

## Επίδραση της χρονίας άσκησης στον τροχό στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολίων στο σκελετικό μυ και στην καρδιά επιμύων

**ΣΚΟΠΟΣ** Ο σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να εξετάσει τις επιδράσεις της χρονίας άσκησης στον τροχό στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολίων στο σκελετικό μυ και στην καρδιά επιμύων. **ΥΛΙΚΟ-ΜΕΘΟΔΟΣ** Έντεκα αρσενικοί επίμυες της φυλής Wistar ασκήθηκαν αυθόρμητα σε τροχό για 8 εβδομάδες. Ο υποκνημίδιος μυς και η καρδιά τους, καθώς και τα ίδια όργανα 14 αγύμναστων επιμύων, αναλύθηκαν ως προς τη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολίων τους με συνδυασμό χρωματογραφίας ρεπτικής στιβάδας και αέριας χρωματογραφίας. **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ** Ο υποκνημίδιος μυς των προπονημένων πειραματοζώων παρουσίασε αξιοσημείωτα χαμηλότερη συγκέντρωση τριακυλογλυκερολίων (αν και όχι στατιστικά σημαντική). Τα μονοακόρεστα λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων του μύος βρέθηκαν σημαντικά χαμηλότερα στους προπονημένους επίμυες. Η υπολογισμένη δραστηριότητα της εθνογκάσης βρέθηκε σημαντικά υψηλότερη, ενώ η δραστηριότητα της Δ<sup>9</sup>-δεσατουράσης σημαντικά χαμηλότερη στους προπονημένους μύς. Τα μονοακόρεστα λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων ήταν επίσης χαμηλότερα στην καρδιά των προπονημένων πειραματοζώων. Το προφίλ λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων του σκελετικού μύος και της καρδιάς προσαρμόστηκε στην άσκηση με παρόμοιο τρόπο, ενώ οι περισσότερες αλλαγές στο προφίλ λιπαρών οξέων των τριακυλογλυκερολίων ήταν εξαρτημένες από τον ιστό. Κρίνοντας από τις τιμές των μεγέθων επίδρασης και από τις ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ προπονημένων και απροπόνητων πειραματοζώων, υπήρξαν πολλές σημαντικές επιδράσεις της χρονίας άσκησης στο σκελετικό μυ και στην καρδιά των πειραματοζώων. **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ** Η μακρόχρονη άσκηση στον τροχό τροποποίησε το προφίλ λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολίων του σκελετικού μύος και της καρδιάς επιμύων, και, επομένως, μπορεί να θεωρείται τροποποιητής του προφίλ λιπαρών οξέων των ιστών.

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί μια πληθώρα εργασιών που μελετούν την επίδραση της άσκησης στο προφίλ των λιπαρών οξέων των ζωικών ιστών. Αυτό οφείλεται πιθανώς στη μερική διαλεύκανση του ρόλου των επιμέρους λιπαρών οξέων στη βιοχημεία και στη φυσιολογία των ζώων. Σε μοριακό επίπεδο, τα επιμέρους λιπαρά οξέα επηρεάζουν θεμελιώδεις ρυθμιστικές διαδικασίες, όπως η ομοίωση των ιόντων, η γονιδιακή έκφραση, η κυτταρική σηματοδότηση και η σύνθεση λιπιδικών ή προερχόμενων από λίπη σηματοδοτικών μορίων.<sup>1</sup> Οι επιδράσεις αυτές μπορούν, στη συνέχεια,

να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη φυσιολογία των ζώων. Για παράδειγμα, υπάρχουν πλέον αρκετά στοιχεία που συνδέουν την ευαισθησία στην ινσουλίνη με το προφίλ των λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων του σκελετικού μύος,<sup>2</sup> ενώ σε περιβάλλον αθλητικής φυσιολογίας, η αυξημένη πρόσληψη ω3 λιπαρών οξέων έχει αναφερθεί ότι μειώνει την αντοχή επιμύων<sup>3</sup> και σολομών.<sup>4</sup>

Ο σκελετικός μυς είναι ο περισσότερο μελετημένος ιστός αναφορικά με την επίδραση της χρονίας άσκησης στη σύστασή του σε λιπαρά οξέα.<sup>5-17</sup> Ωστόσο, δεν υπάρχει ομοφωνία σχετικά με τις επιδράσεις της άσκησης,

Μ.Γ. Νικολαΐδης,  
Α. Πετρίδου,  
Β. Μούγιος

Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής  
και Αθλητισμού, Αριστοτέλειο  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,  
Θεσσαλονίκη

Effect of long-term wheel running  
on the fatty acid composition of  
phospholipids and triacylglycerols  
in rat skeletal muscle and heart

*Abstract at the end of the article*

### Λέξεις ευρετηρίου

Άσκηση  
Καρδιά  
Μεταβολισμός λιπιδίων  
Προφίλ λιπαρών οξέων  
Σκελετικός μυς  
Τρέξιμο στον τροχό

Υποβλήθηκε 18.2.2004  
Εγκρίθηκε 3.3.2004

πιθανώς εξαιτίας της σχεδόν μοναδικότητας κάθε μιας μελέτης αναφορικά με το είδος της άσκησης, το είδος των πειραματοζώων, το υποκυτταρικό κλάσμα, την κατηγορία λιπιδίου και τη δίαιτα των πειραματοζώων και των ανθρώπων που εξετάστηκαν. Η ίδια έλλειψη ομοφωνίας (με τις ίδιες πιθανές αιτίες) υπάρχει και μεταξύ των μελετών που έχουν εξετάσει την επίδραση της χρονίας άσκησης στη σύσταση σε λιπαρά οξέα της καρδιάς.<sup>6,9,10,15,18-20</sup>

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να εξετάσει τις επιδράσεις του μακρόχρονου τρεξίματος στον τροχό (ένα μη στρεσογόνο μοντέλο άσκησης) στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολών στο σκελετικό μυ και στην καρδιά επιμύων, έτσι ώστε να προστεθούν νέα δεδομένα σε αυτό το αντικρουόμενο ερευνητικό θέμα.

## ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

### Πειραματοζώα

Τριάντα πέντε αρσενικοί επίμυες της φυλής Wistar αγοράστηκαν σε ηλικία 7 εβδομάδων από την Charles River Laboratories (Sulzfeld, Γερμανία) και διαβιούσαν κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία 21 °C και κύκλος φώτος-σκότους 12:12 ώρες) στις εγκαταστάσεις του Αθλητικού Πανεπιστημίου της Κολωνίας. Οι επίμυες είχαν ελεύθερη πρόσβαση σε νερό και τυποποιημένη τροφή για τρωκτικά από τη Ssniff (Soest, Γερμανία). Τα πειραματοζώα διαβιούσαν σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη φροντίδα και χρήση των πειραματοζώων. Ο σχεδιασμός της μελέτης εγκρίθηκε από την τοπική διεύθυνση της πόλης της Κολωνίας (Bezirksregierung Kohn).

### Προπόνηση

Οι επίμυες χωρίστηκαν τυχαία σε μια ομάδα προπονημένων (n=20) και μια ομάδα απροπόνητων πειραματοζώων (n=15). Τα μέλη της πρώτης ομάδας διαβιούσαν ανά ένα σε κλουβιά εξοπλισμένα με τροχό, όπου μπορούσαν να ασκούνται ελεύθερα για 8 εβδομάδες, ενώ τα μέλη της δεύτερης ομάδας διαβιούσαν ανά ένα σε απλά κλουβιά. Η σωματική δραστηριότητα της προπονημένης ομάδας καταγραφόταν συνεχώς μέσω του συστήματος συλλογής δεδομένων DasyLab 5.0 της Datalog (Monchengladbach, Γερμανία).

