



Αναζητήσεις στη Φυσική Αγωγή & τον Αθλητισμό
Τόμος 12 (2), 79-89
Δημοσιεύτηκε: Απρίλιος 2014



Inquiries in Sport & Physical Education
Volume 12 (2), 79-89
Released: April 2014

www.pe.uth.gr/emag

ISSN 1790-3041

Παιδιά, Άσκηση και Οξειδωτικό Στρες

Αθανάσιος Ζαλαβράς^{1,2}, & Τζιαμούρτας Αθανάσιος^{1,2}

¹Σ.Ε.Φ.Α.Α., Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τρίκαλα,

²Ινστιτούτο Έρευνας, Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Τρίκαλα,

Περίληψη

Η άσκηση αποτελεί ένα ερέθισμα για την διαταραχή της οξειδοαναγωγικής κατάστασης, όπως αυτή εκτιμάται από την αυξημένη παραγωγή δραστικών ειδών οξυγόνου και αζώτου και τις μεταβολές αντιοξειδωτικών μορίων. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην πλειονότητα τους σε ενήλικα άτομα. Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερες έρευνες προσπαθούν να εκτιμήσουν την επίδραση που έχει η άσκηση, τόσο η οξεία όσο και η συστηματική προπόνηση, στην οξειδοαναγωγική κατάσταση παιδιών. Σκοπός της παρούσας ανασκόπησης είναι να παρουσιάσει τα αποτελέσματα των ερευνών σχετικά με τη επίδραση της οξείας και χρόνιας άσκησης σε οξειδοαναγωγικούς δείκτες, που μετρήθηκαν στο αίμα γυμνασμένων παιδιών και εφήβων σε ηρεμία, καθώς και μετά από άσκηση, έτσι ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για τα οφέλη, όσο και για τους κινδύνους που πιθανόν μπορεί να προκύψουν από τη συστηματική σωματική άσκηση. Από την ανασκόπηση προκύπτει ότι η άσκηση προκαλεί πρόσκαιρα οξειδωτικό στρες, ακόμα και στα γυμνασμένα παιδιά, αλλά μέσω της προπόνησης φαίνεται να συντελούνται προσαρμογές στο σύστημα άμυνας, που περιορίζουν την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου.

Λέξεις κλειδιά: έφηβοι, προπόνηση, ελεύθερες ρίζες, αντιοξειδωτικά

Children, Exercise and Oxidative Stress

Athanasios Zalavras^{1,2} & Athanasios Z. Jamurtas^{1,2}

¹School of Physical Education and Sport Science, University of Thessaly, Trikala, Hellas

²Institute for Research and Technology – Thessaly, Trikala, Greece

Abstract

Exercise is a stressor that results in changes in redox status as this is estimated through an increase of reactive oxygen and nitrogen species and modulation of the antioxidant system. Lately, there is an increasing interest of the scientific community to examine the effects of acute and chronic exercise on redox status of children. This review highlights results from studies that examined the effects of acute and chronic exercise on blood redox status. From this review is evident that exercise causes a temporary increase in oxidative stress, even in trained children, but systematic training seems to enhance the antioxidant system that prevents significant increases in oxidative stress.

Key words: *adolescence, training, free radicals, antioxidants*

Εισαγωγή

Η άσκηση σε κατάλληλη ένταση και διάρκεια μπορεί να προκαλέσει αυξημένη παραγωγή δραστικών ειδών οξυγόνου και αζώτου (RONS) (Nikolaidis et al., 2008; Urso & Clarkson, 2003). Η παραγωγή RONS σε ποσότητες που ξεπερνούν το ενδογενές αντιοξειδωτικό σύστημα άμυνας προκαλεί οξειδωτικό στρες. Το οξειδωτικό στρες συνδέεται με μεγάλο αριθμό παθολογικών καταστάσεων όπως, η αθηροσκλήρωση, ο διαβήτης, η μυϊκή δυστροφία, το Parkinson, το Alzheimer, ο καρκίνος κ.α.

Η πλειονότητα των αναφορών υποστηρίζει μια παροδική αύξηση της οξειδωσης των μακρομορίων (λιπιδίων, πρωτεϊνών κ.τ.λ) μετά από αερόβια άσκηση (Goldfarb, 1993; Mihailidis et al., 2007; Powers, DeRuisseau, Quindry, & Hamilton, 2004). Η εκτέλεση τόσο ήπιας όσο και έντονης προπόνησης φαίνεται να συντελεί στη μείωση του σχηματισμού ελευθέρων ριζών και κατά συνέπεια της οξειδωσης των προαναφερθέντων μακρομορίων, προάγοντας τη διατήρηση της υγείας και της φυσιολογικής λειτουργίας (Gomes, Silva, & de Oliveira, 2012; Miyazaki et al., 2001; Powers et al., 2004). Η αερόβια προπόνηση ίσως μειώνει (χωρίς να εξαφανίζει εντελώς) την οξειδωση των μακρομορίων μετά από άσκηση (Powers, Ji, & Leeuwenburgh, 1999) εξαιτίας της αύξησης της αντιοξειδωτικής άμυνας και/ή εξαιτίας της μείωσης της παραγωγής RONS κατά την διάρκεια καθώς και μετά από αυτή.

