

# Αναερόβιος μεταβολισμός κατά τη διάρκεια άσκησης υψηλής έντασης

Θανάσης Τζιαμούρτας, Ph.D.

Καθηγητής Βιοχημείας της Άσκησης

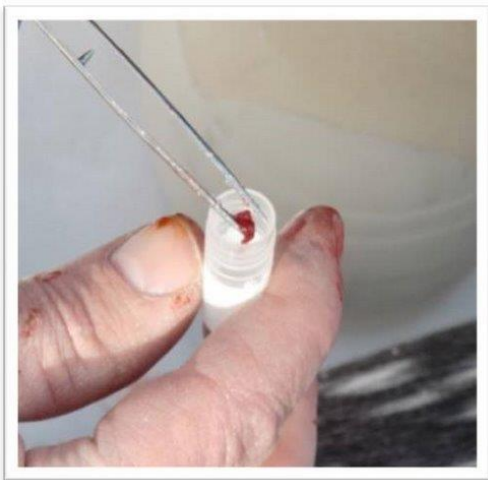
# Σκοπός

- Σκοπός αυτής της διάλεξης είναι να παρουσιάσει ορισμένες βασικές αρχές που άπτονται του «αναερόβιου» μεταβολισμού και να τις συνδέσει με την απόδοση

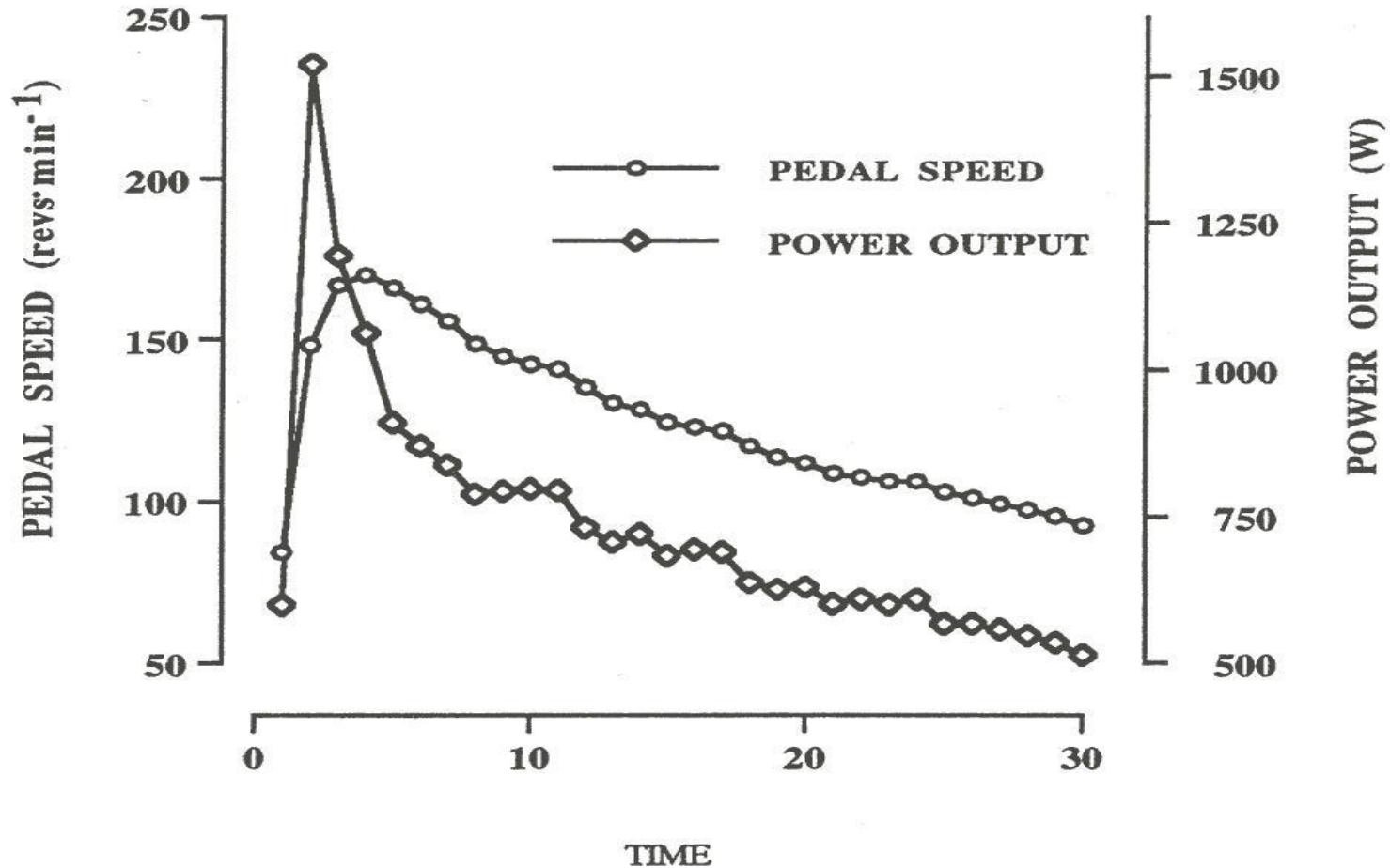
- Μέχρι τώρα όταν αναφερόταν κανείς σε μέγιστη άσκηση εννοούσε τη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου
- Ωστόσο, έχει βρεθεί πως η μέγιστη παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια σπρινταρίσματος **30 δευτερολέπτων** είναι περίπου **δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη** από αυτή που απαιτείται για να φτάσει κανείς σε επίπεδα μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου

# Τι οδήγησε στη μεγαλύτερη συλλογή πληροφοριών για το μεταβολισμό του μυός;

- Δύο μεθοδολογικές εξελίξεις:
  1. Μυϊκή βιοψία
  2. Wingate



# Απόδοση Ισχύος σε Wingate τεστ



**Figure 19.1** Power output (corrected for kinetic energy of the flywheel) and pedal speed during a maximal 30-s cycle ergometer sprint ( $n = 1$ ).

# Μεταβολικές και ορμονικές αλλαγές που επέρχονται με άσκηση σπρινταρίσματος σε αθλητές ταχύτητας (ST) και αερόβιων αθλημάτων (ET)

**Table 19.1 Blood Lactate and Serum Growth Hormone After a 30-s Treadmill Sprint in Male Sprint- and Endurance-Trained Athletes**

	Rest	Minutes postsprint		
		10 min post	30 min post	60 min post
<b>Blood lactate (mmol · L<sup>-1</sup>)</b>				
ST	1.1 ± 0.1	19.7 ± 0.7	12.5 ± 1.3	3.8 ± 0.3
ET	1.2 ± 0.1	13.8 ± 0.9	8.3 ± 0.9	2.9 ± 0.4 <sup>a, b, c</sup>
<b>Serum growth hormone (mU · L<sup>-1</sup>)</b>				
ST	4.0 ± 0.8	57.7 ± 8.1	84.4 ± 21.1	44.9 ± 11.0
ET	4.8 ± 1.3	24.3 ± 8.8	25.1 ± 6.7	23.5 ± 6.8 <sup>a, b, c</sup>

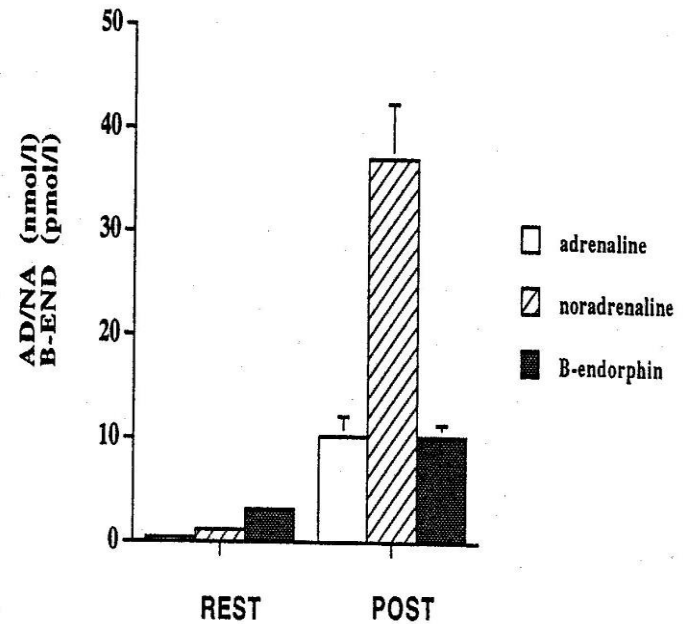
ST *n* = 6, ET *n* = 6; mean + SE. Data from Nevill et al. 1993 (28) and unpublished results by the same authors.

<sup>a</sup>Main effect time.

<sup>b</sup>Main effect group (sprint vs. endurance).

<sup>c</sup>Interaction (all *p* < .05).

Τα σπριντ αποτελούν σημαντικό στρες για τον οργανισμό, κάτι που φαίνεται από τις αποκρίσεις των κατεχολαμινών και της β-ενδορφίνης



**Figure 19.2** Plasma catecholamine (rest and 1 min post,  $n = 10$  males) and  $\beta$ -endorphin (rest and 3 min post,  $n = 10$  males) before and after a maximal 30-s treadmill sprint (mean  $\pm$  SE). Catecholamine data from Allsop et al. 1990 (1);  $\beta$ -endorphin data from Brooks et al. 1988 (11).

# Μεταβολές σε μεταβολίτες του μυός μετά από άσκηση 10 και 20 sec

**Table 19.3 Muscle Metabolites at Rest and After 10 and 20 s of Cycle Ergometer Sprinting**

	Rest	10 s	20 s
Glycogen	403.8 ± 20.1	357.4 ± 18.6	329.7 ± 21.4 <sup>b</sup>
PCr	80.7 ± 3.2	36.1 ± 3.0	21.4 ± 2.2 <sup>a</sup>
ATP	25.6 ± 0.7	20.2 ± 1.3	19.8 ± 1.4
HMP	1.5 ± 0.1	21.2 ± 2.3	29.0 ± 1.7 <sup>a</sup>
*Pi	2.9	14.8 ± 1.8	17.4 ± 2.0
Lactate	4.5 ± 0.4	51.0 ± 4.6	81.7 ± 4.7 <sup>a</sup>

mmol · kg<sup>-1</sup> dry muscle; *n* = 8 males; mean ± *SE*. Data from Bogdanis et al. 1994.