### Συλλογή και παρασκευή των δειγμάτων

Αμέσως μετά τη συμπλήρωση της προπονητικής περιόδου, τα 11 πιο δραστήρια προπονημένα πειραματοζώα (που έτρεχαν, κατά μέσο όρο, πάνω από 2 km/ημέρα) και τα 14 απροπόνητα πειραματοζώα (ένα πέθανε κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου) αποκεφαλίστηκαν περίπου την ίδια ώρα της

ημέρας (14:00-16:00). Οι τροχοί και η τροφή είχαν αφαιρεθεί από τα κλουβιά 12 και 6 ώρες νωρίτερα, αντίστοιχα, για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της τελευταίας άσκησης και του τελευταίου γεύματος στις βιοχημικές παραμέτρους που μας ενδιέφεραν. Ο υποκνημίδιος μύς του δεξιού πίσω ποδιού και η καρδιά (χωρίς τα μεγάλα αγγεία) αφαιρέθηκαν όσο γρηγορότερα γινόταν. Οι ιστοί απαλλάχθηκαν από το ορατό λίπος, τα νεύρα και τις περιτονίες και βυθίστηκαν σε υγρό άζωτο. Κατόπιν, αποθηκεύτηκαν στους -80 °C. Μετά την ολοκλήρωση της συλλογής τους, τα δείγματα μεταφέρθηκαν μέσα σε ξηρό πάγο στη Θεσσαλονίκη, όπου αποθηκεύτηκαν και πάλι στους -80 °C μέχρι να αναλυθούν.

### Ανάλυση λιπαρών οξέων

Την ημέρα της ανάλυσης, οι παγωμένοι ιστοί κονιορτοποιήθηκαν με γουδί και γουδοχέρι μέσα σε υγρό άζωτο. Η σύσταση σε λιπαρά οξέα των δειγμάτων προσδιορίστηκε, συνδυάζοντας χρωματογραφία λεπτής στιβάδας και αέρια χρωματογραφία. Τριάντα mg κονιορτοποιημένου ιστού αναμείχθηκαν με 2,5 mL μίγματος 2-προπανόλης-επτανίου-0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 40:10:1 (v/v/v), μετά την προσθήκη διδεκαεπτανουόλοφωσφατιδυλοχολίνης και τριδεκαεπτανουόλογλυκερόλης (και οι δύο από τη Sigma, St. Louis, ΗΠΑ) ως εσωτερικά πρότυπα για την ποσοτικοποίηση των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολών, αντίστοιχα. Μετά από 10 min προστέθηκαν 1 mL επτάνιο και 1,5 mL νερό και το μίγμα αναδεύτηκε ζωηρά, με σκοπό να εκκυλιστούν τα λιπίδια.<sup>21</sup> Σε πιλοτικά πειράματα βρέθηκε ότι αυτή η μέθοδος εκκύλισης λιπιδίων από τους ιστούς είναι καλύτερη από τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη,<sup>22</sup> ως προς την απόδοση και την ευκολία, αφού δεν δημιουργείται ίζημα στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων και τα λιπίδια εκκυλίζονται στην πάνω φάση.

Η πάνω φάση κατόπιν αφαιρέθηκε, συμπυκνώθηκε κάτω από ρεύμα αζώτου και ενσταλάχθηκε σε πλάκες επιστρωμένες με σίλικα για χρωματογραφία λεπτής στιβάδας (Sigma). Οι πλάκες αναπτύχθηκαν με πετρελαϊκό αιθέρα-διαιθυλαιθέρα-οξικό οξύ 130:20:1,5 (v/v/v) και οι κηλίδες εντοπίστηκαν κάτω από υπεριώδες φως, αφού πρώτα οι πλάκες ψεκάστηκαν με διάλυμα διχλωροφλουορεσεΐνης σε αιθανόλη. Οι κηλίδες που αντιστοιχούσαν στα φωσφολιπίδια και τις τριακυλογλυκερόλες αποξέθηκαν και επωάστηκαν σε 0,5 mL μεθανολικού διαλύματος μεθοξειδίου του νατρίου (Sigma) στους 50 °C για 10 min. Κατόπιν, προστέθηκαν 0,5 mL μεθανολικού διαλύματος τριφθοριούχου βορίου (Fluka, Buchs, Ελβετία) και η επώαση επαναλήφθηκε όπως προηγουμένως.<sup>23</sup> Οι μεθυλεστέρες των λιπαρών οξέων που παράχθηκαν εκκυλίστηκαν με 1,5 mL εξάνιο και διαχωρίστηκαν σε έναν αέριο χρωματογράφο Hewlett Packard 5890 Series II (Waldbronn, Γερμανία) εξοπλισμένο με τριχοειδή στήλη AT-WAX, μήκους 30 m, από την Alltech (Deerfield, ΗΠΑ) και με ανιχνευτή ιοντισμού φλόγας. Η θερμοκρασία της στήλης προγραμματίστηκε από τους 160 στους 250 °C με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 5 °C/min. Το φέρον αέριο ήταν ήλιο με ροή 1 mL/min (στους 160 °C). Οι

μεθυλεστέρες των επιμέρους λιπαρών οξέων αναγνωρίστηκαν στα χρωματογραφήματα, με σύγκριση των χρόνων κατακράτησής τους με αυτούς καθαρών μεθυλεστέρων που αγοράστήκαν από τη Sigma, και ποσοτικοποιήθηκαν με σύγκριση του εμβαδού των αιχμών τους με αυτό του δεκαεπτανοϊκού μεθυλεστέρα (προερχόμενου από τη μεθυλίωση των εσωτερικών προτύπων), με τη βοήθεια του λογισμικού HP 3365 ChemStation από τη Hewlett Packard. Οι συγκεντρώσεις των ολικών φωσφολιπιδίων και των ολικών τριακυλογλυκερολών υπολογίστηκαν ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων των ακυλομάδων των διαιρεμένο με το 2 και το 3, αντίστοιχα.

Η σύσταση σε λιπαρά οξέα της τροφής προσδιορίστηκε όπως περιγράφηκε παραπάνω για τους ιστούς, εκτός από το ότι δεν προστέθηκαν εσωτερικά πρότυπα και τα εκχυλισμένα λιπίδια δεν διαχωρίστηκαν με χρωματογραφία λεπτής στιβάδας.

### Προσδιορισμός συνθάσης του κιτρικού οξέος

Προσδιορίστηκε η συνθάση του κιτρικού οξέος στο σκελετικό μυ και στην καρδιά φωτομετρικά, σύμφωνα με τον Srere.<sup>24</sup> Δέκα mg κονιορτοποιημένου ιστού διαλύθηκαν σε 250  $\mu$ L (για το σκελετικό μυ) ή 1000  $\mu$ L (για την καρδιά) 175 mM KCl, 2 mM EDTA (pH 7,4) και φυγοκεντρήθηκαν στα 1500/g για 5 min. Το διάλυμα ανάλυσης αποτελείται από 467  $\mu$ L 100 mM Tris-HCl (pH 8,3), 67  $\mu$ L 1 mM 5,5'-διθειο-δισ-2-νιτροβενζοϊκό οξύ (DTNB), 33  $\mu$ L 10 mM οξαλοξικό οξύ, 100  $\mu$ L 3 mM ακετυλοσυνένζυμο A και 5 ή 2,5  $\mu$ L από το υπερκείμενο του σκελετικού μύος ή της καρδιάς, αντίστοιχα. Ο ρυθμός αναγωγής του DTNB από το σχηματιζόμενο συνένζυμο A καταγράφεται στα 412 nm, στους 25 °C. Η δραστηριότητα της συνθάσης του κιτρικού οξέος εκφράστηκε σε U/g, όπου μία U αντιστοιχεί σε παραγωγή ενός  $\mu$ mol συνενζύμου A ανά min. Όλα τα υλικά για τον προσδιορισμό αγοράστηκαν από τη Sigma.