Τα παιδιά καταναλώνουν περισσότερο οξυγόνο κατά τη διάρκεια της άσκησης και αυτό μπορεί να επηρεάσει την οξειδοαναγωγική τους κατάσταση (Armon, Cooper, Flores, Zanconato, & Barstow, 1991). Επίσης, οι μεταβολές στο ενδοκυτταρικό pH και στην αναλογία ανόργανου φωσφόρου προς φωσφοκρεατίνη κατά την διάρκεια της άσκησης είναι μικρότερη στα παιδιά, κάτι που υποδεικνύει ότι τα παιδιά βασίζονται λιγότερο στον αναερόβιο μηχανισμό παραγωγής ενέργειας σε σχέση με τους ενήλικες (Zanconato, Buchthal, Barstow, & Cooper, 1993). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, πολύ πιθανόν η ροή οξυγόνου στη μιτοχονδριακή αναπνευστική αλυσίδα των εργαζόμενων μυών των παιδιών να είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα το οξειδωτικό στρες που προκαλείται εξαιτίας της άσκησης να είναι μεγαλύτερο σ' αυτά από ότι στους ενήλικες (Cooper, Nemet, & Galassetti, 2004). Εξετάζοντας την περιορισμένη βιβλιογραφία σχετικά με τις μεταβολές στην οξειδοαναγωγική κατάσταση που προκαλεί η άσκηση σε γυμνασμένα παιδιά και εφήβους, τόσο μετά από οξεία, όσο και μετά από χρόνια παρέμβαση, δεν διαπιστώνουμε ομοφωνία απόψεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ερευνών επικεντρώθηκε σε αγωνίσματα όπως η κολύμβηση και αφορούσε στην επίδραση αερόβιων κυρίως ερεθισμάτων, ενώ ερευνητικές προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν και σε ομαδικά αθλήματα, όπως η χειροσφαίριση και αφορούσαν σε εφήβους (Djordjevic et al., 2011; Djordjevic et al., 2010).

Επομένως, σκοπός της παρούσας ανασκόπησης είναι να παρουσιάσει τα αποτελέσματα των ερευνών σχετικά με την επίδραση της οξείας και χρόνιας άσκησης σε οξειδοαναγωγικούς δείκτες που μετρήθηκαν στο αίμα γυμνασμένων παιδιών και εφήβων σε ηρεμία, καθώς και μετά από άσκηση, έτσι ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για τα οφέλη, όσο και για τους κινδύνους που πιθανόν μπορεί να προκύψουν από τη συστηματική σωματική άσκηση.

Οξεία επίδραση της άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση γυμνασμένων παιδιών

Υπάρχουν πολύ λίγες εργασίες που εξέτασαν την οξεία επίδραση της άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση γυμνασμένων παιδιών. Οι περισσότερες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε παιδιά χρησιμοποιούν ως κριτήρια για το χαρακτηρισμό ενός παιδιού (9-11 χρόνων) ως γυμνασμένο τα ακόλουθα: η εβδομαδιαία συχνότητα προπόνησης να είναι ≥ 3 φορές, η διάρκεια της κάθε προπονητικής μονάδας να είναι ≥ 1 ώρα και η προπονητική ηλικία να είναι ≥ 1 έτους (Alshammari et al., 2010; Cavas & Tarham, 2004; Gougoura et al., 2007; Kabasakalis et al., 2009; Nikolaidis et al., 2007). Στην ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε μπορέσαμε να εντοπίσουμε μόνο τρεις εργασίες που να εξετάζουν την οξεία επίδραση της άσκησης, με τις δύο από αυτές να χρησιμοποιούν ένα αερόβιο ερέθισμα για να αξιολογήσουν τις μεταβολές της οξειδοαναγωγικής κατάστασης, ενώ μόνο σε μία χρησιμοποιήθηκε αναερόβιο ερέθισμα. Τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Οι Inal, Akyu, Turgut και Getsfrid (2001), διερευνώντας την επίδραση που είχε ένας αγώνας κολύμβησης 800μ (αερόβιο ερέθισμα) στο αντιοξειδωτικό σύστημα, πολύ καλά γυμνασμένων εφήβων κολυμβητών,

