

ΑΜΕΣΗ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ

ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΟΥΓΙΟΣ, PhD

Αναληρωτής Καθηγητής Βιοχημείας της Άσκησης

Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μεταβολισμός είναι το σύνολο των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν σε ένα ζωντανό σύστημα, όπως π.χ. σε ένα κύτταρο. Οι αντιδράσεις αυτές ανέρχονται σε χιλιάδες. Ωστόσο, η εικόνα του μεταβολισμού δεν είναι εικόνα χάους, αλλά εκείνη μιας οργανωμένης και συντονισμένης κυψέλης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η ταχύτητα των μεταβολικών αντιδράσεων ελέγχεται από πλήθος βιοχημικών παραγόντων (όπως τα ένζυμα), οι οποίοι επιτρέπουν την επιτυχή ανταπόκριση ενός εκάστου κυττάρου και, κατ' επέκταση, ενός πολυκύτταρου οργανισμού σε διαρκώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Τέτοιες απαιτήσεις, και μάλιστα πολύ έντονες, επιβάλλει η σωματική άσκηση.

Η σωματική άσκηση είναι ένας από τους ισχυρότερους τροποποιητές του μεταβολισμού. Λίγα άλλα αίτια προκαλούν τόσο εντυπωσιακές αλλαγές, ό-

σο αυτή. Οι αλλαγές που σχετίζονται με τους υδατάνθρακες και τα λίπη αποτελούν το θέμα αυτού του άρθρου. Μέσα από την εξέτασή τους θα αναδυθούν οι παρακάτω βασικές αρχές:¹

- Ο μεταβολισμός κατά την άσκηση υποτάσσεται στην ανάγκη αυξημένης παροχής ενέργειας στους συστελλόμενους μύες.
- Τα περισσότερα είδη άσκησης χαρακτηρίζονται από αυξημένη διάσπαση υδατανθράκων και λιπών.
- Η άσκηση αλληάζει το μεταβολισμό, όχι μόνο των ασκούμενων μυών, αλλά και άλλων οργάνων και ιστών, όπως το ήπαρ και ο λιπώδης ιστός.
- Ο μεταβολισμός δεν επιστρέφει στα χαρακτηριστικά της ηρεμίας αμέσως μετά το τέλος της άσκησης. Πολλές αλλαγές διατηρούνται για ώρες ή ημέρες, ενώ άλλες είναι τόσο αργές, που εκδηλώνονται κατά την αποκατάσταση μάλλον, παρά κατά την άσκηση.

- Η τακτική επανάληψη της άσκησης (αυτό που ονομάζουμε άθληση ή προπόνηση) μπορεί να αλληάζει τόσο πολύ το μεταβολισμό, που να είναι διαφορετικός σε έναν αθλούμενο απ' ό,τι σε ένα μη αθλούμενο, όχι μόνο κατά την άσκηση, αλλά και κατά την ηρεμία.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΣΚΗΣΗΣ

Δεν έχουν όλης οι ασκήσεις την ίδια επίδραση στο μεταβολισμό. Αν και η πλήρης εξέταση όλων των πιθανών ειδών άσκησης ξεφεύγει από το σκοπό αυτού του άρθρου, χρειάζεται ωστόσο να είμαστε όσο το δυνατό σαφέστεροι ως προς το σε ποια είδη άσκησης αναφέρονται οι μεταβολικές αλλαγές που θα συζητήσουμε.

Τρεις κύριες παράμετροι που προσδιορίζουν την άσκηση είναι ο τύπος, η ένταση και η διάρκεια. Ξεκινώντας από την πρώτη παράμετρο, τρεις κύριοι τύποι άσκησης είναι η άσκηση αντοχής, η άσκηση με αντιστάσεις και η άσκηση ταχύτητας. Η άσκηση αντοχής χαρα-

κτηρίζεται από παρατεταμένες συνεχείς ή διαλειμματικές περιόδους συστολής των μυών ενάντια σε μικρές αντιστάσεις. Το χαλαρό τρέξιμο (τζόγκινγκ) είναι μια άσκηση αντοχής. Αντίθετα, η άσκηση με αντιστάσεις περιλαμβάνει μικρές περιόδους συσταθτικής δραστηριότητας των μυών ενάντια σε μεγάλες αντιστάσεις. Η άρση βαρών είναι μια άσκηση με αντιστάσεις. Τέλος, η άσκηση ταχύτητας περιλαμβάνει μικρές περιόδους μέγιστης συσταθτικής δραστηριότητας ενάντια σε χαμηλές αντιστάσεις. Μια αγωνιστική κοθύμηση 50 μέτρων είναι άσκηση ταχύτητας.

Ένας άθλιος τρόπος περιγραφής του τύπου άσκησης είναι με τους όρους αερόβια και αναερόβια. Οι όροι αυτοί αναφέρονται στον κυρίαρχο τρόπο παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια της άσκησης. Η αερόβια άσκηση αντλεί ενέργεια κυρίως από βιοχημικές διεργασίες που απαιτούν την παρουσία οξυγόνου, ενώ η αναερόβια άσκηση αντλεί ενέργεια κυρίως από βιοχημικές διεργασίες που δεν απαιτούν την παρουσία οξυγόνου. Η άσκηση αντοχής είναι αερόβια, ενώ η άσκηση με αντιστάσεις και η άσκηση ταχύτητας είναι αναερόβιας.

Περνώντας στην ένταση της άσκησης, αυτή μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Μερικοί είναι ειδικοί για τη συγκεκριμένη άσκηση (για παράδειγμα, δρομική ταχύτητα ή βάρος που ανυψώνεται), ενώ άλλοι έχουν γενική εφαρμογή (για παράδειγμα, καρδιακή συχνότητα ή πρόσληψη οξυγόνου). Μπορεί κανείς ακόμη να εκφράσει την ένταση με σχετικούς αντί για απόλυτους όρους, δηλαδή ως ποσοστό της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (VO_{2max}). Με βάση αυτό χαρακτηρίζουμε μια άσκηση ως ελαφριά αν

είναι μέχρι 49%, μέτρια αν είναι από 50 ως 74%, βαριά αν είναι από 75% και πάνω, και μέγιστη αν είναι γύρω στο 100%.

Η διάρκεια της άσκησης είναι ευκολότερο να μετρηθεί, αφού υπάρχει ένας μόνο τρόπος για να την εκφράσει κανείς (ο χρόνος). Επειδή δεν υπάρχει συμφωνημένη ταξινόμηση των ασκήσεων με βάση τη διάρκειά τους (δηλαδή ποιες ασκήσεις θα χαρακτηρίζουμε σύντομες και ποιες παρατεταμένες), θα προσπαθώ να γίνωμαι όσο το δυνατό πιο συγκεκριμένος, όταν αναφέρομαι σε διάρκεια.

Μια τελευταία παράμετρος που απαιτεί συζήτηση είναι το αν η άσκηση εκτελείται μία φορά ή επαναλαμβάνεται τακτικά σε μια περίοδο εβδομάδων, μηνών ή χρόνων. Η άσκηση που εκτελείται μία φορά μόνο είναι οξεία ή βραχυπρόθεσμη, ενώ η άσκηση που επαναλαμβάνεται είναι χρόνια ή μακροπρόθεσμη.

Τα αποτελέσματα της οξείας άσκησης στο μεταβολισμό διαρκούν συνήθως από λίγα λεπτά μέχρι μερικές ημέρες μετά το τέλος της, ενώ τα αποτελέσματα της χρόνιας άσκησης διαρκούν συνήθως από αρκετές ημέρες μέχρι αρκετούς μήνες μετά τη διακοπή της. Τα χρόνια αποτελέσματα λέγονται και προσαρμογές στην άσκηση, με την έννοια ότι ο οργανισμός τροποποιεί το μεταβολισμό του για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της τακτικής άσκησης με μικρότερη διαταραχή της ομοιόστασής του και με μικρότερη πιθανότητα τραυματισμού. Στις προσαρμογές στηρίζεται η βελτίωση της αθλητικής ικανότητας με την προπόνηση, αλλά και η βελτίωση της υγείας του γενικού πληθυσμού με την άθληση.

