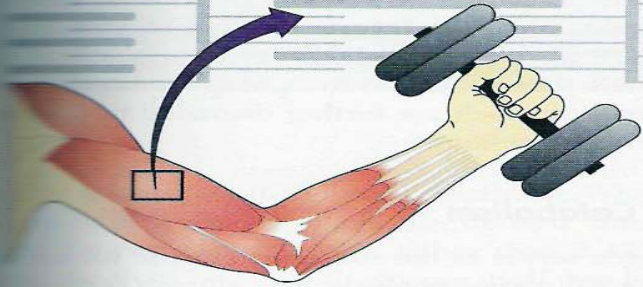
**KREBS CYCLE**

**ATP**

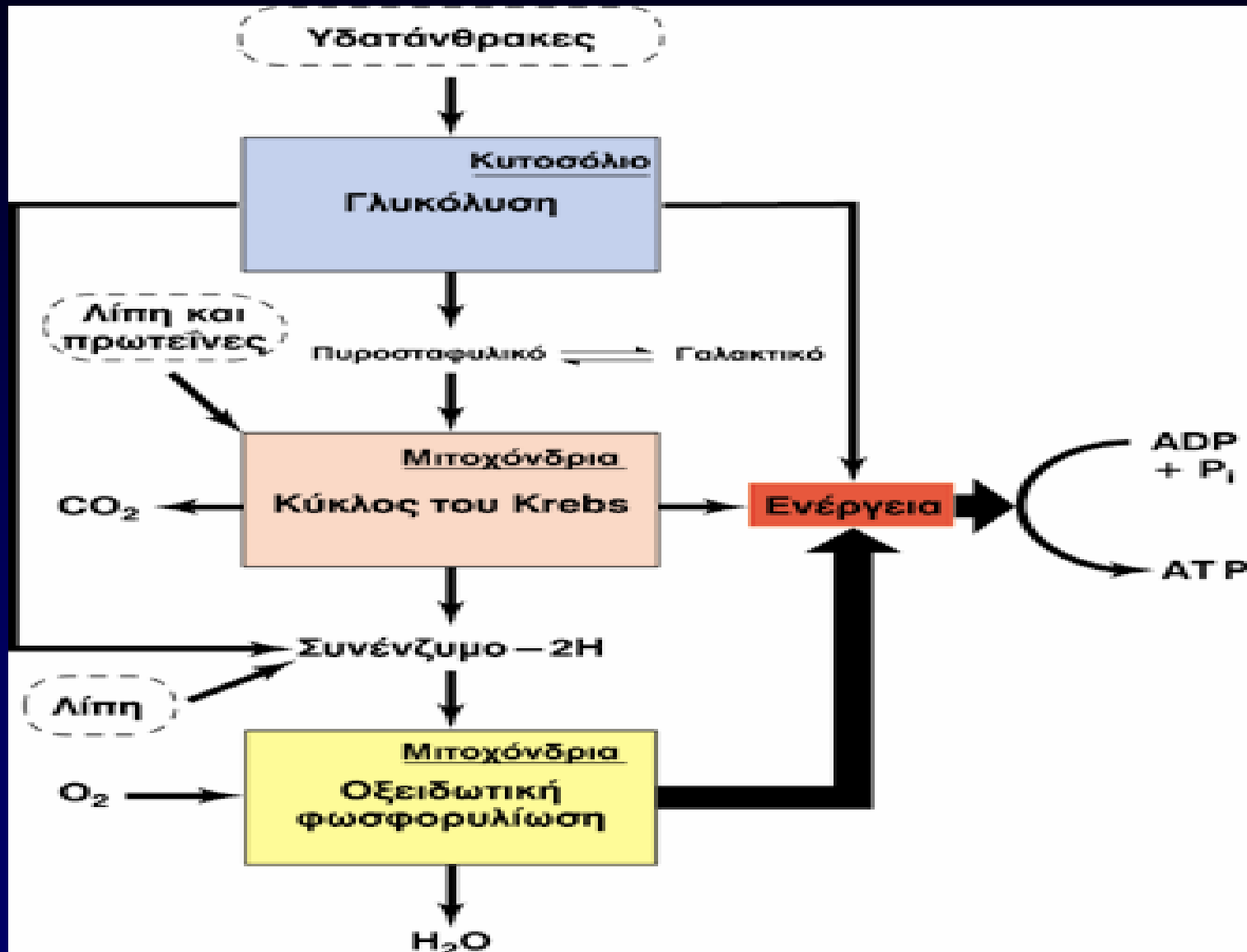
**Tissue capillary**

**Intramuscular Energy Stores**

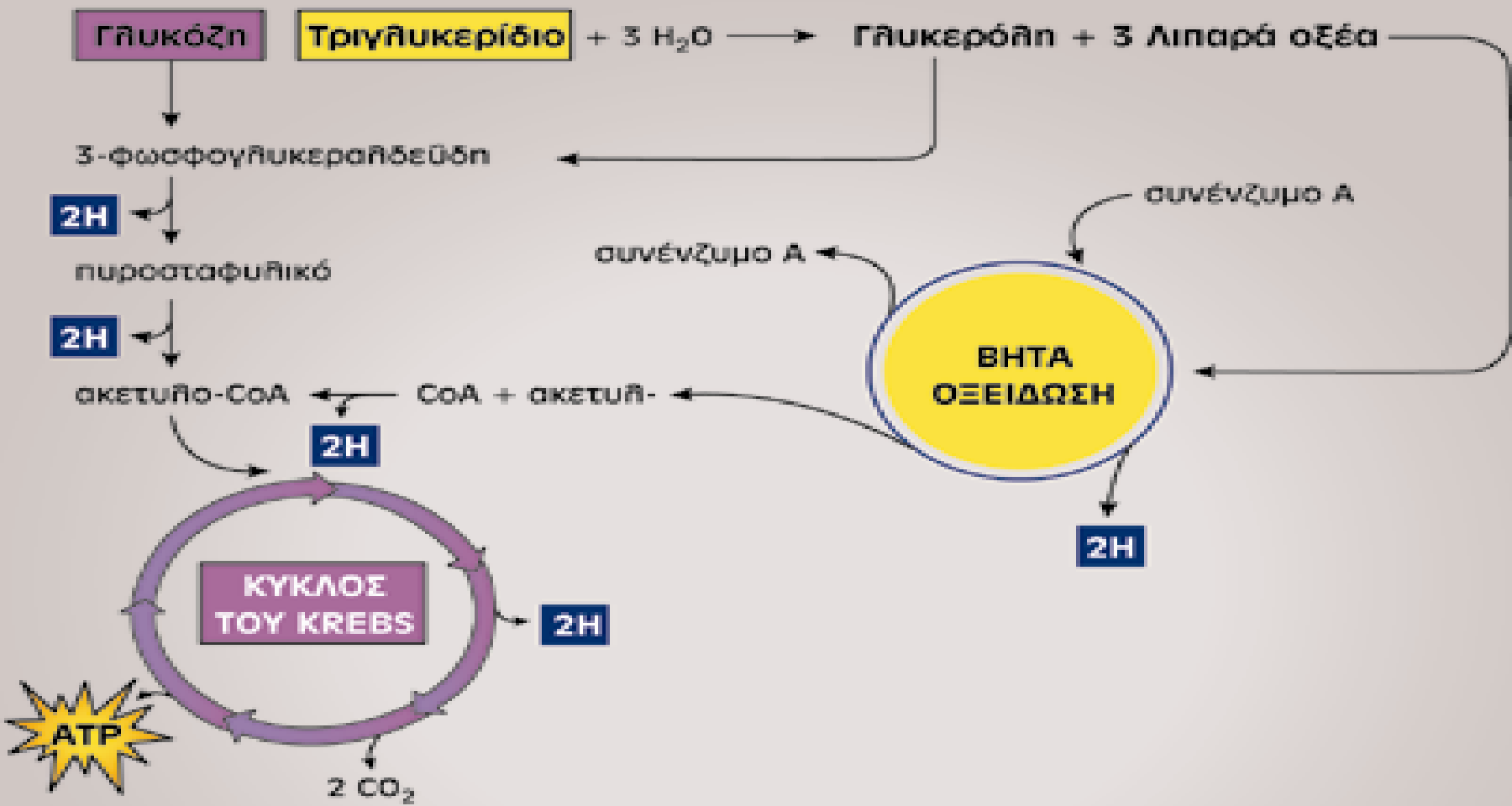
- ATP
- CP
- Triglycerides
- Glycogen
- Carbon skeletons from amino acids



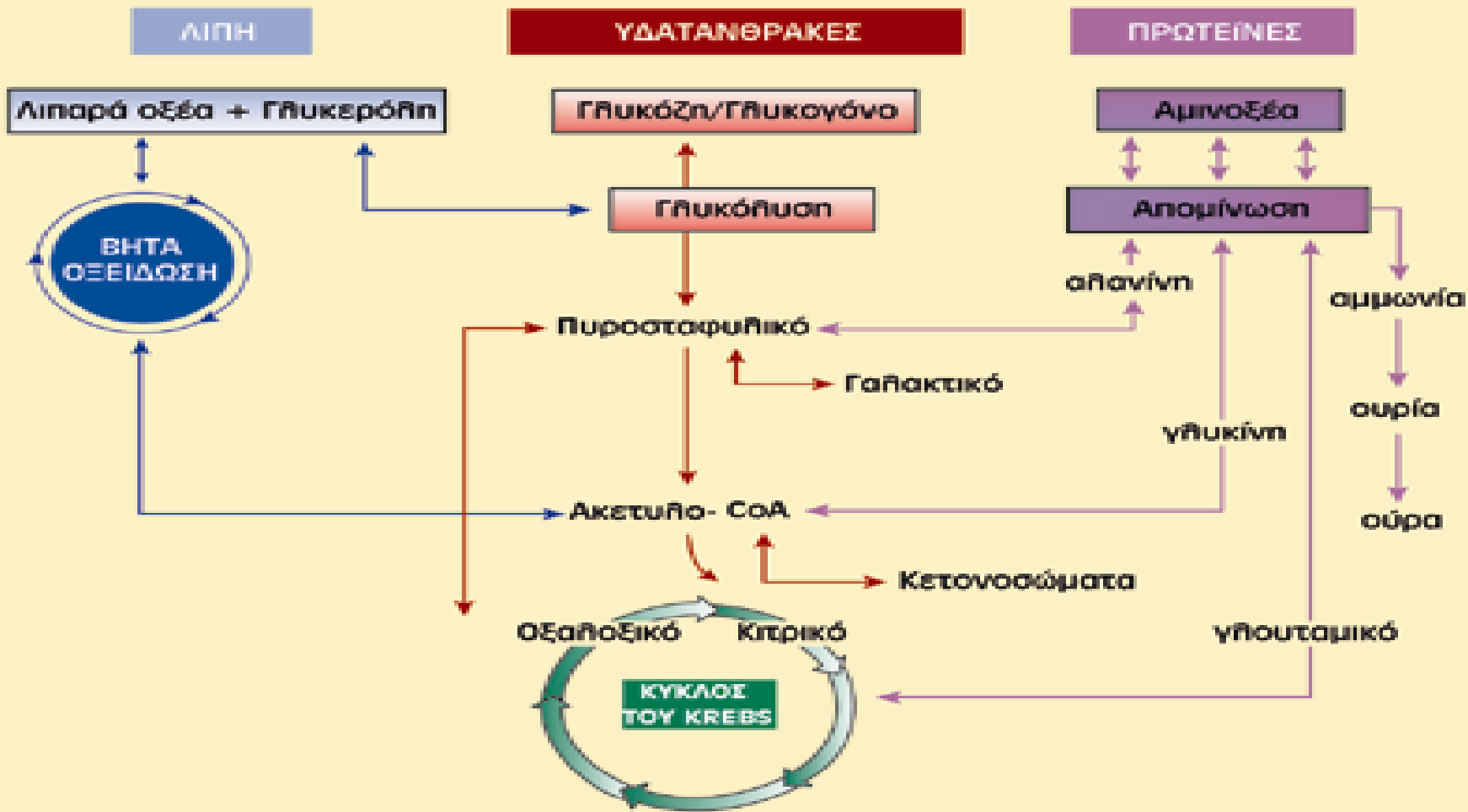
# Μεταβολικά μονοπάτια που αποδίδουν ενέργεια για δημιουργία ATP από την καύση θρεπτικών στοιχείων







Πηγή	Οδός	Παραγωγή ATP ανά μόριο ουδέτερου λίπους
1 μόριο γλυκερόλης	Γλυκόλυση + κύκλος του Krebs	19
3 μόρια λιπαρών οξέων με 18 μόρια άνθρακα	β-οξείδωση + κύκλος του Krebs	441
<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>		<b>460 ATP</b>

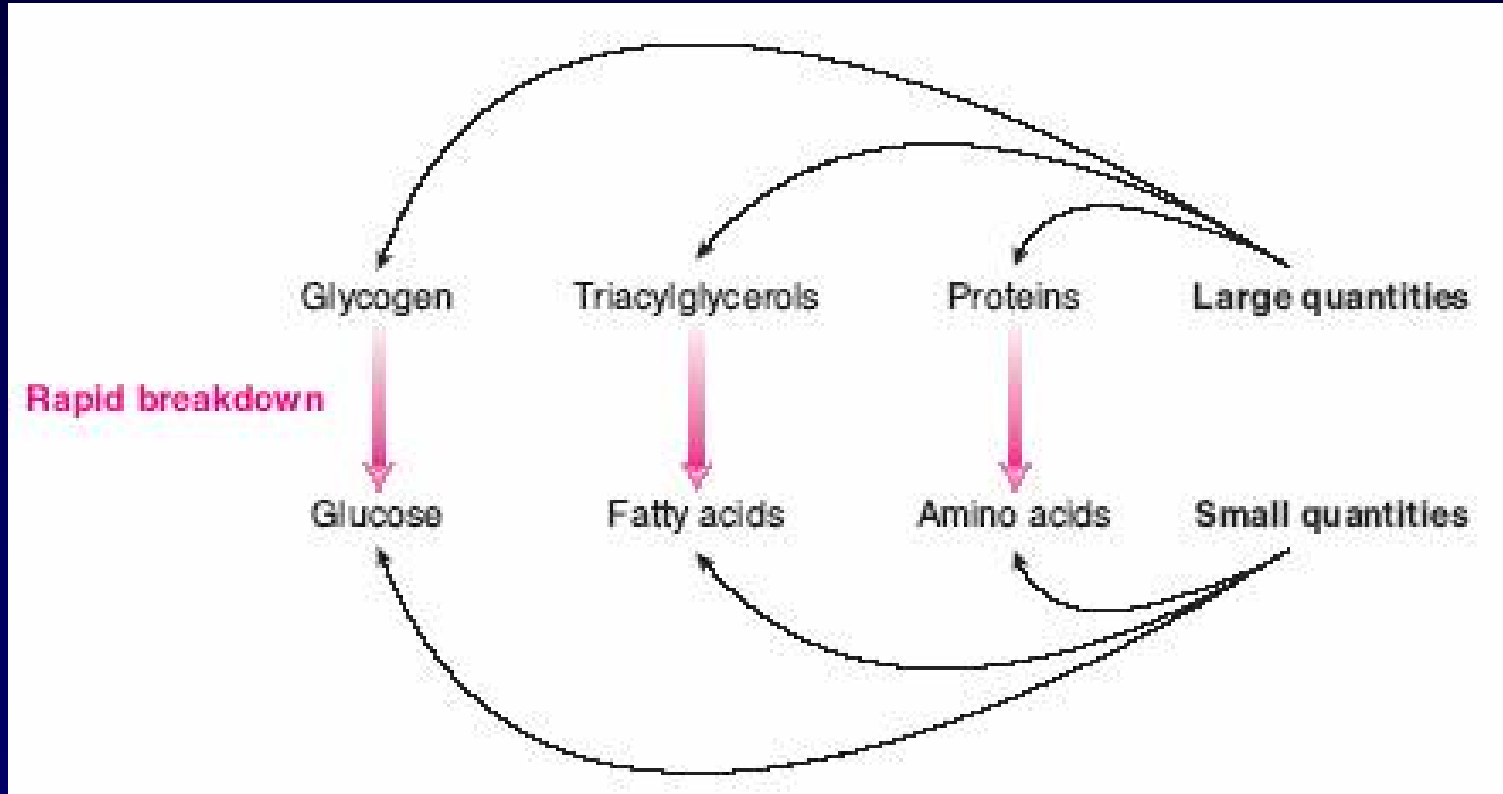


**Κυρίαρχες αλληλομετατροπές**

Θρεπτικό υλικό	Μπορεί να σχηματίσει γλυκόζη:	Μπορεί να σχηματίσει αμινοξέα:	Μπορεί να σχηματίσει λίπος:
<b>Υδατάνθρακες</b>	Ναι	Ναι' προσθήκη αζώτου παράγει μη στοιχειώδη οξέα	Ναι
<b>Λίπη</b>	Λιπαρά οξέα όχι	Όχι	Ναι
<b>Πρωτεΐνες</b>	Ναι' αμινοξέα από γλυκογόνο	Ναι	Ναι' αμινοξέα από κετοξυγενή

# Μεταβολισμός των υδατανθράκων κατά την άσκηση

Το γλυκογόνο είναι ο αφθονότερος υδατάνθρακας των ζώων



# Επιτάχυνση της γλυκογονόλυσης στους μύες κατά την άσκηση

Η ταχύτητα της γλυκογονόλυσης αυξάνεται χάρη στις μεταβολές της συγκέντρωσης κάποιων ουσιών:

## 1. Αύξηση $P_i$

Γλυκογόνο ( $n$  μονάδες γλυκόζης) +  $P_i \rightarrow$   
γλυκογόνο ( $n - 1$  μονάδες γλυκόζης) + 1-φωσφορική γλυκόζη

## 2. Αύξηση AMP και IMP και μείωση ATP

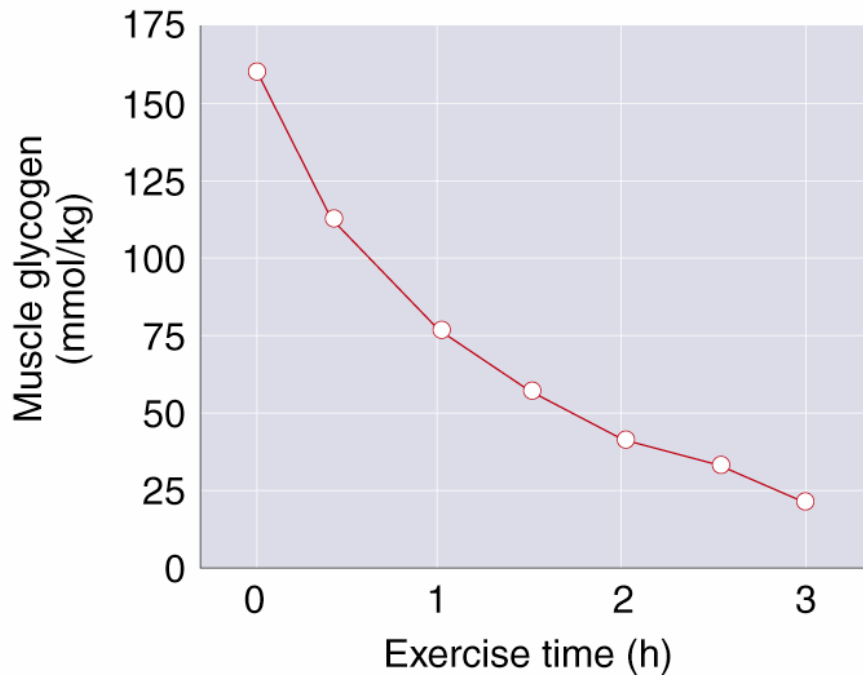
## 3. Αύξηση $Ca^{2+}$

## 4. Αύξηση επινεφρίνης

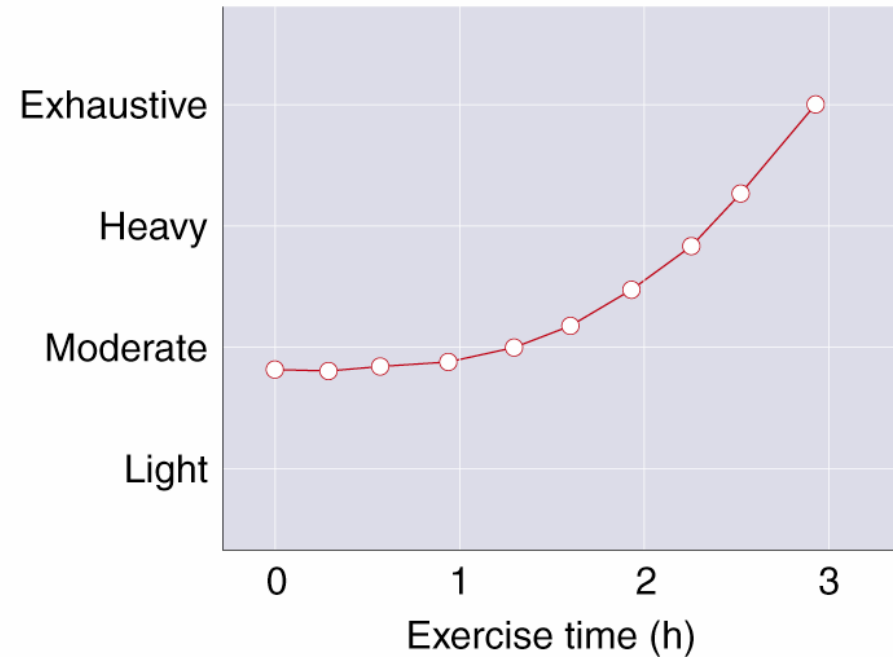
Οι τρεις αυτές μεταβολές επιταχύνουν τη γλυκόλυση ενεργοποιώντας άμεσα ή έμμεσα τη φωσφορυλάση

# Η ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΜΥΪΚΟΥ ΓΛΥΚΟΓΟΝΟΥ ΚΑΤΆ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