διαπίστωσαν μια σημαντική αύξηση (σε σχέση με τα επίπεδα ηρεμίας) της δραστηριότητας αντιοξειδωτικών ενζύμων, όπως της καταλάσης (CAT) και της υπεροξειδάσης της γλουταθειόνης (GPX), ενώ υπήρξε μείωση της δραστηριότητας της ανηγμένης γλουταθειόνης (GSH) αμέσως μετά τον αγώνα. Πέρα όμως από αυτές τις διαπιστώσεις, οι παραπάνω ερευνητές παρατήρησαν μια γρήγορη επαναφορά του αντιοξειδωτικού μηχανισμού, κοντά στα επίπεδα ηρεμίας μέσα σε 20-40min. Αυτή η γρήγορη επαναφορά πιθανόν να οφείλεται στη συστηματική και πολύμηνη προπονητική διαδικασία την οποία ακολούθησαν οι κολυμβητές και η οποία με τη σειρά της προκάλεσε προσαρμογές στο αντιοξειδωτικό σύστημα, καθιστώντας το αποτελεσματικότερο στην αντιμετώπιση του προκαλούμενου από την άσκηση οξειδωτικού στρες. Στην ίδια έρευνα ο Inal et al. (2001) παρατήρησαν ότι και ένας αγώνας 100μ κολύμβησης (αναερόβιο ερέθισμα) προκάλεσε παρόμοιες οξειδοαναγωγικές ανταποκρίσεις. Το γεγονός ότι η επαναφορά των παραπάνω δεικτών κοντά στα επίπεδα ηρεμίας, καθυστέρησε περισσότερο από ότι μετά τον αγώνα των 800μ κολύμβησης, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, πιθανόν, η ένταση να αποτελεί σημαντικό παράγοντα για διαφορετικές μεταβολές στην οξειδοαναγωγική κατάσταση ασκούμενων παιδιών.

Μια άλλη έρευνα του Nikolaidis et al. (2007), που εξέτασε την επίδραση ενός πρόσκαιρου αερόβιου ερεθίσματος (αερόβια διαλειμματική προπόνηση μικρού χρόνου 50 μέτρα X 10 επαναλήψεις σε ένταση 70%-75% της μέγιστης προσπάθειας στην απόσταση) στην οξειδοαναγωγική κατάσταση καλά προπονημένων παιδιών (9-11 χρονών, αγόρια και κορίτσια) κολυμβητών διαπίστωσε παρόμοιες ποιοτικές μεταβολές με την έρευνα του Inal, Akyu, Turgut και Getsfrid (2001). Πιο συγκεκριμένα, μετά την άσκηση παρατηρήθηκε αύξηση της δραστηριότητας της CAT, της συνολικής αντιοξειδωτικής ικανότητας (TAC), μείωση της συγκέντρωσης της GSH καθώς και του λόγου ανοιγμένης προς οξειδωμένη γλουταθειόνη (GSH/GSSG) σε σχέση με αυτά που παρατηρήθηκαν σε επίπεδο ηρεμίας, τόσο στα αγόρια όσο και στα κορίτσια που συμμετείχαν στην έρευνα. Παρόμοια αύξηση (σε αγόρια και κορίτσια) παρουσίασαν και δείκτες οξείδωσης των λιπιδίων, όπως οι αντιδρώσες ουσίες με το θειοβαρβιτουρικό οξύ (TBARS), και των πρωτεϊνών, όπως τα πρωτεϊνικά καρβονύλια (PC). Γενικότερα, οι παραπάνω ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη αερόβια διαλειμματική άσκηση προκάλεσε οξειδωτικό στρες κατά τον ίδιο τρόπο, σε πολύ καλά προπονημένα αγόρια και κορίτσια κολυμβητές. Επίσης, δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά στην οξειδοαναγωγική κατάσταση μεταξύ των συμμετεχόντων αγοριών και κοριτσιών σε κατάσταση ηρεμίας.