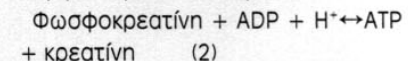
ΠΡΩΤΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

Πριν εξετάσουμε την επίδραση της άσκησης στο μεταβολισμό των υδατανθράκων και των λιπών (των κύ-

ριων πηγών ενέργειας στις περισσότερες ασκήσεις), είναι απαραίτητο να αναφερθούμε σε δύο άλλες πηγές, το ATP και τη φωσφοκρεατίνη, για λόγους που θα γίνουν φανεροί αμέσως. Το ATP (συντομογραφία της τριφωσφορικής αδενοσίνης) είναι η άμεση πηγή ενέργειας για τη μυϊκή συστολή, αφού η υδρόλυση του προς ADP (διφωσφορική αδενοσίνη) και Pi (φωσφορικό οξύ) είναι αυτή που παράγει την ενέργεια για τη μετακίνηση της μυοσίνης κατά μήκος της ακτίνης μέσα στις μυϊκές ίνες (τα μυϊκά κύτταρα) και τη συστολή των μυών.



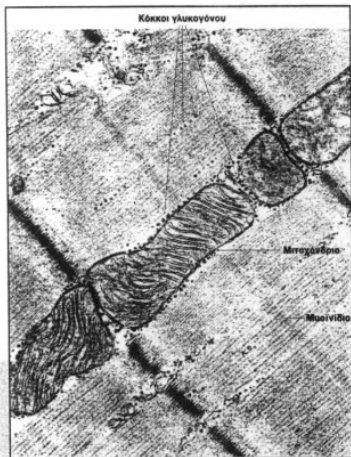
Η συγκέντρωση του ATP μέσα στις μυϊκές ίνες είναι τόσο μικρή (6 mmol/L), που επαρκεί για τρία μόλις δευτερόλεπτα μέγιστης συστολής. Επομένως, είναι επιτακτική ανάγκη η γρήγορη αναπλήρωσή του, αν θέλουμε να συνεχίσουμε να ασκούμε. Η πρώτη εφεδρεία είναι η φωσφοκρεατίνη, που βρίσκεται στους μύες σε συγκέντρωση πολύπληθια εκείνης του ATP (20 mmol/L) και το αναπληρώνει σύμφωνα με την αντίδραση:



Με τον τρόπο αυτόν η φωσφοκρεατίνη γίνεται η κύρια πηγή ενέργειας σε μέγιστες ασκήσεις που διαρκούν μέχρι επτά περίπου δευτερόλεπτα,² όπως η άρση βαρών, τα άλματα, οι ρίψεις και ο δρόμος 60 μέτρων. Λόγω της μικρής σχετικά συγκέντρωσής της, η φωσφοκρεατίνη εξαντλείται γρήγορα και αδυνατεί να παίξει πρωταγωνιστικό ρόλο σε ασκήσεις μεγαλύτερης διάρκειας. Τα σκίπτρα εδώ αναλαμβάνουν οι υδατάνθρακες.

ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

Ο αφθονότερος υδατάνθρακας στο σώμα μας είναι το γλυκογόνο. Πρόκειται για έναν πολυσακχαρίτη της



Εικόνα 1

Φωτογραφία μέρους μιας μυϊκής ίνας κάτω από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο αποκαλύπτει πλήθος κόκκων γλυκογόνου με τη μορφή κουκίδων μεταξύ μυοϊνιδίων, μεταξύ μυοϊνιδίων και μιτοχονδρίων, και μεταξύ μιτοχονδρίων.

(Με την ευγενική άδεια του Dr. Hans Hoppeler, Πανεπιστήμιο Βέρνης. Φωτογραφία από τους Heigard Claassen και Franziska Graber.)



Εικόνα 2

Κόκκοι γλυκογόνου, φωτογραφημένοι σε μεγαλύτερη ανάλυση από ό,τι στην εικόνα 1, αφθονούν στα ηπατοκύτταρα, όπως αυτό που μέρος του εμφανίζεται εδώ. Οι μισοί από τους κόκκους είναι συγκεντρωμένοι κοντά σε δύο μιτοχόνδρια στην κορυφή.

(© Prof. Ewald R. Weibel, Πανεπιστήμιο Βέρνης.)

γλυκόζης, που βρίσκεται αποθηκευμένος με τη μορφή κόκκων στο κυτταρόπλασμα των μυϊκών (εικόνα 1) και ηπατικών κυττάρων (εικόνα 2). Η περιεκτικότητα των σκελετικών μυών και του ήπατος σε γλυκογόνο επηρεάζεται σημαντικά από τη διατροφή και τη σωματική δραστηριότητα, αλλιώς, όταν αυτές δεν είναι ακραίες, κυμαίνεται από 1 μέχρι 1,5 % (κατά βάρος) για τους μύες και από 3 μέχρι 7 % για το ήπαρ. Λαμβάνοντας υπόψη το βάρος των οργάνων αυτών σε έναν άντρα 70 κιλών, τα παραπάνω ποσοστά μεταφράζονται, κατά μέσο όρο, σε 350 και 90 γραμμάρια αντίστοιχα.

Η άσκηση επιτείνει τη διάσπαση του γλυκογόνου τόσο στους μύες, όσο και στο ήπαρ. Η διάσπαση ονομάζεται γλυκογονόλυση και πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντίδραση: Γλυκογόνο (με n μονάδες γλυκόζης) + $P_i \rightarrow$ γλυκογόνο (με $n-1$ μονάδες γλυκόζης) + 1-φωσφορική γλυκόζη (3)

Οι παράγοντες που επιταχύνουν τη γλυκογονόλυση διαφέρουν μεταξύ του μυός και του ήπατος. Στο μυ πρωταρχικό ρόλο παίζει η αύξηση της συγκέντρωσης του P_i , λόγω της αθρόας υδρόλυσης του ATP (αντίδραση 1). Επειδή το P_i είναι αντιδρών στην αντίδραση 3, η αύξησή του την επιταχύνει και μάλιστα από τα πρώτα δευτερόλεπτα της άσκησης.³ Οι άηθοι παράγοντες που επιταχύνουν τη γλυκογονόλυση στο μυ ενεργοποιούν άμεσα ή έμμεσα τη φωσφορυλίωση, το ένζυμο που καταλύει την αντίδραση 3. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η μείωση της συγκέντρωσης του ATP και η αύξηση της συγκέντρωσης του AMP (μονοφωσφορική αδενοσί-