Gastrocnemius muscle

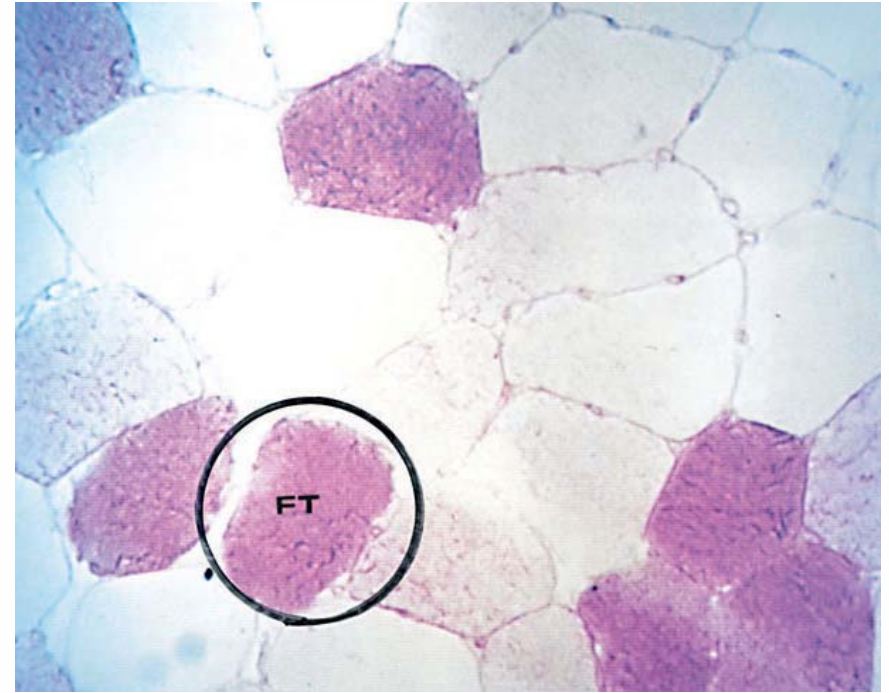
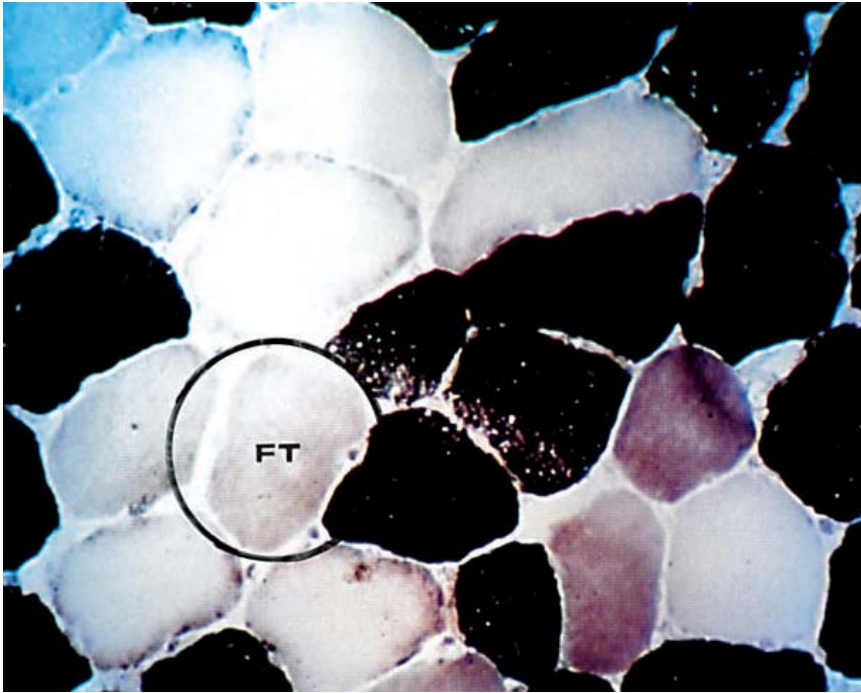


Perceived exertion

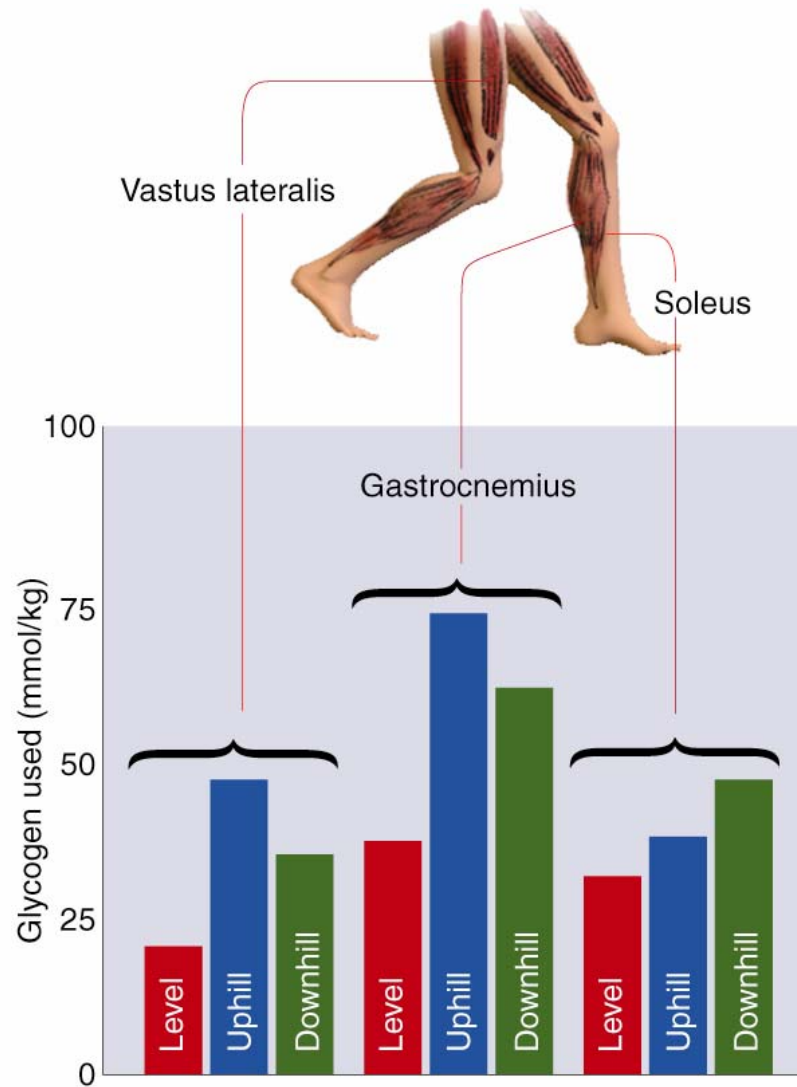




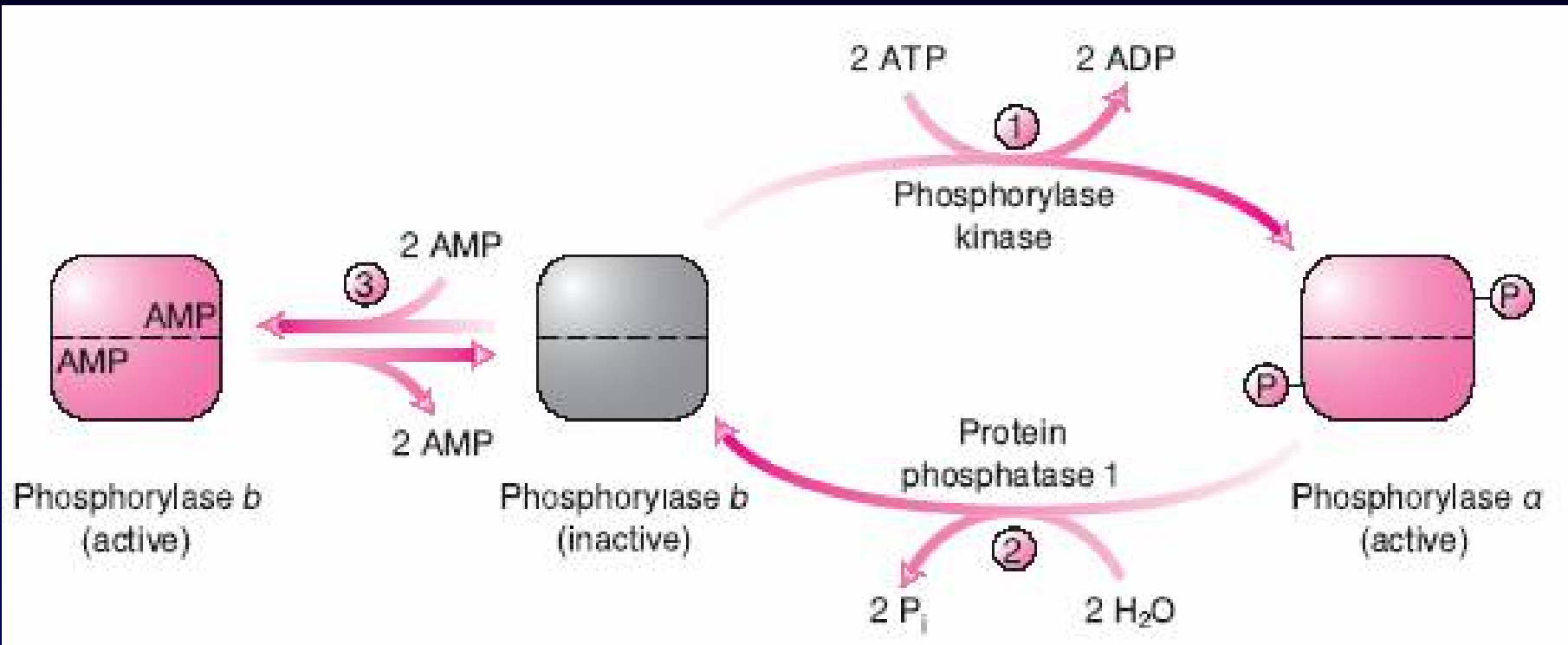
# ΧΡΩΣΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΜΥΪΚΩΝ ΙΝΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ ΣΕ ΓΛΥΚΟΓΟΝΟ



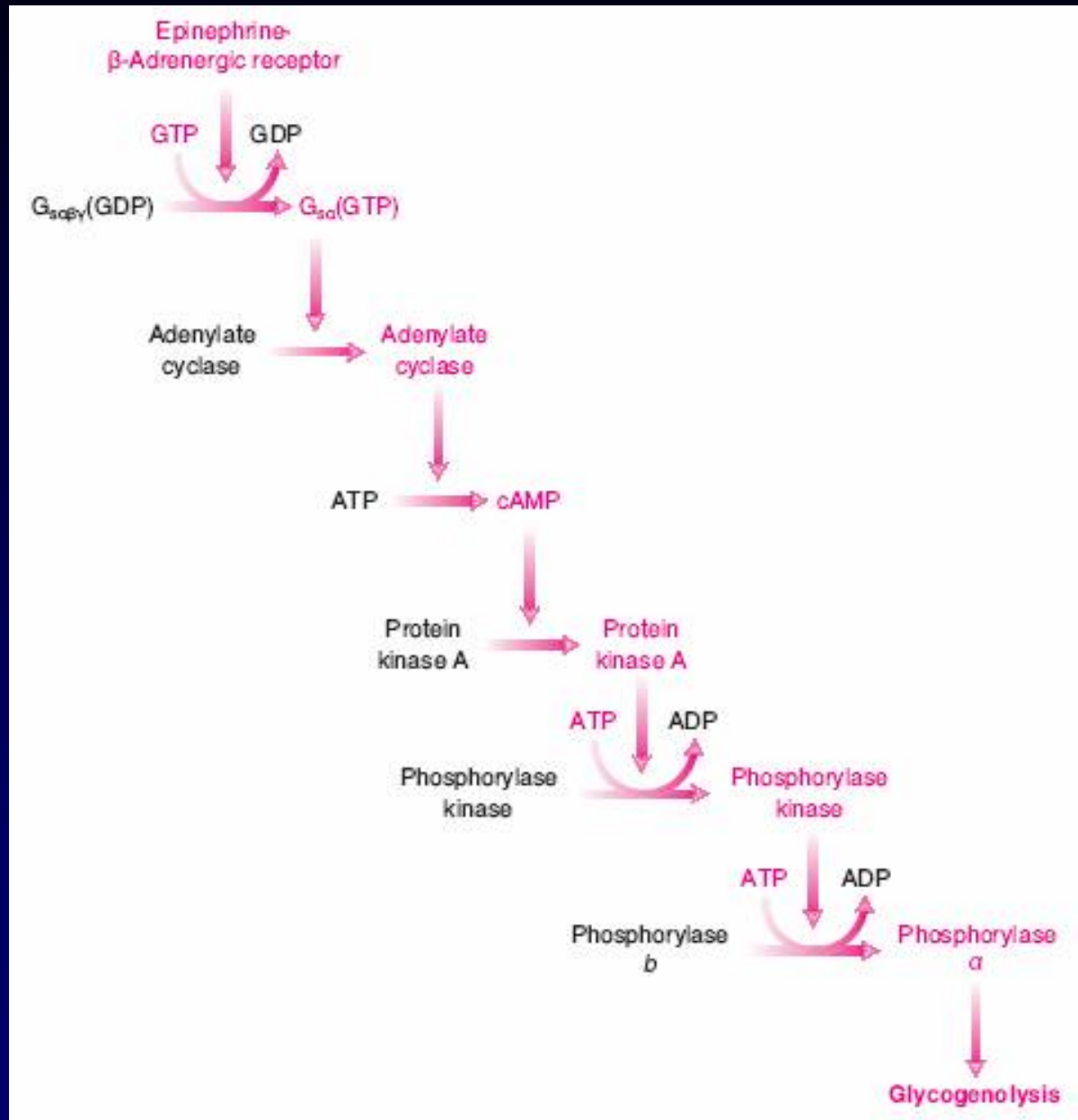
# Η ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΓΛΥΚΟΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ



# Ρύθμιση της φωσφορυλάσης

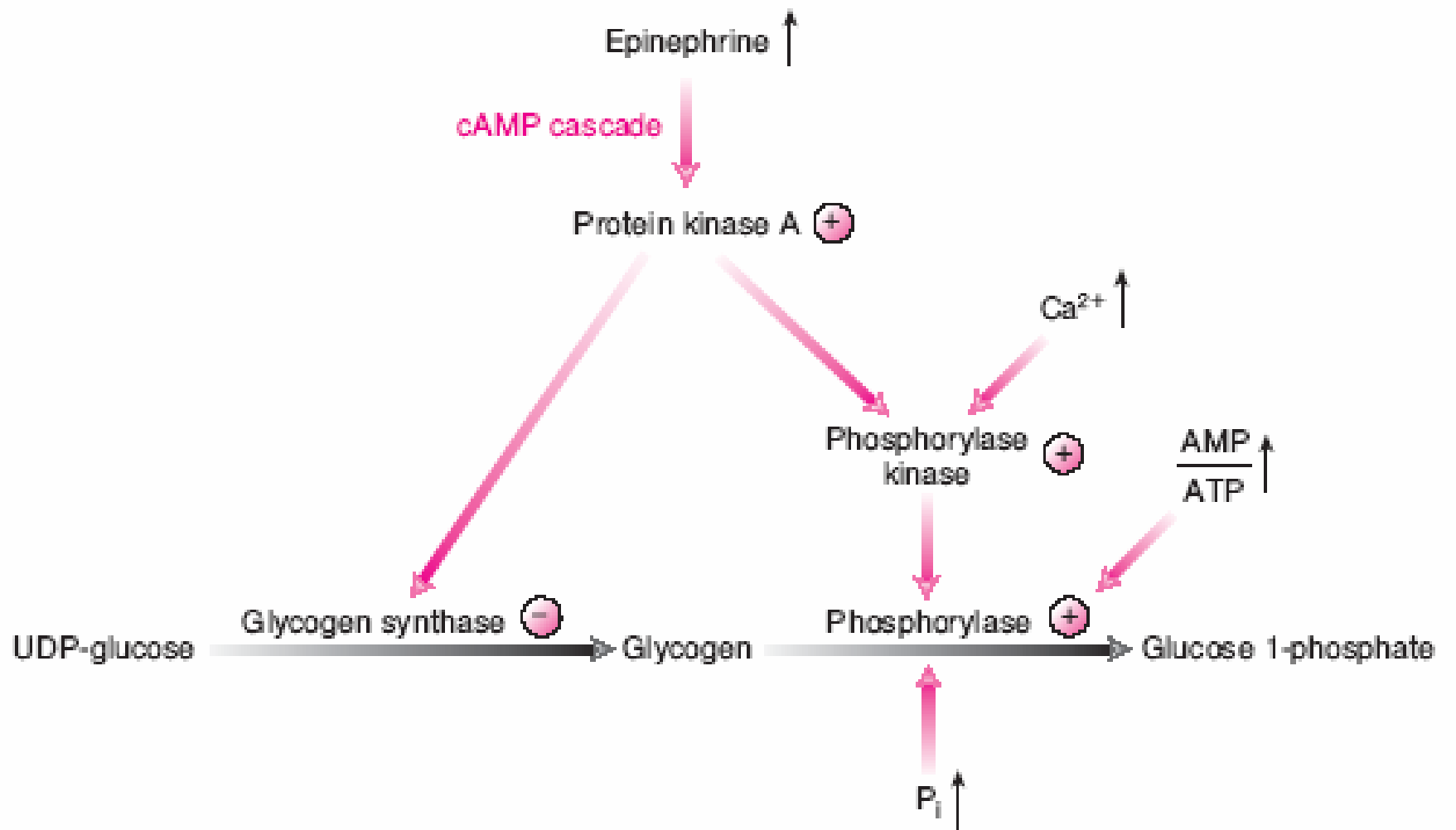


# Ρύθμιση της γλυκογονόλυσης από τον καταρράκτη του cAMP



# TAINIA 6

# Σύνοψη της ρύθμισης του μεταβολισμού του γλυκογόνου κατά την άσκηση



# Η ρύθμιση της γλυκογονόλυσης στο μυ κατά τη διάρκεια της άσκησης

- Ασβέστιο: στην έναρξη της άσκησης προκαλεί την αρχική έκτίναξη της διάσπασης του γλυκογόνου, πάνω από τις ανάγκες του μυ με ταυτόχρονη συσσώρευση γαλακτικού. Στη συνέχεια η φωσφορυλίωση της φωσφορυλάσης αναστέλλεται κατά τη διάρκεια συνεχόμενης άσκησης και αφού παρέχει μία μεγάλη ποσότητα πυροσταφυλικού στα μιτοχόνδρια.
- Το σύμπλεγμα γλυκογόνου-ενζύμου-σαρκοπλασματικού δικτύου: η αντιστροφή της ενεργοποίησης της φωσφορυλάσης επιτυγχάνεται μερικώς από τη διάσπαση του γλυκογόνου απελευθερώνοντας την φωσφορυλάση απομακρύνοντας την από την κινάση της φωσφορυλάσης και το μηχανισμό του ασβεστίου και εκκείθοντας το ένζυμο στην φωσφατάση.
- Στο τέλος της άσκησης η φωσφορυλάση και η γλυκογονόλυση επαναενεργοποιούνται πιθανά με τη δράση της επινεφρίνης. Πιθανά ενεργοποιούνται μυϊκές ίνες που δεν είχαν συσπασθεί προηγούμενα.

# Η ρύθμιση της γλυκογονόλυσης στο μυ κατά τη διάρκεια της άσκησης

- Ανόργανος φώσφορος: μπορεί να προκαλέσει αύξηση της γλυκογονόλυσης όταν αυξηθεί η συγκέντρωσή του παρά το ότι η φωσφορυλάση α μπορεί να μην αυξηθεί. Αυτό μπορεί να εξηγήσει τη συνεχόμενη γλυκογονόλυση κατά την άσκηση.
- Η μικρότερη συγκέντρωση φωσφόρου στους προπονημένους αερόβια μυς προκαλεί πιθανά μικρότερη εκτίναξη της γλυκογονόλυσης κατά την έναρξη της άσκησης.

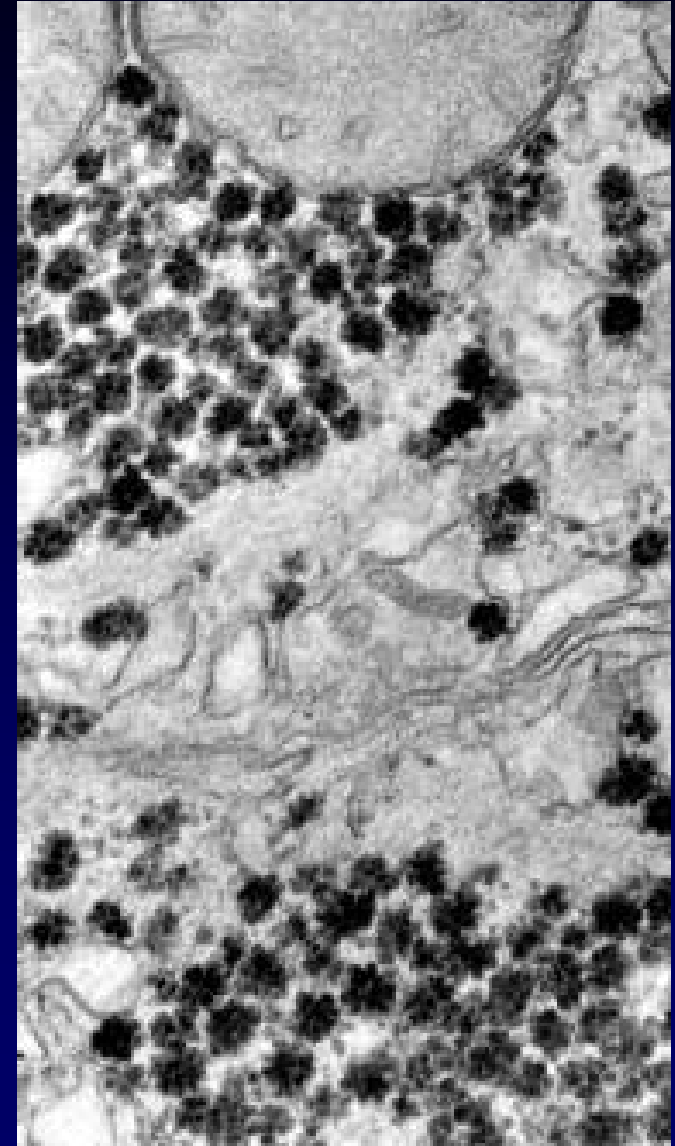


# Επιτάχυνση της γλυκογονόλυσης στο ήπαρ κατά την άσκηση

Γλυκόζη στο ήπαρ παράγεται από τη γλυκονεογένεση και τη γλυκογονόλυση

Η περιεκτικότητα του ήπατος σε γλυκογόνο επηρεάζεται πολύ από τη διατροφή: αν είναι φτωχή σε υδατάνθρακες η περιεκτικότητα μπορεί να κατέβει στο 0,5%, ενώ αν είναι πλούσια σε υδατάνθρακες φτάνει το 8%.