Η επίδραση μιας έντονης αερόβιας άσκησης, όπως αυτή εκφράζεται διαμέσου της δοκιμασίας 20m-shuttle run για την εκτίμηση της αερόβιας ικανότητας, έδειξε ότι σε αγύμναστα αγόρια που βρισκόταν στην προεφηβεία και την εφηβεία, τα επίπεδα της γλουταθειόνης στο σάλιο μειώνονται (Benitez-Sillero et al., 2009). Η μείωση αυτή δεν παρουσιάστηκε μόνο στα παιδιά τα οποία βρισκόταν στην προεφηβεία και είχαν χαμηλά επίπεδα φυσικής κατάστασης. Είναι προφανές πως υπάρχει ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία όσον αφορά στην αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η άσκηση στις πιθανές μεταβολές της οξειδοαναγωγικής κατάστασης. Δε θα πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός ότι υπάρχουν πολλές κατηγορίες αθλημάτων όπου η συμμετοχή των παιδιών ξεκινάει από πολύ μικρή ηλικία για να μπορέσουν να δημιουργήσουν μια πετυχημένη αθλητική καριέρα ή η κορύφωση της αθλητικής καριέρας συμβαίνει στην εφηβική ηλικία (π.χ. ενόργανη και ρυθμική γυμναστική). Ακόμα διαπιστώνει κανείς ότι μόνο αθλητές της κολύμβησης είναι αυτοί που έχουν αξιολογηθεί ως προς την οξεία επίδραση της άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση. Επομένως απαιτείται συστηματικότερη προσπάθεια για να μπορέσουμε να αντλήσουμε πληροφορίες οι οποίες θα μπορέσουν να βοηθήσουν, όχι μόνο την αθλητική προσπάθεια, αλλά κυρίως να θωρακίσουν την υγεία των ασκούμενων παιδιών.

Πίνακας 1. Επιδράσεις της οξείας άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση παιδιών και εφήβων αθλητών ατομικών και ομαδικών αθλημάτων

Εργασία	Πρωτόκολλο	Χαρακτηριστικά δειγματος	Τύπος ερεθίσματος	Ιστός όπου έγινε η ανάλυση	Δείκτης οξειδωτικού στρες
Inal et al.,(2001)	800μ κολύμβηση με πλήρη προσπάθεια	Φύλο: ♂, ♀ n=10 Αθλημα: κολύμβηση Επίπεδο: αθλητές συλλόγου Ηλικία: 15-21χρ. Προπονητική ηλικία: 5±1χρ. Φύλο: ♂, ♀ n=9 Αθλημα: κολύμβηση	Αερόβια	Πλάσμα, Ερυθροκύτταρα	CAT↑, GPX↑, GSH↓
Inal et al.,(2001)	100μ κολύμβηση με πλήρη προσπάθεια	Επίπεδο: αθλητές συλλόγου Ηλικία: 15-21χρ. Προπονητική ηλικία: 5±1χρ. Φύλο: ♂, ♀ n=22 Αθλημα: κολύμβηση	Αναερόβια	Πλάσμα, Ερυθροκύτταρα	CAT↑, GPX↑, GSH↓
Nikolaïdis et al., (2007)	50μ.Χ12επαν. κολύμβηση στο 70%-75% της μέγιστης προσπάθειας με 1 λεπτό διάλειμμα	Επίπεδο: αθλητές συλλόγου Ηλικία: 9-11χρ. Προπονητική ηλικία: ≥1χρ. Συχνότητα προπόνησης: ≥3φ/εβδ. Διάρκεια: ≥1h Φύλο: ♂ n=70	Αερόβια	Ορός	CAT↑, GSH↓, TBARS↑, PC↑, TAC↑
Benites-Sillero et al.,(2009)	20m-Shuttle run test	Επίπεδο: μη-αθλητές Ηλικία: Δύο ομάδες: 10.75 & 13.86 χρ.	Αερόβια	Σάλιο	GSH↓

↓= στατιστικά σημαντική μείωση, ↑= στατιστικά σημαντική αύξηση, ↔= καμία στατιστικά σημαντική μεταβολή, ♀= κορίτσια, ♂= αγόρια, CAT = καταλάση, GPX =υπεροξειδάση της γλουταθειόνης, GR=αναγωγή της γλουταθειόνης, GSH = ανηγμένη γλουταθειόνη, TAC = συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα, TBARS =ουσίες που αντιδρούν μεθειοβαρβιτουρικό οξύ, PC=πρωτεϊνικά καρβονύλια

Χρόνια επίδραση της άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση προπονημένων παιδιών και εφήβων

Πέρα όμως από τις έρευνες που εξέτασαν την επίδραση ενός πρόσκαιρου αερόβιου ερεθίσματος στην απόκριση της οξειδοαναγωγικής κατάστασης προπονημένων παιδιών, υπήρξαν ερευνητές που προσπάθησαν να διαλευκάνουν την επίδραση της χρόνιας αερόβιας άσκησης στην πρόκληση οξειδωτικού στρες και στον αντιοξειδωτικό μηχανισμό παρόμοια γυμνασμένων παιδιών και εφήβων (Cavas & Tarham, 2004; Kabasakalis et al., 2009). Ωστόσο, ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα σε αυτές τις