### Προσδιορισμός φωσφοφρουκτοκινάσης

Ο φωτομετρικός προσδιορισμός έγινε σύμφωνα με τους Ling et al.<sup>25</sup> εκτός από το ρυθμιστικό διάλυμα ομογενοποίησης, που παρασκευάστηκε σύμφωνα με τους Baldwin et al.<sup>26</sup> Δέκα mg ιστού διαλύθηκαν σε 1000  $\mu$ L 100 mM φωσφορικού καλίου, 2 mM διθειοθρεϊτόλης, 0,5 mM ATP, 5 mM MgCl<sub>2</sub>, 30 mM NaF (pH 8,0), και φυγοκεντρήθηκαν στα 1500/g για 5 min. Το διάλυμα ανάλυσης αποτελείται από 125  $\mu$ L 200 mM Tris-HCl (pH 8,0), 75  $\mu$ L 20 mM ATP, 19  $\mu$ L 200 mM MgCl<sub>2</sub>, 75  $\mu$ L 20 mM 6-φωσφορική φρουκτόζη, 50  $\mu$ L 2,4 mM NADH, 190  $\mu$ L 200 mM KCl, 7,5  $\mu$ L 100 mM διθειοθρεϊτόλη, 50  $\mu$ L διαλύματος βοηθητικών ενζύμων (που περιείχε 8 U/mL αλδολάση, 19 U/mL ισομεράση των φωσφορικών τριοζών, 2,4 U/mL αφυδρογονάση της 3-φωσφορικής γλυκερόλης και 2 mg/mL βόεια λευκωματίνη ορού), 128  $\mu$ L νερό και 30  $\mu$ L από το υπερκείμενο του σκελετικού μύος ή της καρδιάς. Ο ρυθμός σχηματισμού του NAD<sup>+</sup> καταγράφηκε στα 340 nm, στους 25 °C. Η δραστηριότητα της φωσφοφρουκτοκινάσης εκφράστηκε σε U/g, όπου μία U αντιστοιχεί σε μετατροπή ενός  $\mu$ mol 6-φωσφορικής φρου-

κτόνης ανά min. Όλα τα υλικά για τον προσδιορισμό αγοράστηκαν από τη Sigma.

### Υπολογισμοί και στατιστική ανάλυση

Υπολογίστηκαν οι ακόλουθοι δείκτες του προφίλ λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολών σε κάθε ιστό: μονοακόρεστα λιπαρά οξέα, πολυακόρεστα λιπαρά οξέα,  $\omega$ 6 λιπαρά οξέα,  $\omega$ 3 λιπαρά οξέα,  $\omega$ 6/ $\omega$ 3, ο λόγος ακόρεστων προς κορεσμένα λιπαρά οξέα (A/K) και ο δείκτης ακορεστότητας ( $\Delta$ A, ο μέσος όρος των διπλών δεσμών ανά λιπαρό οξύ σε ένα μίγμα λιπαρών οξέων πολλαπλασιαζόμενος με το 100). Επιπρόσθετα, εκτιμήθηκαν οι δραστηριότητες της ελονγκάσης και των  $\Delta^5$ -,  $\Delta^6$ - και  $\Delta^9$ -δεσατουρασών στο σκελετικό μυ και την καρδιά μέσω κατάλληλων λόγων (προϊόν προς αντιδρών). Οι λόγοι αυτοί ήταν 18:0/16:0 για την ελονγκάση, 20:4 $\omega$ 6/20:3 $\omega$ 6 για τη  $\Delta^5$ -δεσατουράση, 18:3 $\omega$ 6/18:2 $\omega$ 6 για τη  $\Delta^6$ -δεσατουράση και 18:1 $\omega$ 9/18:0 για τη  $\Delta^9$ -δεσατουράση. Οι λόγοι αυτοί υπολογίστηκαν από το άθροισμα των συγκεντρώσεων κάθε λιπαρού οξέος στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες.

Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσες τιμές  $\pm$  τυπική απόκλιση (SD). Η κατανομή όλων των εξαρτημένων μεταβλητών εξετάστηκε με τη δοκιμασία Kolmogorov-Smirnov και βρέθηκε να μη διαφέρει σημαντικά από την κανονική. Διαφορές μεταξύ απροπόντων και προπονημένων πειραματοζώων εξετάστηκαν με δίπλευρες δοκιμασίες t του Student για ανεξάρτητες παρατηρήσεις. Για να προσδιοριστεί το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ προπονημένων και απροπόντων επιμύων, σε ό,τι αφορά το προφίλ λιπαρών οξέων, υπολογίστηκαν τα μεγέθη επίδρασης ως τη διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών διαιρεμένη με την SD της ομάδας ελέγχου. Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίστηκε στο  $\alpha = 0,05$ . Για όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο SPSS έκδοση 10.0 (SPSS Inc, Chicago, ΗΠΑ).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### Διατροφή

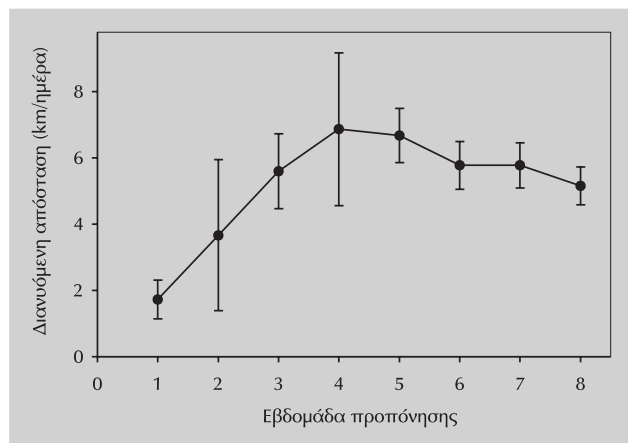
Η σύσταση σε λιπαρά οξέα της διατροφής των πειραματοζώων παρουσιάζεται στον **πίνακα 1**. Τα πιο άφθονα λιπαρά οξέα ήταν τα 16:0, 18:1 $\omega$ 9 και 18:2 $\omega$ 6, που συγκέντρωναν το 89% του συνόλου.

### Σωματική δραστηριότητα των επιμύων

Η δραστηριότητα των πειραματοζώων στον τροχό αυξήθηκε μέχρι και την 4η εβδομάδα και στη συνέχεια μειώθηκε σταδιακά (**εικ. 1**). Οι επίμυες κάλυπταν 5,2 $\pm$ 3,8 km/ημέρα κατά τη διάρκεια της προπονητικής περιόδου.

**Πίνακας 1.** Ποσοστιαία γραμμομοριακή σύσταση των λιπαρών οξέων της τροφής των επιμύων.

Λιπαρό οξύ	%
12:0	0,3
14:0	0,3
16:0	28,3
16:1ω7	0,2
18:0	3,9
18:1ω9	20,8
18:1ω7	1,8
18:2ω6	40,1
18:3ω3	2,9
20:1ω9	0,8
20:5ω3	0,6
Άθροισμα	100,0

**Εικόνα 1.** Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι της καθημερινά καλυπτόμενης απόστασης από την προπονημένη ομάδα (μέσες τιμές±SD).