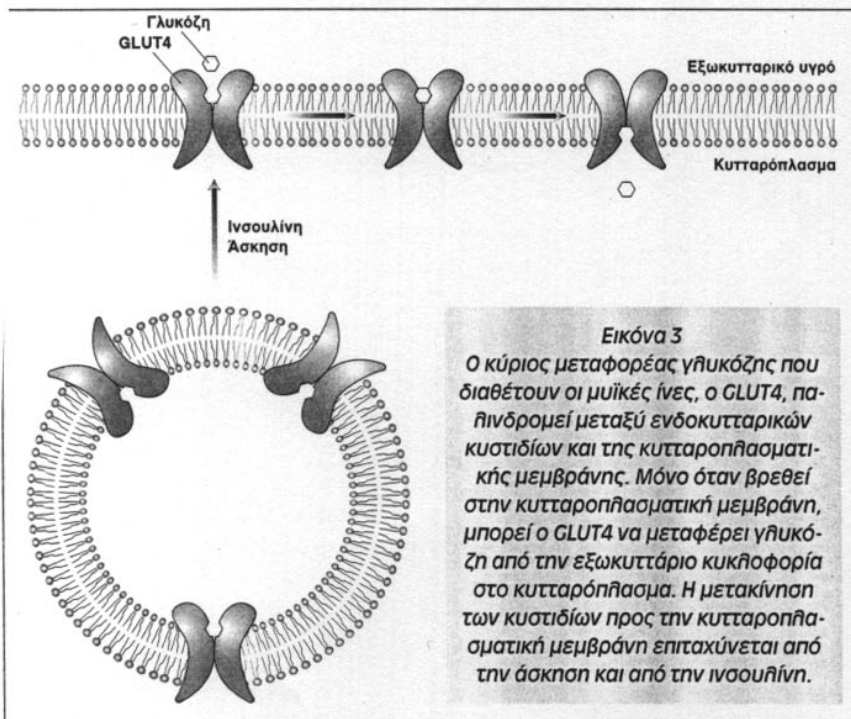
νη), ως αποτέλεσμα της παραπέρα διάσπασης του ADP, το οποίο προκύπτει από την αντίδραση 1. Το AMP ενεργοποιεί τη φωσφορυλίωση, ενώ το ATP την αναστέλλει.

- Η αύξηση της συγκέντρωσης του ιόντος ασβεστίου (Ca^{2+}) στο κυτταρόπλασμα, ως αποτέλεσμα της διάχυσης του από το σαρκοπλασματικό δίκτυο κατά την ενεργοποίηση της συστολής. Το Ca^{2+} ενεργοποιεί το ένζυμο κινάση της φωσφορυλίωσης, η οποία καταλύει τη φωσφορυλίωση με συνέπεια την ενεργοποίηση της φωσφορυλίωσης.

- Η αύξηση της συγκέντρωσης της ορμόνης επινεφρίνη στο αίμα, ως αποτέλεσμα της ενεργοποίησης του συμπαθητικοαδρενεργικού συστήματος κατά την άσκηση. Η επινεφρίνη συνδέεται με το β αδρενεργό υποδοχέα στην επιφάνεια των μυϊκών ινών και ενεργοποιεί μια σειρά μοριακών αλληλεπιδράσεων (το ηλεγόμενο καταρράκτη του κυκλικού AMP), ο οποίος καταλήγει στη φωσφορυλίωση και ενεργοποίηση της φωσφορυλίωσης.

Στο ήπαρ η φωσφορυλίωση ενεργοποιείται επίσης χάρη στην αύξηση της επινεφρίνης. Δύο άλλες ορμονικές αλληλαγές που συμβάλλουν στην ενεργοποίησή της κατά την άσκηση είναι η αύξηση της γλυκαγόνης και η μείωση της ινσουλίνης. Σε αντίθεση ωστόσο με το μυ, το P_i , το ATP και το AMP δεν επηρεάζουν τη δραστηριότητα του ενζύμου, επειδή οι συγκεντρώσεις τους στα ηπατοκύτταρα δεν επηρεάζονται από την άσκηση.

Διαφορετική είναι και η τύχη των προϊόντων της γλυκογονόλυσης στο μυ και στο ήπαρ. Στο μυ η 1-φωσφορική γλυκόζη, η οποία προκύπτει από την αντίδραση 3 εισέρχεται στο μεταβολικό μονοπάτι της γλυκόλυσης, μέσω του οποίου διασπάται για την παραγωγή ενέργειας. Αντίθετα, στο



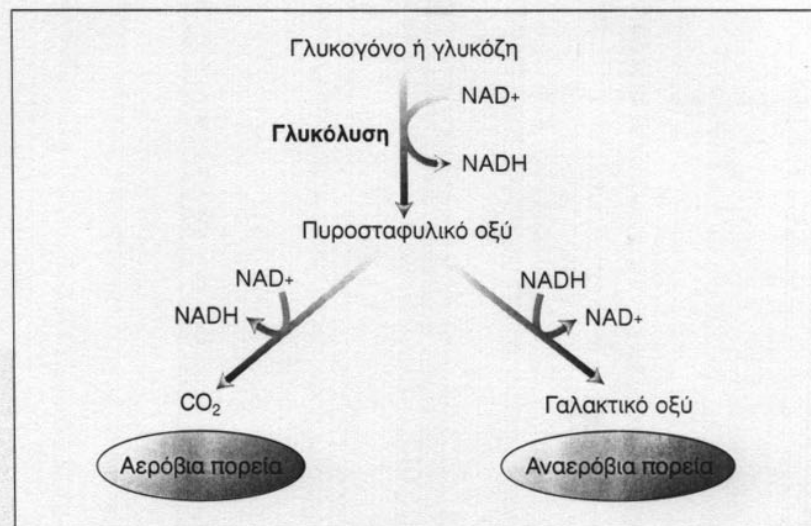
μόμος αυτού του φαινομένου δεν είναι γνωστός, αλλήλ φαίνεται να προκαλείται από την απελευθέρωση Ca^{2+} από το σαρκοπλησματικό δίκτυο. Σημειώστε, ότι αύξηση της πρόσληψης γλυκόζης από τις μυϊκές ίνες, μέσω της μετακίνησης του GLUT4 προς την κυτταροπλησματική μεμβράνη, προκαλεί και η ορμόνη ινσουλίνη. Η μετακίνηση αυτή ωστόσο γίνεται με διαφορετικό μηχανισμό. Για το λόγο αυτό, η αύξηση της πρόσληψης γλυκόζης από το μυ δεν εμποδίζεται σε έναν ασκούμενο διαβητικό. Αυτός είναι ένας από τους λόγους, για τους οποίους η άσκηση είναι χρήσιμη στη ρύθμιση της γλυκόζης του αίματος στους διαβητικούς (έναν άλλο θα συζητήσουμε παρακάτω).

Τόσο η 1-φωσφορική γλυκόζη, η οποία παράγεται στους ασκούμενους μύες μέσω της γλυκογονόλυσης, όσο και η γλυκόζη που προέρχεται από το αίμα, μετατρέπονται μέσω της γλυκόλυσης σε δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέος, αποδίδοντας 3 και 2 ATP αντί-

ήπαρ μετατρέπεται σε απλή γλυκόζη (με την αφαίρεση της φωσφορικής ομάδας της) και εξάγεται στο αίμα για τον εφοδιασμό του υπόλοιπου σώματος (και ιδιαίτερα των ασκούμενων μυών) με ενέργεια.

Στον εφοδιασμό των ασκούμενων μυών με γλυκόζη συμβάλλει ο πολλαπλασιασμός (μέχρι και κατά 20 φορές) της αιματικής ροής προς αυτούς και η αύξηση του μεταφορέα γλυκόζης GLUT4 στην επιφάνεια των μυϊκών ινών. Η πρωτεΐνη αυτή δεν βρίσκεται πάντοτε στην επιφάνεια. Αντιθέτως, κυκλοφορεί μεταξύ ενδοκυτταρικών κυστιδίων και της κυτταροπλησματικής μεμβράνης (εικόνα 3).⁴ Η πρόσληψη της γλυκόζης από μια μυϊκή ίνα πιστοποιείται, κυρίως μέσω του ελέγχου της μετακίνησης του GLUT4 από τα κυστίδια προς την κυτταροπλησματική μεμβράνη: Όσο περισσότερα μόριά του μετακινηθούν προς την κυτταροπλησματική μεμβράνη, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα γλυκόζης θα εισέλθει στο κύτταρο. Η συστολή μιας μυϊκής ίνας αυξάνει

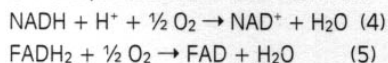
τη μετακίνηση του GLUT4 προς την κυτταροπλησματική μεμβράνη, με αποτέλεσμα την αύξηση της πρόσληψης γλυκόζης.⁵ Ο βιοχημικός μηχανι-



Εικόνα 4

Η διάσπαση των υδατανθράκων μπορεί να ακολουθήσει αερόβια πορεία (με κατάληξη το διοξείδιο του άνθρακα) ή αναερόβια πορεία (με κατάληξη το γαλακτικό οξύ). Καθώς η ένταση της άσκησης αυξάνεται, η δεύτερη πορεία κερδίζει σταδιακά έδαφος, γιατί συνεπάγεται τη γρήγορη αναγέννηση του NAD⁺ που χρειάζεται στη γλυκόλυση. Αντίθετα, η αερόβια πορεία απαιτεί πρόσθετο NAD⁺, που αναγεννιέται πιο αργά με την αναπνευστική αλυσίδα.