ηλικίες είναι η βιολογική ωρίμανση των παιδιών. Για να ελεγχτεί η επίδραση που μπορεί να έχει η βιολογική ηλικία γίνεται στην αρχή και στο τέλος μιας έρευνας εκτίμηση της βιολογικής ηλικίας των συμμετεχόντων μέσω της κλίμακας του Tanner (1972). Κατά αυτόν τον τρόπο αν δεν παρατηρηθεί κάποια μεταβολή στην κλίμακα Tanner, σε σχέση με τις αρχικές τιμές, τότε μπορούμε να πούμε ότι δεν υπήρξε επίδραση της βιολογικής ωρίμανσης στα αποτελέσματα της έρευνας. Οι επιδράσεις της χρόνιας άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση παιδιών και εφήβων αθλητών ατομικών και ομαδικών αθλημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Ερευνητές όπως ο Kabasakalis et al. (2009), παρατήρησαν μια αύξηση του λόγου GSH/GSSG ως αποτέλεσμα της αύξησης της GSH και μιας μείωσης της GSSG μετά από 13 και 23 εβδομάδες προπόνησης σε γυμνασμένα αγόρια και κορίτσια κολυμβητές. Η μεταβολή των παραπάνω δεικτών φανερώνει μια βελτίωση του αντιοξειδωτικού μηχανισμού άμυνας η οποία πιθανόν συντελέστηκε κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Στην ίδια έρευνα δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές της TAC, της CAT, ούτε δεικτών υπεροξειδωσης των λιπιδίων, όπως των TBARS. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι οξειδοαναγωγικοί δείκτες δεν ανταποκρίνονται όλοι κατά τον ίδιο τρόπο μετά από μακροχρόνια προπόνηση.

Σε διαφορετικά όμως αποτελέσματα κατέληξε η έρευνα των Cavaς και Tarham (2004), όσον αφορά στην συμπεριφορά της CAT μετά από αερόβια προπονητική παρέμβαση κολύμβησης, μικρότερης διάρκειας (4 εβδομάδες), σε προπονημένα αγόρια και κορίτσια 11-13 χρονών. Πιο συγκεκριμένα, στα κορίτσια παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της δραστηριότητας της CAT και της δισμουτάσης του υπεροξειδίου (SOD), αποτελέσματα που έρχονται σε αντίθεση με αυτά που παρουσίασαν οι κολυμβητριες στην έρευνα του Kabasakalis et al. (2009) ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή των παραπάνω δεικτών στα αγόρια, γεγονός που συμφωνεί με την παραπάνω έρευνα. Επιπρόσθετα, βρέθηκε αύξηση της υπεροξειδάσης της γλουταθειόνης (GPX) και μείωση της οξειδωσης των λιπιδίων που εκτιμήθηκε μέσω των επιπέδων της μαλονδιαλδεύδης (MDA) σε όλους τους κολυμβητές (αγόρια-κορίτσια).

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν επίσης να απαντήσουν στο ερώτημα σχετικά με τις προσαρμογές που προκαλεί η χρόνια ενασχόληση με την άσκηση στο οξειδωτικό στρες και αντιοξειδωτικό σύστημα των παιδιών, συγκρίνοντας προπονημένα με απροπόνητα παιδιά. Σε μια τέτοια ερευνητική προσπάθεια η Gougoura et al. (2007), αφού συνέκριναν την οξειδοαναγωγική κατάσταση πολύ καλά γυμνασμένων παιδιών κολυμβητών με αγύμναστα παιδιά ίδιας ηλικίας, διαπίστωσαν, ότι τα γυμνασμένα παιδιά παρουσίαζαν χαμηλότερα επίπεδα GSH και GSH/GSSG στο αίμα από ότι τα αγύμναστα. Το παραπάνω γεγονός μπορεί πιθανόν να αποδοθεί στο οξειδωτικό στρες, προερχόμενο από τις απαιτήσεις της προπόνησης. Οι ίδιοι ερευνητές βρήκαν υψηλότερα επίπεδα TBARS στα γυμνασμένα παιδιά σε σχέση με τα αγύμναστα, που σημαίνει ότι η υπεροξειδωση των λιπιδίων ήταν πιθανόν μεγαλύτερη στα παιδιά κολυμβητές. Υψηλότερα επίπεδα υπεροξειδωσης των λιπιδίων σε γυμνασμένους έφηβους κολυμβητές, σε σχέση με αυτά που παρατηρήθηκαν σε αγύμναστους, έδειξε και η έρευνα του Santos-Silva et al. (2001).