### Λιπίδια του υποκνημίου μυός

Η επίδραση της άσκησης στα λιπίδια του υποκνημίου μυός παρουσιάζεται στους **πίνακες 2** και **3**. Οι ολικές τριακυλογλυκερόλες ήταν οριακά μη σημαντικά χαμηλότερες στους προπονημένους επίμυες ( $5,63 \pm 3,36$  έναντι  $8,26 \pm 3,56$   $\mu\text{mol/L/g}$ ,  $P=0,072$ ). Υπήρξε σημαντική μείωση στα 3 από τα 4 μονοακόρεστα λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων. Ως αποτέλεσμα, τα προπονημένα πειραματόζωα εμφάνισαν κατά 10,9% χαμηλότερα μονοακόρεστα ( $P=0,001$ ). Η μεγαλύτερη επίδραση της άσκησης παρουσιάστηκε στο ποσοστό του 18:3ω6 των τριακυλογλυκερολών, το οποίο ήταν υψηλότερο στους προπονημένους επίμυες κατά 54,9% ( $P=0,036$ ). Η δραστηριότητα της ελονγκάσης ήταν σημαντικά υψηλότερη,

ενώ της Δ<sup>9</sup>-δεσατουράσης ήταν σημαντικά χαμηλότερη στα προπονημένα πειραματόζωα.

### Λιπίδια της καρδιάς

Η επίδραση της άσκησης στα λιπίδια της καρδιάς παρουσιάζεται στους **πίνακες 4** και **5**. Τα ολικά φωσφολιπίδια ήταν χαμηλότερα στους προπονημένους επίμυες κατά 8,0% ( $45,99 \pm 4,71$  έναντι  $50,00 \pm 4,73$   $\mu\text{mol/g}$ ,  $P=0,046$ ). Τα μονοακόρεστα λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων ήταν χαμηλότερα στους προπονημένους επίμυες κατά 13,7% ( $P=0,002$ ). Υπήρξαν αρκετές σημαντικές διαφορές αναφορικά με τα επιμέρους λιπαρά οξέα μεταξύ των δύο ομάδων, με τις περισσότερες να εμφανίζονται στα φωσφολιπίδια.

### Ένζυμα

Η άσκηση στον τροχό δεν επηρέασε τις δραστηριότητες της συνθάσης του κιτρικού οξέος και της φωσφοφρουκτοκινάσης σε κανέναν από τους ιστούς όπου μετρήθηκαν (**πίν. 6**). Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι, συγκριτικά με τους απροπόνητους επίμυες, οι προπονημένοι είχαν μη σημαντικά υψηλότερες δραστηριότητες στο σκελετικό μυ και χαμηλότερες στην καρδιά.

### ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εξέλιξη της αυθόρμητης σωματικής δραστηριότητας των πειραματοζώων που παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη (δηλαδή, αρχική αύξηση ακολουθούμενη από σταθεροποίηση και μικρή μείωση) βρίσκεται σε συμφωνία με δημοσιευμένες εργασίες.<sup>27,28</sup> Ομοίως, η ποσότητα της σωματικής δραστηριότητας είναι συγκρίσιμη με αυτή που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία για αρσενικούς επίμυες.<sup>28-30</sup>

Βρέθηκε ότι το τρέξιμο σε τροχό δεν άλλαξε σημαντικά τις δραστηριότητες των ενζύμων που επιλέχθηκαν ως δείκτες της οξειδωτικής και γλυκολυτικής ικανότητας σε κανέναν από τους ιστούς όπου μετρήθηκαν, αν και τόσο η συνθάση του κιτρικού οξέος όσο και η φωσφοφρουκτοκινάση αυξήθηκαν ελαφρά στον υποκνημίο μυ. Μελέτες που χρησιμοποίησαν το ίδιο μοντέλο άσκησης έχουν αναφέρει αυξημένη δραστηριότητα της συνθάσης του κιτρικού οξέος στους προπονημένους σκελετικούς μυς,<sup>7,31,32</sup> απουσία διαφοράς από τους απροπόνητους μυς<sup>28,29,33</sup> ή και τα δύο αποτελέσματα ανάλογα με το μυ που αναλύθηκε.<sup>34</sup> Η φωσφοφρουκτοκινάση έχει αναλυθεί λιγότερο αναφορικά με την προπόνηση. Αν και δεν βρήκαμε κάποια σχετική μελέτη με άσκηση

**Πίνακας 2.** Ποσοστιαία κατανομή των επιμέρους λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες του υποκνημίδιου μύος των απροπόνητων και προπονημένων επιμύων (μέσες τιμές±SD).

Λιπαρό οξύ	Φωσφολιπίδια			Τριακυλογλυκερόλες		
	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ
14:0	0,28 ± 0,10	0,28 ± 0,08	0,03	2,43 ± 0,29	2,12 ± 0,30*	-1,08
16:0	10,08 ± 1,05	9,69 ± 0,96	-0,37	28,81 ± 1,28	28,09 ± 1,64	-0,56
16:1ω7	0,86 ± 0,24	0,63 ± 0,09*	-0,97	8,42 ± 2,87	5,79 ± 1,54*	-0,92
18:0	21,62 ± 1,89	21,95 ± 1,83	0,18	3,22 ± 0,44	3,83 ± 0,37*	1,38
18:1ω9	3,78 ± 0,47	3,31 ± 0,14*	-0,99	20,84 ± 1,37	20,27 ± 0,85	-0,42
18:1ω7	3,44 ± 0,25	3,21 ± 0,18*	-0,87	3,58 ± 1,01	3,66 ± 0,32	0,08
18:2ω6	34,41 ± 2,06	35,10 ± 2,62	0,34	28,57 ± 3,89	31,84 ± 3,30*	0,84
18:3ω6	0,35 ± 0,04	0,36 ± 0,05	0,39	0,23 ± 0,08	0,36 ± 0,13*	1,52
18:3ω3	0,26 ± 0,04	0,31 ± 0,07	1,13	1,76 ± 0,22	1,73 ± 0,23	-0,17
20:1ω9	0,17 ± 0,04	0,19 ± 0,03	0,35	0,28 ± 0,06	0,33 ± 0,05*	0,89
20:3ω6	0,58 ± 0,10	0,61 ± 0,07	0,34	0,14 ± 0,07	0,16 ± 0,07	0,34
20:4ω6	11,04 ± 1,25	11,13 ± 1,08	0,07	1,22 ± 0,28	1,28 ± 0,56	0,22
20:5ω3	0,20 ± 0,10	0,21 ± 0,16	0,07	0,09 ± 0,05	0,10 ± 0,05	0,16
22:5ω3	3,07 ± 0,25	3,06 ± 0,28	-0,06	0,19 ± 0,07	0,21 ± 0,10	0,32
22:6ω3	9,88 ± 1,18	9,96 ± 1,22	0,07	0,21 ± 0,07	0,24 ± 0,11	0,49
Άθροισμα	100,00	100,00		100,00	100,00	

ΜΕ: Μέγεθος επίδρασης

\* Σημαντικά διαφορετικό από τους απροπόνητους (P&lt;0,05)

**Πίνακας 3.** Δείκτες του προφίλ λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες του υποκνημίδιου μύος των απροπόνητων και προπονημένων επιμύων (μέσες τιμές±SD).