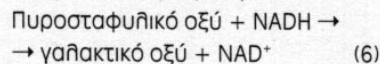
στοίχως. Οι μέχρι στιγμής διεργασίες είναι αναερόβιες και πραγματοποιούνται στο κυτταρόπληγμα. Το πυροσταφυλικό οξύ αποτελεί ένα κομβικό σημείο στο μεταβολισμό των υδατανθράκων, γιατί μπορεί να ακολουθήσει δύο δρόμους, έναν αερόβιο κι έναν αναερόβιο (εικόνα 4). Στον αερόβιο δρόμο περνά στα μιτοχόνδρια και μετατρέπεται σε ακετυλοσυνένζυμο Α, [Acetyl co-A], το οποίο εισέρχεται στον κύκλο του κιτρικού οξέος (κύκλος του Krebs). Μέσω του κύκλου η ακετυλομάδα του ακετυλοσυνενζύμου Α οξειδώνεται σε δύο μόρια διοξειδίου του άνθρακα με τη βοήθεια του NAD⁺ (νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο) και του FAD (φλαβινο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο), τα οποία ανάγονται σε NADH και FADH₂. Οι δύο αυτές ουσίες περιέχουν την περισσότερη ενέργεια που αποδίδει η καύση των υδατανθράκων (και των λιπιδίων, όπως θα δούμε). Ενέργεια που μετατρέπεται εν μέρει σε ATP και εν μέρει σε θερμότητα, μέσω της αναπνευστικής αλυσίδας και της οξειδωτικής φωσφορύλωσης, των δύο διεργασιών με τις οποίες τελειώνει η καύση των θρεπτικών συστατικών στα μιτοχόνδρια. Η αναπνευστική αλυσίδα χρησιμοποιεί το οξυγόνο της αναπνοής, όχι μόνο για την παραγωγή ενέργειας, αλλά και για την αναγέννηση των NAD⁺ και FAD.



Η αναγέννηση των NAD⁺ και FAD είναι απαραίτητη για τη συνέχιση του κύκλου του κιτρικού οξέος, αλλά και της γλυκόλυσης, αφού και σε αυτήν το NAD⁺ ανάγεται σε NADH.

Αυτή ακριβώς η μετατροπή γίνεται η αιτία της εκτροπής της διάσπασης των υδατανθράκων προς την αναερόβια οδό κατά την έντονη άσκηση: Επειδή η αναγέννηση του NAD⁺ μέσω της αερόβιας οδού είναι χρονοβόρος, η αύξηση της έντασης της άσκησης,

με την επακόλουθη επιτάχυνση της διάσπασης των υδατανθράκων, προκαλεί μια τέτοια μείωση της αναλογίας NAD⁺ προς NADH, η οποία απειλεί να «πνίξει» τη γλυκόλυση. Στην περίπτωση αυτή αποδεικνύεται σωτήρια η αναερόβια μετατροπή του πυροσταφυλικού οξέος σε γαλακτικό.



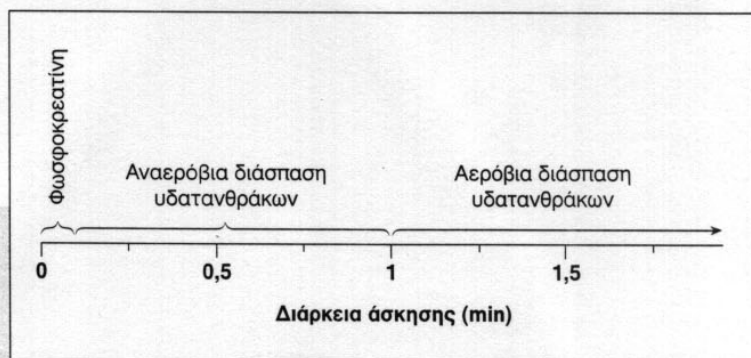
Ο αναγνώστης θα πρόσεξε, ότι η αναφερθείσα εξήγηση της παραγωγής γαλακτικού οξέος, δεν είναι η ευρέως διαδεδομένη άποψη της έλλειψης οξυγόνου.

Μοιλονότι είναι παραδεκτό, ότι σε συνθήκες τεχνητής ή παθολογικής υποξίας αυξάνεται η παραγωγή γαλακτικού οξέος στους μύες, τα δεδομένα των τελευταίων χρόνων δείχνουν ότι σε έναν υγιή μυ, ακόμη και σε μέγιστη άσκηση, υπάρχει αρκετό οξυγόνο για την υποστήριξη της αερόβιας παραγωγής ενέργειας. Έτσι φαίνεται, ότι ο πραγματικός λόγος της αυξημένης παραγωγής γαλακτικού οξέος σε έναν έντονα ασκούμενο μυ, είναι απλώς η υπερπαραγωγή NADH στη γλυκόλυση.

Η αναερόβια διάσπαση των υδαταν-

θράκων προς γαλακτικό οξύ είναι αντιοικονομική: Αποδίδει μόλις τα 3 ή 2 ATP της γλυκόλυσης που ανέφερα προηγουμένως. Αντιθέτως, η αερόβια διάσπαση της 1-φωσφορικής γλυκόζης (από το γλυκογόνο) και της γλυκόζης αποδίδει 30 και 31 ATP αντίστοιχως. Όμως η αναερόβια διάσπαση είναι πολύ γρήγορη, και αποδίδει σε δεδομένο χρόνο τριπλάσια ενέργεια από την αερόβια διάσπαση. Συγκεκριμένως, η μέγιστη ταχύτητα παραγωγής ATP από τη μετατροπή του γλυκογόνου σε γαλακτικό οξύ στους ανθρώπινους μύες υπολογίζεται σε 1,5 mmol ανά χιλιόγραμμο μυός ανά δευτερόλεπτο (mmol/kg/s) κι επιτυγχάνεται μέσα στα πρώτα 5 sec. μέγιστης άσκησης, ενώ η μέγιστη ταχύτητα παραγωγής ATP από τη μετατροπή του γλυκογόνου σε CO₂ υπολογίζεται σε 0,5 mmol/kg/s και απαιτεί γύρω στο 1 min μέγιστης άσκησης για να επιτευχθεί.³ Έτσι η αερόβια διάσπαση υπερέχει σε ποσότητα αποδιδόμενης ενέργειας, ενώ η αναερόβια σε ταχύτητα.

Στη βάση των παραπάνω ιδιοτήτων, η αναερόβια διάσπαση του γλυκογόνου αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας σε ασκήσεις μέγιστης δυνατής



Εικόνα 5
Χρονική κυριαρχία των πηγών ενέργειας στον αγωνιστικό αθλητισμό. Η φωσφοκρεατίνη είναι κύρια πηγή ενέργειας σε ασκήσεις μέγιστης έντασης μέχρι περίπου 7 sec, η αναερόβια διάσπαση των υδατανθράκων σε ασκήσεις μέγιστης έντασης μέχρι περίπου 1 min και η αερόβια διάσπαση των υδατανθράκων σε ασκήσεις υψηλής ή μέτριας έντασης πάνω από 1 min.