Αντίθετα στην έρευνα του Ookawara et al. (2003) δεν μεταβλήθηκαν τα επίπεδα υπεροξειδωσης των λιπιδίων μετά από τρεις μήνες προπόνησης κολύμβησης ή τρεξίματος σε εφήβους. Στην εργασία της Gougoura et al. (2007) διαπιστώθηκε επίσης ότι και η δραστηριότητα της CAT παρουσίαζε μια τάση μείωσης στους κολυμβητές συγκρινόμενη με αυτή των αγύμναστων. Τα χαμηλότερα επίπεδα του συγκεκριμένου αντιοξειδωτικού ενζύμου φαίνεται να συντέλεσαν στη μείωση της αντιοξειδωτικής άμυνας απέναντι στα RONS, συνεισφέροντας κατά αυτό τον τρόπο στο οξειδωτικό στρες. Σε χαμηλότερο επίπεδο βρέθηκε ότι ήταν και η TAC των κολυμβητών σε σχέση με τους αγύμναστους, αποτέλεσμα το οποίο δεν συμφωνεί με αυτό που βρήκε ο Santos-Silva et al. (2001), όπου δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ πολύ καλά γυμνασμένων κολυμβητών και μέτρια γυμνασμένων εφήβων (12-16 ετών) όσον αφορά στην TAC. Τέλος, το γεγονός ότι δεν βρέθηκαν διαφορές στο ουρικό οξύ (UA) μεταξύ των δύο ομάδων ενισχύει την άποψη ότι πιθανόν άλλα μόρια προκάλεσαν την αύξηση της παραγωγής ROS συνεισφέροντας στη μειωμένη TAC που βρέθηκε στους κολυμβητές σε σχέση με τα αγύμναστα παιδιά (Gougoura et al., 2007). Σημαντικές διαφορές μεταξύ κοριτσιών που έκαναν συστηματική προπόνηση γυμναστικής και αγύμναστων βρέθηκαν σε αντιοξειδωτικά ένζυμα και στην πρόσληψη ιχνοστοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκαν σημαντικά υψηλότερες τιμές στην GPx και σημαντικά χαμηλότερες τιμές στην SOD στις αθλήτριες γυμναστικής σε σχέση με την ομάδα ελέγχου (Alshammari et al., 2010). Επιπρόσθετα, οι αθλήτριες είχαν σημαντικά υψηλότερες τιμές στο σελήνιο αλλά όχι στον ψευδάργυρο ή χαλκό, ιχνοστοιχεία τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο σαν συμπαραγόντες στη δράση των προαναφερθέντων ενζύμων. Ωστόσο, οι μισές σχεδόν αθλήτριες και οι κοπέλες της ομάδας ελέγχου είχαν κάτω από τα φυσιολογικά όρια τιμές στον ψευδάργυρο, που θα μπορούσε εν γένει να επηρεάσει τη δραστηριότητα της SOD. Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ διατροφικών παραγόντων (μονοα-

κόρεστα και πολυακόρεστα λιπαρά οξέα) και SOD μόνο για τις αθλήτριες. Είναι πολύ πιθανόν διάφοροι διατροφικοί παράγοντες να επηρέασαν τα αποτελέσματα της SOD σε αυτή την εργασία (Alshammari et al., 2010).

Σε έρευνες που έγιναν σε ομαδικά αθλήματα, όπως η χειροσφαίριση, βρέθηκε ότι έφηβοι αθλητές παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερη δραστικότητα της SOD σε σχέση με μη αθλητές αντίστοιχης ηλικίας (Djordjevic et al., 2011). Αυτή η προσαρμογή πιθανόν συνέβη εξαιτίας του ότι το συγκεκριμένο ένζυμο συμμετέχει στην πρώτη γραμμή άμυνας των ερυθροκυττάρων και η δραστικότητά του μεταβάλλεται πολύ συχνά και εύκολα εξαιτίας της επίδρασης της συστηματικής άσκησης (Djordjevic et al., 2010). Αντίθετα, τα επίπεδα της CAT ήταν απρόσμενα χαμηλότερα σε σύγκριση με τους αγύμναστους, γεγονός που δικαιολογείται από τη συγγραφέα λόγω πιθανής έλλειψης σιδήρου, σεληνίου και άλλων ιχνοστοιχείων στους συγκεκριμένους αθλητές. Διαπιστώθηκε επίσης θετική συσχέτιση της αερόβιας ικανότητας με την CAT και αρνητική με τα επίπεδα του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2). Επιπρόσθετα βρέθηκε ότι τα επίπεδα υπεροξειδωσής των λιπιδίων, που υπολογίστηκαν μέσω των επιπέδων των TBARS, ήταν υψηλότερα στους αθλητές με την υψηλότερη αερόβια ικανότητα, πιθανόν ως συνέπεια της μεγαλύτερης ικανότητας για άσκηση που εμφανίζουν οι συγκεκριμένοι αθλητές, η οποία με τη σειρά της προκαλεί υψηλότερο οξειδωτικό στρες στους εργαζόμενους μύες.