<sup>a</sup>*p* < .01, <sup>b</sup>*p* < .05 different from 10 s sprint

\*calculated inorganic phosphate (mmol · L<sup>-1</sup> muscle water)

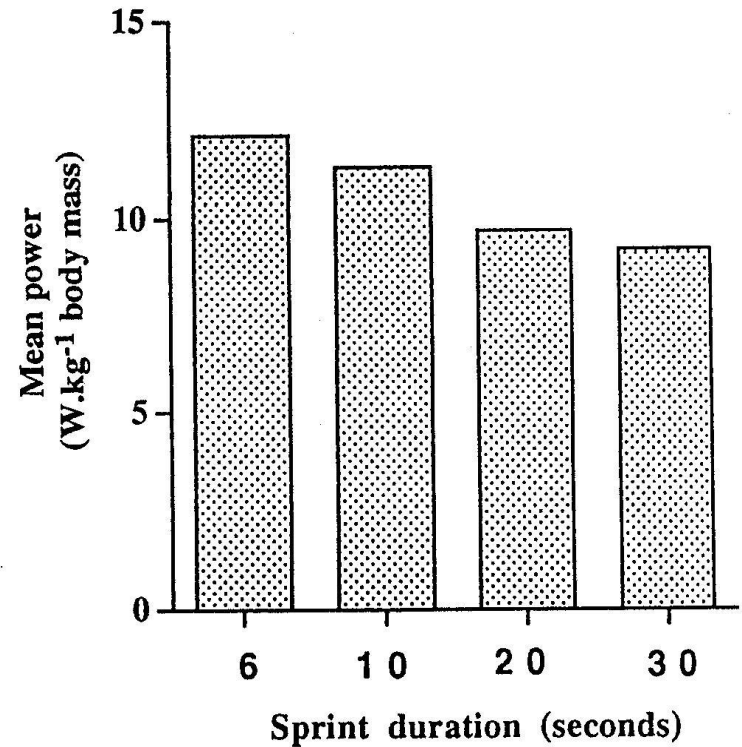
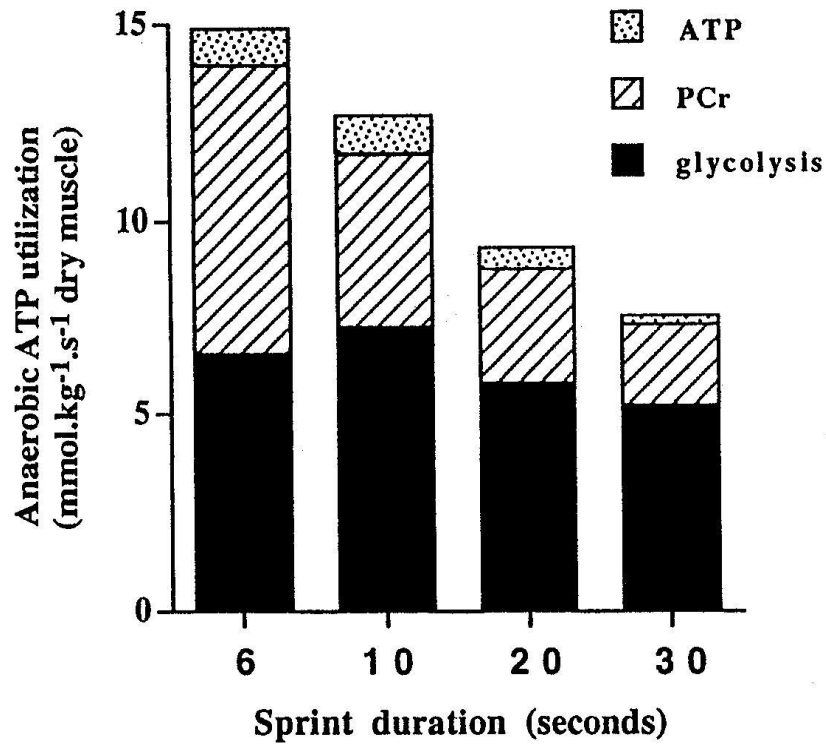


# Μεταβολές σε μεταβολίτες του μυός μετά από άσκηση 30 sec

	Rest	Post
Glycogen	317.0 ± 19.3	214.5 ± 18.9
PCr	84.0 ± 4.4	28.0 ± 4.5
Total creatine	119.2 ± 4.0	116.0 ± 5.6
ATP	26.7 ± 1.4	19.2 ± 4.0
G1P	0.2 ± 0.1	2.5 ± 0.6
G6P	1.2 ± 0.2	20.7 ± 2.2
F6P	0.3 ± 0.1	5.6 ± 0.5
Pyruvate	1.0 ± 0.2	3.8 ± 0.7
Lactate	4.1 ± 0.4	86.0 ± 10.8
Posttraining lactate	5.1 ± 1.4	103.6 ± 10.0*

mmol · kg<sup>-1</sup> dry muscle; *n* = 6, 3 males and 3 females; mean ± *SE*. Data from Nevill et al. 1989 (27).

\**p* < .05 significant difference between experimental and control group (data not shown) in response to exercise after training (group × training × exercise interaction)



**Figure 19.3** Utilization of ATP derived from anaerobic metabolism and mean power output during maximal sprint cycling of 6-, 10-, 20-, and 30-s duration (6 s:  $n = 8$ ; 10 s and 20 s:  $n = 8$ ; 30 s:  $n = 16$ ; all males). Data for 6-s sprint from Gaitanos et al. 1993 (13); data for 10- and 20-s sprints from Bogdanis et al. 1994 (8); data for 30-s sprint from Bogdanis et al. (9) and Bogdanis et al. 1994 (10).

# Μεταβολίτες του μυός μετά από 2 διαδοχικά σπριντ

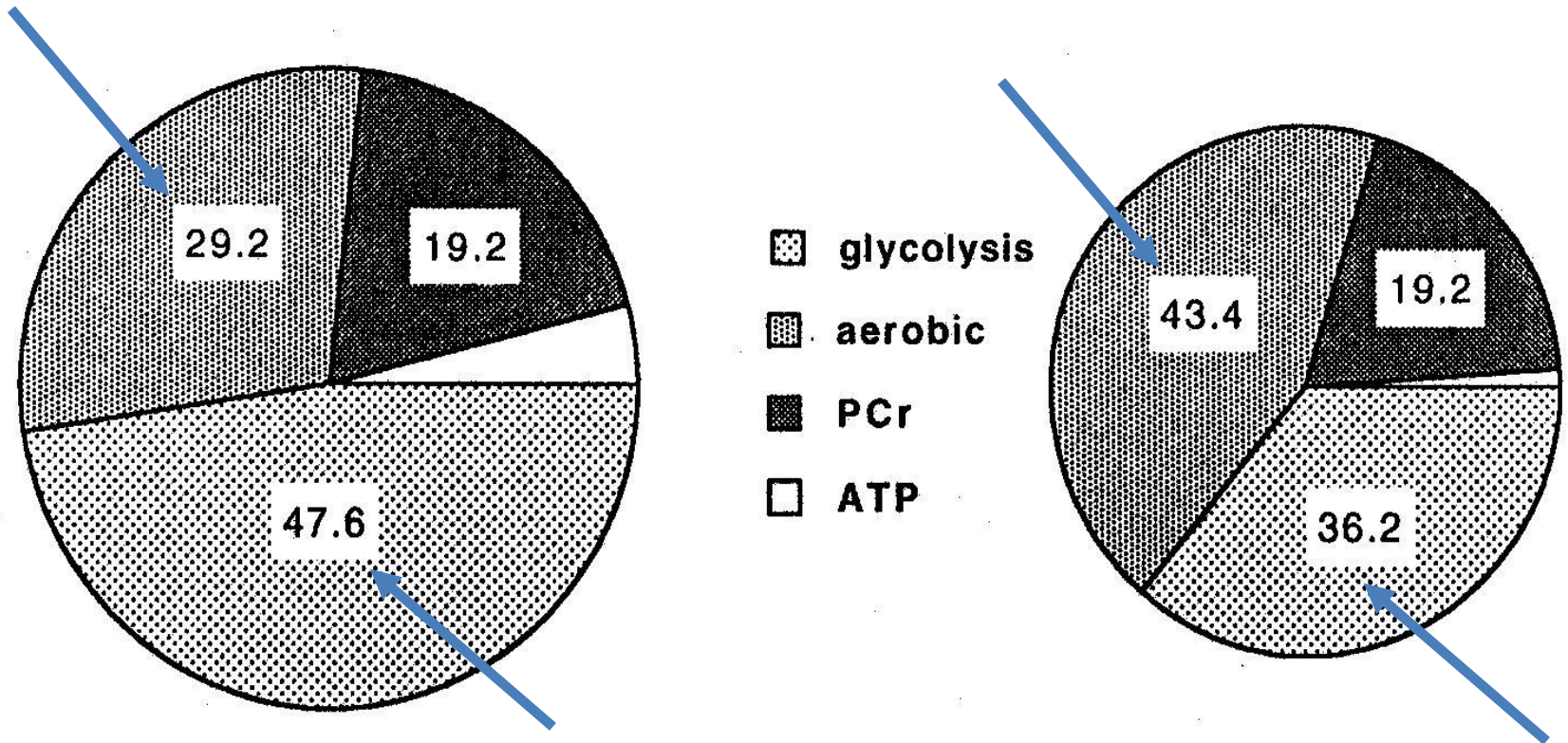
**Table 19.4 Muscle Metabolites Before and After Two 30-s Sprints Separated by 4 min of Passive Recovery**

	Rest	Post-sprint 1	Pre-sprint 2	Post-sprint 2
Glycogen	320.7 ± 14.9	218.4 ± 19.5 <sup>a</sup>	240.5 ± 23.9 <sup>a</sup>	184.0 ± 15.8 <sup>a, d</sup>
PCr	76.5 ± 4.3	13.5 ± 1.4 <sup>a</sup>	56.6 ± 1.4 <sup>a, b</sup>	9.4 ± 2.4 <sup>a, c</sup>
ATP	27.3 ± 0.8	20.7 ± 1.3 <sup>a</sup>	22.2 ± 1.0 <sup>a</sup>	20.8 ± 1.2 <sup>a</sup>
G6P	1.4 ± 0.1	26.3 ± 1.7 <sup>a</sup>	14.2 ± 0.7 <sup>a, b</sup>	22.3 ± 1.3 <sup>a, b, c</sup>
Lactate	5.6 ± 0.9	106.1 ± 4.5 <sup>a</sup>	72.8 ± 5.5 <sup>a, b</sup>	130.5 ± 4.9 <sup>a, b, c</sup>

mmol · kg<sup>-1</sup> dry muscle; *n* = 8 males, mean ± SE. Data from Bogdanis et al. (9).