έντασης που διαρκούν από 7 sec μέχρι 1 min περίπου.² Σ' αυτό το χρονικό «παράθυρο» εντάσσονται ο δρόμος 100, 200 και 400 μέτρων, η κοιλύμβηση 50 και 100 μέτρων, η ποδηλασία ενός χιλιομέτρου κ.ά. Αντιθέτως, σε ασκήσεις υψηλής ή μέτριας έντασης, οι οποίες διαρκούν περισσότερο από 1 min, κύρια πηγή ενέργειας είναι η αερόβια διάσπαση του γλυκογόνου (εικόνα 5).

ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

Η αφθονότερη κατηγορία λιπιδίων στο σώμα μας είναι οι τριακυλογλυκερόλιες (τριγλυκερίδια). Ένας μέσος άνδρας έχει περίπου 10 kg τριακυλογλυκερολίων, ενώ μια μέση γυναίκα περίπου 14 kg. Η πλειονότητα των τριακυλογλυκερολίων είναι συγκεντρωμένη στο λιπώδη ιστό, κατα-



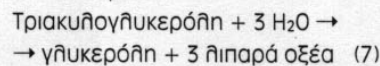
Εικόνα 6

Τριακυλογλυκερόλιες σε μυϊκή ίνα. Δυο σταγονίδια λίπους συνωστιζονται ανάμεσα σε μιτοχόνδρια σε αυτή την ηλεκτρονική μικρογραφία μιας μυϊκής ίνας. Η γειτνίαση με τα μιτοχόνδρια ελαχιστοποιεί την απόσταση που έχουν να διασχίσουν τα παραγόμενα από τη λιπόλυση λιπαρά οξέα προκειμένου να αποδώσουν ενέργεια. Όπως και στην εικόνα 1, φαίνονται κόκκοι γλυκογόνου διασκορπισμένοι στο κυτταρόλημμα.

IME την ευγενική δόξα του Dr. Hans Hoppeler, Πανεπιστήμιο Βέρνης. Φωτογραφία από τους Helgard Claassen και Franziska Graber.

λαμβάνοντας περίπου το 82 % της μάζας του. Πρόκειται για μια εκπληκτική συσσώρευση μιας και μόνο ουσίας σε έναν ιστό. Τριακυλογλυκερόλιες περιέχουν και οι μυϊκές ίνες με τη μορφή σταγονιδίων λίπους (εικόνα 6). Η περιεκτικότητα των μυών σε τριακυλογλυκερόλιες κυμαίνεται από 0,2 μέχρι 0,8 % κατά βάρος.

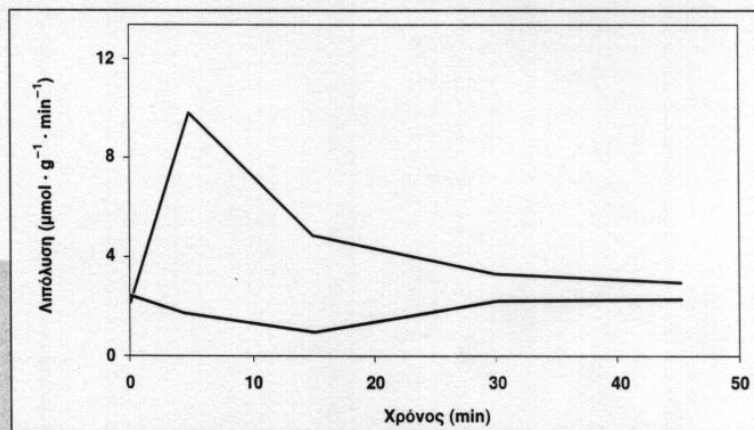
Η άσκηση επιταχύνει τη διάσπαση των τριακυλογλυκερολίων τόσο στο λιπώδη ιστό, όσο και στους μύες.^{6,7} Η διάσπαση ονομάζεται λιπόλυση και πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντίδραση:



Η κύρια αιτία επιτάχυνσης της λιπόλυσης κατά την άσκηση είναι η αυξημένη έκκριση κατεχολαμινών: επινεφρίνης από τα επινεφρίδια και νορεπινεφρίνης από τις απολήξεις του συμπαθητικού συστήματος. Τόσο η επινεφρίνη, όσο και η νορεπινεφρίνη συνδέονται με το β αδρενεργό υποδοχέα και ενεργοποιούν τον καταρ-

ράκτη του κυκλικού AMP, ο οποίος καταλήγει στην ενεργοποίηση της λιπάσης των τριακυλογλυκερολίων (που ονομάζεται και ευαίσθητη σε ορμόνες λιπάση), του καθοριστικού ενζύμου της λιπόλυσης. Αντίθετα με τις κατεχολαμίνες, η ινσουλίνη εμποδίζει τη λιπόλυση μέσω της ενεργοποίησης μιας φωσφοδιεστεράσης, η οποία υδρολύει το κυκλικό AMP. Όμως η άσκηση μειώνει την έκκριση ινσουλίνης, με αποτέλεσμα να αίρεται η αντιλιπολυτική της δράση.

Η ενεργοποίηση της λιπόλυσης με την άσκηση είναι πιο αργή από την ενεργοποίηση της γλυκογονόλυσης. Πειράματα in vitro έδειξαν ότι η λιπόλυση μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω του καταρράκτη του κυκλικού AMP σε 1-2 min,⁸ ενώ έρευνα in vivo έδειξε εξαπλάσιασμό της ταχύτητας λιπόλυσης στον ανθρώπινο λιπώδη ιστό 5 min μετά την έναρξη ελαφριάς άσκησης (εικόνα 7).⁹ Ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος από εκείνον που πολλοί πιστεύουν ότι χρειάζεται για την κινητο-



Εικόνα 7

Η λιπόλυση κατά την άσκηση. Η ταχύτητα λιπόλυσης (εκφρασμένη σε μmol διασπώμενων τριακυλογλυκερολίων ανά mg λιπώδους ιστού ανά min) κορυφώνεται στο 5ο λεπτό ελαφριάς ποδηλασίας διάρκειας 30 min (κόκκινη γραμμή). Στο 15ο και 30ό λεπτό της άσκησης, καθώς και στο 15ο λεπτό της αποκατάστασης, η δραστηριότητα είναι αισθητά μειωμένη, γεγονός που μάλλον οφείλεται σε απευαισθητοποίηση του β αδρενεργού υποδοχέα. Η μαύρη γραμμή παριστάνει τη δραστηριότητα του ενζύμου σε μια ομάδα ελέγχου που δεν ασκήθηκε.

Τροποποιημένο από την παραπομπή 9. Copyright © 2002 Lipid Research, Inc.1

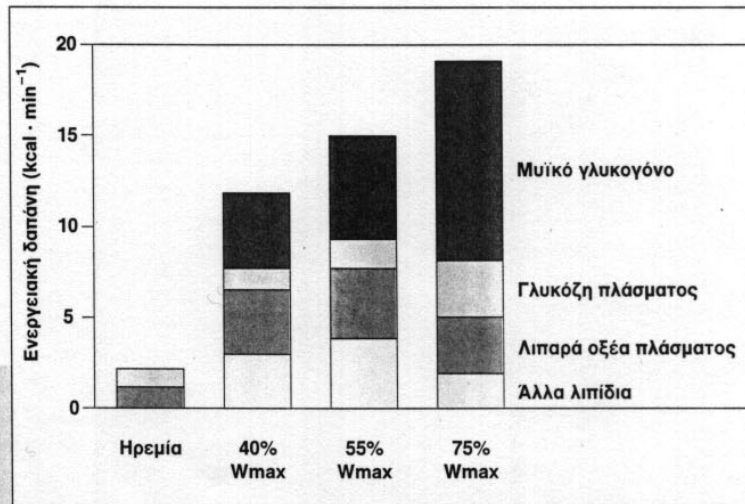
ποίηση του λίπους από την άσκηση.