Λιπαρό οξύ	Φωσφολιπίδια			Τριακυλογλυκερόλες		
	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ
Μονοακόρεστα (%)	8,2 ± 0,8	7,3 ± 0,3*	-1,17	33,1 ± 3,7	30,0 ± 2,2*	-0,83
Πολυακόρεστα (%)	59,8 ± 2,7	60,7 ± 2,8	0,35	32,4 ± 4,2	35,9 ± 3,2*	0,84
ω6 (%)	46,4 ± 2,0	47,2 ± 2,9	0,42	30,2 ± 4,0	33,6 ± 3,1*	0,88
ω3 (%)	13,4 ± 1,3	13,5 ± 1,3	0,10	2,3 ± 0,3	2,3 ± 0,3	0,08
ω6/ω3	3,5 ± 0,3	3,5 ± 0,5	0,12	13,5 ± 1,9	14,9 ± 1,5	0,72
A/K	2,15 ± 0,29	2,15 ± 0,26	0,00	1,91 ± 0,13	1,95 ± 0,17	0,30
ΔΑ	200 ± 11	202 ± 9	0,14	104 ± 6	109 ± 5	0,79
Ελονγκάση <sup>#</sup>	0,86 ± 0,25	1,10 ± 0,30*	0,97			
Δ <sup>5</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	18,0 ± 2,5	17,2 ± 1,4	-0,34			
Δ <sup>6</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	0,009 ± 0,001	0,010 ± 0,002	0,85			
Δ <sup>9</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	0,76 ± 0,27	0,55 ± 0,21*	-0,77			

ΜΕ: Μέγεθος επίδρασης, A/K: Ακόρεστα/Κορεσμένα, ΔΑ: Δείκτης ακορεστότητας

\* Σημαντικά διαφορετικό από τους απροπόνητους (P&lt;0,05)

<sup>#</sup> Υπολογίστηκαν ως λόγος προϊόντος προς αντιδρών (στο κείμενο περιγράφονται ακριβώς) από το άθροισμα των συγκεντρώσεων των κατάλληλων λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες

σε τροχό, δύο έρευνες με τρέξιμο σε τάπητα ανέφεραν αυξημένη δραστηριότητα της φωσφοφρουκτοκινάσης σε σκελετικούς μυς προπονημένων επιμύων,<sup>35,36</sup> ενώ 4 άλλ-

λες έρευνες με τρέξιμο σε τάπητα<sup>37-40</sup> και 2 με κολύμβηση<sup>41,42</sup> ανέφεραν μη σημαντικές αλλαγές στη δραστηριότητα της φωσφοφρουκτοκινάσης.

**Πίνακας 4.** Ποσοστιαία κατανομή των επιμέρους λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες της καρδιάς των απροπόνητων και προπονημένων επιμύων (μέσες τιμές±SD).

Λιπαρό οξύ	Φωσφολιπίδια			Τριακυλογλυκερόλες		
	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ
14:0	0,09 ± 0,02	0,08 ± 0,02	-0,02	1,28 ± 0,50	1,15 ± 0,51	-0,26
16:0	6,97 ± 0,28	6,71 ± 0,41	-0,91	30,09 ± 5,29	32,11 ± 5,94	0,38
16:1ω7	0,45 ± 0,15	0,29 ± 0,06*	-1,14	5,00 ± 2,35	2,25 ± 0,85*	-1,17
18:0	18,40 ± 0,84	18,70 ± 1,34	0,36	6,94 ± 2,04	8,24 ± 2,90	0,64
18:1ω9	2,41 ± 0,46	2,09 ± 0,23*	-0,70	24,40 ± 10,12	20,34 ± 5,21	-0,40
18:1ω7	3,52 ± 0,26	3,08 ± 0,15*	-1,69	3,78 ± 0,83	4,52 ± 1,73	0,90
18:2ω6	46,99 ± 1,89	47,41 ± 3,30	0,22	24,30 ± 8,58	26,30 ± 9,44	0,23
18:3ω6	0,24 ± 0,03	0,26 ± 0,03	0,63	0,83 ± 0,52	1,09 ± 0,74	0,51
18:3ω3	0,23 ± 0,03	0,25 ± 0,03	0,50	0,94 ± 0,46	0,99 ± 0,58	0,10
20:1ω9	0,10 ± 0,03	0,14 ± 0,03*	1,35	0,45 ± 0,17	0,59 ± 0,22	0,78
20:3ω6	0,30 ± 0,04	0,31 ± 0,06	0,18	0,15 ± 0,07	0,19 ± 0,07	0,54
20:4ω6	13,63 ± 0,76	12,75 ± 0,62*	-1,15	1,35 ± 0,66	1,36 ± 0,54	0,01
20:5ω3	0,09 ± 0,03	0,07 ± 0,02	-0,51	0,09 ± 0,13	0,28 ± 0,28	1,47
22:5ω3	1,28 ± 0,38	1,42 ± 0,25	0,37	0,19 ± 0,08	0,28 ± 0,10*	1,11
22:6ω3	5,30 ± 1,46	6,44 ± 1,39	0,79	0,23 ± 0,13	0,33 ± 0,13	0,78
Άθροισμα	100,00	100,00		100,00	100,00	

ΜΕ: Μέγεθος επίδρασης

\* Σημαντικά διαφορετικό από τους απροπόνητους (P&lt;0,05)

**Πίνακας 5.** Δείκτες του προφίλ λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες της καρδιάς των απροπόνητων και προπονημένων επιμύων (μέσες τιμές±SD).

Λιπαρό οξύ	Φωσφολιπίδια			Τριακυλογλυκερόλες		
	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	ΜΕ
Μονοακόρεστα (%)	6,5 ± 0,8	5,6 ± 0,4*	-1,10	33,6 ± 11,5	27,7 ± 6,6	-0,51
Πολυακόρεστα (%)	68,1 ± 0,8	68,9 ± 1,7	1,04	28,1 ± 8,7	30,8 ± 9,5	0,31
ω6 (%)	61,2 ± 1,5	60,7 ± 2,8	-0,29	26,6 ± 8,3	28,9 ± 9,1	0,28
ω3 (%)	6,9 ± 1,7	8,2 ± 1,5	0,77	1,5 ± 0,5	1,9 ± 0,7	0,90
ω6/ω3	9,5 ± 2,9	7,7 ± 1,8	-0,61	18,6 ± 4,5	16,8 ± 5,7	-0,40
A/K	2,93 ± 0,12	2,94 ± 0,29	0,07	1,72 ± 0,64	1,50 ± 0,50	-0,33
ΔΑ	196 ± 8	200 ± 5	0,54	96 ± 10	97 ± 16	0,11
Ελονγκάση <sup>#</sup>	2,47 ± 0,21	2,61 ± 0,20	0,66			
Δ <sup>5</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	45,1 ± 6,5	41,5 ± 6,7	-0,56			
Δ <sup>6</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	0,005 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,53			
Δ <sup>9</sup> -δεσατουράση <sup>#</sup>	0,16 ± 0,04	0,13 ± 0,02	-0,66			

ΜΕ: Μέγεθος επίδρασης, A/K: Ακόρεστα/Κορεσμένα, ΔΑ: Δείκτης ακορεστότητας

\* Σημαντικά διαφορετικό από τους απροπόνητους (P&lt;0,05)

<sup>#</sup> Υπολογίστηκαν ως λόγοι προϊόντος προς αντιδρών (στο κείμενο περιγράφονται ακριβώς) από το άθροισμα των συγκεντρώσεων των κατάλληλων λιπαρών οξέων στα φωσφολιπίδια και στις τριακυλογλυκερόλες

Η επίδραση της άσκησης στον τροχό στη δραστηριότητα της συνθάσης του κιτρικού οξέος στην καρδιά δεν έχει ερευνηθεί εκτεταμένα. Οι σχετικές μελέτες έχουν

αναφέρει είτε αυξημένη δραστηριότητα σε προπονημένους επίμυες<sup>31</sup> ή μη σημαντική διαφορά από τους απροπόνητους επίμυες.<sup>28,43</sup> Δεν βρέθηκε κάποια μελέτη που

**Πίνακας 6.** Ενζυμικές δραστηριότητες (U/g ιστού) στους σκελετικούς μυς και στην καρδιά των απροπόνητων και προπονημένων επιμύων (μέσες τιμές±SD).

	Υποκνημίδιος		Καρδιά	
	Απροπόνητοι	Προπονημένοι	Απροπόνητοι	Προπονημένοι
Συνθάση κιτρικού οξέος	32,7±5,5	33,1±4,4	84,5±16,2	80,2±19,0
Φωσφοφρουκτοκινάση	10,4±3,3	11,6±2,1	13,8±2,2	12,9±2,0

να ερευνήσει την επίδραση της χρονίας άσκησης στη δραστηριότητα της φωσφοφρουκτοκινάσης στην καρδιά.