<sup>a</sup>*p* < .01 from rest; <sup>b</sup>*p* < .01 from post-sprint 1; <sup>c</sup>*p* < .01 from pre-sprint 2; <sup>d</sup>*p* < .05 from pre-sprint 2.

# Συνεισφορά του αερόβιου μεταβολισμού στην απόδοση σπριντ



**Figure 19.4** Estimated total ATP utilization from aerobic and anaerobic metabolism during two maximal 30-s sprints separated by 4 min of passive recovery ( $n = 8$  males, see text for assumptions).

Data from Bogdanis et al. 1994 (10).

## Συνεισφορά του αερόβιου μεταβολισμού στην απόδοση σπριντ

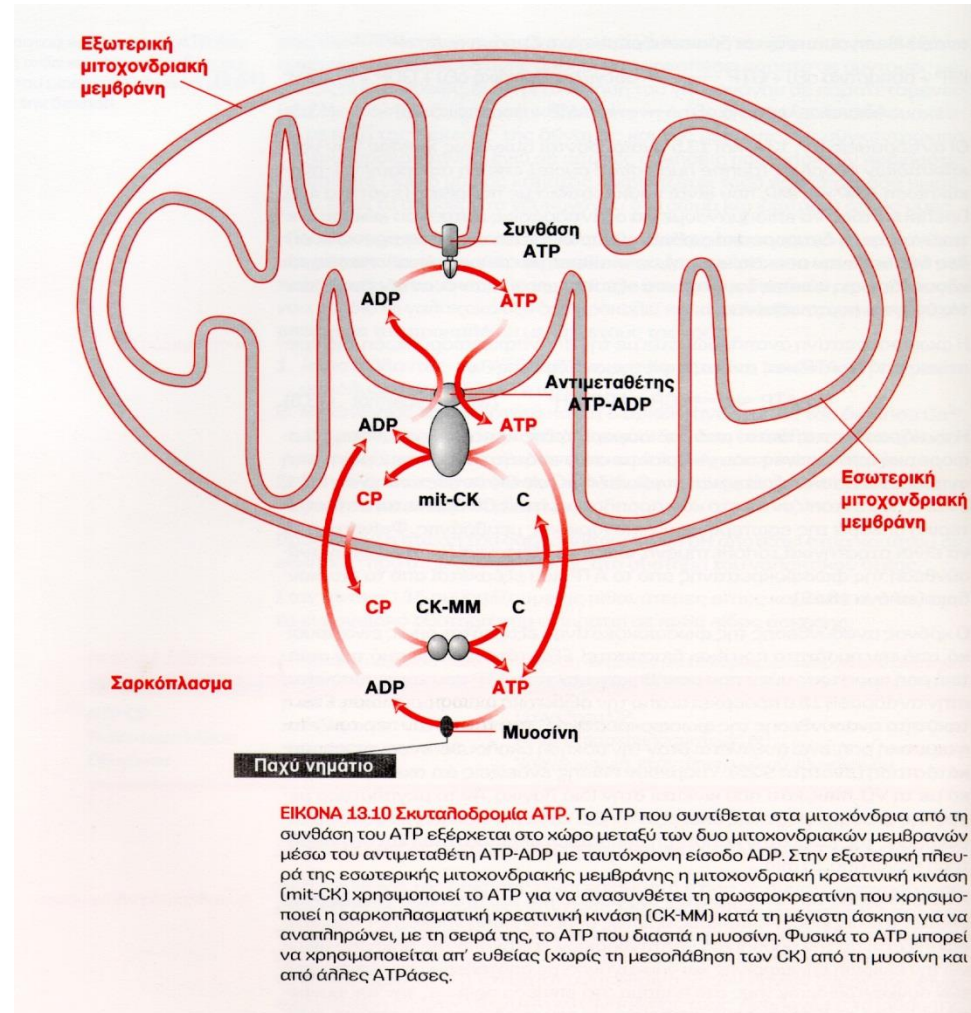
- Παραμένει σταθερή η συνεισφορά των φωσφαγόνων στην απόδοση στο δεύτερο σπριντ
- Μειώνεται η συνεισφορά της αναερόβιας γλυκόλυσης
- Αυξάνεται η συνεισφορά του αερόβιου μεταβολισμού κατά 15%

## Γιατί είναι σημαντική η συνεισφορά του αερόβιου μεταβολισμού;

- Η ανάπτυξη της αερόβιας ικανότητας σχετίζεται με την ανασύνθεση της φωσφοκρεατίνης
- Η συσχέτιση μεταξύ της ανασύνθεσης της φωσφοκρεατίνης και του ποσοστού της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου στο οποίο βρέθηκε μία συγκέντρωση γαλακτικού οξέος 4 mM (μία τιμή που σχετίζεται με το γαλακτικό κατώφλι και την αερόβια ικανότητα ενός αθλητή) ήταν 0.94
- Η κινητικότητα της φωσφοκρεατίνης είναι ταχύτερη στους αθλητές ταχύτητας απ' ότι σε αγύμναστα άτομα

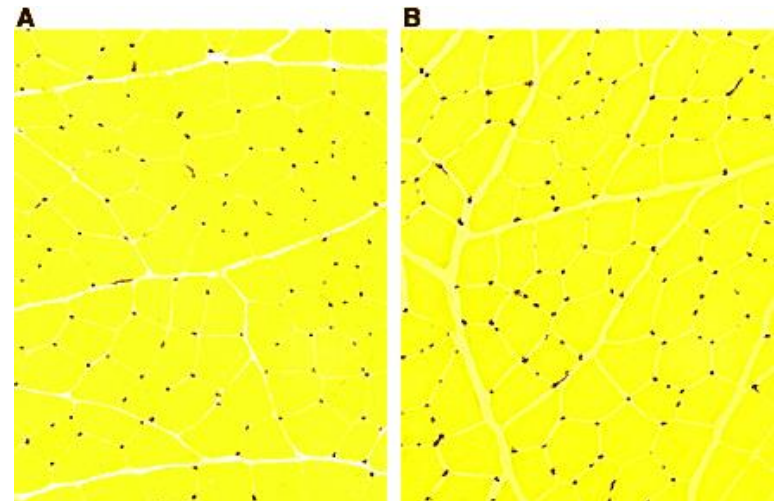
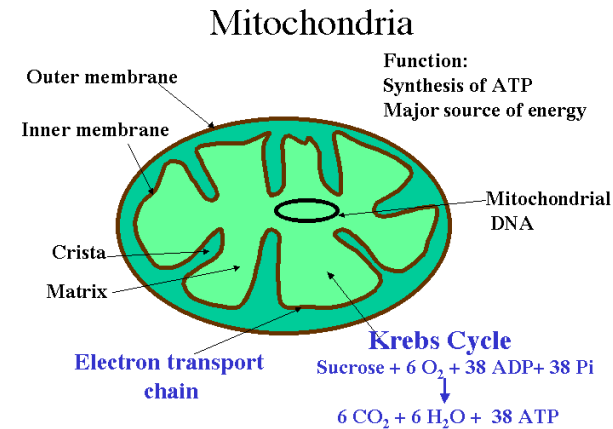
# Επανασύνθεση PC

- Η επανασύνθεση της PC γίνεται διαμέσου της μιτοχονδριακής CK (*mit CK*)
- $C + ATP \rightleftharpoons CP + ADP + H$
- Βρίσκεται στην εσωτερική μιτοχονδριακή μεμβράνη
- Άμεση ανασύνθεση από το ATP που εξέρχεται από τα μιτοχόνδρια



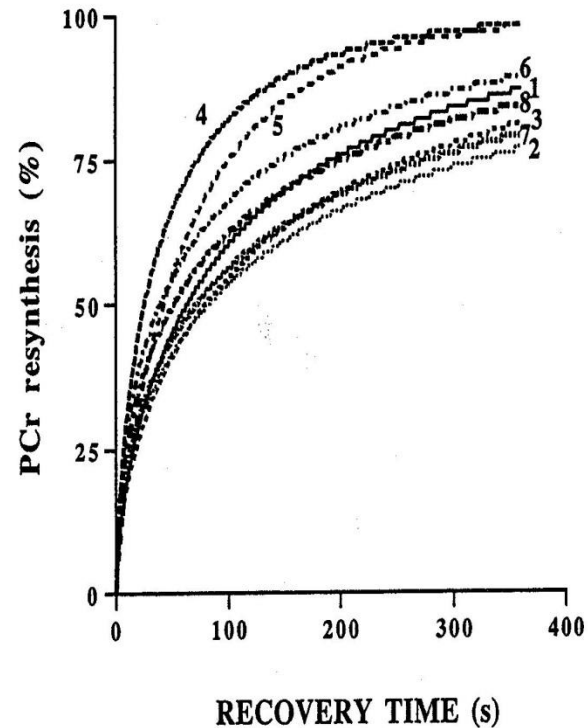
# Αερόβιες προσαρμογές

- Αύξηση του όγκου των μιτοχονδρίων
- Αύξηση του αριθμού των μιτοχονδρίων
- Αύξηση αριθμού αερόβιων ενζύμων
- Αύξηση δραστηριότητας αερόβιων ενζύμων
- Αυξημένο δίκτυο τριχοειδών αγγείων