Μεγάλο μέρος των λιπαρών οξέων, τα οποία προκύπτουν από τη λιπόλυση στο λιπώδη ιστό εξέρχεται στο αίμα και προσλαμβάνεται από άλλους ιστούς, μεταξύ των οποίων είναι και ο μυϊκός. Εκεί τα «εισαγόμενα» λιπαρά οξέα συναντούν τα «εγχώρια», εκείνα δηλαδή που προέκυψαν από την υδρόλυση των μυϊκών τριακυλογλυκερολίων, και με τη βοήθεια της καρνιτίνης εισέρχονται στα μιτοχόνδρια για να διασπαστούν. Η διάσπασή τους συντελείται με τη διεργασία της β οξειδωσης, που καταλήγει στην παραγωγή ακετυλοσυνενζύμου Α, NADH και FADH₂. Τα προϊόντα αυτά ακολουθούν στη συνέχεια μονοπάτια κοινά με τους υδατάνθρακες, δηλαδή τον κύκλο του κίτρικου οξέος, την αναπνευστική αλυσίδα και την οξειδωτική φωσφορυλίωση. Τελικά, ένα λιπαρό οξύ καίγεται πλήρως προς CO₂, παράγοντας μεγάλη ποσά ενέργειας. Για παράδειγμα, το παλμιτικό οξύ, με 16 άνθρακες, παράγει 106 ATP. Τα παράγει όμως με πολύ χαμηλή ταχύτητα: μόλις 0,2-0,3 mmol/kg/s. Γι' αυτό τα λίπη δεν είναι κύρια πηγή ενέργειας παρά μόνο κατά την ηρεμία και σε ελαφριές ασκήσεις.

Ο πίν. 1 συνοψίζει τη χαρακτηριστικά των κύριων πηγών ενέργειας κατά την άσκηση.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΛΙΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ

Σε τι αναλογία χρησιμοποιούνται οι δύο μεγαλύτερες πηγές ενέργειας κατά την άσκηση; Η απάντηση εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι η ένταση και η διάρκεια. Μάλιστα, οι δυο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν το μείγμα καυσίμων με τρόπο αντίθετο: Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή των υδατανθράκων, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια, τόσο μεγα-



Εικόνα 8

Πηγές ενέργειας σε διαφορετικές εντάσεις άσκησης. Τα δεδομένα προέρχονται από ποδηλάτες αντοχής που ασκήθηκαν για 30 min σε κάθε ένταση. Τα ποσοστά της Wmax είναι περίπου ίδια με τα ποσοστά της VO₂max.

Προσπονημένο από την παραπομπή 10. Copyright © 2001 the Physiological Society.

λύτερη είναι η συμμετοχή των λιπών. Ας εξετάσουμε αυτές τις σχέσεις με κριτήριο τα δεδομένα, που προέκυψαν από δύο έρευνες:

Στην πρώτη έρευνα¹⁰ μετρήθηκε ή εκτιμήθηκε, η συνεισφορά τεσσάρων πηγών στην ενεργειακή δαπάνη κατά τη διάρκεια της ηρεμίας και κατά τη διάρκεια ελαφριάς, μέτριας και βαριάς άσκησης (εικόνα 8). Σε κατάσταση ηρεμίας και κατά τη διάρκεια ποδηλάτησης στο 40 % της μέγιστης ισχύος (Wmax), η πλειονότητα της ενέργειας που δαπανά ο οργανισμός

προέρχεται από την καύση των λιπιδίων. Κατά την άσκηση στο 55 και 75 % της Wmax η συνεισφορά των λιπιδίων περιορίστηκε στο 49 και 24 %, αντίστοιχα. Και στις τρεις εντάσεις άσκησης το μυϊκό γλυκογόνο πρόσφερε περισσότερη ενέργεια από τη γλυκόζη του πλάσματος (κύρια πηγή της οποίας είναι το ηπατικό γλυκογόνο), ενώ κατά την ηρεμία η διάσπασή του ήταν μηδαμινή. Αντιθέτως, τα λιπαρά οξέα του πλάσματος προσέφεραν ίση ή περισσότερη ενέργεια από τις μυϊκές τριακυλογλυκερόλες

Πίν. 1: Κύριες πηγές ATP κατά την άσκηση

Πηγή	Απόδοση (ATP)	Ταχύτητα (mmol ATP/kg μύς/s)
Φωσφοκρεατίνη	1	2,2
Γλυκογόνο (ανά μονάδα γλυκόζης)		
γαλακτικό οξύ	3	1,5
CO ₂	31	0,5
Παλμιτικό οξύ	106	0,2-0,3

και τις τριακυλογλυκερόλες του πλάσματος (οι δυο αυτές πηγές αναφέρονται ως άλλη λιπίδια) και στις τέσσερις συνθήκες. Είναι σημαντικό, ότι στο 75 % της W_{max} μειώθηκε όχι μόνο η ποσοστιαία, αλλά και η απόλυτη συνεισφορά των λιπιδίων στην ενεργειακή δαπάνη της άσκησης. Σύμφωνα με αυτήν και άλλες έρευνες, η καύση λιπών μεγιστοποιείται κάπου μεταξύ 45 και 65% της VO_{2max} .

Στη δεύτερη έρευνα¹¹ μετρήθηκε ή εκτιμήθηκε, η συνεισφορά τεσσάρων πηγών στην ενεργειακή δαπάνη κατά τη διάρκεια άσκησης δύο ωρών στο 65% της VO_{2max} (εικόνα 9). Με την πάροδο του χρόνου η αναλογία υδατανθράκων-λιπών μετατοπίζεται σταδιακά υπέρ των δευτέρων. Έτσι μειώνεται η διάσπαση του γλυκογόνου και αυξάνεται η διάσπαση των λιπαρών οξέων.

Πριν συνεχίσουμε, αξίζει να σημειωθεί ότι η συνεισφορά των πρωτεϊνών στις ενεργειακές απαιτήσεις της άσκησης είναι πολύ μικρή. Για την ακρίβεια, είναι μηδαμινή σε σύντομες α-

σκήσεις, ενώ σε παρατεταμένες ασκήσεις εκτιμάται στο 3-6% της συνολικής ενεργειακής δαπάνης.¹²

Από όσα παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα προκύπτει ότι η καύση των λιπών μεγιστοποιείται με μέτρια παρατεταμένη άσκηση. Σημαίνει αυτό, ότι τέτοιες ασκήσεις είναι και οι καταλληλότερες για τη μείωση του σωματικού λίπους μακροπρόθεσμα; Με άλλα λόγια, η ποσότητα λίπους που καίγεται κατά τη διάρκεια της άσκησης καθορίζει και την απώλεια λίπους μακροπρόθεσμα; Ή μήπως ο οργανισμός αντισταθμίζει μια μεγαλύτερη απώλεια λιπών ή υδατανθράκων (που προκλήθηκε από μια άσκηση μέτριας ή υψηλής έντασης αντίστοιχα) αποθηκεύοντας ανάλογα περισσότερα λίπη ή υδατάνθρακες, όταν φάμε το επόμενο γεύμα;