Τι υποδηλώνει αυτή η μεγάλη διακύμανση;

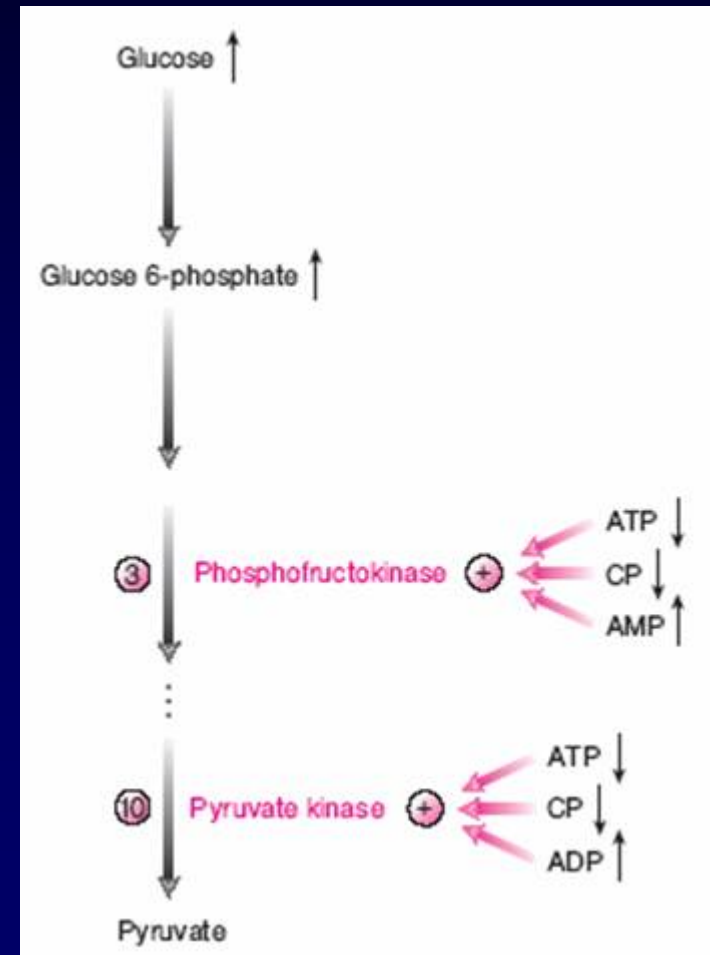


# Επιτάχυνση της γλυκόλυσης στους μύες κατά την άσκηση

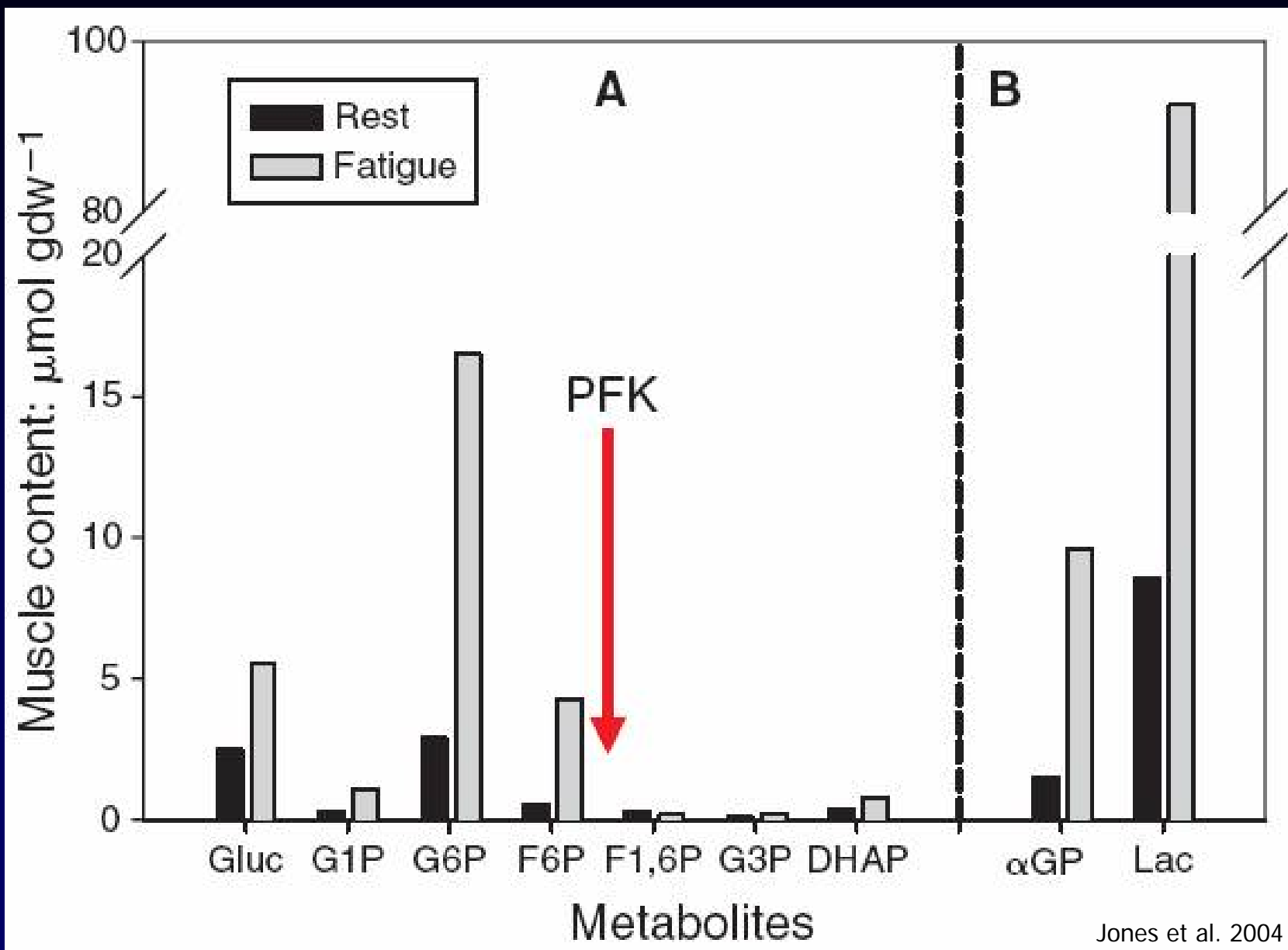
Προϊόντα της γλυκογονόλυσης είναι η 1-φωσφορική γλυκόζη και η γλυκόζη.  
Γλυκόζη υπάρχει στα κύτταρα και ανεξάρτητα από τη γλυκογονόλυση.

Η άσκηση μπορεί να αυξήσει κατά εκατοντάδες φορές την ταχύτητα της γλυκόλυσης σε ένα μυ με περισσότερους από έναν τρόπους:

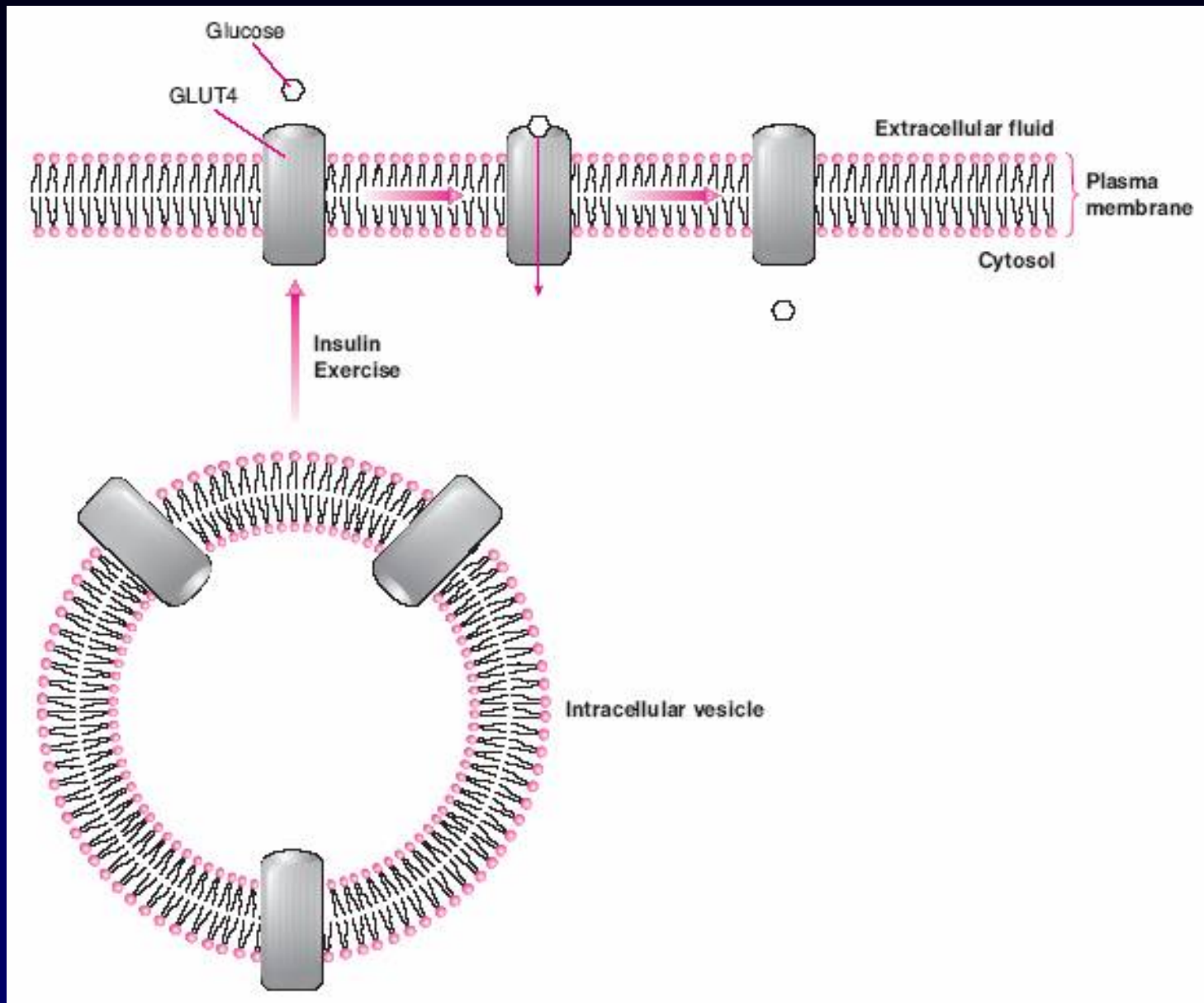
1. Αύξηση του υποστρώματος
2. Ενεργοποίηση της φωσφοφρουκτοκινάσης
3. Ενεργοποίηση της κινάσης του πυροσταφυλικού οξέος



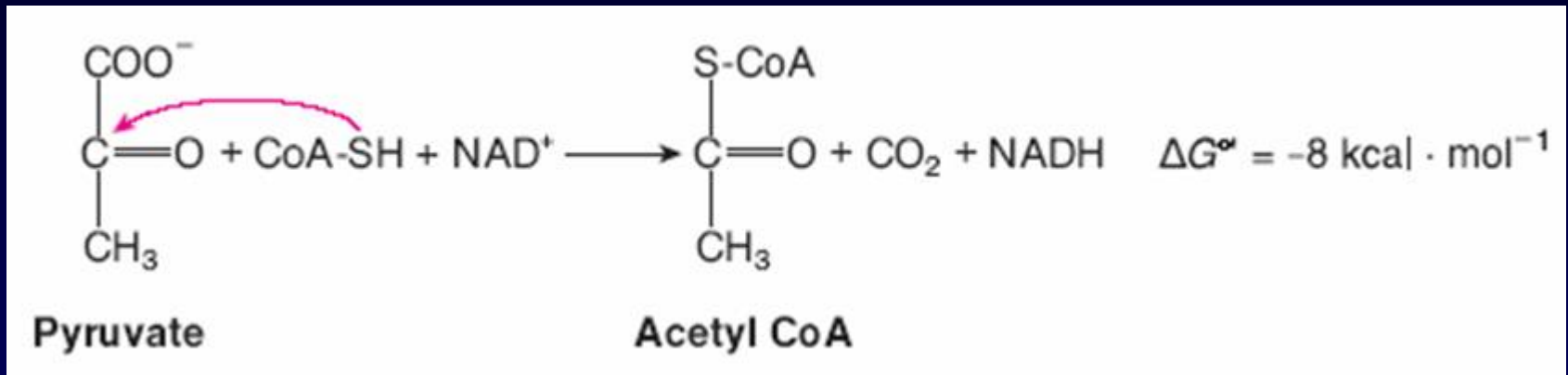
# Ένδειξη ότι η φωσφοφρουκτοκινάση είναι ο βηματοδότης της γλυκόλυσης κατά την άσκηση



# Η παλινδρόμηση των μεταφορέων γλυκόζης (GLUT4)

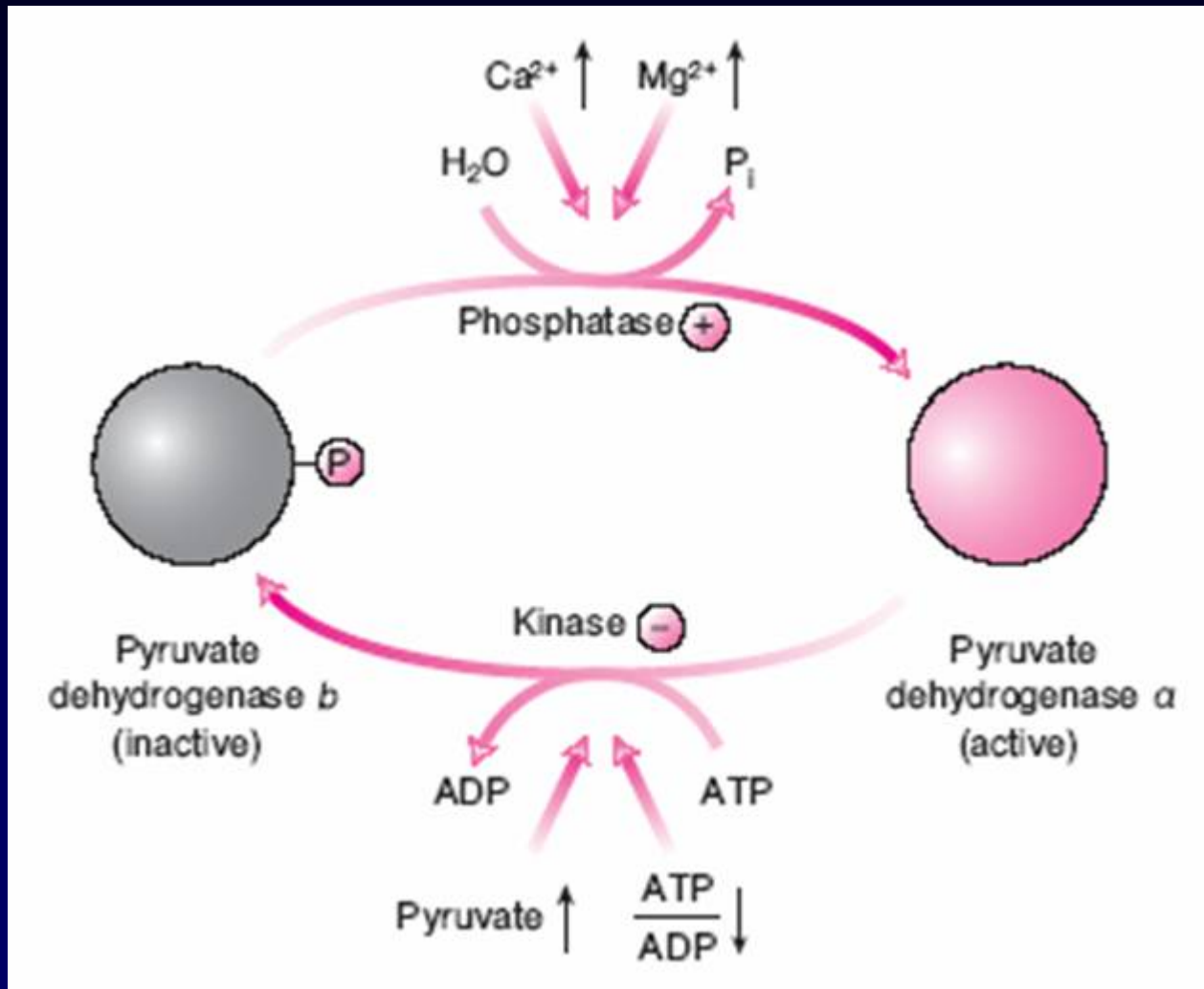


## Επιτάχυνση της οξείδωσης του πυροσταφυλικού οξέος στους μύες κατά την άσκηση



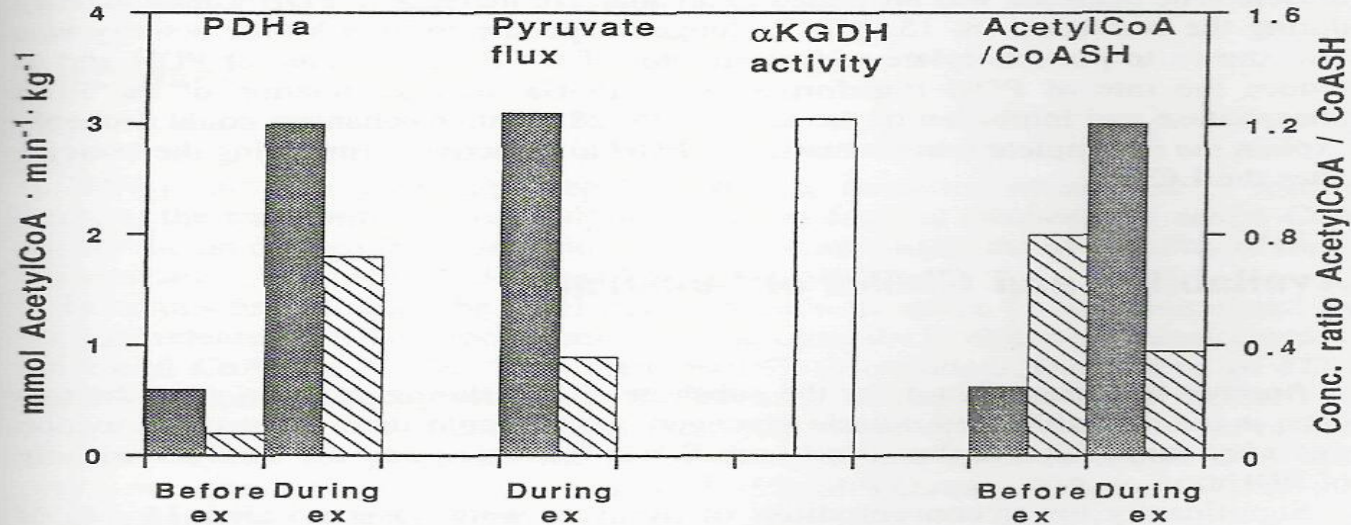
Η μετατροπή του πυροσταφυλικού οξέος σε ακετυλοσυνένζυμο Α καταλύεται από την αφυδρογονάση του πυροσταφυλικού οξέος.

# Ρύθμιση της αφυδρογονάσης του πυροσταφυλικού οξέος στους μύες κατά την άσκηση



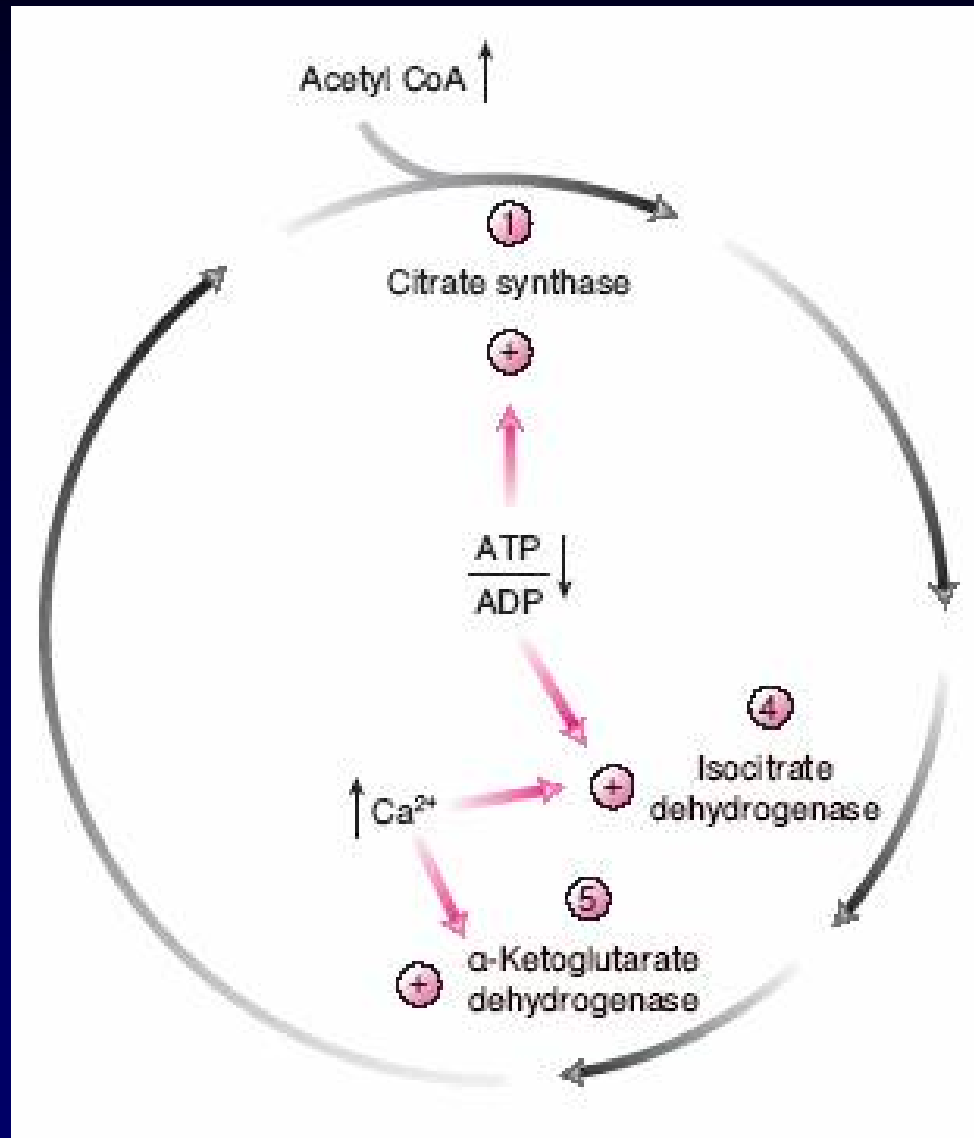
# Η αφυδρογονάση του πυροσταφυλικού οξέος

- Ενεργοποιείται από το ασβέστιο ενώ καταργείται προσωρινά κατά την άσκηση η αναστολή της από το ακετυλοσυνένζυμο και το NADH.
- όταν εξαντληθεί το γλυκογόνο, μειώνεται και η δραστικότητα της PDH κι αυξάνεται η οξείδωση των FFA.



**Figure 13.6** PDH activity and regulation during the two exercise periods described in figure 13.5a. Results after HCD are indicated by filled bars and after LCD by striped bars. PDHa activity in muscle samples obtained before and at the end of the exercise periods is determined in vitro. The pyruvate flux through PDH is calculated from glyco-gen degradation and glucose uptake, with deduction of pyruvate used for formation of lactate and anaplerotic substrates during the exercise period from 16 min to end of exercise ( $\approx 47$  min). The activity of  $\alpha$ -ketoglutarate dehydrogenase ( $\alpha$ KGDH) is a measure of the maximum flux through the TCA cycle. The concentration ratios of acetyl CoA to CoASH are measured in muscle samples obtained before and at the end of the exercise periods. The activity of  $\alpha$ KGDH is from Blomstrand, Ekblom, and Newsholme (2).

# Επιτάχυνση του κύκλου του κιτρικού οξέος στους μύες κατά την άσκηση





# Επιτάχυνση της αναπνευστικής αλυσίδας και της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης στους μύες κατά την άσκηση

Ο σημαντικότερος ρυθμιστής της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης είναι η συγκέντρωση του ADP

Επιτάχυνση της αναπνευστικής αλυσίδας και της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης στους μύες κατά την άσκηση έχει ως αποτέλεσμα:

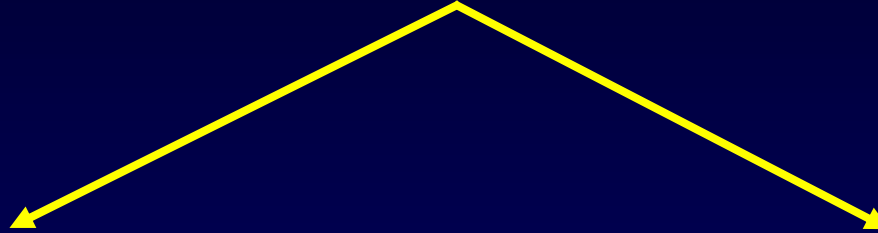
1. Την αύξηση της κατανάλωσης του οξυγόνου.
2. Τη μείωση της συγκέντρωσης του NADH, οπότε αίρεται η επιβράδυνση της οξείδωσης του πυροσταφυλικού οξέος και του κύκλου του κιτρικού οξέος.
3. Την επιτάχυνση της αναγέννησης των NAD<sup>+</sup> και FAD, χωρίς τα οποία δεν μπορούν να γίνουν οι οξειδώσεις κατά τη γλυκόλυση, η μετατροπή του πυροσταφυλικού οξέος σε ακετυλοσυνένζυμο Α και ο κύκλος του κιτρικού οξέος.