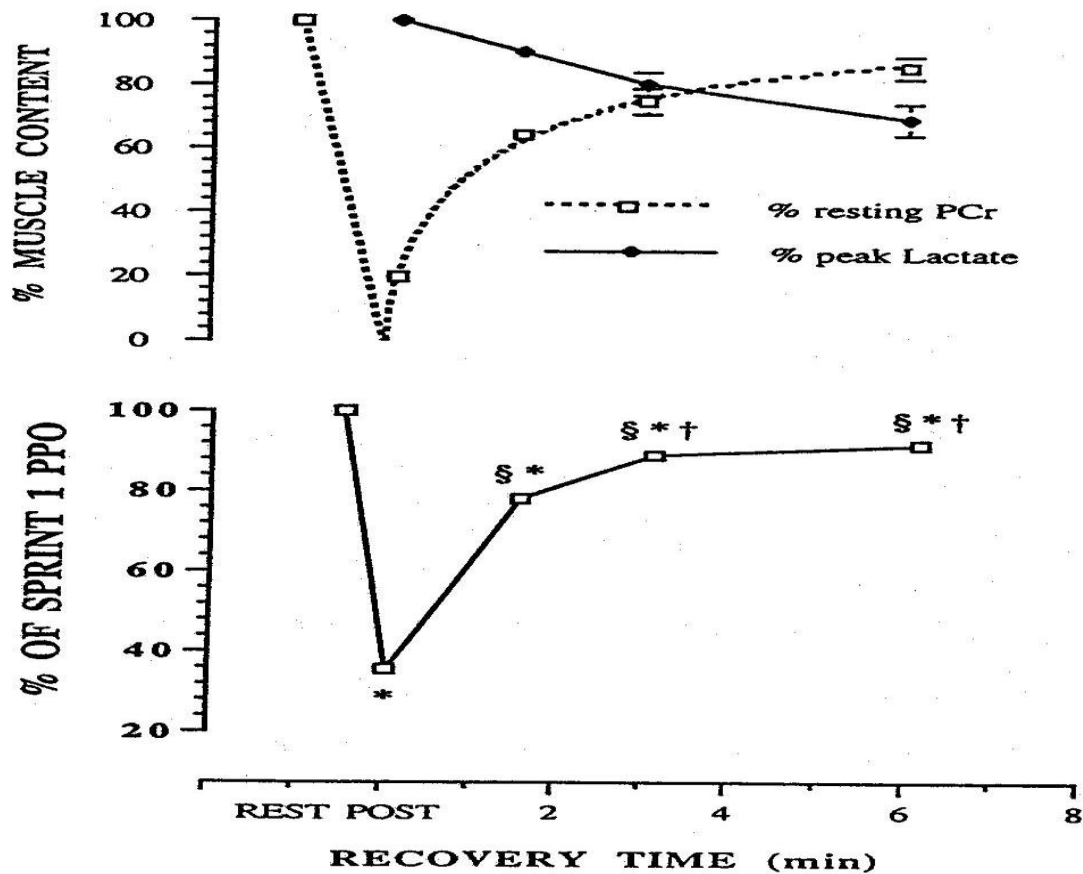
- Η ολοκλήρωση της ποσοστιαίας ανασύνθεσης της φωσφοκρεατίνης μπορεί να διαρκέσει πάνω από τέσσερα λεπτά



**Figure 19.5** Individual phosphocreatine (PCr) resynthesis curves, fitted using a mono-exponential model, during passive recovery after a maximal 30-s cycle ergometer sprint. Values for PCr are expressed as a percentage of the resting concentration. Numbers 1 to 8 represent individual subjects.

Reprinted from Bogdanis, Nevill, Boobis, Lakomy, and Nevill 1995.

# Συσχέτιση της ανάκαμψης της απόδοσης ισχύος και της φωσφοκρεατίνης



**Figure 19.6** Time course of phosphocreatine (PCr) resynthesis and muscle lactate disappearance (*top*) and peak power recovery (*bottom*) after a 30-s maximal cycle ergometer sprint. Values for PCr are expressed as a percentage of the peak concentration (mean  $\pm$  SE,  $n = 8$ ). The curve fitted to the PCr data represents the mean of the curves fitted on the individual data for each subject. \* $p < .01$  from sprint 1; \$ $p < .01$  from POST; † $p < .01$  from 1.5 min; see p. 253.

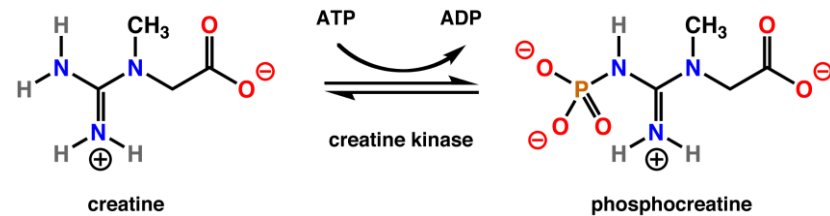
Reprinted from Bogdanis, Nevill, Boobis, Lakomy, and Nevill 1995.

# Συσχέτιση της ανάκαμψης της απόδοσης ισχύος και της φωσφοκρεατίνης

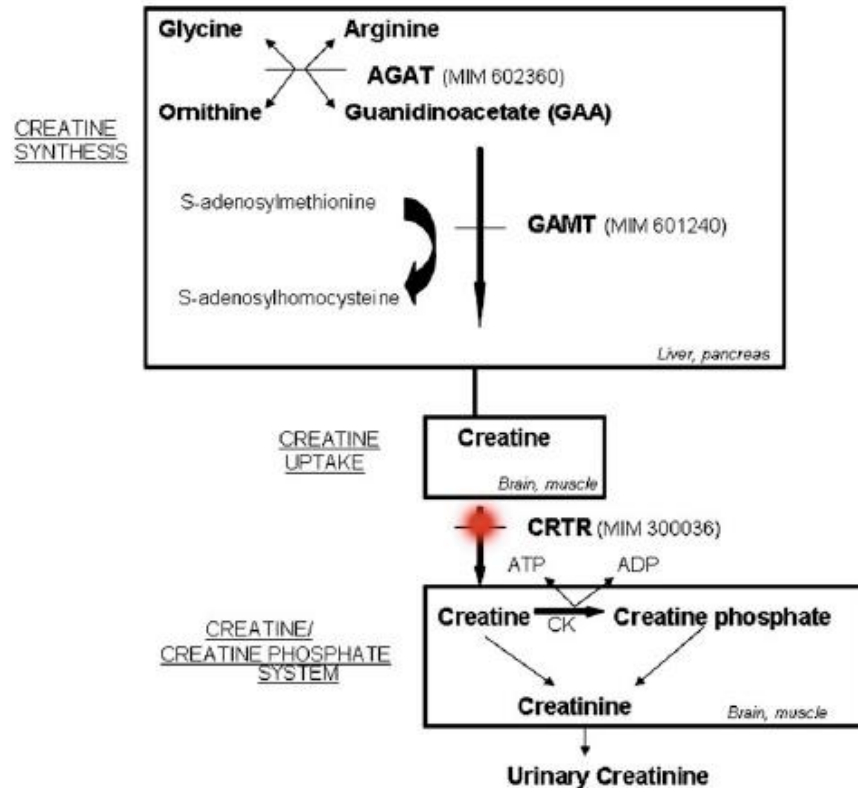
- Η πτώση των επιπέδων της φωσφοκρεατίνης συμβαδίζει με τη μείωση της απόδοσης ισχύος μετά από ένα μέγιστο τεστ 30 δευτερολέπτων στο ποδήλατο
- Η ανασύνθεση της φωσφοκρεατίνης ακολουθεί μία παράλληλη πορεία με αυτή της ανάκαμψης που υπάρχει στην απόδοση της ισχύος κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης

# Κρεατίνη

- Χημική ουσία η οποία βρίσκεται στον ανθρώπινο οργανισμό και σε ένα ενήλικα άνδρα 70 κιλών, η συνολική της ποσότητα υπολογίζεται στα 120 γραμμάρια.
- Το 95% αυτής της ποσότητας βρίσκεται στο μυ.
- Μεγαλύτερη ποσότητα βρίσκεται στους μύες ταχείας συστολής (~60%) συγκριτικά με τη συγκέντρωση της κρεατίνης στους μύες βραδείας συστολής (~40%)