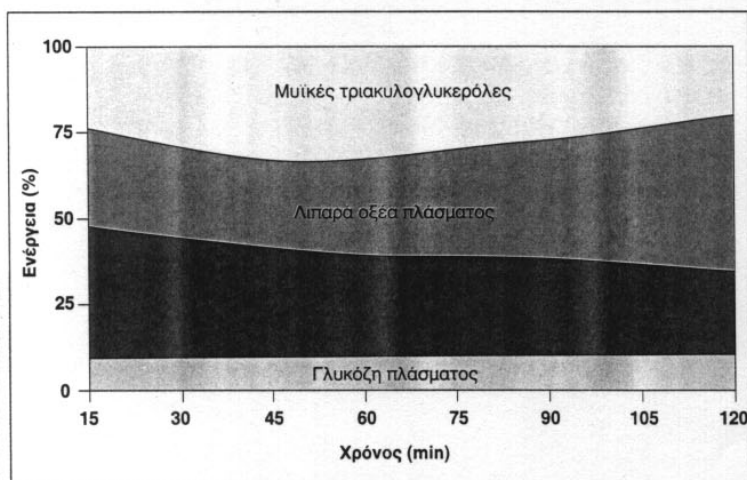
Δεν γνωρίζουμε με βεβαιότητα την απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα. Πάντως τα αποτελέσματα αρκετών ερευνών δείχνουν ότι μάλλον αυτό που μετράει είναι η ενεργειακή δαπάνη της άσκησης και όχι η έντασή της.¹³ Επομένως, ακόμη και ασκήσεις

υψηλής έντασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αγώνα κατά της παχυσαρκίας (άρκει ο ασκούμενος να μπορεί να τις πραγματοποιήσει με ασφάλεια), δεδομένου ότι οι ασκήσεις αυτές επιφέρουν ευεργετικές προσαρμογές στο καρδιοαναπνευστικό και μυοσκελετικό σύστημα.

ΧΡΟΝΙΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΛΙΠΙΔΙΩΝ

Η συστηματική άσκηση μπορεί να τροποποιήσει το μεταβολισμό σε κατεύθυνση θετική τόσο για την αθλητική απόδοση, όσο και για την υγεία. Οι θεαματικότερες αλλαγές στο μεταβολισμό παρατηρούνται με την προπόνηση αντοχής και συνοψίζονται στην αύξηση της χρήσης λιπιδίων κατά τη διάρκεια μέτριας άσκησης. Η αύξηση αυτή μπορεί να διαπιστωθεί με δύο δοκιμασίες της ίδιας διάρκειας και έντασης, που θα πραγματοποιηθούν η μια στην αρχή και η άλλη στο τέλος ενός προπονητικού προγράμματος. Εδώ όμως χρειάζεται να διακρίνουμε την ίδια απόλυτη ένταση από την ίδια σχετική ένταση, επειδή η προπόνηση αντοχής αυξάνει τη VO_{2max} (η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην αύξηση της μέγιστης καρδιακής παροχής). Έτσι, αν η VO_{2max} στην αρχή ενός προπονητικού προγράμματος αντοχής διάρκειας μερικών μηνών είναι 45 mL/kg/min, στο τέλος μπορεί να φτάσει τα 52 mL/kg/min. Οι δυο δοκιμασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε στην ίδια απόλυτη ένταση (για παράδειγμα, στα 27 mL/kg/min που είναι το 60% της VO_{2max} πριν από την προπόνηση), είτε στην ίδια σχετική ένταση (στο 60% της τρέχουσας VO_{2max} , που είναι 27 mL/kg/min πριν και 31,2 mL/kg/min μετά την προπόνηση).

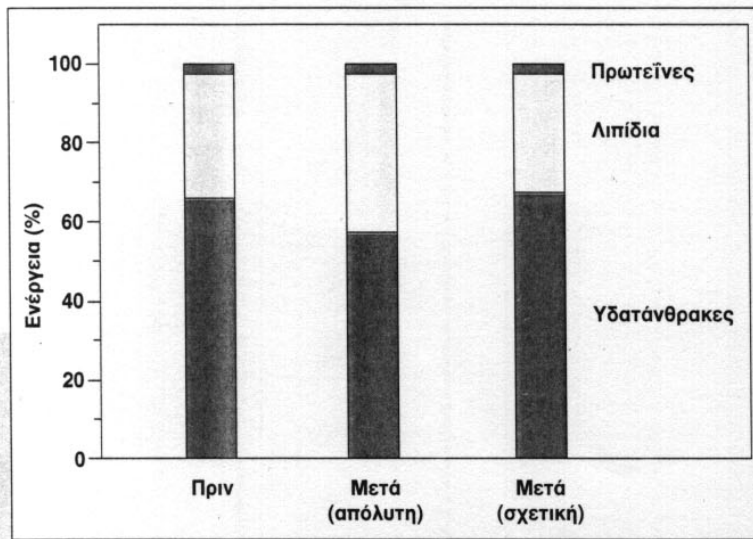
Στην πρώτη περίπτωση (ίδια απόλυτη ένταση) είναι γενικώς αποδεκτό, ότι η αναλογία λιπιδίων-υδατανθράκων είναι υψηλότερη μετά το προπονητικό



Εικόνα 9

Πηγές ενέργειας σε παρατεταμένη μέτρια άσκηση. Τα δεδομένα προέρχονται από ποδηλάτες αντοχής που ασκήθηκαν στο 65% της VO_{2max} .

[Προπονημένο από την παραπομπή 11. Copyright © 1993 the American Physiological Society.]



Εικόνα 10

Επίδραση της προπόνησης αντοχής στην αναλογία πηγών ενέργειας.
 Η εκατοστιαία συνεισφορά των λιπιδίων στην ενεργειακή απαίτηση παρατεταμένης μέτριας άσκησης (ποδηλάτηση επί 90 min στο 60 % της VO_{2max}) αυξήθηκε σημαντικά (από 31 σε 41 %) έπειτα από αερόβια προπόνηση αγύμναστων ανδρών και γυναικών επί 7 εβδομάδες, όταν η δεύτερη δοκιμασία πραγματοποιήθηκε στην ίδια απόλυτη ένταση με την πρώτη. Όταν όμως πραγματοποιήθηκε στην ίδια σχετική ένταση (60 % της νέας VO_{2max} που ήταν αυξημένη κατά 20 % λόγω της προπόνησης), το ποσοστό των λιπιδίων (και των υδατανθράκων) έμεινε αμετάβλητο. Οι πρωτεΐνες προσέφεραν 3-4 % της συνολικής ενέργειας και στις τρεις δοκιμασίες.

[Από την παραπομπή 14. Copyright © 2001 the American Physiological Society.]

πρόγραμμα. Στη δεύτερη περίπτωση (ίδια σχετική ένταση) καλά σχεδιασμένες προοπτικές μελέτες των τελευταίων χρόνων δείχνουν, ότι η αναλογία λιπιδίων-υδατανθράκων δεν αλλάζει σημαντικά (εικόνα 10).¹⁴ Ωστόσο μελέτες που συγκρίνουν αγύμναστα άτομα και αθλητές αντοχής στο ίδιο ποσοστό της VO_{2max} καθενός βεβαιώνουν, ότι οι αθλητές αντοχής έχουν υψηλότερη αναλογία λιπιδίων-υδατανθράκων. Η αντίφαση αυτή μπορεί να οφείλεται σε γενετικές διαφορές μεταξύ αθλητών και μη αθλητών ή στο ότι οι αθλητές έχουν δεχθεί μεγαλύτερες προπονητικές επιβαρύνσεις από τους συμμετέχοντες στις προοπτικές μελέτες.