# Παραγωγή γαλακτικού οξέος στους μύες κατά την άσκηση

Η άσκηση επιταχύνει τη γλυκογονόλυση και τη γλυκόλυση

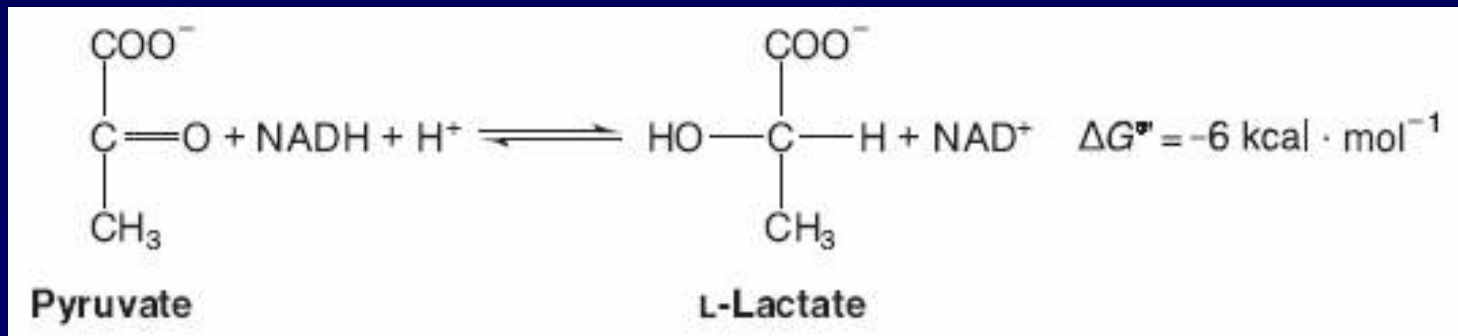


Η γλυκόλυση συνοδεύεται από τη μετατροπή  $\text{NAD}^+$  σε  $\text{NADH}$  στην 6η αντίδραση

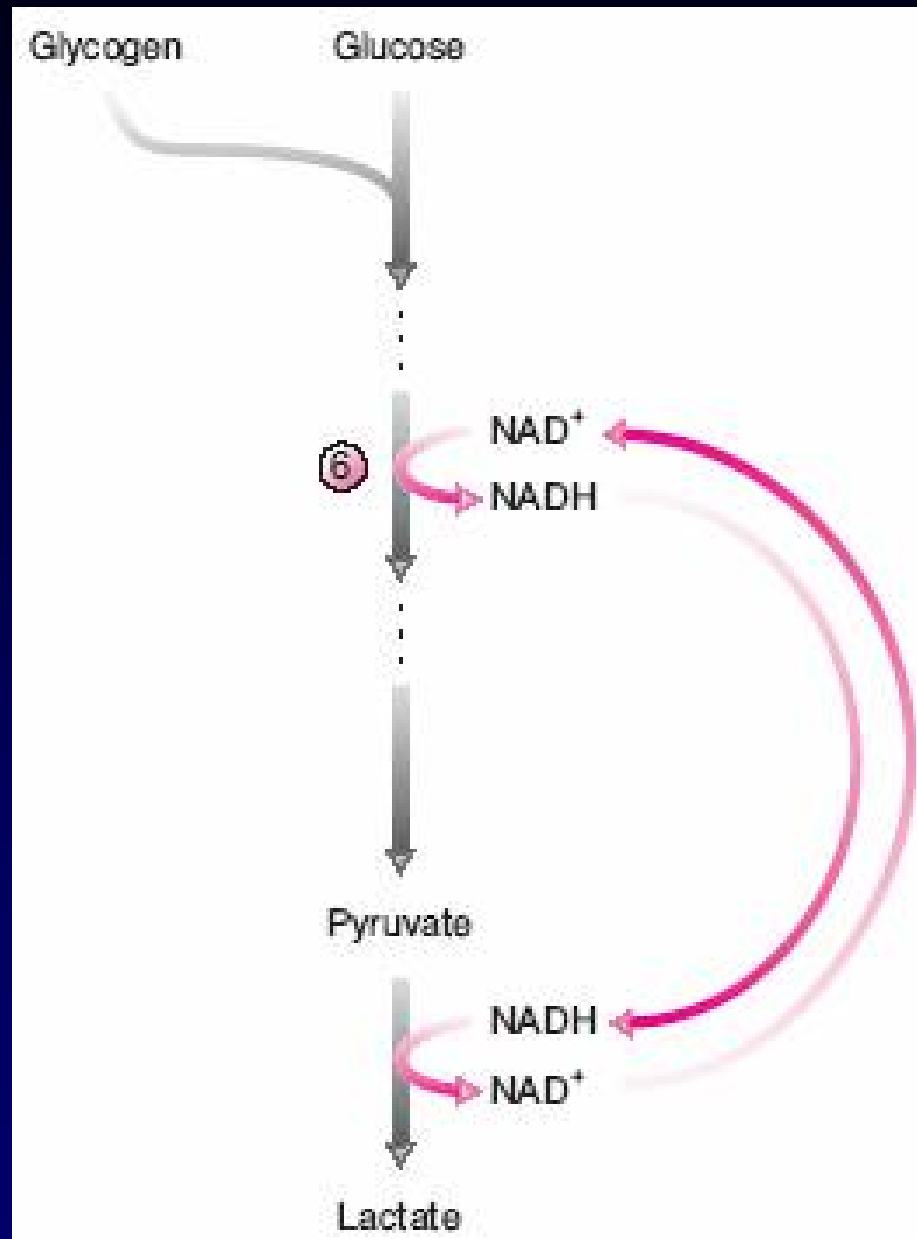


Αναγέννηση του  $\text{NAD}^+$  μέσω της αναπνευστικής αλυσίδας στο μιτοχόνδριο

Αναγέννηση του  $\text{NAD}^+$  μέσω μετατροπής του πυροσταφυλικού οξέος σε γαλακτικό οξύ



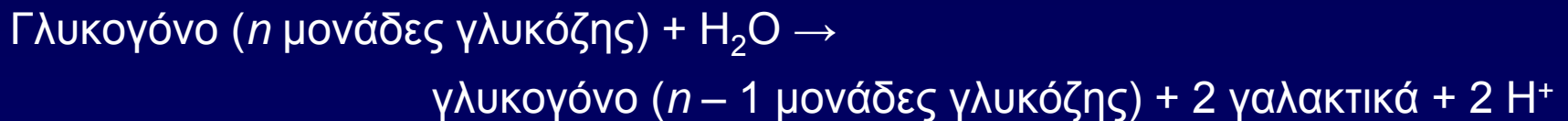
# Το όφελος από την παραγωγή γαλακτικού οξέος

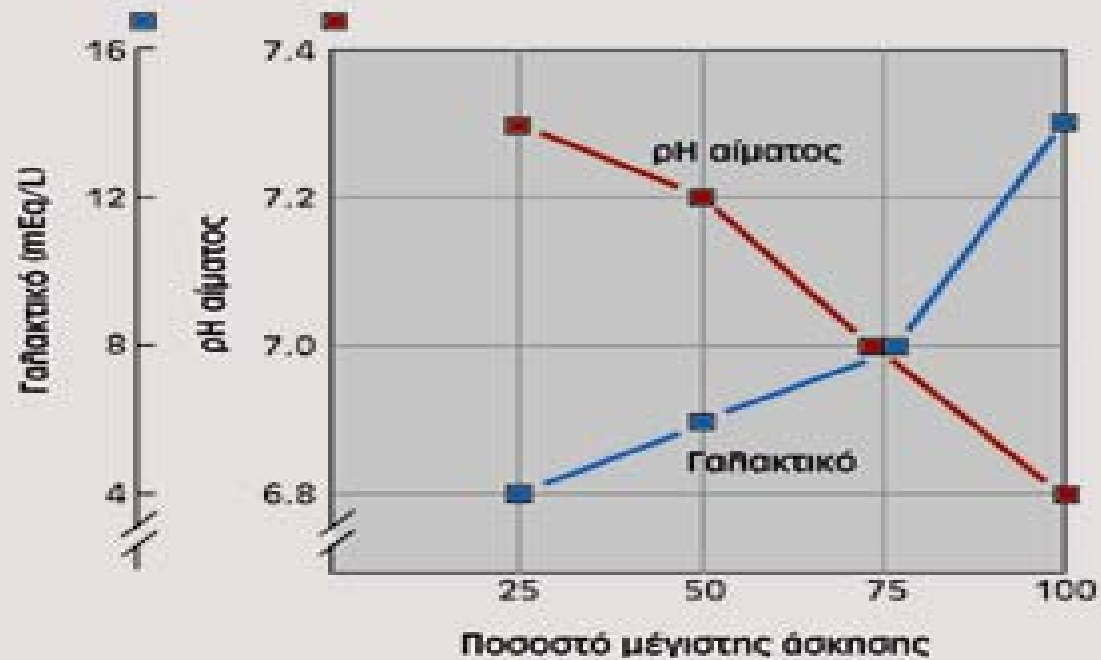
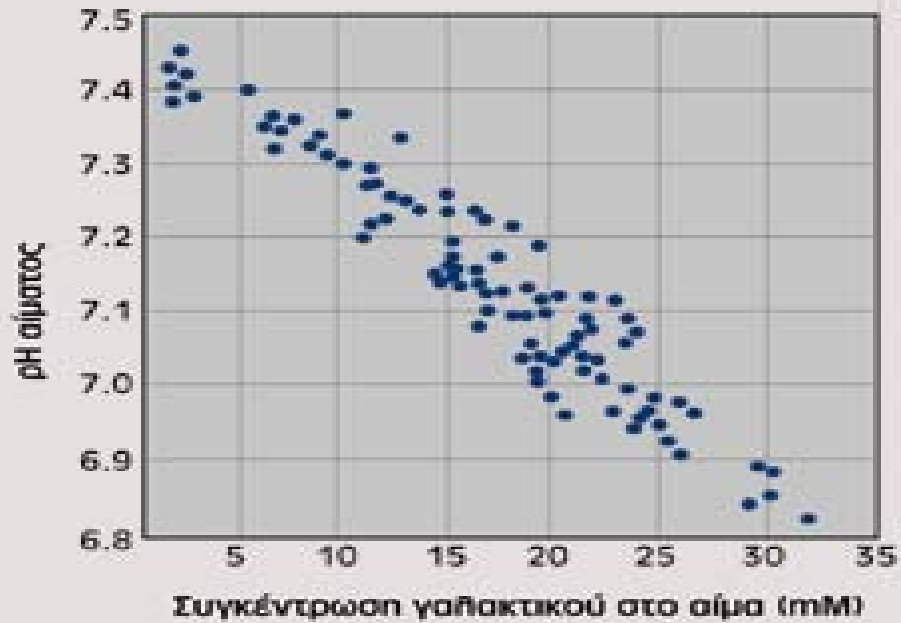


## Προκαλεί η αυξημένη παραγωγή γαλακτικού οξέος πτώση του pH;

Η συγκέντρωση γαλακτικού οξέος μπορεί να αυξηθεί από 1 mmol/kg σε ηρεμία στα 30 mmol/kg κατά τη διάρκεια μέγιστης άσκησης, πράγμα που δείχνει μαζικό αναερόβιο καταβολισμό υδατανθράκων.

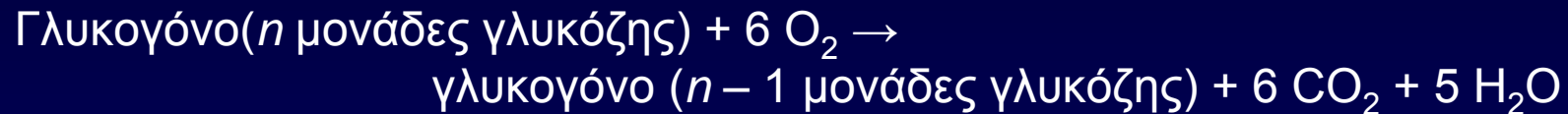
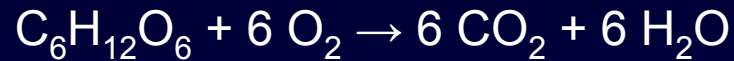
Αυτό συνοδεύεται από πτώση του pH, αφού η μετατροπή της γλυκόζης ή του γλυκογόνου σε γαλακτικό οξύ συνοδεύεται από παραγωγή H<sup>+</sup>:





## Προκαλεί η αυξημένη παραγωγή γαλακτικού οξέος πτώση του pH;

Αντίθετα, δεν υπάρχει καθαρή παραγωγή H<sup>+</sup> στον αερόβιο καταβολισμό των υδατανθράκων σε CO<sub>2</sub>:

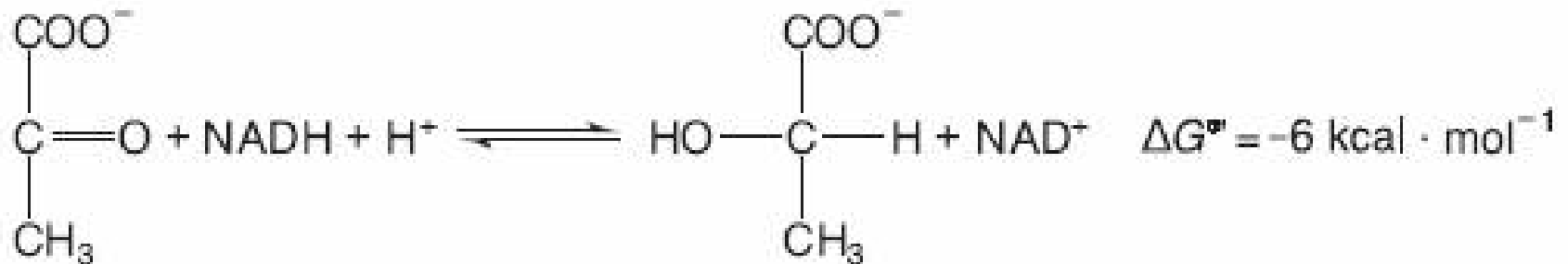


Ως αποτέλεσμα της παραγωγής πρωτονίων το κυτταροπλασματικό pH του μυός πέφτει από το 7-7,1 στην ηρεμία μέχρι και το 6,3.

Η παρουσία γαλακτικού και πρωτονίων στη δεξιά πλευρά των εξισώσεων δεν σημαίνει ότι τα πρωτόνια παράγονται από το γαλακτικό!

## Γιατί παράγεται γαλακτικό οξύ κατά την άσκηση;

Διότι, αφού κατά τη γλυκόλυση ένα  $\text{NAD}^+$  μετατρέπεται σε  $\text{NADH}$ , αυξάνεται ένα αντιδρών και μειώνεται ένα προϊόν στην αντίδραση μετατροπής του πυροσταφυλικού οξέος σε γαλακτικό οξύ και η αντίδραση ωθείται προς τα δεξιά.



Pyruvate

L-Lactate

# Χαρακτηριστικά της αναερόβιας διάσπασης των υδατανθράκων

1. Είναι αντισοικονομική. Αποδίδει μόλις 2 ATP ανά μόριο γλυκόζης έναντι των περίπου 30 που αποδίδει η αερόβια διάσπαση.
2. Είναι πολύ γρήγορη και αποδοτική. Η μέγιστη ταχύτητα ανασύνθεσης ATP από τη μετατροπή του **γλυκογόνου σε γαλακτικό οξύ** στους μύες υπολογίζεται σε **1,5 mmol/kg/s** και επιτυγχάνεται στα πρώτα **5 s** μέγιστης άσκησης. Αντίθετα, η μέγιστη ταχύτητα ανασύνθεσης ATP από τη μετατροπή του **γλυκογόνου σε CO<sub>2</sub>** υπολογίζεται σε **0,5 mmol/kg/s** και απαιτεί γύρω στο **1 min** μέγιστης άσκησης.
3. Η αναερόβια διάσπαση του γλυκογόνου αποτελεί την πιο γρήγορη πηγή ανασύνθεσης του ATP μετά τη φωσφοκρεατίνη. Υπερέχει μάλιστα απέναντί της ως προς την ποσότητα ATP που μπορεί να ανασυνθέσει (είναι περίπου δεκαπλάσια).



**Η αναερόβια διάσπαση των υδατανθράκων είναι η κύρια πηγή ενέργειας σε αθλήματα/αγωνίσματα που απαιτούν μέγιστη ένταση και διαρκούν από 7 s μέχρι 1 min όπως:**

1. Δρόμος 100, 200 και 400 m
2. Κολύμβηση 50 και 100 m
3. Χιονοδρομία κατάβασης

# Τύχες και αξιοποίηση του γαλακτικού οξέος

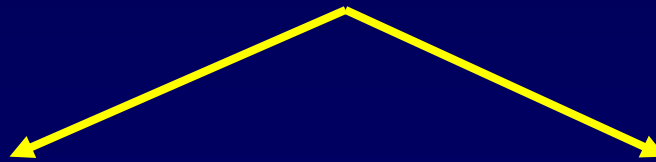
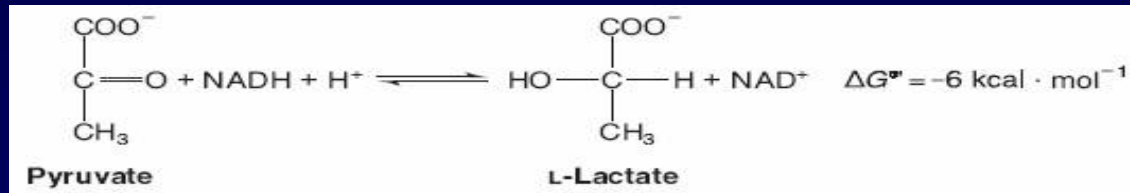
Έξοδος του γαλακτικού οξέος από τους ασκούμενους μύες και διασπορά του μέσω του αίματος σε όλο το σώμα.



Είσοδος του γαλακτικού οξέος σε όργανα και ιστούς όπου η συγκέντρωσή του είναι χαμηλότερη από εκείνη στο αίμα (πχ, καρδιά, ήπαρ, ξεκούραστοι μύες).



Στα κύτταρα όπου εισέρχεται το γαλακτικό οξύ μπορεί να οξειδωθεί προς πυροσταφυλικό οξύ.



Οξείδωση προς  $\text{CO}_2$  μέσω αερόβιων διεργασιών

Μετατροπή σε γλυκόζη (γλυκονεογένεση)

# Γλυκονεογένεση

Γλυκονεογένεση ονομάζεται η σύνθεση γλυκόζης από χημικές ενώσεις που δεν είναι υδατάνθρακες. Τέτοιες ενώσεις είναι το πυροσταφυλικό οξύ, το γαλακτικό οξύ, η γλυκερόλη και τα περισσότερα αμινοξέα.

Τα κύρια όργανα όπου πραγματοποιείται γλυκονεογένεση είναι το ήπαρ και οι νεφροί. Γλυκονεογένεση δεν συμβαίνει στους μύες επειδή στερούνται του ενζύμου φωσφατάση της 6-φωσφορικής γλυκόζης.

Αυτή η έλλειψη δεν είναι απαραίτητα μειονέκτημα για το μυ αφού :

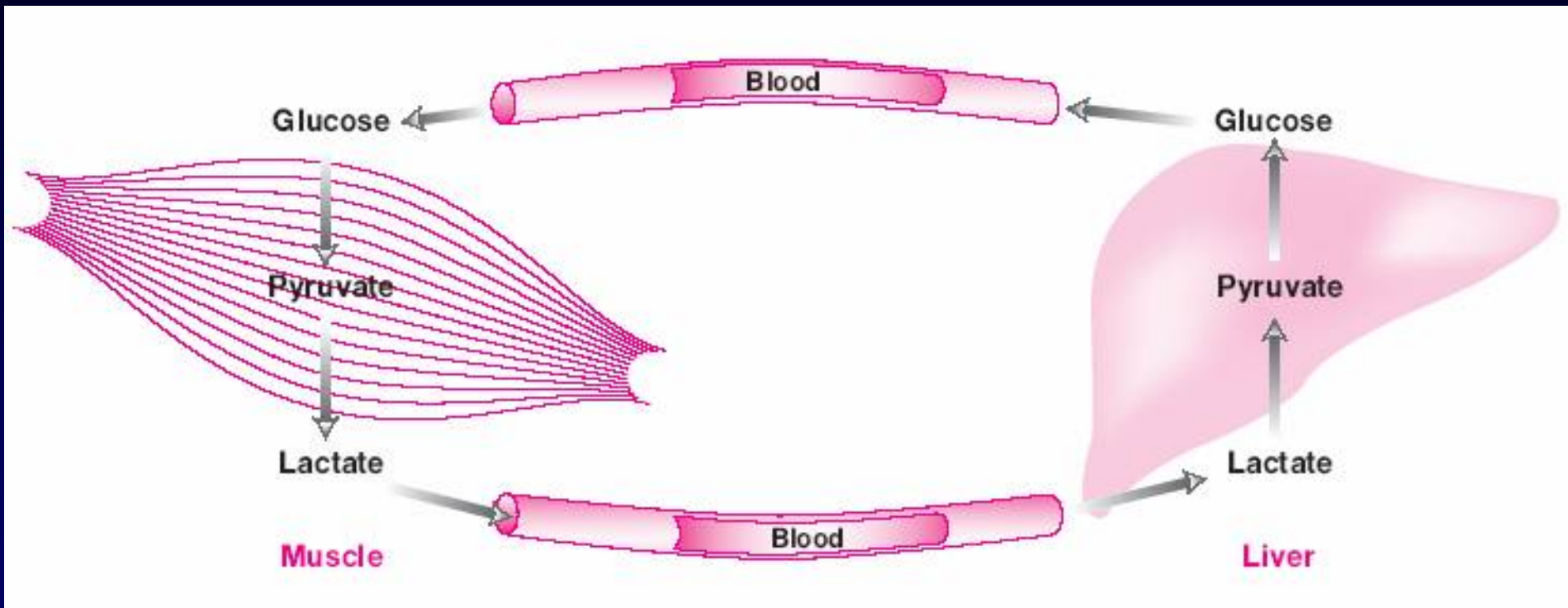
- Ταιριάζει στον κύριο βιολογικό ρόλο των μυών που είναι η κίνηση του σώματος.
- Εμποδίζει την 6-φωσφορική γλυκόζη που προέρχεται από τη διάσπαση του γλυκογόνου να μετατραπεί σε γλυκόζη και να διαχυθεί έξω από τις μυϊκές ίνες.