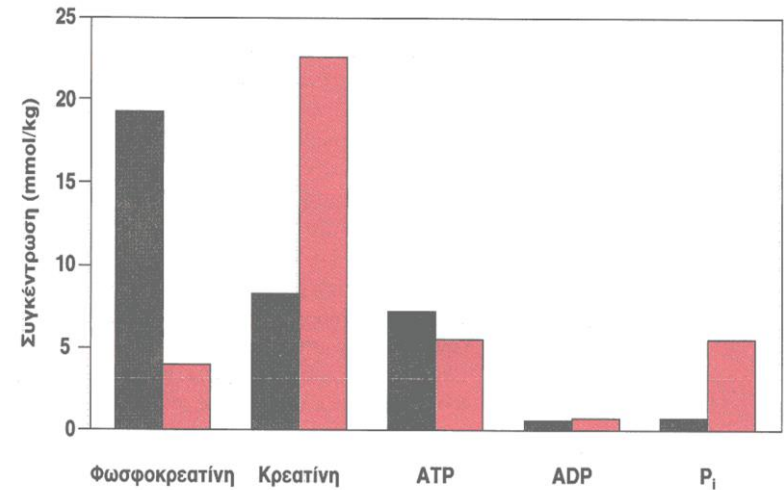
# Σύνθεση κρεατίνης

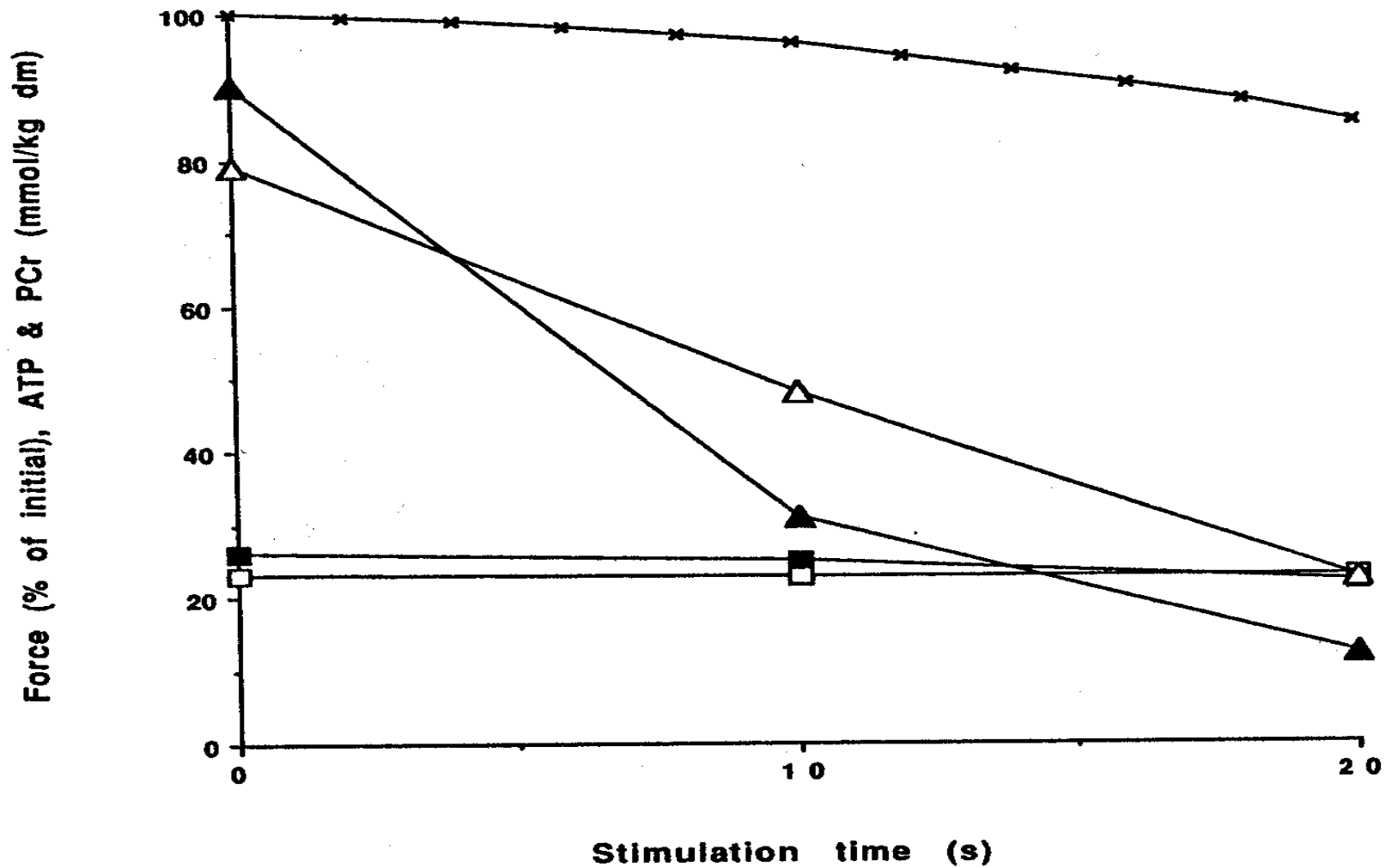


. Creatine metabolism pathway

# Κρεατίνη

- Το σύστημα φωσφαγόνων (ATP και PCr) είναι υπεύθυνο για την απόδοση ισχύος σε μικρής χρονικής διάρκειας προσπάθειες.
- Μεγαλύτερη μείωση στα επίπεδα PCr μετά από έντονες προσπάθειες.





**Figure 18.3** Muscle isometric force production (x) and ATP (squares) and PCr (triangles) concentrations in type I (open symbols) and type II (filled symbols) muscle fibers during 20 s of intense electrical stimulation (1.6 s stimulation, 1.6 s rest; 50 Hz) in humans.

# Συμπληρωματική λήψη κρεατίνης

- Αύξηση της συγκέντρωσης της φωσφοκρεατίνης μπορεί να οδηγήσει σε επιβράδυνση της εμφάνισης της κόπωσης και ο αθλητής μπορεί να αποδώσει καλύτερα.





# Συμπληρωματική λήψη κρεατίνης

- Τιμή ηρεμίας 140 mM/kg ξηρού μυός
- Χορτοφάγοι 90-110 mM/kg ξηρού μυός
- Ανώτατη τιμή συγκέντρωσης κρεατίνης στο μυ είναι τα 145 με 160 mM/kg ξηρού μυός.



# Συμπληρωματική λήψη κρεατίνης

- 4 εκατομμύρια κιλά το χρόνο κατανάλωση στις ΗΠΑ
- Άνδρες κολεγιακοί αθλητές
- Baseball 28.1%
- Basketball 14.6%
- Football 27,5%
- Soccer 11,1%
- Golf 13,0%

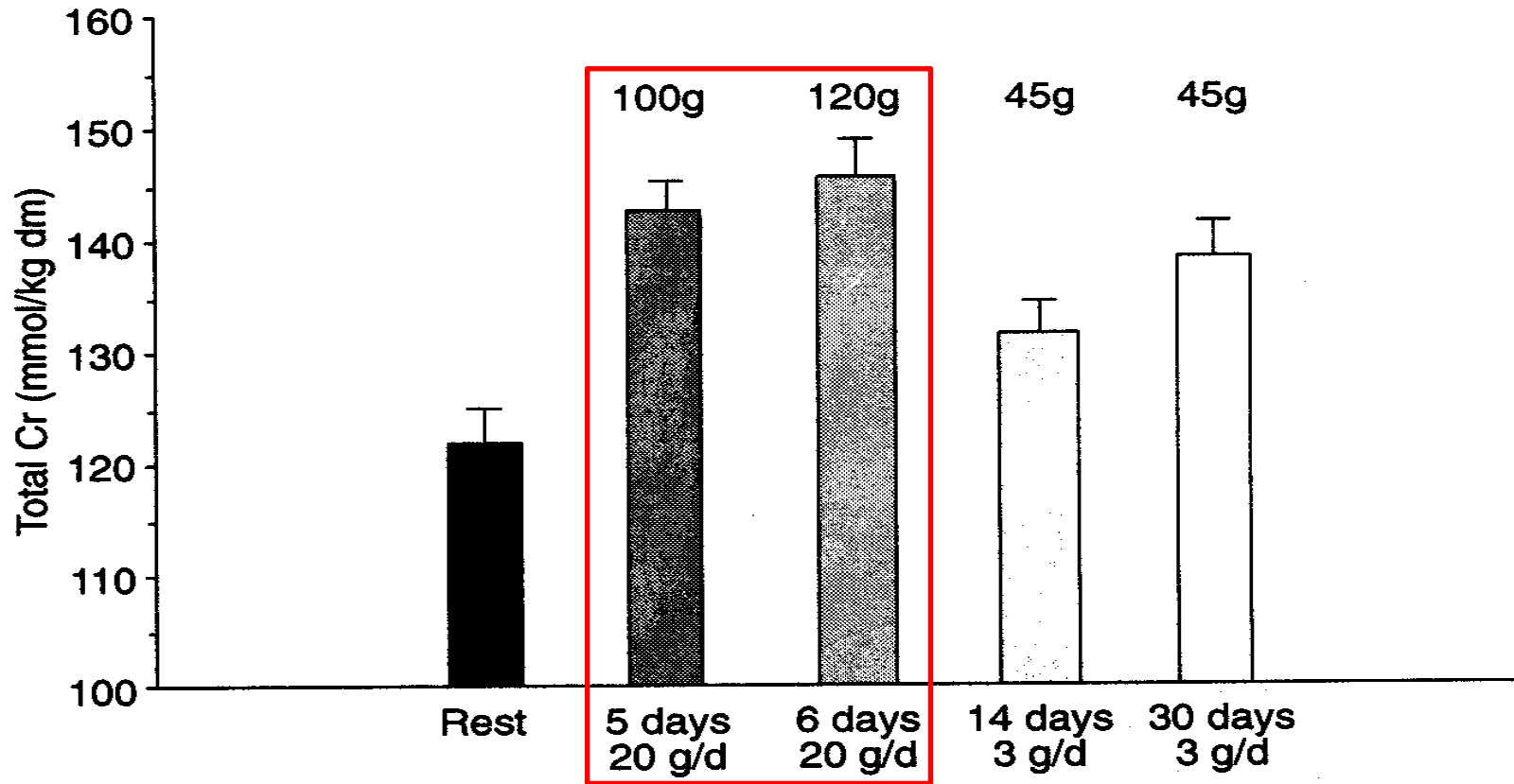


# Συμπληρωματική λήψη κρεατίνης

- Φάση υπερφόρτωσης (6 ημέρες)
- Φάση διατήρησης (25-30 ημέρες)
- Φάση αποχής (7 ημέρες)