Το όφελος από την αύξηση της αναλογίας λιπιδίων-υδατανθράκων κατά την άσκηση στην ίδια απόλυτη έντα-

ση, μετά από προπόνηση αντοχής, είναι η εξοικονόμηση υδατανθράκων, της μικρότερης και ταχύτερης από τις δυο αυτές πηγές ενέργειας. Η εξοικονόμηση υδατανθράκων μπορεί να παρατείνει την άσκηση. Μια άλλη όψη του οφέλους είναι η δυνατότητα άσκησης σε υψηλότερη ένταση με την ίδια δαπάνη υδατανθράκων, γεγονός που θα επιτρέψει σε έναν αθλητή αντοχής να τελειώσει μια προσπάθεια γρηγορότερα, αυξάνοντας έτσι την απόδοσή του.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσαρμογή στην προπόνηση αντοχής είναι η αύξηση της ευαισθησίας των μυών στην ινσουλίνη.¹⁵ Η ευαισθησία των μυών στην ινσουλίνη ορίζεται, ως η συγκέντρωση ινσουλίνης που απαιτείται για την επίτευξη του μισού της

μέγιστης πρόσληψης γλυκόζης από αυτούς, αν και υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι έκφρασής της. Η αύξηση της ευαισθησίας στην ινσουλίνη οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των μορίων GLUT4 που μετακινούνται προς την κυτταροπλάσματική μεμβράνη των μυϊκών ινών εξαιτίας μιας δεδομένης μέτριας συγκέντρωσης ινσουλίνης στο πλάσμα. Αυτός είναι ένας ακόμη τρόπος (επιπρόσθετα προς την αύξηση της πρόσληψης γλυκόζης από τους ασκούμενους μύες), μέσω του οποίου η άσκηση βοηθά όσους έχουν αντίσταση στην ινσουλίνη ή και διαβήτη τύπου 2 να ελέγχουν τη γλυκόζη του αίματος.

Τέλος, είναι αρκετά γνωστές οι επιδράσεις της αερόβιας προπόνησης στα λιπίδια του αίματος: Η αερόβια προπόνηση μπορεί να μειώσει τις τριακυλογλυκερόλες του πλάσματος και να αυξήσει τη χοληστερόλη των HDL.¹⁶ Και οι δυο αυτές αλληλαγές μειώνουν τον κίνδυνο για αθηροσκλήρωση, προάγοντας έτσι ένα υγιές λιπιδαιμικό προφίλ. Για να συμβεί αυτό απαιτείται μια ελάχιστη εβδομαδιαία ενεργειακή δαπάνη, που προσδιορίζεται μεταξύ 1200 και 2200 kcal (χιλιοθερμίδες) ανάλογα με την έρευνα. Αυτή μεταφράζεται σε λίγες ώρες μέτριας αερόβιας άσκησης διασπαρτες μέσα στην εβδομάδα.

Σε αντίθεση με τις τριακυλογλυκερόλες και τη χοληστερόλη των HDL, η άσκηση δεν φαίνεται να επηρεάζει την ολική χοληστερόλη και τη χοληστερόλη των LDL, αν δεν προκαλεί ταυτόχρονα μείωση βάρους. Αν όμως προκαλεί μείωση βάρους, τότε οι δύο αυτές παράμετροι του λιπιδαιμικού προφίλ μειώνονται, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωσή του.

ΣΥΝΟΨΗ

Συνοψίζοντας, η άσκηση έχει τις παρακάτω άμεσες επιδράσεις στο μεταβολισμό των υδατανθράκων και των λιπών:

- Τα περισσότερα είδη άσκησης αυξάνουν τη διάσπαση των υδατανθράκων και των λιπών.
- Η άσκηση αυξάνει την είσοδο γλυκόζης από το αίμα στους μύες.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της άσκησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή των υδατανθράκων στην παραγωγή ενέργειας, ενώ τόσο μικρότερη είναι η συμμετοχή των λιπών.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της άσκησης, τόσο μεγαλύτερο μέ-

ρος των υδατανθράκων διασπάται αναερόβια, ενώ τόσο μικρότερο μέρος τους διασπάται αερόβια.

- Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της άσκησης, τόσο περισσότερα λίπη χρησιμοποιούνται.

Επίσης η αερόβια άσκηση έχει τις παρακάτω μακροπρόθεσμες επιδράσεις στο μεταβολισμό των υδατανθράκων και των λιπών:

- Αυξάνει τη χρήση λιπών και μειώνει τη χρήση υδατανθράκων κατά τη διάρκεια μέτριας άσκησης.

- Αυξάνει την ευαισθησία στην ινσουλίνη.

- Μειώνει τις τριακυλογλυκερόλες και αυξάνει τη κοήληστερόλη των HDL στο αίμα.

Η γνώση των παραπάνω αποκρίσεων του οργανισμού στη σωματική δραστηριότητα έχει όχι μόνο θεωρητικό, αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον, αφού επιτρέπει τη συνειδητή παρέμβασή μας τόσο για την αύξηση της αθλητικής απόδοσης, όσο και για τη βελτίωση της υγείας και της ποιότητας ζωής του ανθρώπου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Mougios V. *Exercise Biochemistry. Human Kinetics, Champaign, 2006, pp. 121-122.*
2. Gastin PB. *Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. Sports Med 31: 725-741, 2001.*
3. Greenhaff PL, Hultman E, Harris RC. *Carbohydrate metabolism. In: Principles of Exercise Biochemistry. Poortmans JR, ed., Karger, Basel, 2004, pp. 108-151.*
4. Ploug T, van Deurs B, Ai H, Cushman SW, Ralston E. *Analysis of GLUT4 distribution in whole skeletal muscle fibers: Identification of distinct storage compartments that are recruited by insulin and muscle contractions. J Cell Biol 142: 1429-1446, 1998.*
5. Rose AJ, Richter EA. *Skeletal muscle glucose uptake during exercise: How is it regulated? Physiology 20: 260-270, 2005.*
6. Bülow J. *Lipid mobilization and utilization. In: Principles of Exercise Biochemistry. Poortmans JR, ed., Karger, Basel, 2004, pp. 197-226.*
7. Donsmark M, Langfort J, Holm C, Ploug T, Galbo H. *Hormone-sensitive lipase as a mediator of lipolysis in contracting skeletal muscle. Exerc Sport Sci Rev 33: 127-133, 2005.*
8. Nilsson NO, Stralfors P, Fredrikson G, Belfrage P. *Regulation of adipose tissue lipolysis: Effects of noradrenaline and insulin on phosphorylation of hormone-sensitive lipase and on lipolysis in intact rat adipocytes. FEBS Lett 111: 125-130, 1980.*
9. Petridou A, Mougios V. *Acute changes in triacylglycerol lipase activity of human adipose tissue during exercise. J Lipid Res 43: 1331-1334, 2002.*
10. van Loon LJ, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, Saris WH, Wagenmakers AJ. *The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. J Physiol 536.1: 295-304, 2001.*
11. Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, Endert E, Wolfe RR. *Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. Am J Physiol Endocr Metab 265: E380-E391, 1993.*
12. Poortmans JR. *Protein metabolism. In: Principles of Exercise Biochemistry. Poortmans JR, ed., Karger, Basel, 2004, pp. 227-278.*
13. Grediagin A, Cody M, Rupp J, Benardot D, Shern R. *Exercise intensity does not effect body composition change in untrained, highly overfat women. J Am Diet Assoc 95: 661-665, 1995.*
14. Carter SL, Rennie C, Tarnopolsky MA. *Substrate utilization during endurance exercise in men and women after endurance training. Am J Physiol Endocr Metab 280: E898-E907, 2001.*
15. Holloszy JO. *Exercise-induced increase in muscle insulin sensitivity. J Appl Physiol 99: 338-343, 2005.*
16. Durstine JL, Grandjean PW, Davis PG, Ferguson MA, Alderson NL, DuBose KD. *Blood lipid and lipoprotein adaptations to exercise: A quantitative analysis. Sports Med 31: 1033-1062, 2001.*