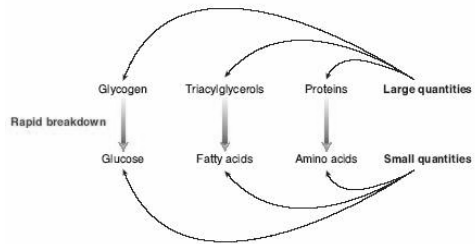


## Μεταβολισμός των υδατανθράκων κατά την άσκηση

Το γλυκογόνο είναι ο αφθονότερος υδατάνθρακας των ζώων



Mougiou, in press

## 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.



Mougiou, in press

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



Mougiou, in press

## Από που προέρχεται το μυϊκό και ηπατικό γλυκογόνο;

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

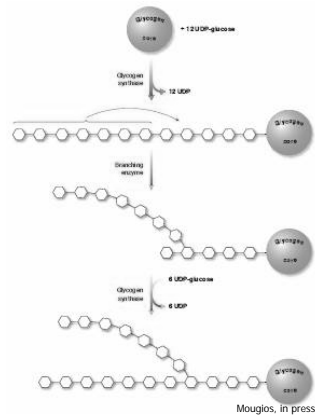
↓  
Με την πέψη υδρολύονται οι γλυκοζιδικές συνδέσεις των πολυσακχαριτών και των ολιγοσακχαριτών, οπότε προκύπτουν μονοσακχαρίτες και κυρίως γλυκόζη.

↓  
Η γλυκόζη εισέρχεται στην κυκλοφορία και προσλαμβάνεται από τα κύτταρα.

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

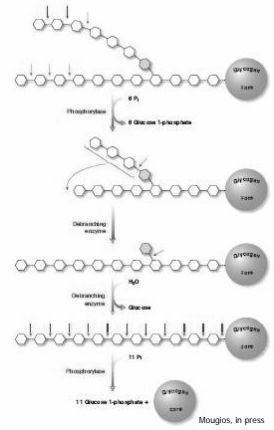
### Γλυκογονοσύνθεση

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



### Γλυκογονόλυση

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



### Επιτάχυνση της γλυκογονόλυσης στους μύες κατά την άσκηση

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

**1. Αύξηση P<sub>i</sub>**

Γλυκογόνο (*n* μονάδες γλυκόζης) + P<sub>i</sub> → γλυκογόνο (*n* - 1 μονάδες γλυκόζης) + 1-φωσφορική γλυκόζη

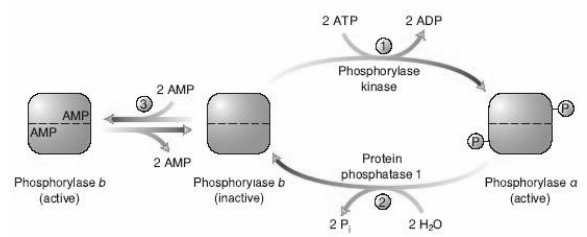
**2. Αύξηση AMP και IMP και μείωση ATP**