# Επιτάχυνση της γλυκονεογένεσης στο ήπαρ κατά την άσκηση

Η άσκηση προσφέρει αυξημένες πρώτες ύλες για γλυκονεογένεση όπως:

1. Γαλακτικό οξύ
2. Μέρος των προϊόντων της διάσπασης των λιπιδίων (πχ, γλυκερόλη)
3. Μέρος των προϊόντων της διάσπασης των πρωτεϊνών

## Ο κύκλος των Cori

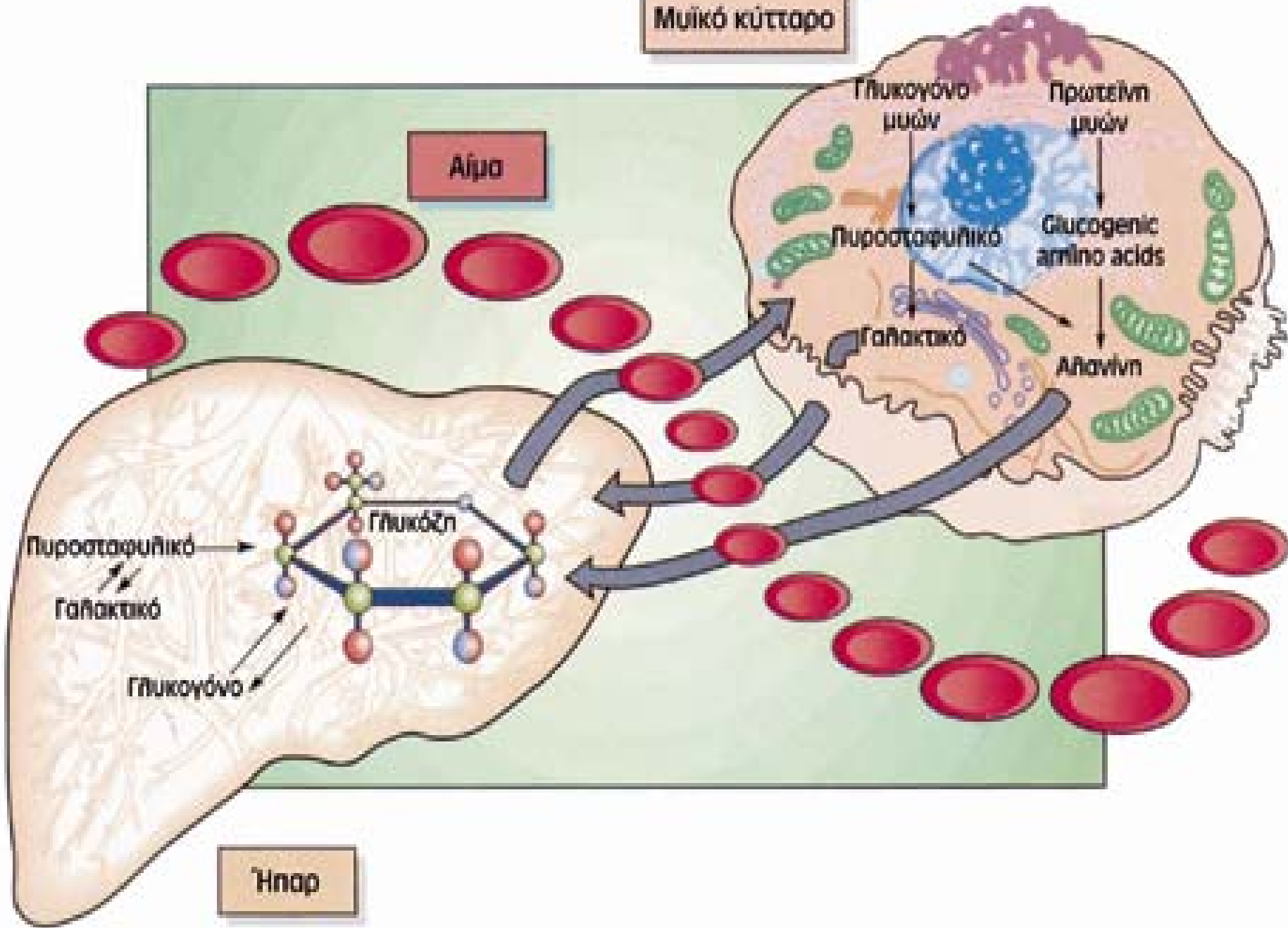


Μέσω του κύκλου των Cori ο ασκούμενος μυς μετατοπίζει μέρος της επιβάρυνσής του στο ήπαρ

Μυϊκό κύτταρο

Αίμα

Ήπαρ



Γλυκογόνο μυών

Πρωτεΐνη μυών

Πυροσταφυϊκό

Glucogenic amino acids

Γαλακτικό

Αλανίνη

Πυροσταφυϊκό

Γλυκόζη

Γαλακτικό

Γλυκογόνο

**TAINIA 7**

# Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση I

Η διατήρηση μιας σχετικά σταθερής συγκέντρωσης γλυκόζης στο αίμα είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του οργανισμού.

Για αυτό το λόγο, ο οργανισμός διαθέτει μια σειρά ομοιοστατικών μηχανισμών που προστατεύουν τη συγκέντρωση της γλυκόζης στο πλάσμα από δραστικές αυξομειώσεις.

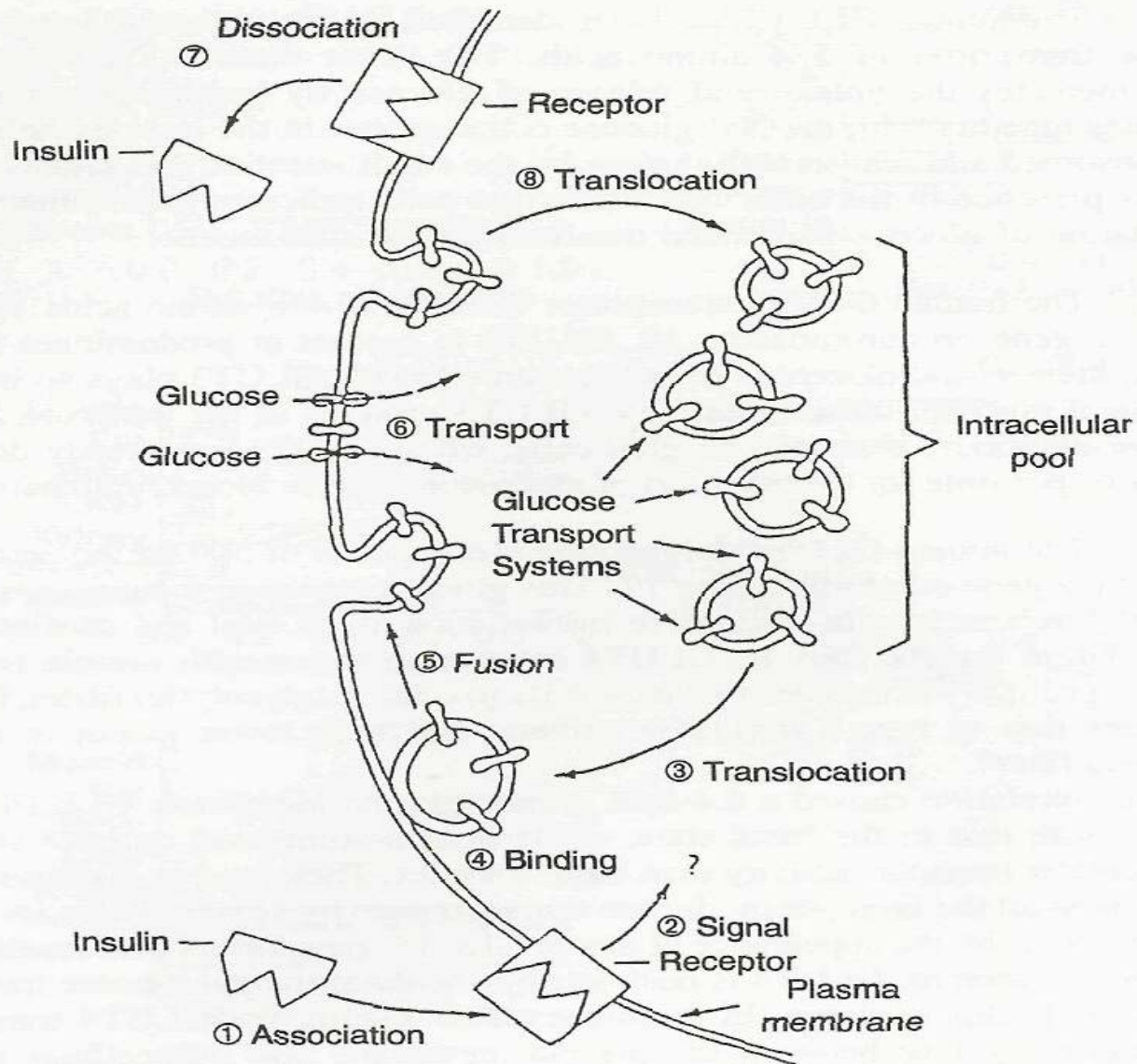
Κύριος ρυθμιστής της συγκέντρωσης της γλυκόζης είναι η ινσουλίνη της οποίας η έκκριση σχετίζεται θετικά με τη συγκέντρωση της γλυκόζης στο πλάσμα.



# TAINIA 8

# ΓΛΟΥΚΟΜΕΤΑΦΟΡΕΙΣ

- Στο μυ είναι οι GLUT4 (509 αμινοξέα, γονίδιο στο χρωμόσωμα 17).
- Βρίσκεται σε ιστούς ευαίσθητους στη δράση της ινσουλίνης (μυς, καρδιά, λίπος).
- Η έκφρασή του διαφέρει μεταξύ των διαφόρων τύπων μυϊκών ινών (IIa > I > IIβ).
- Υπάρχει συνεχής ανακύκλωση αυτών των μεταφορέων μεταξύ κυτταρικής μεμβράνης και κυτοσολικών κυστιδίων.
- Η άσκηση αυξάνει την ευαισθησία δράσης της ινσουλίνης στο μυ ενώ οι μηχανισμοί εισόδου της γλυκόζης στο μυ που εξαρτώνται από την άσκηση και την ινσουλίνη δρουν συνεργαστικά κατά την άσκηση.
- Η άσκηση προκαλεί αύξηση σε τοπικούς παράγοντες (MAF), τοπικής ροής του αίματος, της σύνδεσης της ινσουλίνης στους υποδοχείς της, της ενδοκυττάριας συγκέντρωσης ασβεστίου. Παρόλα αυτά, η αύξηση της εισόδου της γλυκόζης στα μυϊκά κύτταρα κατά την άσκηση οφείλεται στην αύξηση της δραστηριότητας και του αριθμού των GLUT4.

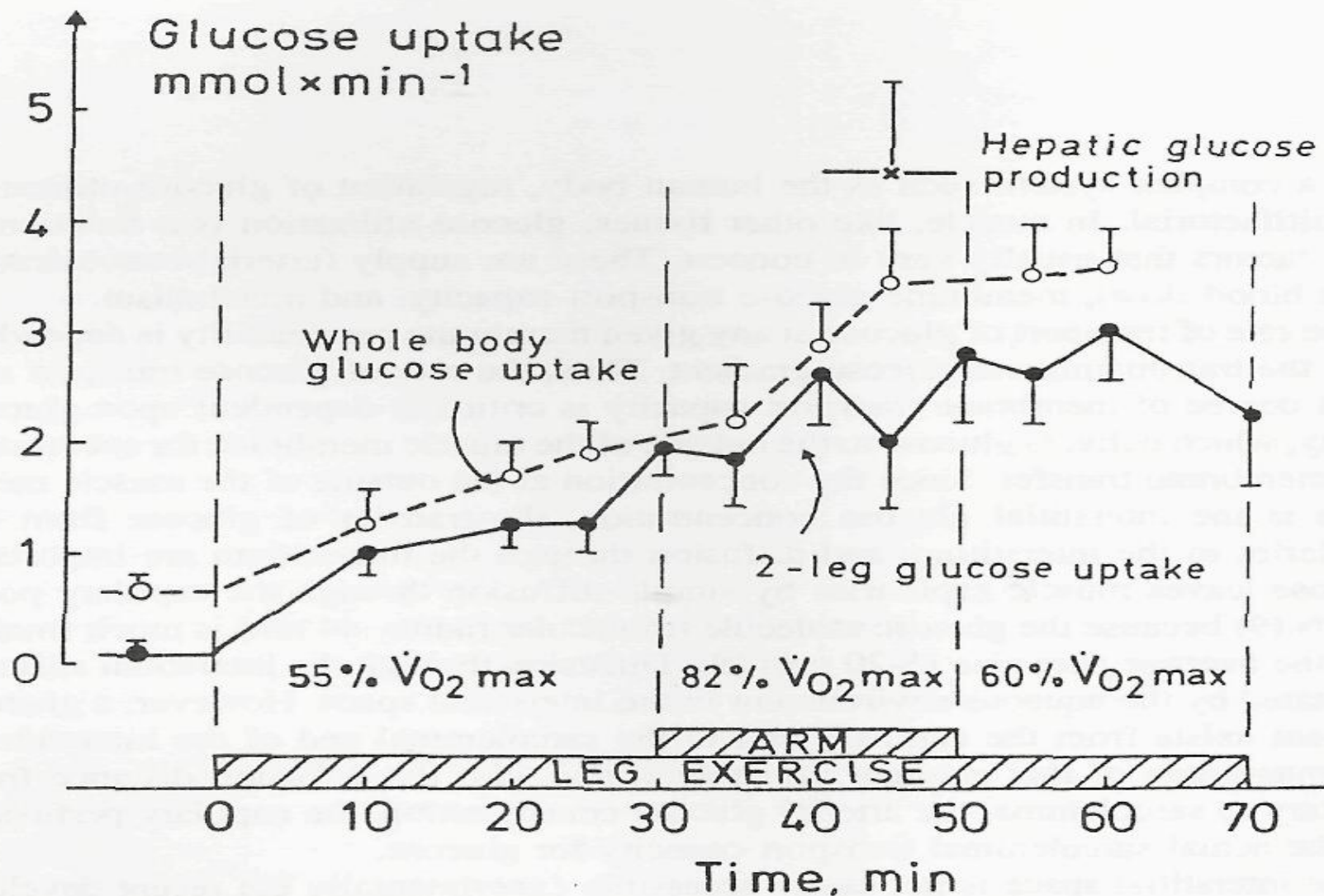


**Figure 4.3** Schematic representation of a hypothetical mechanism of insulin's stimulatory action on glucose transport in the isolated rat epididymal adipose cell.

Reprinted from Karnieli et al. 1981.

# Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΗΣ ΓΛΥΚΟΖΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΜΥΪΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

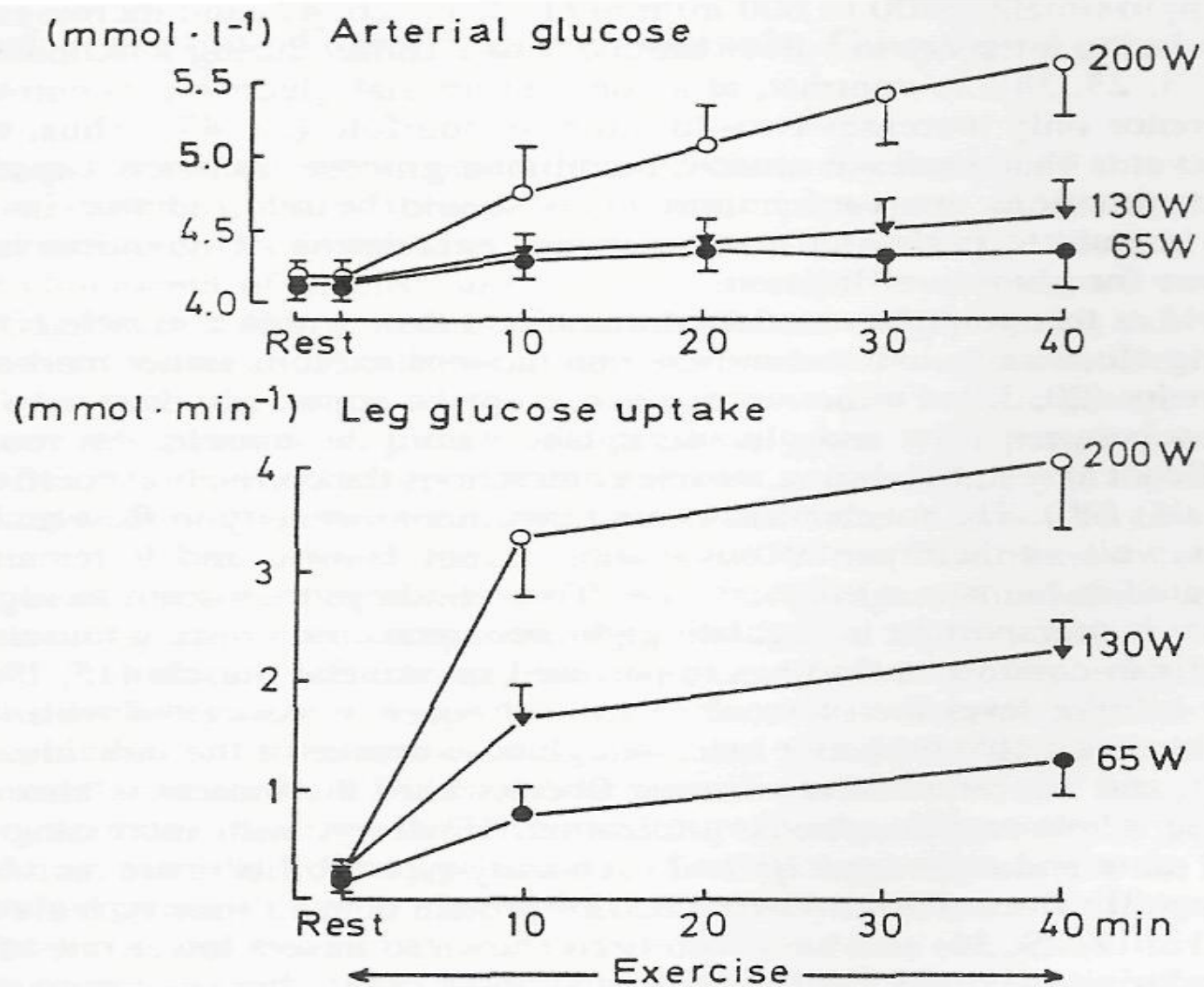
- Αυξάνεται με την αύξηση της έντασης της άσκησης. Παρόλα αυτά, κατά την έναρξη της άσκησης μπορεί να έχουμε αύξηση της απελευθέρωσης γλυκόζης από το μυ εξαιτίας της απότομης αύξησης της γλυκογονόλυσης, την μεγάλη αύξηση της 6-P-Glucose και την δράση του αποκλαδωτικού ένζυμου. Όλα αυτά αναστέλλουν την εξοκινάση.
- Το όλο φαινόμενο διαρκεί μόνο 1-2 λεπτά και μετά αντιστρέφεται αφού η γλυκογονόλυση μειώνεται από εκεί και πέρα. Μπορεί όμως να οφείλεται και στην αυξημένη σύνδεση της εξοκινάσης στα μιτοχόνδρια που έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της δυνατότητας της 6-P-Glucose να αναστέλλει το ένζυμο.
- Η αύξηση της ροής του αίματος συμβάλλει περισσότερο στην αύξηση της πρόσληψης της γλυκόζης (αύξηση κατά 20 φορές σε σχέση με την ηρεμία).
- Αύξηση της ενεργοποίησης περισσότερων μυϊκών ινών με την αύξηση της επιβάρυνσης της άσκησης.



**Figure 5.1** Isotopically measured whole-body glucose disappearance (dotted line) and directly measured two-leg glucose uptake (solid line) in man at rest and during ergometer cycling with legs only and with added arm cranking from 30 to 50 min of exercise. Values are means  $\pm$  SE of seven observations.

Reprinted from Kjær, Kiens, Hargreaves, and Richter 1991.





**Figure 5.2** Arterial blood glucose concentration and leg glucose uptake at rest and during ergometer cycling with the legs. Open circles = 200 W; closed triangle = 130 W; closed circles = 65 W.

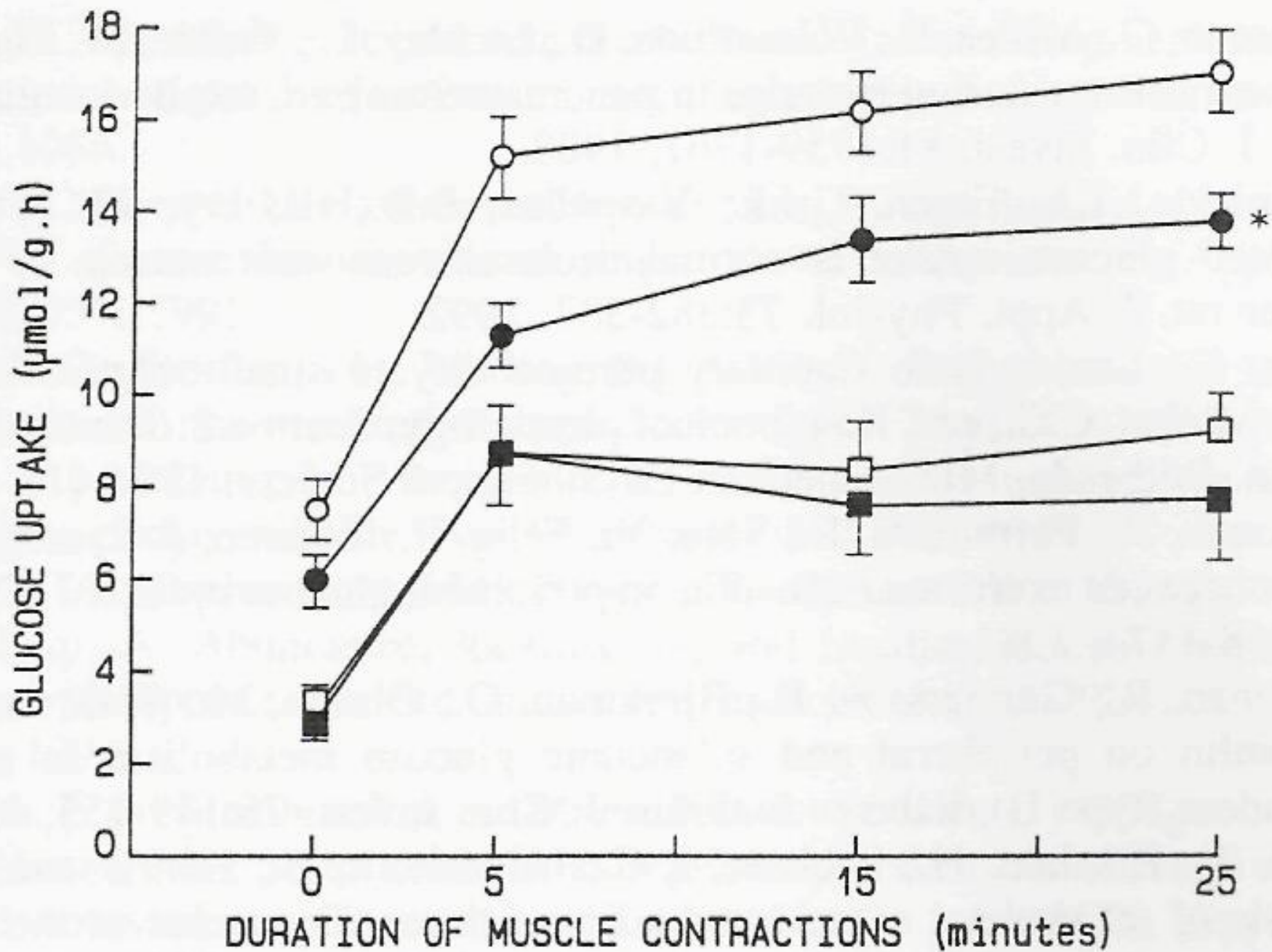
Reprinted from Wahren, Felig, and Hagenfeldt 1978.

# ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΓΛΥΚΟΖΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΜΥΪΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

## Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

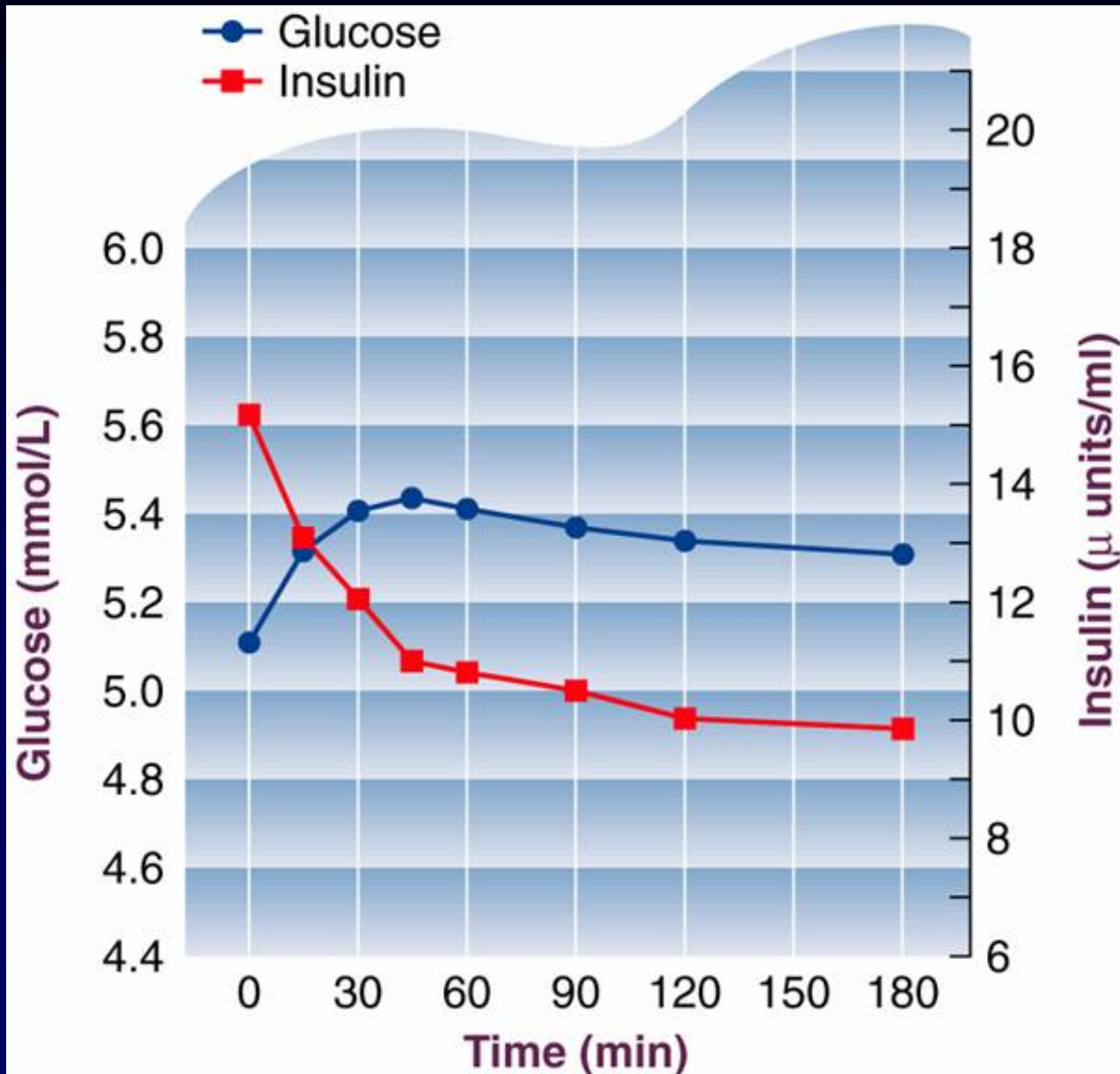
Σε άσκηση σταθερής έντασης μεγάλης διάρκειας:

- Αυξάνεται στα 4-5 πρώτα λεπτά και στη συνέχεια σταθεροποιείται χωρίς σημαντικές διαφοροποιήσεις.
- Η γλυκόζη στο αίμα διατηρείται σταθερή μέχρι να μειωθεί η δυνατότητα ηπατικής παραγωγής γλυκόζης.
- Η αύξηση της διαπερατότητας της γλυκόζης από τη μεμβράνη αυξάνεται άμεσα (λιγότερο στην αρχή και περισσότερο στη συνέχεια).
- Στην αρχή η συσσώρευση της 6-φωσφορικής γλυκόζης μπορεί να περιορίσει την πρόσληψη γλυκόζης από το μυ. Στη συνέχεια, η ένωση της εξοκινάσης με το μιτοχόνδριο αναστρέφει την κατάσταση.
- Η αύξηση των FFA στο αίμα μπορεί να περιορίσει την οξείδωση της γλυκόζης από το μυ.
- Η αδενοσίνη αυξάνει την πρόσληψη γλυκόζης από το μυ (εξαιτίας αύξησης στη ροή του αίματος ή αύξηση της ευαισθησίας δράσης της ινσουλίνης;).





# Επίδραση της άσκησης στη συγκέντρωση της γλυκόζης και της ινσουλίνης στο αίμα



# Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση II

Η ινσουλίνη επιταχύνει:

- τη γλυκογονοσύνθεση στους μύες και στο ήπαρ
- τη γλυκόλυση στο ήπαρ

Η ινσουλίνη απιβραδύνει:

- τη γλυκογονόλυση στους μύες και στο ήπαρ
- τη γλυκονεογένεση στο ήπαρ

Όλες αυτές οι επιδράσεις μειώνουν τη συγκέντρωση της γλυκόζης στο πλάσμα

Τι συμβαίνει όμως κατά τη διάρκεια της άσκησης όπου ο ρυθμός πρόσληψης της γλυκόζης από τους μύες πολλαπλασιάζεται;

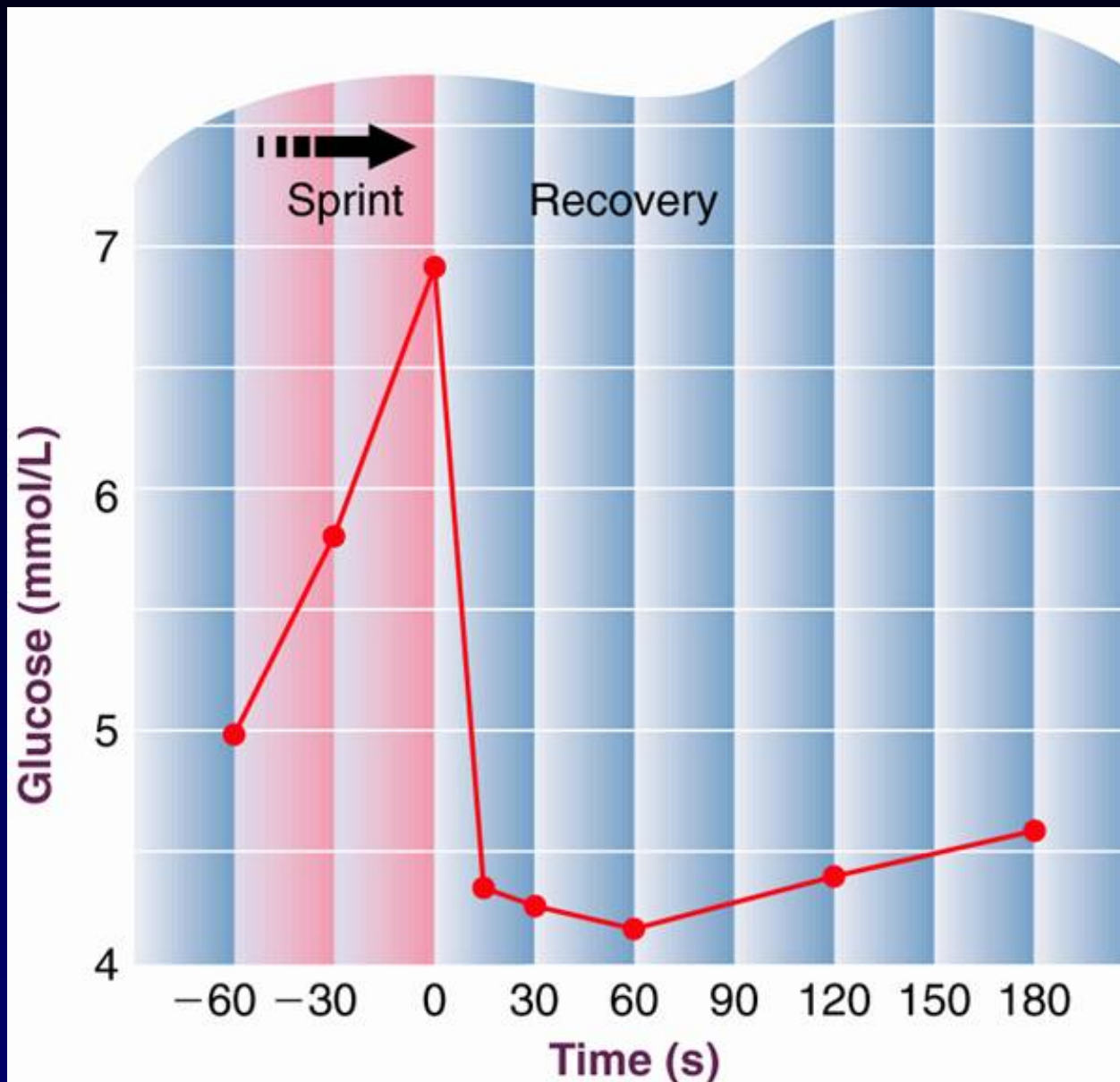
# Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση III

Κατά την άσκηση:

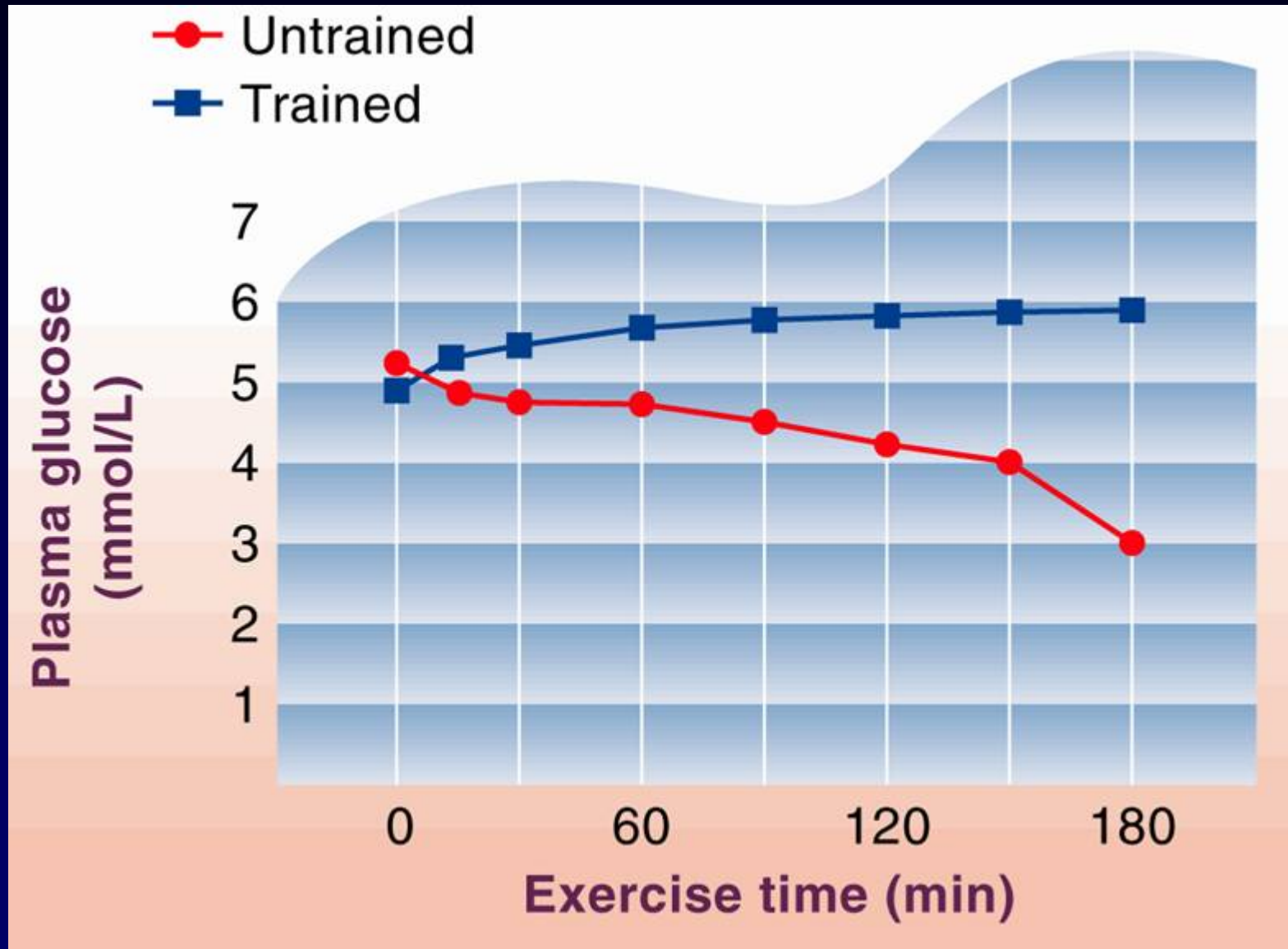
- Ενεργοποιείται η φωσφορυλάση α με αποτέλεσμα την αύξηση της γλυκογονόλυσης.
- Αυξάνεται η έκκριση της επινεφρίνης και της γλυκαγόνης με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της γλυκονεογένεσης και της γλυκογονόλυσης στο ήπαρ.
- Ελάττωση της έκκρισης της ινσουλίνης

Τελικά, πώς επιδρά η άσκηση στη συγκέντρωση της γλυκόζης στο πλάσμα;

# Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση



# Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση σε προπονημένους και απροπόνητους



# ΓΑΛΑΚΤΙΚΟ ΟΞΥ

- ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΓΑΛΑΚΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
- ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΠΟΝΗΣΗΣ
- ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

# Γαλακτικό οξύ

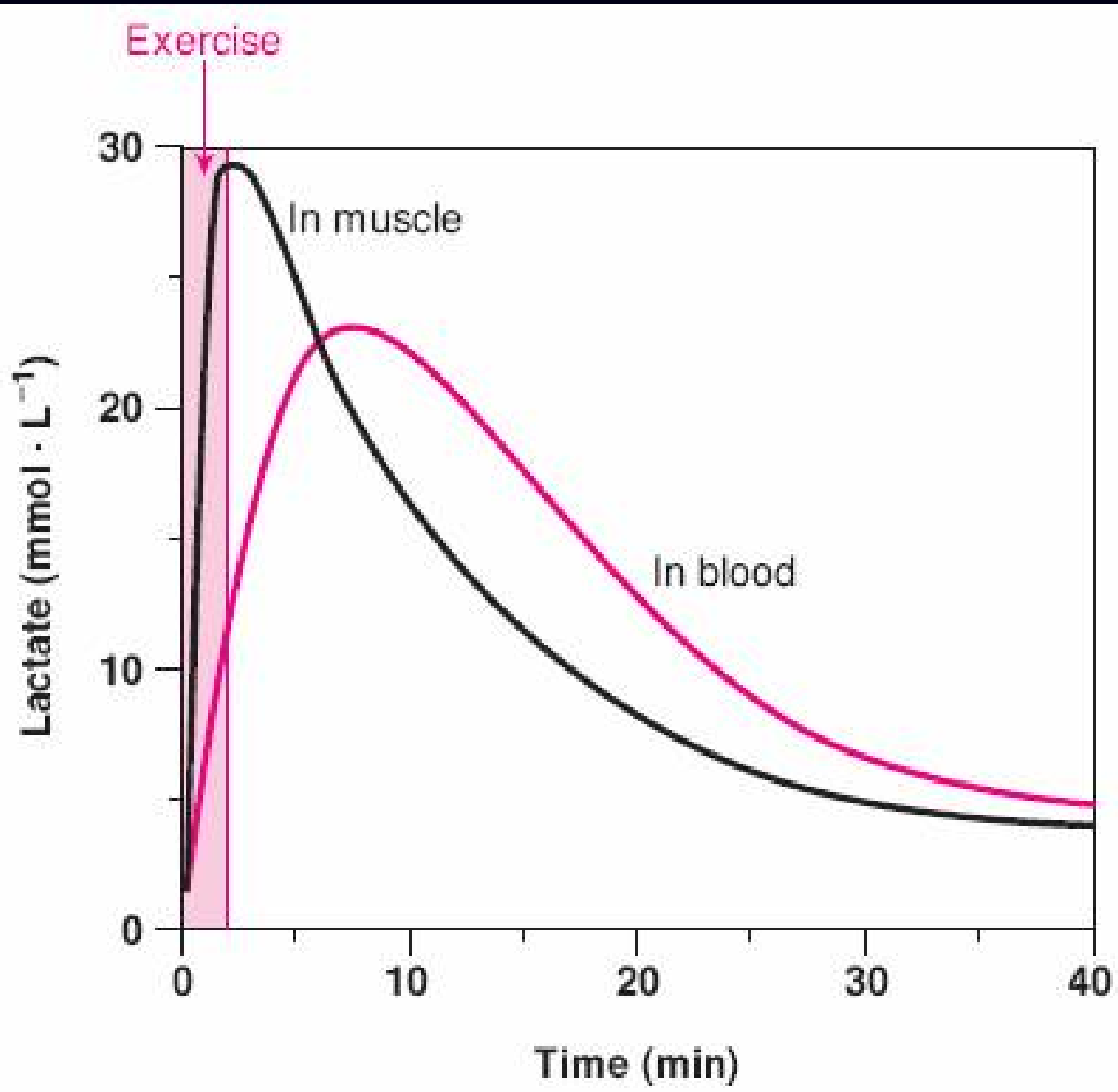
- Τιμή ηρεμίας = 0.7 mM
- Μέγιστη τιμή μετά από άσκηση = 25 mM
- Απομάκρυνση Γ.Ο. από τους ξεκούραστους μύες, τα ήπαρ (κύκλος του Cori) και την καρδιά (Lactate sink)
- Μέγιστη τιμή 5 λεπτά μετά το τέλος της άσκησης
- Χρόνος υποδιπλασιασμού ( $t_{1/2}$ ) = 15 λεπτά
- Ενεργητική αποκατάσταση

# Συσώρευση γαλακτικού οξέος στο αίμα

- Σε κατάσταση ηρεμίας η συγκέντρωση του γαλακτικού οξέος βρίσκεται σε μια σχετικά σταθερή κατάσταση, κατά την οποία η ταχύτητα εμφάνισης του στο αίμα είναι ίση με την ταχύτητα εξαφάνισής του προς τους άλλους ιστούς.
- Με το ξεκίνημα μιας άσκησης η σταθερή κατάσταση του γαλακτικού οξέος διαταράσσεται επειδή αυξάνεται η ταχύτητα εμφάνισής του στο αίμα...



## Συσσώρευση γαλακτικού οξέος στο αίμα



# Συσσώρευση γαλακτικού οξέος στο αίμα

- Ρυθμός παραγωγής στα μυϊκά κύτταρα
- Ρυθμός διάχυσης από τα κύτταρα στο αίμα
- Ρυθμός απομάκρυνσης από το αίμα
- Βαθμός εξουδετέρωσης από τα ρυθμιστικά συστήματα του αίματος

# Απομάκρυνση του γαλακτικού οξέος από τους μύες

- Ο χρόνος ημιζωής του γαλακτικού οξέος στο αίμα είναι τουλάχιστον 12 min
- Η απομάκρυνση του γαλακτικού οξέος είναι γρηγορότερη όταν ακολουθείται άσκηση χαμηλής έντασης.

# Παράγοντες επηρεασμού της [Γ.Ο.] κατά την άσκηση

- Τύπος μυϊκών ινών
- Διαθεσιμότητα ενεργειακών καυσίμων
- Προπονητική κατάσταση
- Υψόμετρο
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος

# Τύπος μυϊκών ινών

- Η ΒΣ:ΤΣ προσιδιάζει πως ο γενετικός παράγοντας επηρεάζει το γαλακτικό κατώφλι και την ικανότητα βελτίωσης του γαλακτικού κατωφλιού.
- Μεγαλύτερη [Γ.Ο] στις μυϊκές ίνες ΤΣ
- Συλλεκτικότητα κινητικών μονάδων (I, IIα, IIβ). Τα άτομα τα οποία έχουν μεγαλύτερη [I] και [IIα] μπορούν να φτάσουν σε μεγαλύτερης έντασης άσκησης πριν να παρατηρηθεί το γαλακτικό κατώφλι.

# Διαθεσιμότητα ενεργειακών καυσίμων

- Πιθανολογείται ότι με την μεγαλύτερη κατανάλωση λίπους μπορεί να επιβραδυνθεί η παραγωγή Γ.Ο. Δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο κάτι τέτοιο και επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αρνητική επίπτωση που έχει η διατροφή με πολλά λιπαρά στην υγεία.