Η σύσταση σε λιπαρά οξέα των τριακυλογλυκερολών του σκελετικού μυός και της καρδιάς και στις δύο πειραματικές ομάδες αντικατοπτρίζει τη σύσταση της διατροφής, με τα 16:0, 18:1ω9 και 18:2ω6 να κυριαρχούν. Δύο από αυτά, το 16:0 και το 18:2ω6, ήταν από τα πιο άφθονα λιπαρά οξέα και στα φωσφολιπίδια, μαζί με τα 18:0, 20:4ω6 και 22:6ω3.

Η συντριπτική πλειονότητα (26 από τα 28) των μεγεθών επίδρασης, που συνόδευσαν σημαντικές διαφορές στη σύσταση σε λιπαρά οξέα και στους δείκτες της, θεωρούνται μεγάλα (δηλαδή,  $\geq 0,8$ ), σύμφωνα με την κατάταξη του Cohen.<sup>44</sup> Για να διερευνηθεί παραπέρα η σημασία αυτών των διαφορών, υπολογίστηκαν και ως ποσοστά αναφορικά με τις αντίστοιχες τιμές της ομάδας των απροπόνητων ζώων. Τα ποσοστά αυτά ήταν κατά μέσο όρο 18,8% και 28,0% στον υποκνημίδιο και στην καρδιά, αντίστοιχα. Επομένως, είτε ως μονάδες SD (δηλαδή μεγέθη επίδρασης) είτε ως ποσοστιαίες αλλαγές, οι επιδράσεις της χρονίας άσκησης στη σύσταση σε λιπαρά οξέα μπορούν να θεωρηθούν μεγάλες στην παρούσα μελέτη.

Βρέθηκαν αρκετές αλλαγές εξαιτίας της προπόνησης στην ποσοστιαία σύσταση των λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων στον υποκνημίδιο. Συγκεκριμένα, οι προπονημένοι επίμυες παρουσίασαν χαμηλότερα 16:1ω7, 18:1ω9 και 18:1ω7. Η σύγκριση με τη σχετική βιβλιογραφία<sup>5,7-9,11,13,14,17</sup> είναι πολύ δύσκολη, επειδή δεν υπάρχει συμφωνία μεταξύ των μελετών. Για παράδειγμα, το 22:6ω3, ένα αρκετά άφθονο λιπαρό οξύ στα φωσφολιπίδια, έχει βρεθεί είτε χαμηλότερο σε προπονημένους μυς ή μη διαφορετικό από απροπόνητους, ανάλογα με το μυ που αναλύθηκε σε δύο μελέτες,<sup>7,11</sup> υψηλότερο σε προπονημένους μυς σε 3 άλλες μελέτες<sup>11,13,14</sup> και μη διαφορετικό από απροπόνητους μυς σε 3 άλλες μελέτες,<sup>8,9,17</sup> καθώς και στην παρούσα. Αυτές οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν επίσης σε μεθοδολογικές ιδιαιτερότητες.

Από τις παραπάνω μελέτες, αυτή των Kriketos et al<sup>7</sup>

είναι παρόμοια με τη δική μας στον πειραματικό σχεδιασμό. Οι ερευνητές προπόνησαν επίμυες σε τροχούς για 45 ημέρες και προσδιόρισαν το προφίλ λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων του υποκνημίδιου και του μακρού εκτείνοντα τους δακτύλους. Η μόνη διαφορά που βρέθηκε μεταξύ των προπονημένων και των απροπόνητων πειραματοζώων ήταν τα χαμηλότερα ποσοστά του 22:6ω3 και του αθροίσματος των ω3 λιπαρών οξέων μόνο στον υποκνημίδιο μυ των προπονημένων επιμύων.<sup>7</sup> Ένα σημείο που χρειάζεται προσοχή είναι η υπερδιπλάσια διαφορά στη σωματική δραστηριότητα συγκριτικά με τη δική μας μελέτη (11,2 έναντι 5,2 km/ημέρα), η οποία λογικά θα ευνοούσε περισσότερες αλλαγές στη σύσταση σε λιπαρά οξέα και όχι λιγότερες. Το κατά πόσο αυτή η παράδοξη διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι οι Kriketos et al<sup>7</sup> χρησιμοποίησαν θηλυκούς επίμυες ή στις διαφορές που υπήρχαν στο προφίλ λιπαρών οξέων πριν από την έναρξη της προπόνησης (π.χ. τα φωσφολιπίδια του υποκνημίδιου των απροπόνητων επιμύων περιείχαν 16% 18:2ω6 και 23% 20:4ω6, ενώ στη δική μας μελέτη 34% και 11%, αντίστοιχα) δεν μπορεί να υποστηριχθεί με βεβαιότητα. Σίγουρα, χρειάζονται περισσότερες μελέτες για να διευκρινιστεί η επίδραση της άσκησης σε τροχό (και της χρονίας άσκησης γενικά) στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων του σκελετικού μυός.

Αξιοσημείωτα χαμηλότερη (κατά 31,9%) συγκέντρωση ολικών τριακυλογλυκερολών βρέθηκε στον υποκνημίδιο μυ των προπονημένων επιμύων, αν και δεν επιβεβαιώθηκε στατιστικά. Οι περισσότερες από τις σχετικές μελέτες έχουν διαπιστώσει χαμηλότερες συγκεντρώσεις τριακυλογλυκερολών στο σκελετικό μυ προπονημένων επιμύων,<sup>45-47</sup> αν και έχει επίσης αναφερθεί απουσία διαφορών μεταξύ προπονημένων και απροπόνητων επιμύων.<sup>48</sup>

Η άσκηση στον τροχό επέδρασε εντυπωσιακά στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των τριακυλογλυκερολών του σκελετικού μυός. Δεν βρέθηκαν μελέτες σε άλλο είδος εκτός από άνθρωπο, που να ασχολήθηκαν με την επίδραση της χρονίας άσκησης στο προφίλ λιπαρών οξέων του σκελετικού μυός. Οι μελέτες στον άνθρωπο έχουν αναφέρει περιορισμένες και αντικρουόμενες επιδράσεις

της άσκησης. Συγκεκριμένα, οι προπονημένοι εθελοντές είχαν (σε ποσοστά) χαμηλότερο 16:0 και 16:1ω7, σύμφωνα με τους Andersson et al,<sup>13</sup> καθώς και χαμηλότερο 18:0 και υψηλότερο 18:1ω9, σύμφωνα με τους Helge et al,<sup>14</sup> ενώ σε 2 άλλες μελέτες<sup>8,17</sup> δεν βρέθηκαν διαφορές μεταξύ προπονημένων και απροπόνητων ανθρώπων.

Στην παρούσα μελέτη, η συγκέντρωση των φωσφολιπιδίων της καρδιάς ήταν χαμηλότερη στα προπονημένα πειραματόζωα, σε αντίθεση με την εργασία των Rocquelin et al,<sup>18</sup> που βρήκαν υψηλότερη συγκέντρωση φωσφολιπιδίων σε προπονημένους επίμυες. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα της μελέτης των Grollman και Costello,<sup>49</sup> που ανέφεραν χαμηλότερα επίπεδα ολικών λιπιδίων στην καρδιά των προπονημένων επιμύων (με δεδομένο ότι τα φωσφολιπίδια αποτελούν συντριπτικά αφθονότερη κατηγορία λιπιδίων στην καρδιά, είναι μάλλον απίθανο μια μείωση των ολικών λιπιδίων να μην οφείλεται σε μείωση των φωσφολιπιδίων).