Το επίπεδο της φυσικής κατάστασης και η σωματοδομή φαίνεται πως επηρεάζουν τους δείκτες οξειδωτικού στρες στην παιδική ηλικία (Kelly, Steinberger, Olson, & Dengel, 2007). Αποτελέσματα πρόσφατων εργασιών δείχνουν πως τα υπέρβαρα και παχύσαρκα παιδιά παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα οξειδωτικού στρες, όπως αξιολογήθηκαν αυτά με τα επίπεδα των ισοπροστανίων (F2-Isop). Τα επίπεδα των F2-Isop συσχετίστηκαν επίσης θετικά με μετρήσεις σωματοδομής, ινσουλινοαντίστασης και λιπιδαιμικού προφίλ και αρνητικά με την μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (Dennis, Ergul, Gower, Allison, & Davis, 2013). Αυξημένα επίπεδα F2-Isop παρουσιάστηκαν και μετά από μία περίοδο 5 εβδομάδων συστηματικής άσκησης (Nasca et al., 2010). Ωστόσο, η τελευταία εργασία παρουσιάζει αρκετούς μεθοδολογικούς περιορισμούς, με κυριότερους την έλλειψη ομάδας ελέγχου και το χαμηλό αριθμό συμμετεχόντων (n=6). Διαφορετικά επίπεδα γλουταθειόνης, ενός σημαντικού αντιοξειδωτικού μορίου, παρουσιάστηκαν σε παιδιά με διαφορετικά επίπεδα φυσικής κατάστασης (Llorente-Cantarero et al., 2012). Τα παιδιά με υψηλά επίπεδα φυσικής κατάστασης, όπως αξιολογήθηκαν αυτά από τη δοκιμασία των 20m-SRT, παρουσίασαν χαμηλότερα επίπεδα οξειδωμένης γλουταθειόνης (GSSG) και ολικής γλουταθειόνης (TGSN) και υψηλότερο λόγο GSH/GSSG. Επιπρόσθετα, τα επίπεδα της GSSG συσχετίστηκαν αρνητικά με την επίδοση στη δοκιμασία 20m-SRT, ενώ ο λόγος GSH/GSSH και επίδοσης στη δοκιμασία 20-m SRT παρουσίασε θετική συσχέτιση, υποδεικνύοντας ότι η συστηματική άσκηση βελτιώνει μέρος του αντιοξειδωτικού συστήματος.

Πίνακας 2. Επιδράσεις της χρόνιας άσκησης στην οξειδοαναγωγική κατάσταση παιδιών και εφήβων αθλητών ατομικών και ομαδικών αθλημάτων

Εργασία	Πρωτόκολλο	Χαρακτηριστικά δείγματος	Τύπος ερεθίσματος	Ιστός όπου έγινε η ανάλυση	Δείκτης οξειδωτικού στρες
Kabasakalis et al., (2007)	13-23 εβδ. προπόνηση κολύμβησης	Φύλο: ♂, ♀ n=24 Άθλημα: κολύμβηση Επίπεδο: αθλητές συλλόγου Ηλικία: 10-11χρ. Προπονητική ηλικία: ≥1χρ. Συχνότητα προπόνησης: ≥3φ/εβδ. Διάρκεια: 75-90min απόσταση 2687 ±547 m,	Αερόβια	Πλάσμα, ερυθρο-κύτταρα	GSH↑, GSSH↓, GSH/GSSH↑, TAC↔, CAT↔, TBA RS↔
Cavas et al., (2004)	4 εβδ. προπόνηση κολύμβησης	Φύλο: ♂ ♀ n=30 (15♀ & 15♂) Άθλημα: κολύμβηση Επίπεδο: αθλητές συλλόγου Ηλικία: 10-13χρ. Προπονητική ηλικία:- Συχνότητα προπόνησης:4φ/εβδ. Διάρκεια: 2h απόσταση 2000-2500m	Αερόβια	Πλάσμα, ερυθρο-κύτταρα	1)αγόρια: MDA↑, CAT↔ SOD↔, GPX↑, CK↑, 2)κορίτσια: MDA↑,CAT↑, SOD↑, GPX↑, CK↑,
Ookawara et al., (2003)	3 μήνες προπόνηση κολύμβησης, τρέξιμο	Φύλο: ♂ n=18 Άθλημα: 9 κολύμβηση, 9 τρέξιμο Επίπεδο: αγύμναστοι Ηλικία:17-22χρ. Προπονητική ηλικία:- Συχνότητα προπόνηση:5φ/εβ. Διάρκεια:2h, Ένταση:80%-90% M.H.R	Αερόβια	Πλάσμα, ερυθρο-κύτταρα	CuZn-SOD↔,Mn-SOD↓, EC-SOD↓, MDA↔,O ₂ ⁻ ↔
Santos-Silva et al., (2001)	Σύγκριση αθλητές με αθλούμενους	Φύλο: ♀ ♂ n=40 Άθλημα: κολύμβηση Επίπεδο: αθλητές υψηλού επιπέδου Ηλικία:12-16χρ. Προπονητική ηλικία:- Συχνότητα προπόνηση: 20h/εβδ.	Αερόβια, αναερόβια	πλάσμα	TAS↔,TBARS↑,
Gougoura et al., (2007)	Σύγκριση αθλητές με αγύμναστους.	Φύλο: ♀ ♂ n=17 Άθλημα: κολύμβηση Επίπεδο: αθλητές συλλόγου	Αερόβια	Ορός, αίμα	GSH↑, GSH/GSSH↓, TBARS↑, TAC↓, CAT↓, U.A↔