# Προπονητική κατάσταση

- Με την προπόνηση μειώνεται η συμμετοχή του μεταβολισμού των CHO και η [Γ.Ο.] στον μυ κατά την άσκηση.
- Γιατί;
  - ↑ [μιτοχονδρίων]
  - ↑ Ενζυματικής δραστηριότητας
  - ↑ Πυκνότητας τριχοειδών αγγείων

# Υψόμετρο

- Η συγκέντρωση του γαλακτικού οξέος είναι μεγαλύτερη σε μεγάλο υψόμετρο κατά την υπομέγιστη άσκηση.
- Γιατί;
- Μικρότερη συμμετοχή του αερόβιου μηχανισμού λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης οξυγόνου



# Θερμοκρασία περιβάλλοντος

↑  $\dot{V}O_2\max$ , time to exhaustion

↑ [Γ.Ο.] σε παρατεταμένη άσκηση

↑ Το Γ.Κ. συμβαίνει σε υψηλότερες εντάσεις απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία

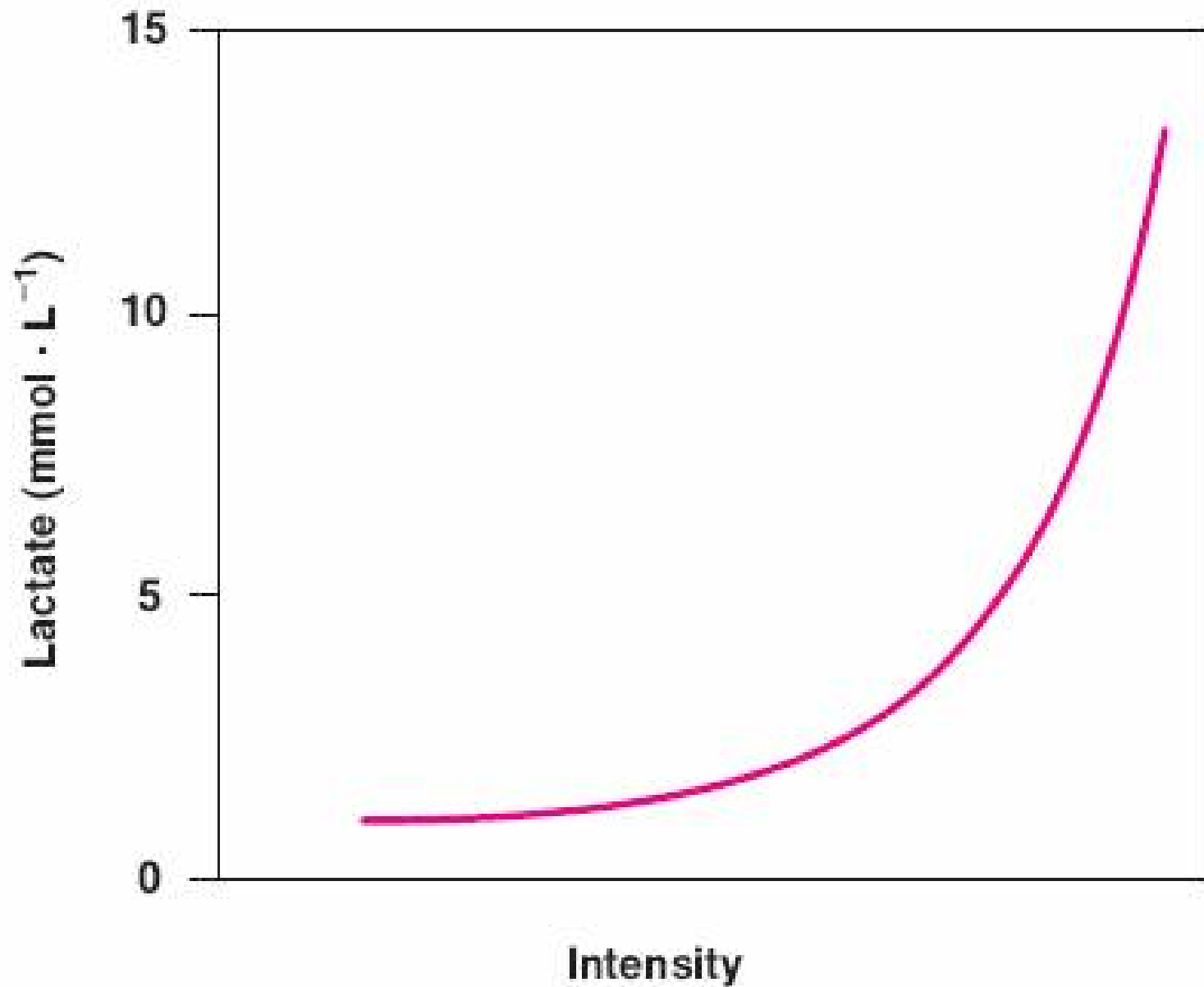
# Εξουδετέρωση Γ.Ο.

- Ανθρακικό οξύ (ασθενές οξύ)- $\text{H}_2\text{CO}_3$
- Διτανθρακικό νάτριο (αλκάλι)- $\text{NaHCO}_3$
  
- $\text{Γ.Ο.} + \text{NaHCO}_3 = \text{Γ.Νάτριο} + \text{H}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

# ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΓΑΛΑΚΤΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ

- $[Γ.Ο.] = 4 \text{ mM}$
- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΕΡΟΒΙΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ
- ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΟΧΩΝ ΠΡΟΠΟΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
- ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΠΟΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

## «Κατώφλια»

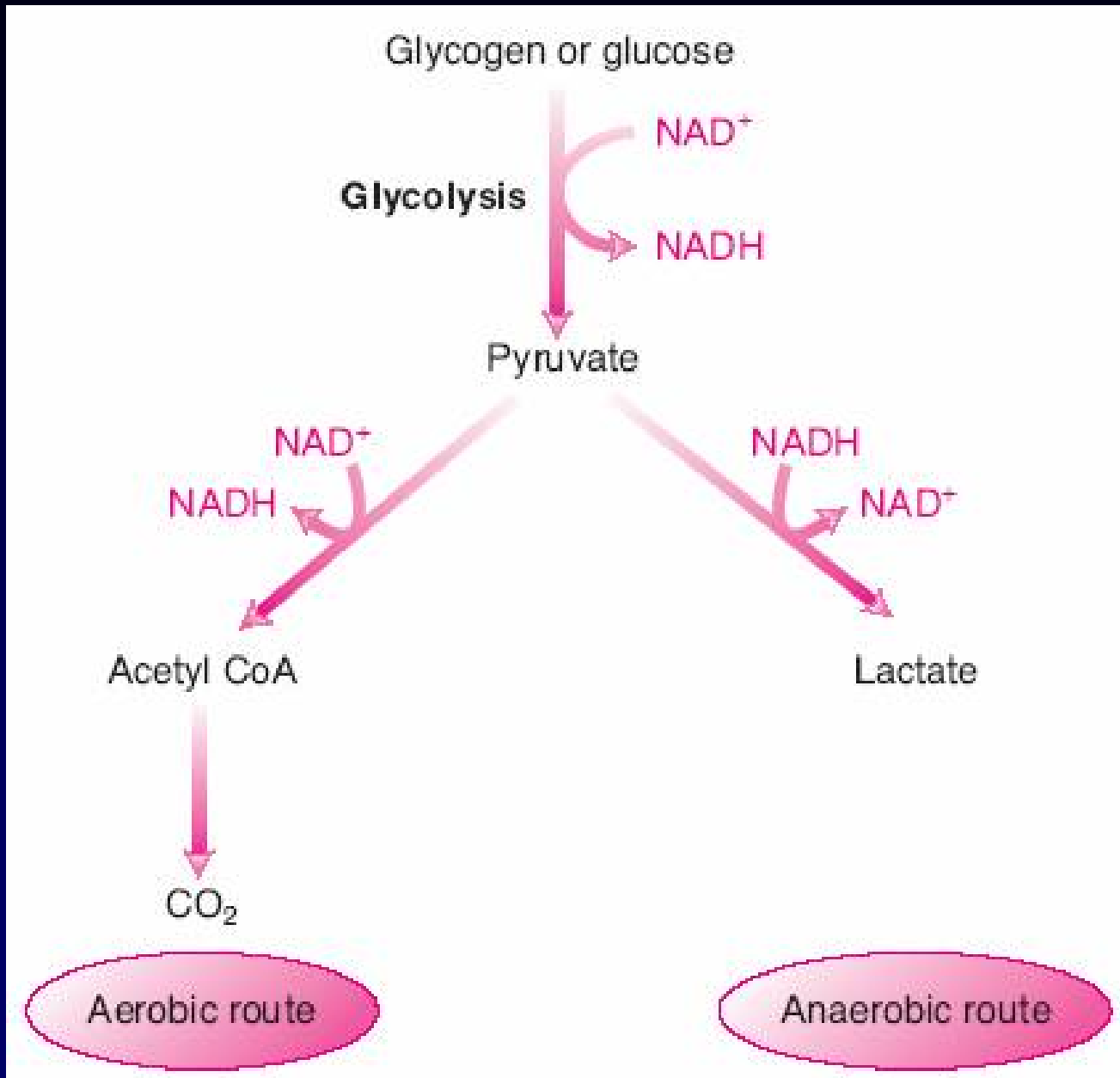


# «Κατώφλια»

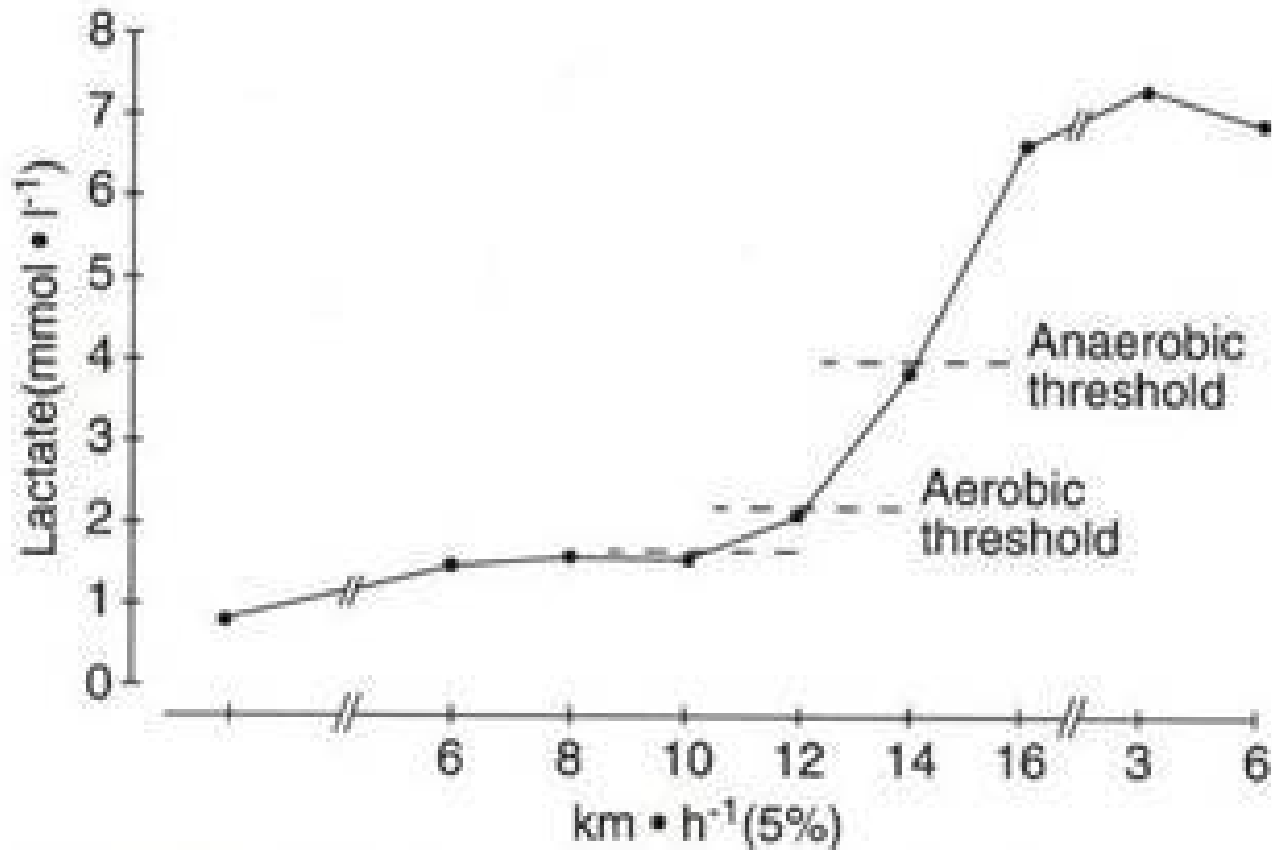
Παρότι έχουν περιγραφεί πολλά «κατώφλια» το πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το *αναερόβιο κατώφλι* που τις περισσότερες φορές ορίζεται ως η ένταση της άσκησης πάνω από την οποία η συγκέντρωση του γαλακτικού οξέος αρχίζει να αυξάνεται απότομα. Συχνά, ως *αναερόβιο κατώφλι* ορίζεται και η ένταση της άσκησης σε συγκέντρωση γαλακτικού οξέος 4 mmol/L.

Το αναερόβιο κατώφλι δεν είναι το σημείο μετάβασης από τον αερόβιο στον αναερόβιο μεταβολισμό, αφού τέτοιο σημείο δεν υπάρχει. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα...

# «Κατώφλια»



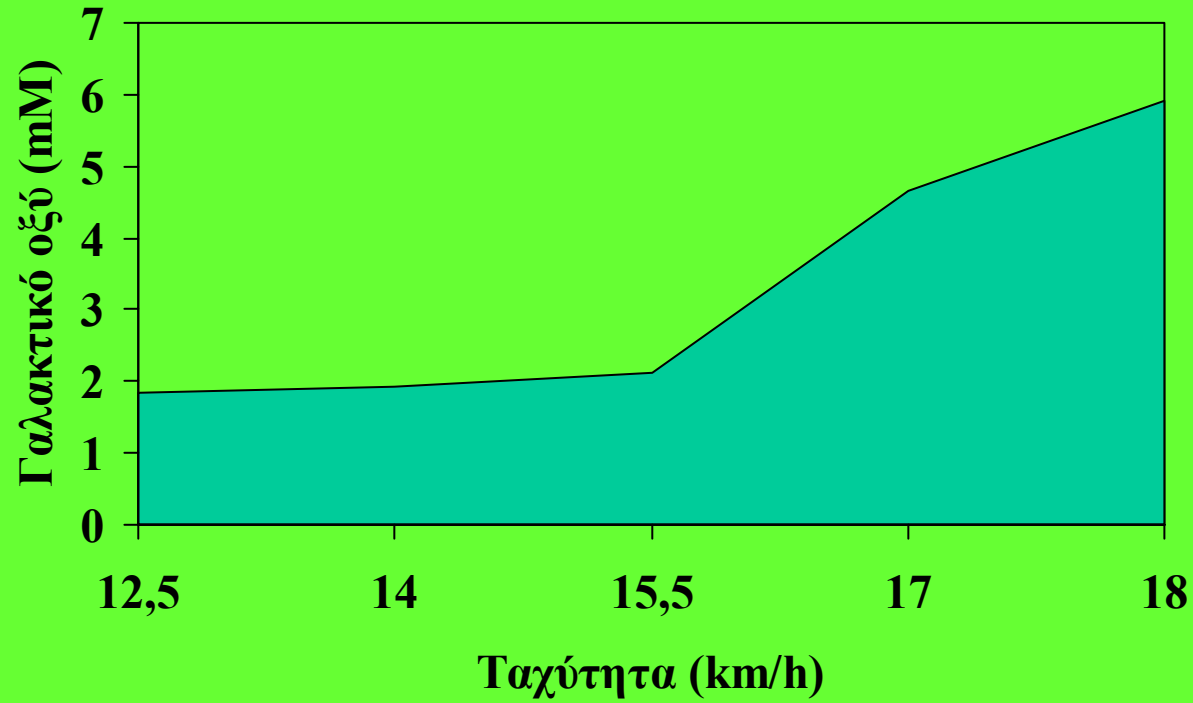
## «Κατώφλια»



**Figure 7.4** Lactate concentration during incremental treadmill running.

Reprinted from W. Vindermann 1986.

# ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΑΛΑΚΤΙΚΟΥ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ





# Παράγοντες που επηρεάζουν την ρύθμιση της γλυκόζης στο αίμα

## 1. Διατροφική κατάσταση

- Μετά από νηστεία και όταν η ηπατική συγκέντρωση γλυκογόνου είναι χαμηλή, αναπτύσσεται υπογλυκαιμία κατά τη διάρκεια άσκησης μέτριας έντασης παρά τη μειωμένη κατανάλωση γλυκόζης αφού η γλυκονεογένεση δεν συμπορεύεται με το ρυθμό κατανάλωσης.
- Μετά από γεύμα πλούσιο σε υδατάνθρακες η υπογλυκαιμία εμφανίζεται πολύ πιο αργά παρά την αυξημένη χρήση γλυκόζης εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης ηπατικού γλυκογόνου.

# Παράγοντες που επηρεάζουν την ρύθμιση της γλυκόζης στο αίμα

## 2. Αερόβια προπόνηση

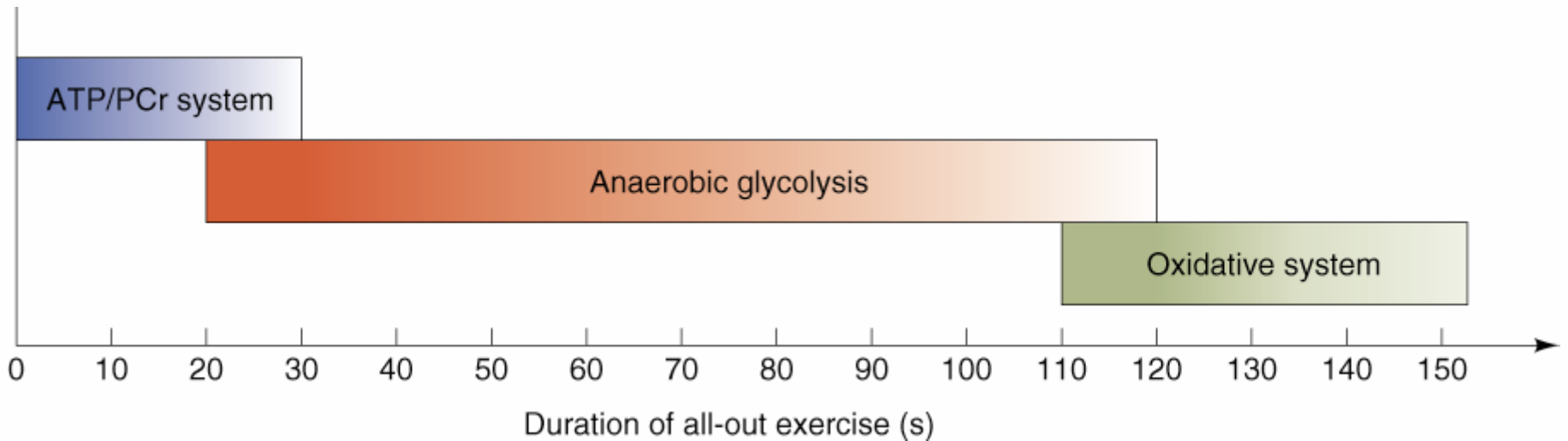
- “Glycogen sparing effect”.
- Πιο καθυστερημένη πρόσληψη γλυκόζης (παρά την αύξηση των γλουκομεταφορέων GLUT4) από τους μυς και μικρότερος ρυθμός παραγωγής ηπατικής γλυκόζης.
- Μειωμένη συγκέντρωση κατεχολαμινών και γλουκαγόνου.
- Αντίστροφη σχέση μεταξύ της συνθάσης του κιτρικού οξέος στο μυ και του ρυθμού οξειδωσης της γλυκόζης.
- Αντίστροφη σχέση μεταξύ της αναπνευστικής ικανότητας του μυ και των αποθεμάτων γλυκογόνου σε μυ και συκώτι.
- Η προπόνηση αυξάνει την πρόσληψη γλυκόζης από το μυ με βάση τον μηχανισμό της ινσουλίνης (GLUT4) κατά 25%. Η επίδραση αυτή είναι βραχυπρόθεσμη.