**3. Αύξηση Ca<sup>2+</sup>**

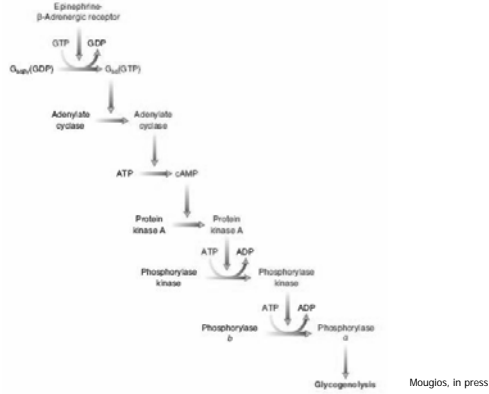
**4. Αύξηση επινεφρίνης**

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

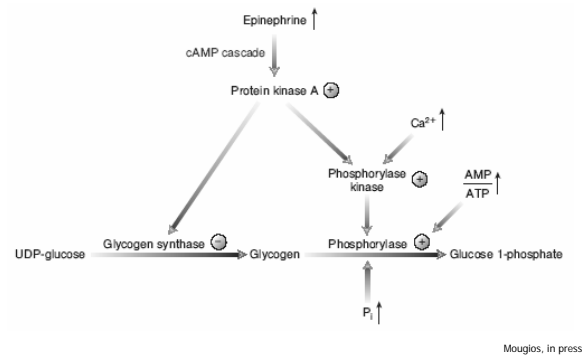
### Ρύθμιση της φωσφορυλάσης



### Ρύθμιση της γλυκογονόλυσης από τον καταρράκτη του cAMP



### Σύνοψη της ρύθμισης του μεταβολισμού του γλυκογόνου κατά την άσκηση

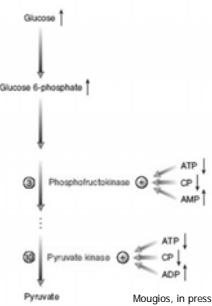


### Επιτάχυνση της γλυκόλυσης στους μύες κατά την άσκηση

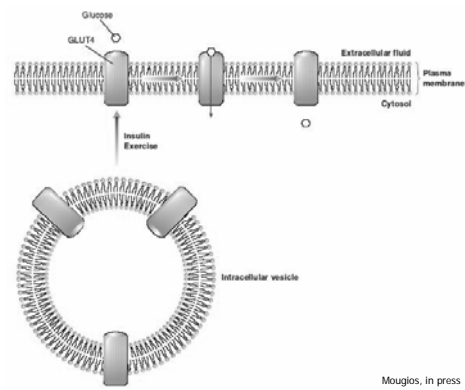
Προϊόντα της γλυκογονόλυσης είναι η 1-φωσφορική γλυκόζη και η γλυκόζη. Γλυκόζη υπάρχει στα κύτταρα και ανεξάρτητα από τη γλυκογονόλυση.

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

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



### Η παλινδρόμηση των μεταφορέων γλυκόζης (GLUT4)

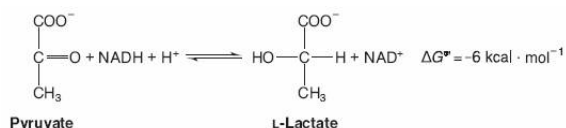






### Γιατί παράγεται γαλακτικό οξύ κατά την άσκηση;

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.



### Χαρακτηριστικά της αναερόβιας διάσπασης των υδατανθράκων

1. Είναι ανηθικονομική. 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  $\text{CO}_2$  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:

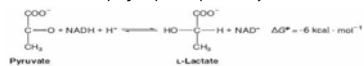
1. Δρόμος 100, 200 και 400 m
2. Κολύμβηση 50 και 100 m
3. Χιονοδρομία κατάβασης

### 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.



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

Μετατροπή σε γλυκόζη (γλυκονογένεση)

### Γλυκογεόγένηση

Γλυκογεόγένηση 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 γλυκογεόγένηση είναι το ήπαρ και οι νεφροί. Γλυκογεόγένηση δεν συμβαίνει στους μύες επειδή στερούνται του ενζύμου φωσφατάση της 6-φωσφορικής γλυκόζης.

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

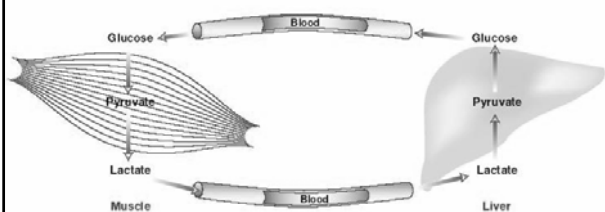
- Ταιριάζει στον κύριο βιολογικό ρόλο των μυών που είναι η κίνηση του σώματος.
- Εμποδίζει την 6-φωσφορική γλυκόζη που προέρχεται από τη διάσπαση του γλυκογόνου να μετατραπεί σε γλυκόζη και να διαχυθεί έξω από τις μυϊκές ίνες.