Οι περισσότερες από τις αλλαγές στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων της καρδιάς με την προπόνηση (δηλαδή, η μείωση των ποσοστών όλων των μονοακόρεστων) ήταν παρόμοιες με αυτές που βρέθηκαν στο σκελετικό μυ. Οι σχετικές μελέτες<sup>9,20</sup> δεν ανέφεραν άλλη αλλαγή εκτός από τη μείωση του 20:3ω6 στους προπονημένους επίμυες.<sup>9</sup> Η ομοιότητα μεταξύ των προσαρμοστικών ανταποκρίσεων της καρδιάς και του σκελετικού μύος στην προπόνηση αναφορικά με τη σύσταση σε λιπαρά οξέα των φωσφολιπιδίων είναι κάπως απροσδόκητη, δεδομένου ότι οι μεταβολικές προσαρμογές της καρδιάς στην άσκηση είναι πολύ χαμηλότερες

από εκείνες του σκελετικού μύος.<sup>50</sup>

Με εξαίρεση τις δύο ακραίες και αντίστροφες αλλαγές στα ποσοστά δύο όξι αφοθωνων λιπαρών οξέων (16:1ω7 και 22:5ω3), το προφίλ λιπαρών οξέων των τριακυλογλυκερολών της καρδιάς δεν τροποποιήθηκε από την προπόνηση. Κάποια σχετική μελέτη δεν είναι γνωστή.

Συμπερασματικά, η μακρόχρονη άσκηση στον τροχό τροποποίησε το προφίλ λιπαρών οξέων των φωσφολιπιδίων και των τριακυλογλυκερολών του σκελετικού μύος και της καρδιάς επιμύων, επομένως θα πρέπει να θεωρείται τροποποιητής της σύστασης σε λιπαρά οξέα αυτών των οργάνων. Η σύσταση σε λιπαρά οξέα του υποκνημίδιου και της καρδιάς προσαρμόστηκε στην άσκηση με παρόμοιο τρόπο (χαμηλότερα μονοακόρεστα), ενώ οι περισσότερες από τις αλλαγές στο προφίλ λιπαρών οξέων των τριακυλογλυκερολών εξαρτώνταν από τον ιστό. Οι αλλαγές στους δείκτες δραστηριότητας δύο ενζύμων που συμμετέχουν στη βιοσύνθεση των λιπαρών οξέων (ελονγκάση και Δ<sup>9</sup>-δεσατουράση) βρίσκονταν προς την ίδια κατεύθυνση και στους δύο ιστούς (προς τα πάνω και προς τα κάτω, αντίστοιχα). Κρίνοντας από τις τιμές των μεγεθών επίδρασης και τις ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των προπονημένων και των απροπόνητων επιμύων, υπήρξαν πολλές σημαντικές επιδράσεις της χρονίας άσκησης στη σύσταση σε λιπαρά οξέα των ιστών που εξετάστηκαν. Η βιολογική σημασία αυτών των αποτελεσμάτων είναι άγνωστη. Χρειάζονται περαιτέρω μελέτες για να επιβεβαιώσουν τα ευρήματα της παρούσας έρευνας και να ξεκαθαρίσουν τις φυσιολογικές προεκτάσεις τους.

## ABSTRACT

### Effect of long-term wheel running on the fatty acid composition of phospholipids and triacylglycerols in rat skeletal muscle and heart

M.G. NIKOLAIDIS, A. PETRIDOU, V. MOUGIOS

*Department of Physical Education and Sport Science, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece*

*Archives of Hellenic Medicine 2004, 21(4):344-353*

**OBJECTIVE** The purpose of this study was to examine the effects of long-term wheel running on the fatty acid composition of phospholipids and triacylglycerols in rat skeletal and heart muscle. **METHOD** Eleven male Wistar rats exercised voluntarily in wheels for eight weeks. Their soleus muscle and heart, and the same organs from fourteen untrained rats were dissected. The fatty acid composition of phospholipids and triacylglycerols was analysed by a combination of thin-layer chromatography and gas chromatography. **RESULTS** The soleus muscle exhibited markedly but non-significantly lower triacylglycerols concentrations in the trained animals. The monounsaturated fatty acids of muscle phospholipids were significantly lower in the trained rats. The estimated elongase activity was significantly higher, whereas the Δ<sup>9</sup>-desaturase activity was significantly lower in the



trained muscles. The monounsaturated fatty acids of phospholipids were also significantly lower in the trained hearts. The fatty acid composition of phospholipids in the skeletal muscles and the heart adapted to training in a comparable manner, whereas most of the changes in the fatty acid profile of triacylglycerols were tissue-dependent. Judging from the magnitude of the effect and the percentage differences between trained and untrained animals, there are many sizeable effects of regular exercise on the fatty acid composition of the skeletal and regular heart muscle of rats. **CONCLUSIONS** Long-term wheel running modified the fatty acid profile of phospholipids and triacylglycerols in rat skeletal and heart muscle, and could thus be considered as a modulator of their fatty acid composition.

**Key words:** Exercise, Fatty acid profile, Heart, Lipid metabolism, Skeletal muscle, Wheel running

## Βιβλιογραφία

- KOGTEVA GS, BEZUGLOV VV. Unsaturated fatty acids as endogenous bioregulators. *Biochemistry (Mosc)* 1998, 63:4–12
- BORKMAN M, STORLIEN LH, PAN DA, JENKINS AB, CHISHOLM DJ, CAMPBELL LV. The relation between insulin sensitivity and the fatty-acid composition of skeletal-muscle phospholipids. *N Engl J Med* 1993, 28:238–244
- AYER KJ, HULBERT AJ. Dietary fatty acid profile affects endurance in rats. *Lipids* 1997, 32:1265–1270
- McKENZIE DJ, HIGGS DA, DOSANJH BS, DEACON G, RANDALL DJ. Dietary fatty acid composition influences swimming performance in Atlantic salmon (*Salmo salar*) in seawater. *Fish Physiol Biochem* 1998, 19:111–122
- THOMAS TR, LONDEREE BR, GERHARDT KO, GEHRKE CW. Fatty acid profile and cholesterol in skeletal muscle of trained and untrained men. *J Appl Physiol* 1977, 43:709–713
- WIRTH A, HEUCK CC, HOLM G, BJOERNTORP P. Changes in the composition of fatty acids of total lipids in various tissues and serum due to physical training and food restriction in the rat. *Scand J Clin Lab Invest* 1980, 40:55–62
- KRIKETOS AD, PAN DA, SUTTON JR. Relationships between muscle membrane lipids, fiber type and enzyme activities in sedentary and exercised rats. *Am J Physiol* 1995, 269:R1154–R1162
- ANDERSSON A, SJOEDIN A, OLSSON R, VESSBY B. Effects of physical exercise on phospholipid fatty acid composition in skeletal muscle. *Am J Physiol* 1998, 274:E432–E438
- AYRE KJ, PHINNEY SD, TANG AB, STERN JS. Exercise training reduces skeletal muscle membrane arachidonate in the obese (fa/fa) Zucker rat. *J Appl Physiol* 1998, 85:1898–1902
- MATAIX J, QUILES JL, HUERTAS JR, BATTINO M, MANAS M. Tissue specific interactions of exercise, dietary fatty acids and vitamin E in lipid peroxidation. *Free Radic Biol Med* 1998, 24:511–521
- HELGE JW, AYRE KJ, HULBERT AJ, KIENS B, STORLIEN LH. Regular exercise modulates muscle membrane phospholipid profile in rats. *J Nutr* 1999, 129:1636–1642
- QUILES JL, HUERTAS JR, MANAS M, BATTINO M, MATAIX J. Physical exercise affects the lipid profile of mitochondrial membranes in rats fed with virgin olive oil or sunflower oil. *Br J Nutr* 1999, 81:21–24
- ANDERSSON A, SJOEDIN A, HEDMAN A, OLSSON R, VESSBY B. Fatty acid profile of skeletal muscle phospholipids in trained and untrained young men. *Am J Physiol* 2000, 279:E744–E751
- HELGE JW, WU BJ, WILLER M, DAUGAARD JR, STORLIEN LH, KIENS B. Training affects muscle phospholipid fatty acid composition in humans. *J Appl Physiol* 2001, 90:670–677
- QUILES JL, HUERTAS JR, MANAS M, OCHOA JJ, BATTINO M, MATAIX J. Dietary fat type and regular exercise affect mitochondrial composition and function depending on specific tissue in the rat. *J Bioenerg Biomembr* 2001, 33:127–134
- SZABO A, ROMVARI R, FEBEL H, BOGNER P, SZENDRO Z. Training-induced alterations of the fatty acid profile of rabbit muscles. *Acta Vet Hung* 2002, 50:357–364
- HELGE JW, DELA F. Effect of training on muscle triacylglycerol and structural lipids: a relation to insulin sensitivity? *Diabetes* 2003, 52:1881–1887
- ROCQUELIN G, JUANEDA P, CLUZAN R. Influence of physical training on the effects of dietary oils on cardiac morphology and phospholipids in rats. *Ann Nutr Metab* 1981, 25:350–361
- TIBBITS GF, NAGATOMO T, SASAKI M, BARNARD RJ. Cardiac sarcolemma: compositional adaptation to exercise. *Science* 1981, 111:1271–1273
- DEMAISON L, BLET J, SERGIEL JP, GREGOIRE S, ARGAUD D. Effect of dietary polyunsaturated fatty acids on contractile function of hearts isolated from sedentary and trained rats. *Reprod Nutr Dev* 2000, 40:113–125
- DOLE VP. A relation between non-esterified fatty acids in plasma and the metabolism of glucose. *J Clin Invest* 1956, 35:150–154
- FOLCH J, LEES M, SLOANE-STANLEY GH. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J Biol Chem* 1957, 226:497–509
- KRAMER JKG, FELLNER V, DUGAN MER, SAUER FD, MOSSOBA MD, YURAWECZ MP. Evaluating acid and base catalysts in the methylation of milk and rumen fatty acids with special emphasis on conjugated dienes and total trans fatty acids. *Lipids* 1997, 32:1219–1228
- SRERE PA. Citrate synthase. *Methods Enzymol* 1969, 13:3–5