# Φάση υπερφόρτωσης

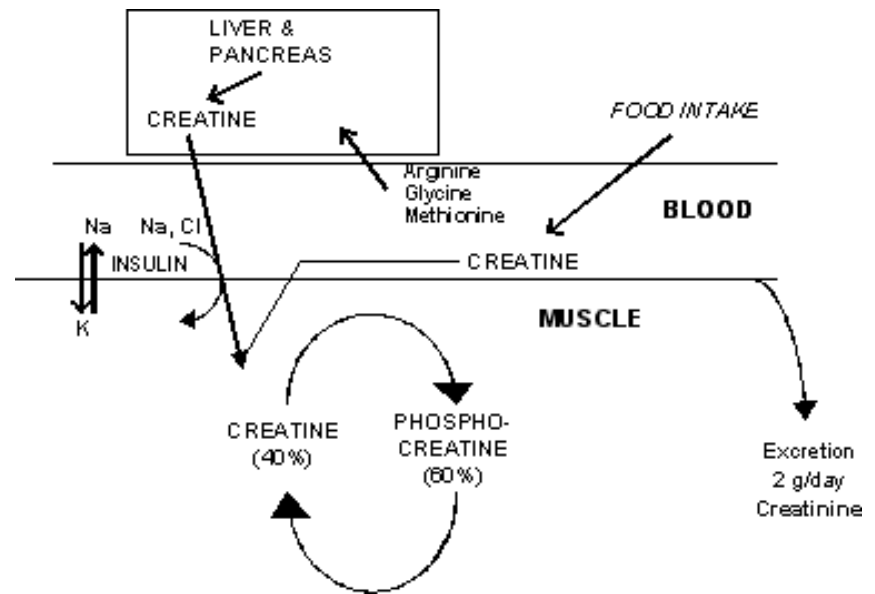
Creatine Supplementation and Muscle Cr



**Figure 18.6** Muscle total creatine (Cr) concentrations before and after Cr ingestion. Units at the base of each bar graph indicate the duration and rate of creatine ingestion. Units above each bar graph indicate the total amount of Cr ingested over the entire experimental period. Values represent mean  $\pm$  SE.

# Συμπληρωματική λήψη κρεατίνης

- Η λήψη της κρεατίνης πρέπει να γίνεται με υδατάνθρακες.
- Αύξηση των επιπέδων ινσουλίνης.



# Κρεατίνη και υδατάνθρακες

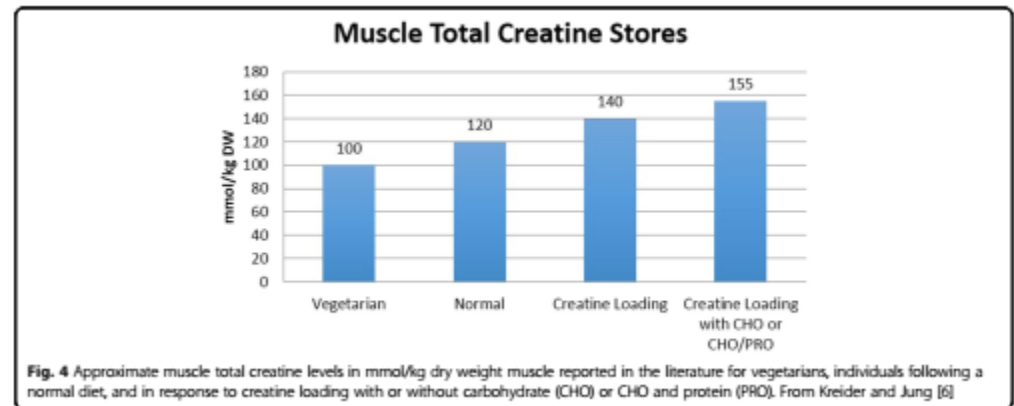
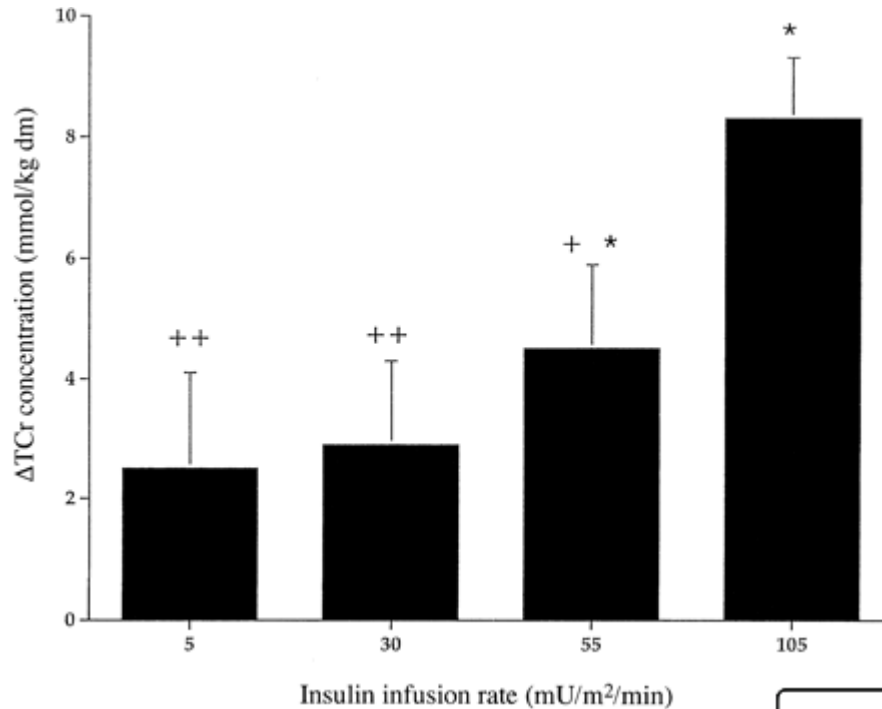
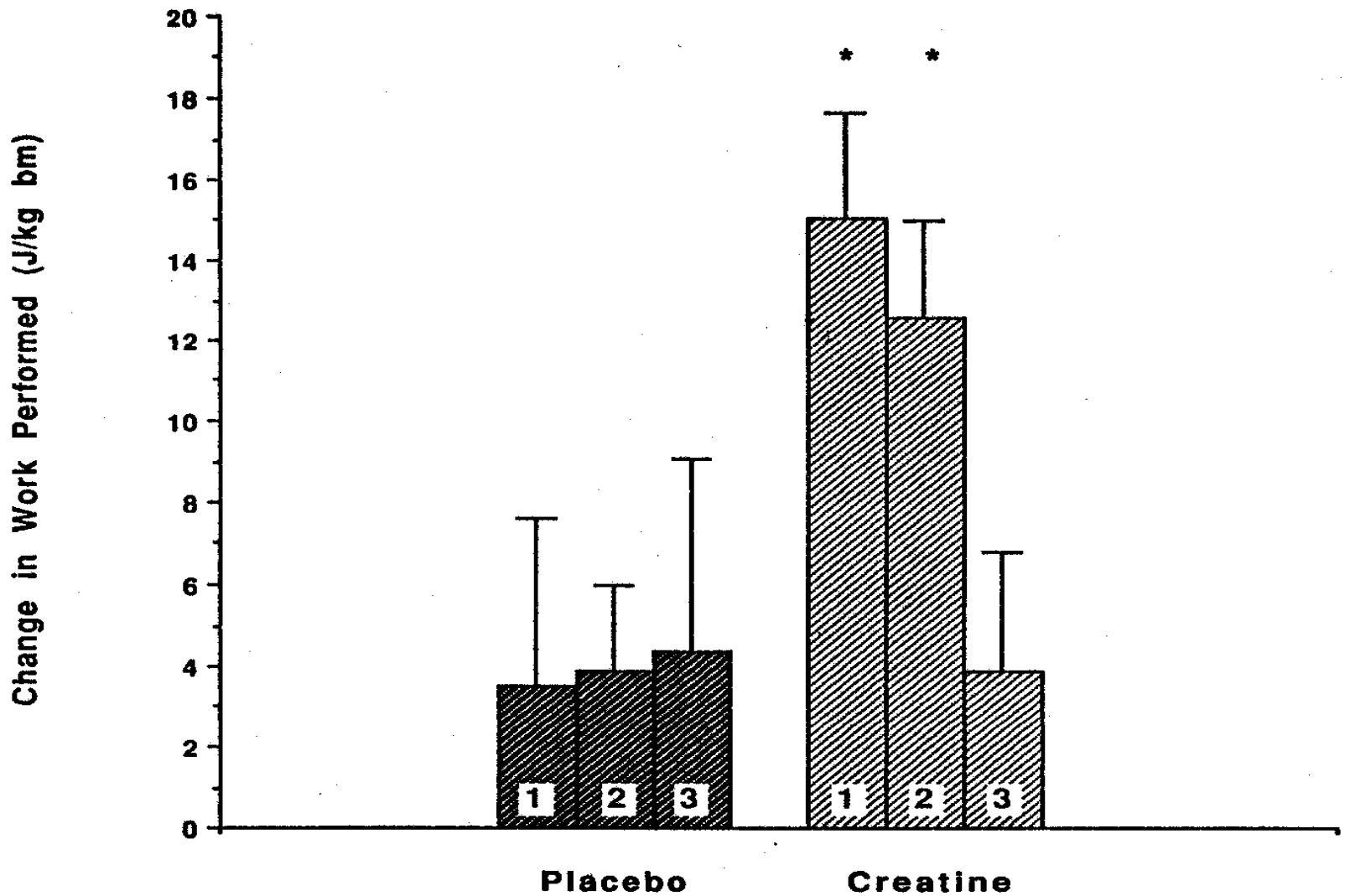