### Επιτάχυνση της γλυκογεόγένησης στο ήπαρ κατά την άσκηση

Η άσκηση προσφέρει αυξημένες πρώτες ύλες για γλυκογεόγένηση 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

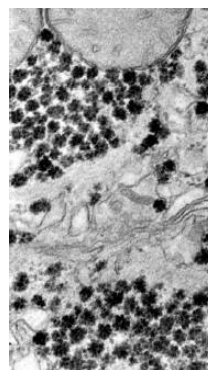
Mougiou, in press

### Επιτάχυνση της γλυκογονόλυσης στο ήπαρ κατά την άσκηση

Γλυκόζη στο ήπαρ παράγεται από τη γλυκογεόγένηση 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;



Mougiou, in press

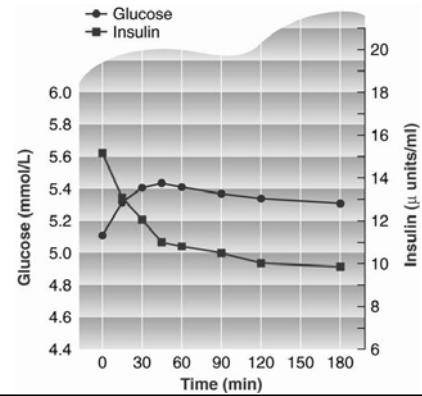
### Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση I

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.

### 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

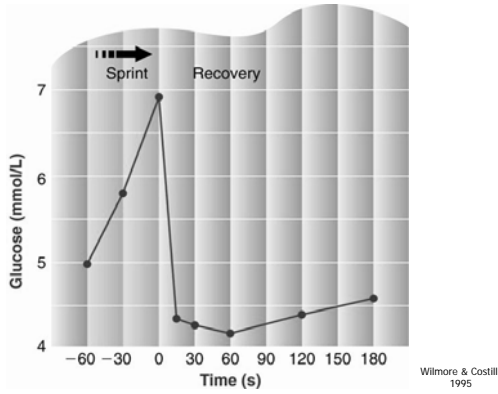
Κατά την άσκηση:

- 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

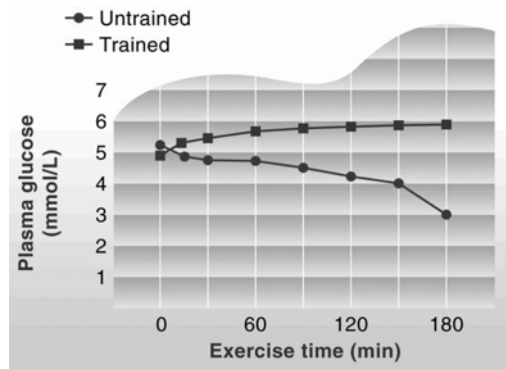
Τελικά, πώς επιδρά η άσκηση στη συγκέντρωση της γλυκόζης στο πλάσμα;



**Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση**



**Ρύθμιση της συγκέντρωσης της γλυκόζης στο αίμα κατά την άσκηση σε προπονημένους και απροπονητούς**

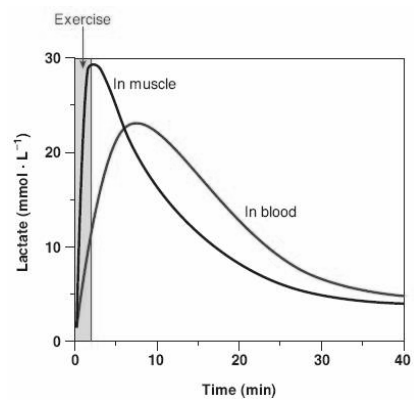


**Συσσώρευση γαλακτικού οξέος στο αίμα**

Σε κατάσταση ηρεμίας η συγκέντρωση του γαλακτικού οξέος βρίσκεται σε μια σχετικά σταθερή κατάσταση, κατά την οποία η ταχύτητα εμφάνισής 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**