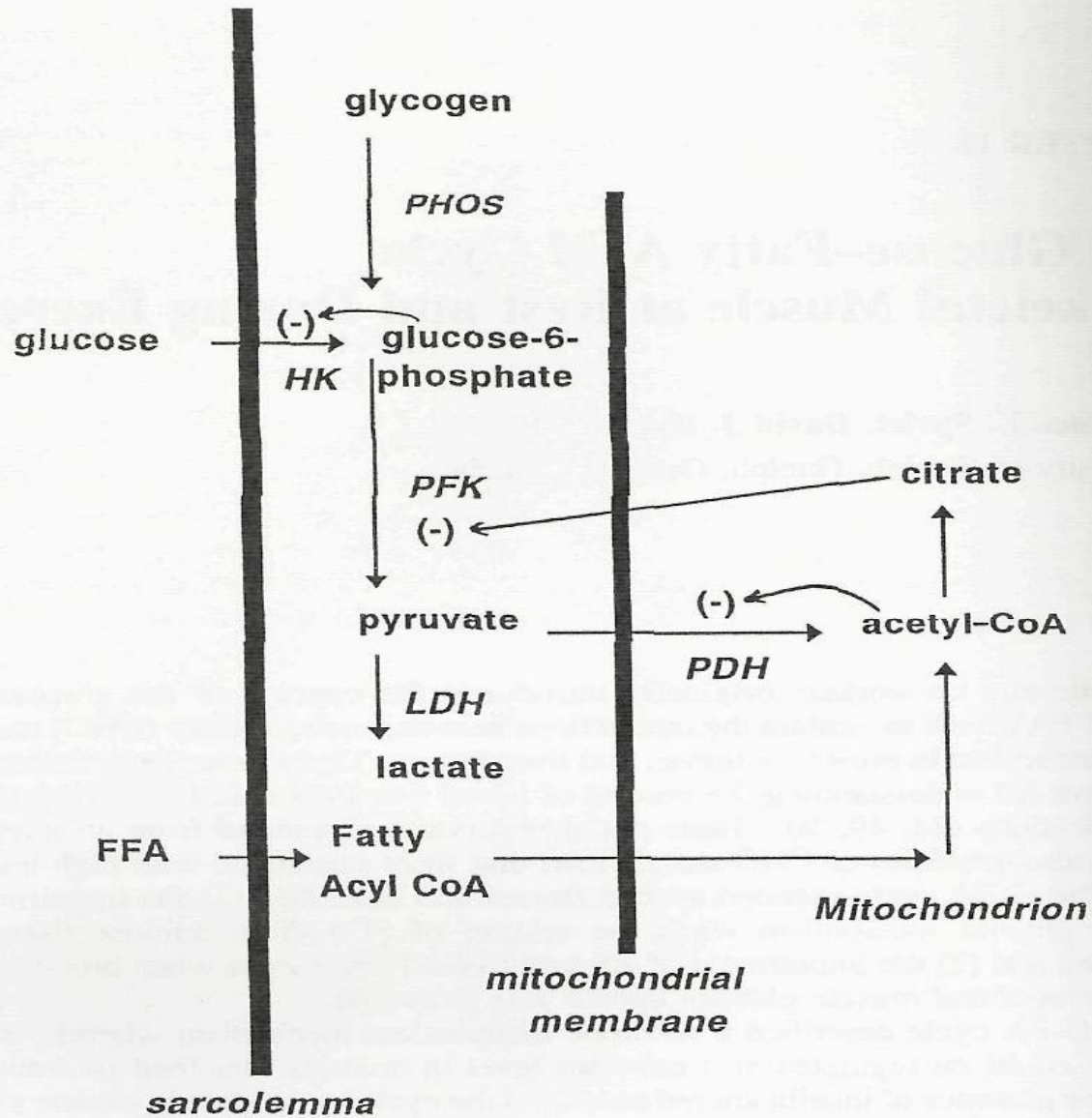
# Η Συνεργασία Λιπών – Υδατανθράκων

## στον Ενεργειακό Μεταβολισμό κατά την Άσκηση

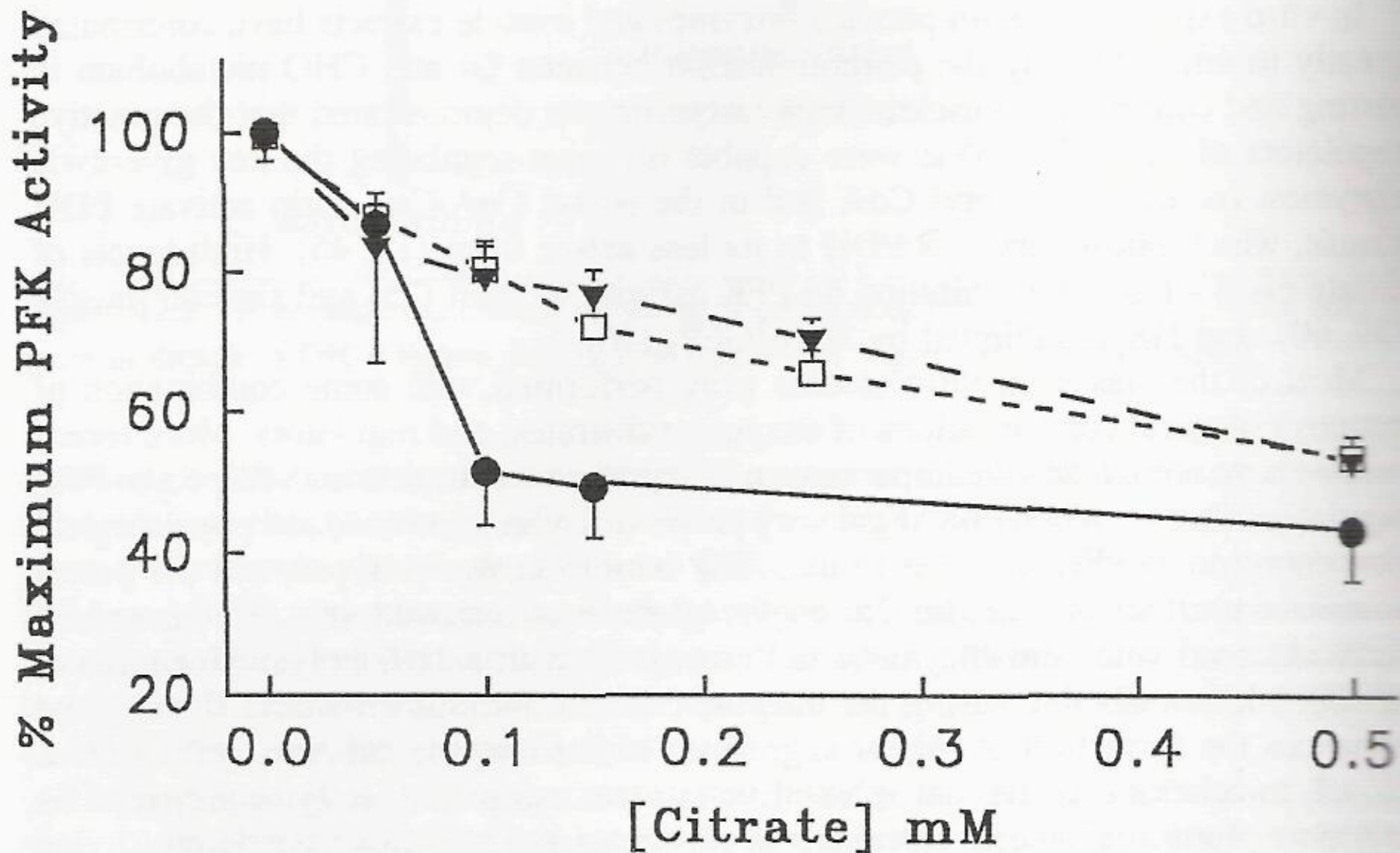
- Η αύξηση της κινητοποίησης των FFA από το λιπώδη ιστό αυξάνει την οξείδωσή τους από τους μυς και μειώνει αυτή των υδατανθράκων, ειδικά σε περιόδους εξάντλησης του γλυκογόνου.
- Αν η καύση του λίπους δεν προστάτευε την καύση του γλυκογόνου τότε αυτό θα εξαντλείτο πολύ γρήγορα.
- Η συνθάση του κιτρικού οξέος αναστέλλει την PFK της γλυκόλυσης (ενισχύει την αναστολή του ενζύμου από την ATP).
- Η προσφορά σε FFA απηρεάζει την PDH;
- Ο ρόλος του κύκλου β-οξείδωσης - επαναστεροποίησης των λιπαρών οξέων;
- Η αυξημένη διαθεσιμότητα FFA πιθανά αναστέλλει την φωσφορυλάση.

# Η ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

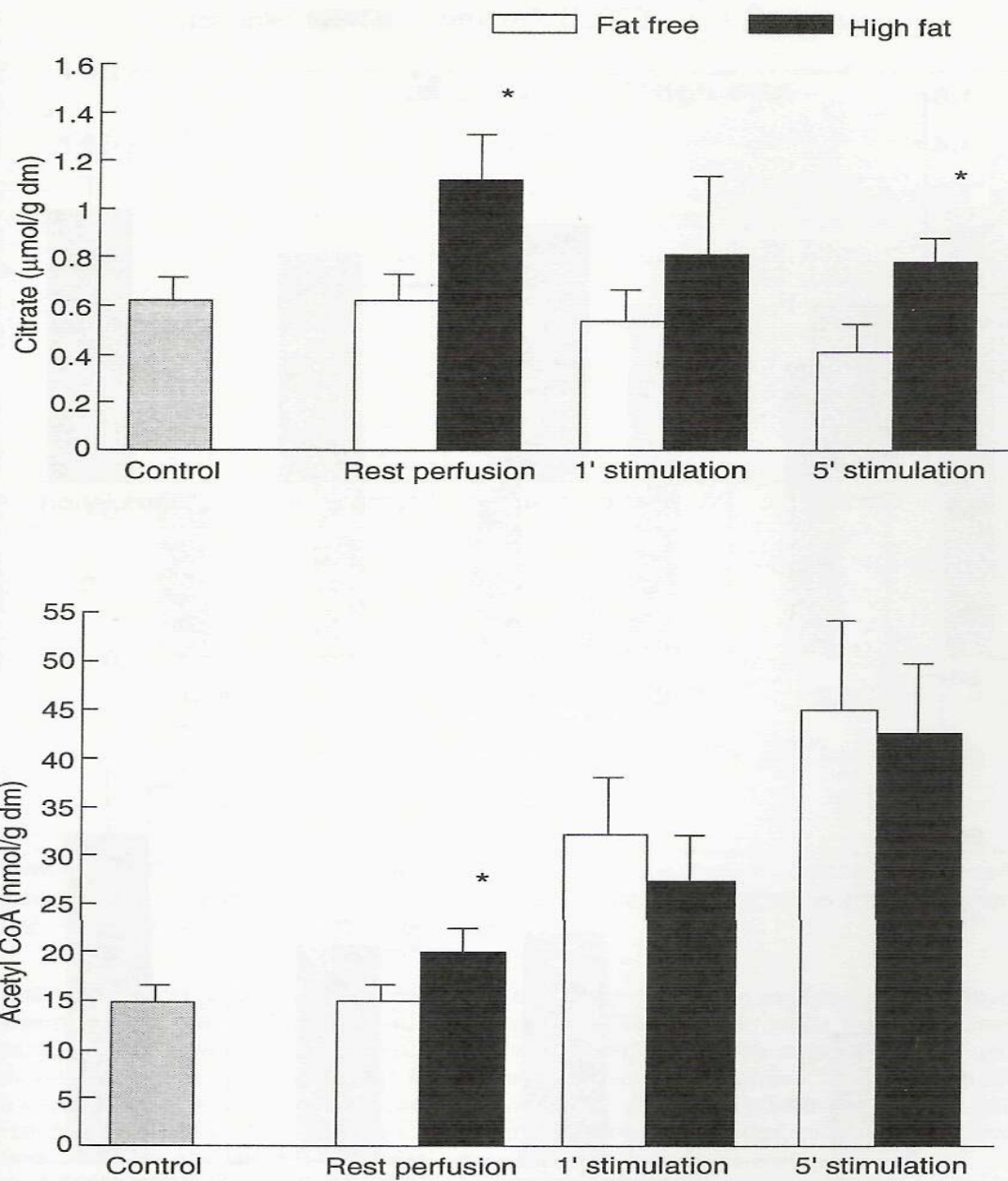




**Figure 12.1** Schematic representation of the regulation of the classic glucose-fatty acid cycle in muscle. LDH = lactate dehydrogenase; PHOS = glycogen phosphorylase.



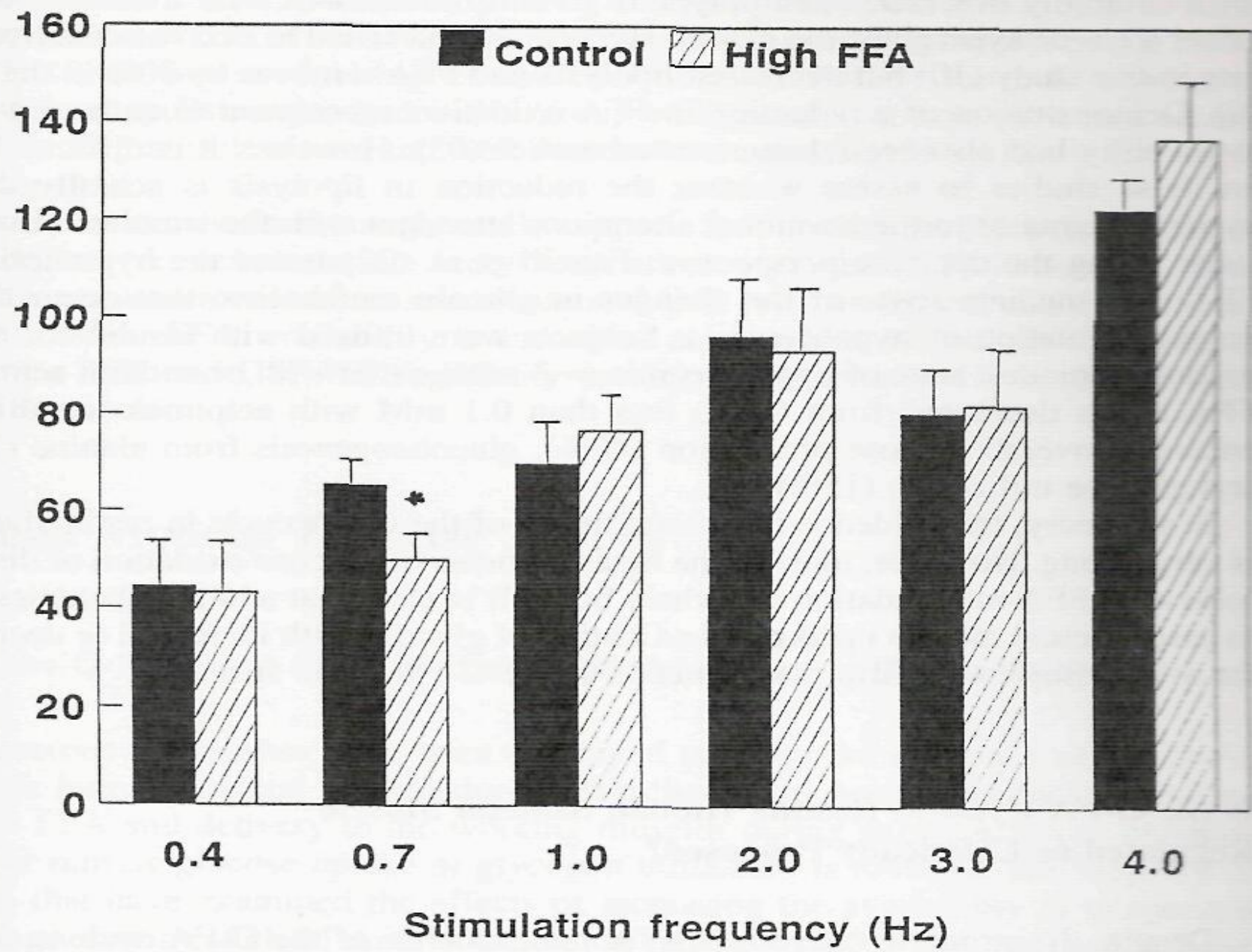
**Figure 12.2** Citrate inhibition of phosphofructokinase activity with enhanced enzyme aggregation in rest (circles), moderate aerobic exercise (triangles), and intense aerobic exercise conditions (squares).



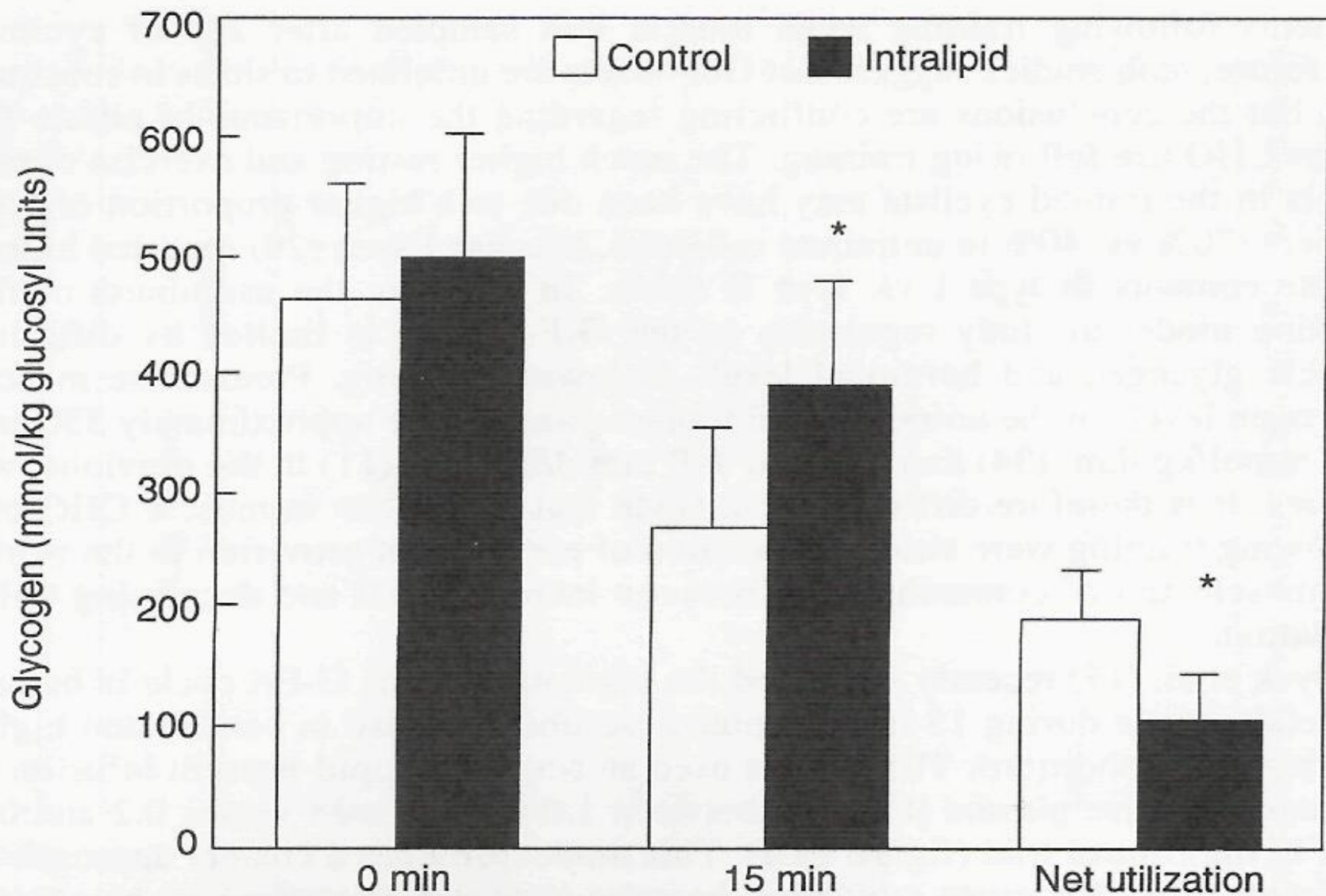
**Figure 12.3** Red gastrocnemius citrate and acetyl CoA dry muscle contents during fat-free and high-fat perfusions at rest and during electrical stimulation. \* = significantly different from fat free.



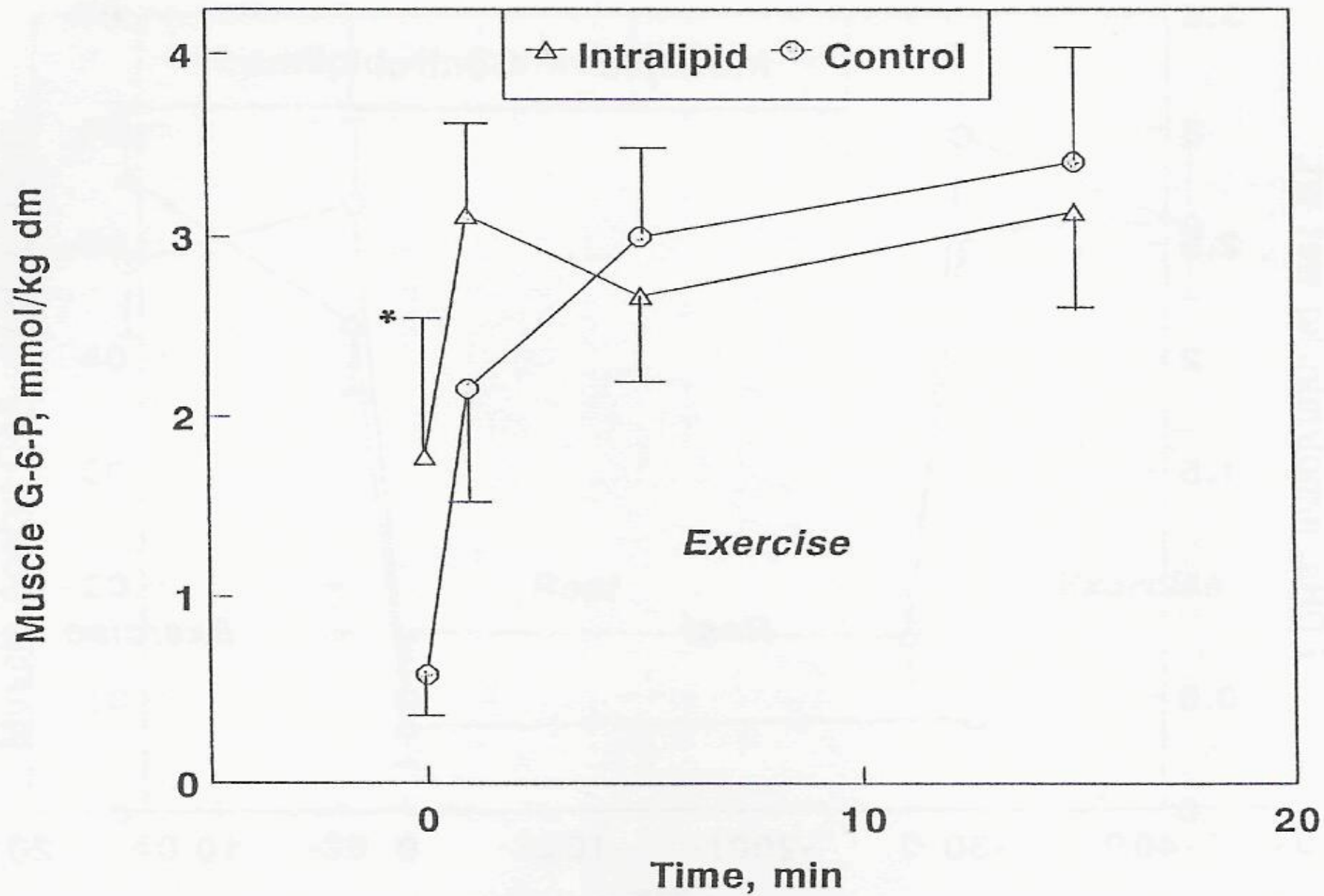
Glycogen degradation, mmol glucosyl units/kg dm



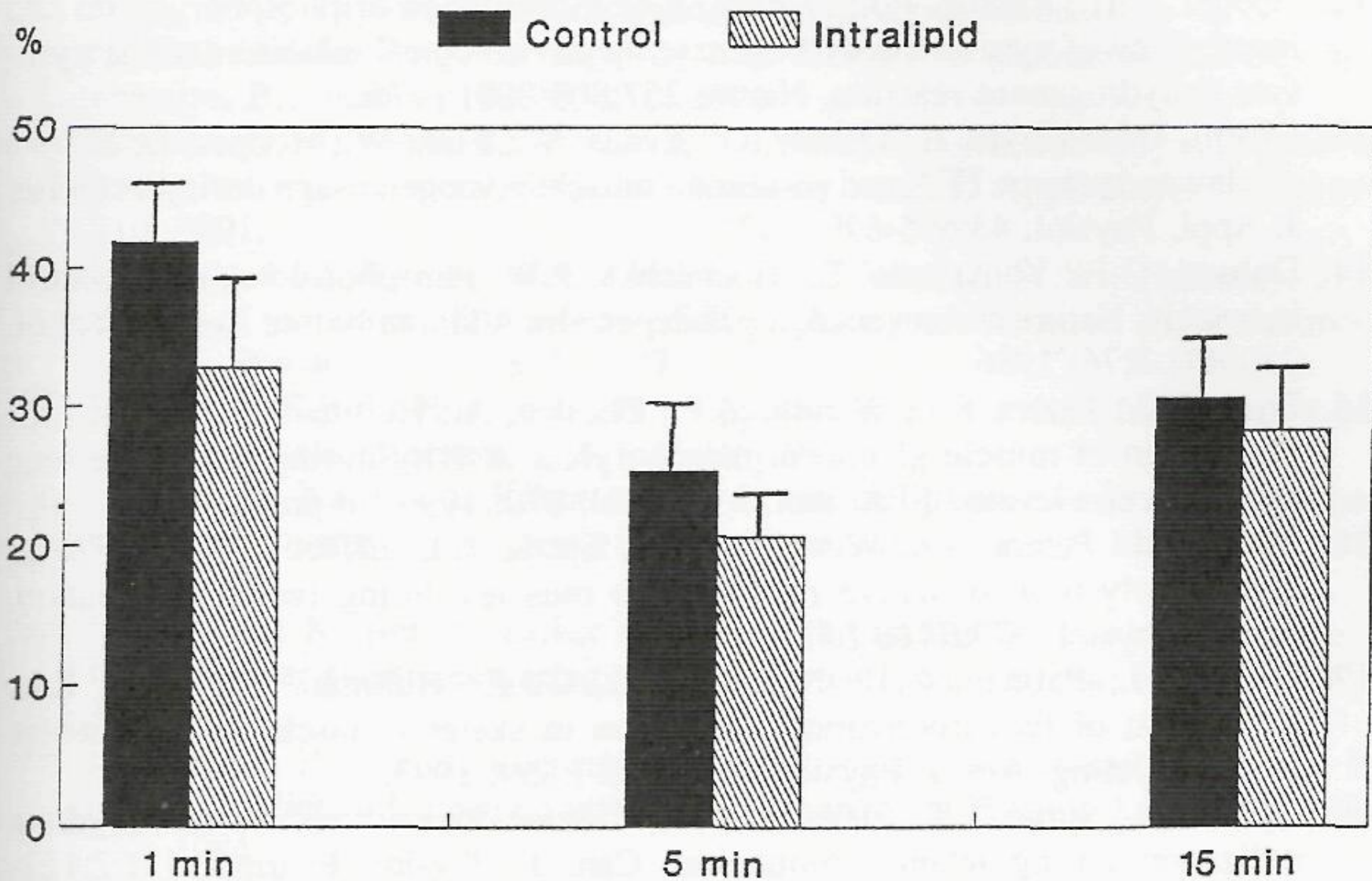




**Figure 12.7** Muscle glycogen contents before and after 15 min of intense aerobic cycling and net glycogen utilization with control and Intralipid-heparin infusions. \* = significantly different from control.



**Figure 12.11** Muscle glucose-6-phosphate (G6P) content at rest and during intense aerobic cycling with control and Intralipid infusion. \* = significantly different from control.



**Figure 12.12** Maximal activity of the active form of phosphorylase (PHOSa) during intense aerobic cycling with control and Intralipid infusion.