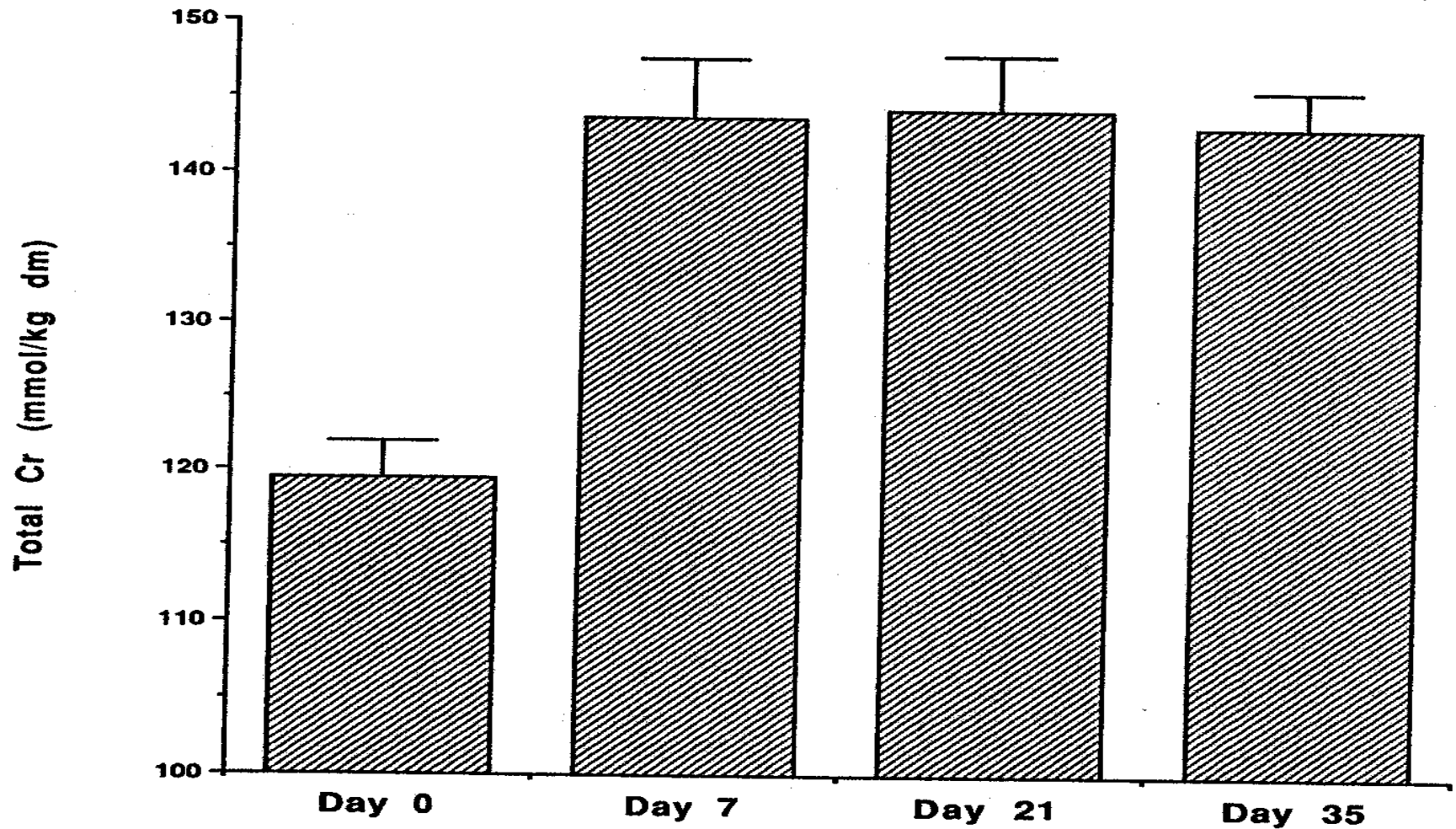
Fig. 4 Approximate muscle total creatine levels in mmol/kg dry weight muscle reported in the literature for vegetarians, individuals following a normal diet, and in response to creatine loading with or without carbohydrate (CHO) or CHO and protein (PRO). From Kreider and Jung [6]



**Figure 18.8** The change in work production during  $3 \times 30$ -s bouts of maximal isokinetic cycling (80 rpm) in men following 5 d of placebo (20 g glucose polymer  $\cdot$  d<sup>-1</sup>) and creatine (20 g  $\cdot$  d<sup>-1</sup>) ingestion. Each bout of exercise was separated by 4 min rest. Values represent mean  $\pm$  SE. \*( $p < .05$ ) indicates significant increase from presupplementation work production.

Ογκώδεις  
αθλητές: 5-  
10 gr/day

# Φάση Διατήρησης

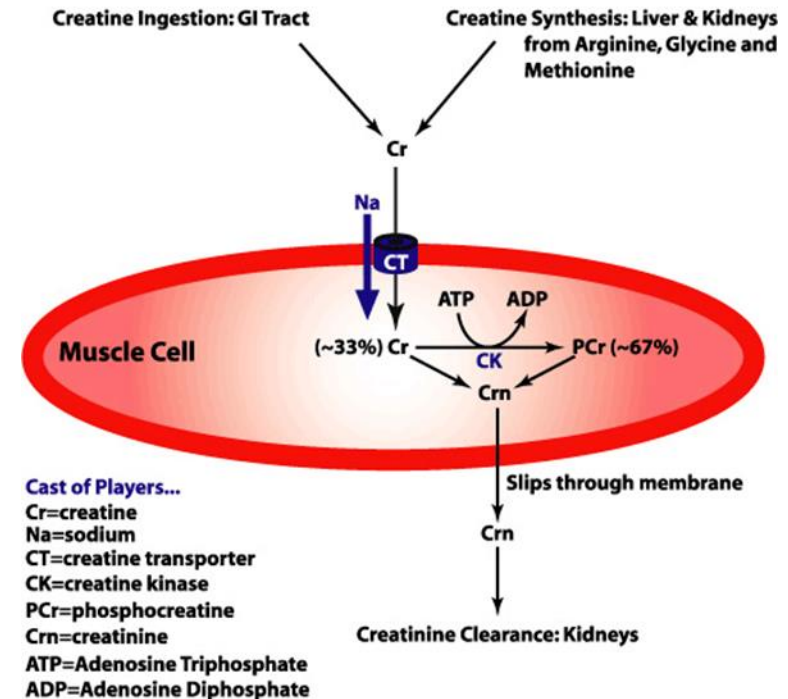


**Figure 18.7** Muscle total creatine (Cr) concentration before and after 34 d of Cr ingestion. Creatine was ingested at a rate of  $20 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  for the initial 6 d and at a rate of  $2 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  thereafter. Values represent mean  $\pm$  SE.

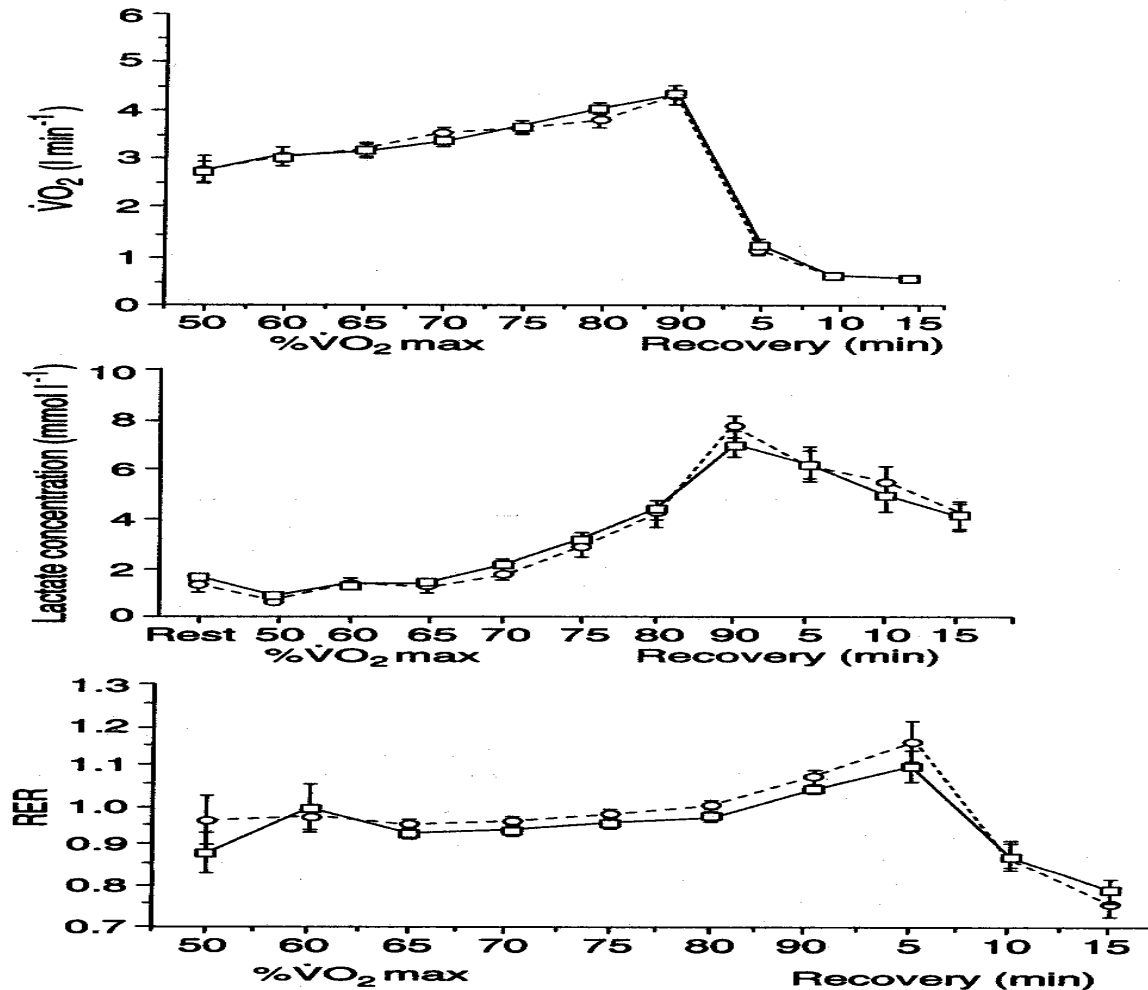


# Φάση αποχής

- Η σύνθεση της κρεατίνης γίνεται στο ήπαρ και το πάγκρεας.
- Μεταφορά με το αίμα στο μυ.
- Είσοδος στο μυ με μεταφορέα.
- Αυξημένη συγκέντρωση κρεατίνης στο μυ μειώνει τη δράση του μεταφορέα (κατιούσα ρύθμιση).
- Η φάση της αποχής διατηρεί τη δράση του μεταφορέα στο μέγιστο δυνατό ρυθμό λειτουργίας.