25. LING KH, PAETKAU V, MARCUS F, LARDY HA. Phosphofructokinase. *Methods Enzymol* 1966, 9:425–429
26. BALDWIN KM, WINDER WW, TERJUNG RL, HOLLOSZY JO. Glycolytic enzymes in different types of skeletal muscle: Adaptation to exercise. *Am J Physiol* 1973, 225:962–966
27. ALLEN DL, HARRISON BC, MAASS A, BELL ML, BYRNES WC, LEINWAND LA. Cardiac and skeletal muscle adaptations to voluntary wheel running in the mouse. *J Appl Physiol* 2001, 90:1900–1908
28. NOBLE EG, MORASKA A, MAZZEO RS. Differential expression of stress proteins in rat myocardium after free wheel or treadmill run training. *J Appl Physiol* 1999, 86:1696–1701
29. PODOLIN DA, WEI Y, PAGLIASSOTTI MJ. Effects of a high-fat diet and voluntary wheel running on gluconeogenesis and lipolysis in rats. *J Appl Physiol* 1999, 86:1374–1380
30. TOKUYAMA K, OKUDA H. Fatty acid synthesis in adipose tissues of physically trained rats *in vivo*. *Am J Physiol* 1983, 245:E8–E13
31. HENRIKSEN EJ, HALSETH AE. Adaptive responses of GLUT-4 and citrate synthase in fast-twitch muscle of voluntary running rats. *Am J Physiol* 1995, 268:R130–R134
32. SEXTON WL. Vascular adaptations in rat hindlimb skeletal muscle after voluntary running-wheel exercise. *J Appl Physiol* 1995, 79:287–296
33. CHENG B, KARAMIZRAK O, NOAKES TD, DENNIS SC, LAMBERT EV. Time course of the effects of a high-fat diet and voluntary exercise on muscle enzyme activity in Long-Evans rats. *Physiol Behav* 1997, 61:701–705
34. RODNICK KJ, HENRIKSEN EJ, JAMES DE, HOLLOSZY JO. Exercise training, glucose transporters, and glucose transport in rat skeletal muscle. *Am J Physiol* 1992, 262:C9–C14
35. GILLESPIE AC, FOX EL, MEROLA AJ. Enzyme adaptations in rat skeletal muscle after two intensities of treadmill training. *Med Sci Sports Exerc* 1982, 14:461–466
36. TROUP JP, METZGER JM, FITTS RH. Effect of high-intensity exercise training on functional capacity of limb skeletal muscle. *J Appl Physiol* 1986, 60:1743–1751
37. BALDWIN KM, CHEADLE WG, MARTINEZ OM, COOKE DA. Effect of functional overload on enzyme levels in different types of skeletal muscle. *J Appl Physiol* 1977, 42:312–317
38. HILTY MR, GROTH H, MOORE RL, MUSCH TI. Determinants of  $\text{VO}_2\text{max}$  in rats after high-intensity sprint training. *J Appl Physiol* 1989, 66:195–201
39. NOBLE EG, IANUZZO CD. Influence of training on skeletal muscle enzymatic adaptations in normal and diabetic rats. *Am J Physiol* 1985, 249:E360–E365
40. TIKKANEN HO, NAVERI HK, HARKONEN MH. Alteration of regulatory enzyme activities in fast-twitch and slow-twitch muscle-fibers in low-intensity endurance-trained rats. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1995, 70:281–287
41. HARRI MN, VALTOLA J. Comparison of the effects of physical exercise, cold acclimation and repeated injections of isoprenaline on rat muscle enzymes. *Acta Physiol Scand* 1975, 95:391–399
42. ST-PIERRE DM, LEONARD D, HOULE R, GARDINER PF. Recovery of muscle from tetrodotoxin-induced disuse and the influence of daily exercise. 2. Muscle enzymes and fatigue characteristics. *Exp Neurol* 1988, 101:327–346
43. DUNCAN ND, WILLIAMS DA, LYNCH GS. Deleterious effects of chronic clenbuterol treatment on endurance and sprint exercise performance in rats. *Clin Sci* 2000, 98:339–347
44. COHEN J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum, 1988
45. FROBERG SO. Metabolism of lipids in blood and tissues during exercise. In: Poortmans JR (ed) *Biochemistry of exercise*. Karger, Basel, 1969:100–113
46. KACIUBA-USCILKO H, DUDLEY GA, TERJUNG RL. Muscle LPL activity, plasma and muscle triglycerides in trained thyroidectomized rats. *Horm Metab Res* 1981, 13:688–690
47. OSCAI LB, CARUSO RA, WERGELES AC. Lipoprotein lipase hydrolyzes endogenous triacylglycerols in muscle of exercised rats. *J Appl Physiol* 1982, 52:1059–1063
48. LEE JS, BRUCE CR, TUNSTALL RJ, CAMERON-SMITH D, HUGEL H, HAWLEY JA. Interaction of exercise and diet on GLUT-4 protein and gene expression in type I and type II rat skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* 2002, 175:37–44
49. GROLLMAN S, COSTELLO L. Effect of age and exercise on lipid content of various tissues of the male albino rat. *J Appl Physiol* 1972, 32:761–765
50. MOORE RL. Cellular adaptations of the heart muscle to exercise training. *Ann Med* 1998, 30:46–53

*Corresponding author:*

V. Mougios, TEFAA, University of Thessaloniki, GR-541 24 Thessaloniki, Greece  
e-mail: mougios@phed.auth.gr

.....