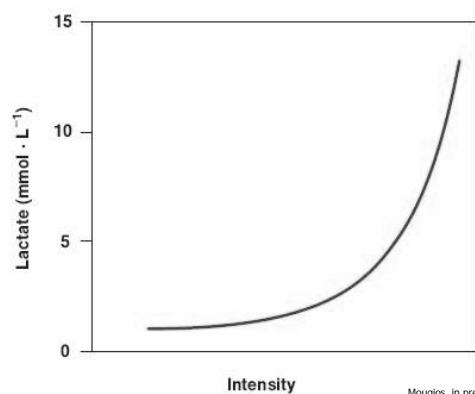


### Απομάκρυνση του γαλακτικού οξέος από τους μύες

Ο χρόνος ημιζωής του γαλακτικού οξέος στο αίμα είναι τουλάχιστον 12 min

Η απομάκρυνση του γαλακτικού οξέος είναι γρηγορότερη όταν ακολουθείται άσκηση χαμηλής έντασης.

### «Κατώφλια»

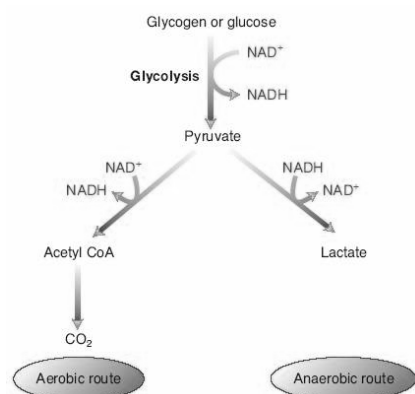


### «Κατώφλια»

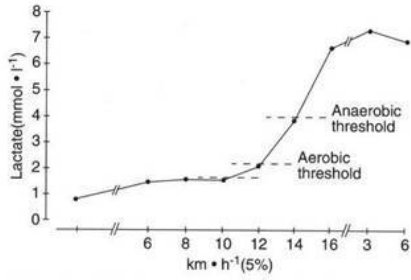
Παρότι έχουν περιγραφεί πολλά «κατώφλια» το πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το *αναερόβιο κατώφλι* που τις περισσότερες φορές ορίζεται ως η ένταση της άσκησης πάνω από την οποία η συγκέντρωση του γαλακτικού οξέος αρχίζει να αυξάνεται απότομα. Συχνά, ως *αναερόβιο κατώφλι* ορίζεται και η ένταση της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

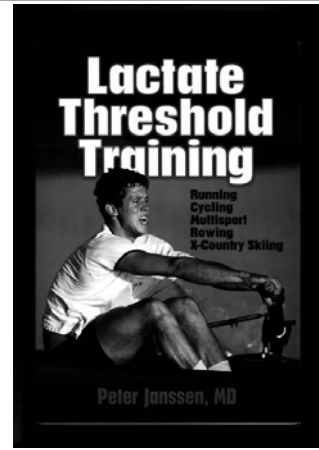


«Κατώφλια»

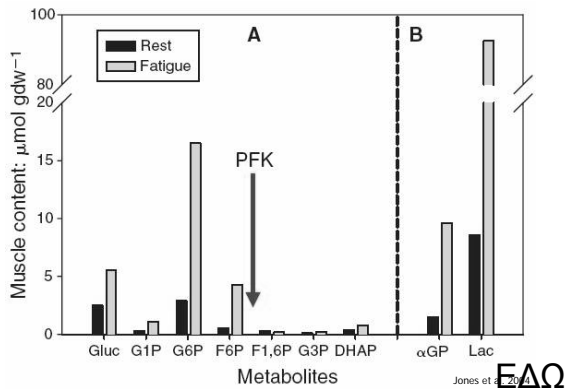


**Figure 7.4** Lactate concentration during incremental treadmill running.  
Reprinted from W.Vindermann 1986.

Viru & Viru 2001



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



Jones et al. 2009