# Η συμπληρωματική λήψη κρεατίνης δεν βελτιώνει την αερόβια απόδοση



**Figure 18.9** Oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ), blood lactate concentration, and respiratory exchange ratio (RER) during treadmill running and recovery before (circles) and after (squares) 5 d of Cr ingestion ( $20 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) in humans. Exercise was performed for 6 min at intensities equivalent to 50%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, and 90% of maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2,\text{max}}$ ). Values represent mean  $\pm$  SE.

# Εργογόνα δράση της συμπληρωματικής λήψης κρεατίνης

## **Table 1** Potential ergogenic benefits of creatine supplementation

---

- Increased single and repetitive sprint performance
  - Increased work performed during sets of maximal effort muscle contractions
  - Increased muscle mass & strength adaptations during training
  - Enhanced glycogen synthesis
  - Increased anaerobic threshold
  - Possible enhancement of aerobic capacity via greater shuttling of ATP from mitochondria
  - Increased work capacity
  - Enhanced recovery
  - Greater training tolerance
- 

Adapted from Kreider and Jung [6]

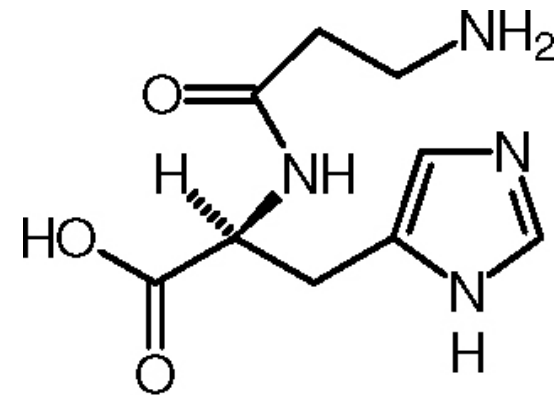
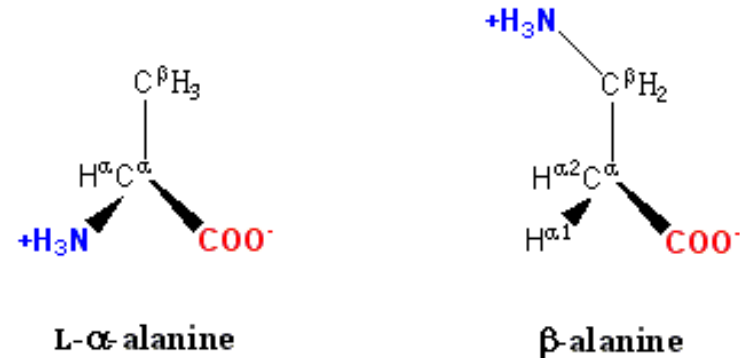
**Table 2** Examples of sport events that may be enhanced by creatine supplementation

---

- *Increased PCr*
    - Track sprints: 60–200 m
    - Swim sprints: 50 m
    - Pursuit cycling
  - *Increased PCr Resynthesis*
    - Basketball
    - Field hockey
    - America Football
    - Ice hockey
    - Lacrosse
    - Volleyball
  - *Reduced Muscle Acidosis*
    - Downhill skiing
    - Water Sports (e.g., Rowing, Canoe, Kayak, Stand-Up Paddling)
    - Swim events: 100, 200 m
    - Track events: 400, 800 m
    - Combat Sports (e.g., MMA, Wrestling, Boxing, etc.)
  - *Oxidative Metabolism*
    - Basketball
    - Soccer
    - Team handball
    - Tennis
    - Volleyball
    - Interval Training in Endurance Athletes
  - *Increased Body Mass/Muscle Mass*
    - American Football
    - Bodybuilding
    - Combat Sports (e.g., MMA, Wrestling, Boxing, etc.)
    - Powerlifting
    - Rugby
    - Track/Field events (Shot put; javelin; discus; hammer throw)
    - Olympic Weightlifting
-

# Καρνοσίνη – β-αλανίνη

- Η καρνοσίνη είναι ένα διπεπτίδιο που σχηματίζεται από τη συνένωση της ιστιδίνης και β-αλανίνης
- Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα συστήματα ρύθμισης του φυσιολογικού pH στο εσωτερικό του κυττάρου συνεπικουρώντας τη δράση άλλων πεπτιδίων και φωσφορικών ριζών



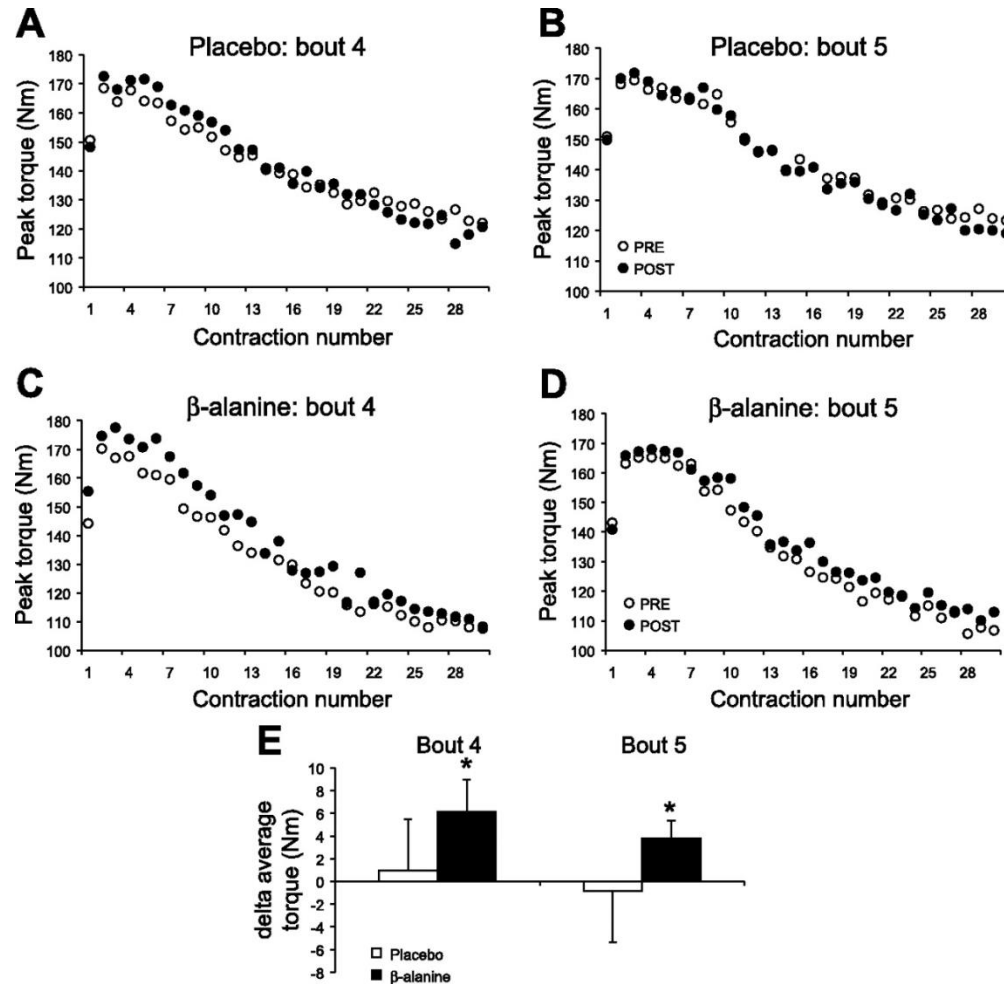
carnosine

# Καρνοσίνη – β-αλανίνη (Trexler et al. 2015)

- Τέσσερις εβδομάδες συμπληρωματικής λήψης (4-6 γραμμάρια ημερησίως) β-αλανίνης αυξάνουν σημαντικά τα επίπεδα της καρνοσίνης και λειτουργεί σαν buffer για το ενδοκυττάριο pH.
- Η συμπληρωματική λήψη β-αλανίνης, μέσα στις προτεινόμενες δόσεις, φαίνεται να είναι ασφαλής για τα υγιή άτομα
- Η μοναδική παρενέργεια, που φαίνεται να είναι εμφανής, είναι αυτή της παραισθησίας αλλά αυτό είναι σημαντικά περιορισμένο εάν η δοσολογία σπάσει σε μικρότερες δόσεις (1.6 γραμμάρια) ή εάν χρησιμοποιηθεί μια μορφή που θα διαχέει τη β-αλανίνη στην κυκλοφορία με αργό και σταθερό τρόπο
- Η συμπληρωματική λήψη 4-6 γραμμαρίων β-αλανίνης την ημέρα, για μια περίοδο 2 έως 4 εβδομάδων, έχει βρεθεί ότι αυξάνει την αθλητική απόδοση, με τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο εμφανή σε αθλήματα που διαρκούν από ένα έως 4 λεπτά.

# Carnosine– $\beta$ -alanine

- In 1-4 min events has been shown ergogenic effects



# Καρνοσίνη – β-αλανίνη (Trexler et al. 2015)

- Η β-αλανίνη βοηθάει στον περιορισμό της νευρομυϊκής κόπωσης, ειδικά σε ηλικιωμένα άτομα, και πιθανόν να βοηθάει σε καλύτερη απόδοση τακτικής
- Ο συνδυασμός της β-αλανίνης με άλλα συμπληρώματα μπορεί να είναι αποδοτικός όταν η λήψη της β-αλανίνης είναι αρκετή (π.χ. 4-6 γραμμάρια την ημέρα) και ο χρόνος λήψης τουλάχιστον 4 εβδομάδες
- Απαιτείται περισσότερη έρευνα για να διαπιστωθεί εάν η επίδραση της συμπληρωματικής λήψης β-αλανίνης έχει θετικές επιδράσεις στη δύναμη και αντοχή σε προσπάθειες μεγαλύτερες των 25 λεπτών καθώς και άλλων θετικών επιδράσεων στην υγεία που σχετίζονται με την καρνοσίνη