		(VO ₂ max: 51.9 ±6.8) Ηλικία: 10.1±1.6 Προπονητική ηλικία:≥1χρ. Συχνότητα προπόνηση: ≥3φ/εβδ. Διάρκεια: ≥1h			
Djordgevic et al. (2011)	Σύγκριση αθλητές με αγόμναστους.	Φύλο: ♂ n=33 Αθλημα: χάντμπολ Επίπεδο: αθλητές συλλόγου (VO ₂ max: 41.3 ± 4.3ml/kg/ min) Ηλικία: 16-19χρ. Προπονητική ηλικία: 7-10χρ.	Αερόβια, αναερόβια	Πλάσμα ερυθροκύτταρα	SOD↑, CAT↓, TBARS↑
Alshammari et al. (2010)	Σύγκριση αθλητές με αγόμναστους.	Φύλο: ♀ n=38 Αθλημα: γυμναστική Επίπεδο: αθλητές συλλόγου (>10 ώρες προπόνηση/εβδομάδα) Ηλικία: 11 ± 0.34 χρ.	Αερόβια, αναερόβια	Ορός	GPX↑, SOD↓
Dennis et al. (2013)	Σύγκριση υπέρβαρων και παχύσαρκων .	Φύλο: ♀ ♂n=112 Ηλικία: 7-11 χρ.	Αερόβια, αναερόβια	Πλάσμα	F2-Isop↑ σε υπέρβαρα και παχύσαρκα παιδιά μετά την άσκηση F2-Isop συσχετίστηκαν θετικά με μετρήσεις σωματοδομής, ινσουλινοαντίστασης και λιπιδαιμικού προφίλ και αρνητικά με την μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου
Llorente-Cantarero FJ et al. (2012)	Σύγκριση παιδιών με χαμηλά και υψηλά επίπεδα φυσικής κατάστασης .	Φύλο: ♀ ♂n=132 Ηλικία: 7-12 χρ.	Ηρεμία	Πλάσμα, ερυθροκύτταρα	TG↑, GSSG↑, GSH/GSSH↓ στα παιδιά με χαμηλά επίπεδα φυσικής κατάστασης, GSSG, GSH/GSSH σημαντική συσχέτιση με 20-mSRT
Nasca et al. (2010)	5 εβδομάδες προπόνηση σε κατασκήνωση (2ώρες προπόνηση/εβδομάδα, 1-2 προπονήσεις/εβδομάδα)	Φύλο: ♀=3, ♂n=3 Ηλικία: 8-10 χρ. Επίπεδο: αγόμναστα παιδιά Ηλικία: 8.8 ± 0.9 χρ.	Ηρεμία	Ούρα	F2-Isop↑ μετά την προπόνηση

Kelly et al. (2007)	8 εβδομάδες προπόνηση σε ποδήλατο (30 λεπτά, 4 φορές την εβδομάδα)	Φύλο: ♀=11, ♂=8 Επίπεδο: αγύμναστα παιδιά (ομάδα άσκησης και ομάδα ελέγχου) Ηλικία: 10.8 ± 0.9 χρ.	Ηρεμία	Αίμα	8-Isop ↔ μετά την προπόνηση
---------------------	--	--	--------	------	-----------------------------

↓= στατιστικά σημαντική μείωση, ↑= στατιστικά σημαντική αύξηση, ↔= καμία στατιστικά σημαντική μεταβολή, **VO₂max** =μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου, **20-mSRT**= Shuttle run test 20 μέτρων, ♀= κορίτσια, ♂= αγόρια, **SOD**= δισμουτάση του σουπεροξειδίου, **CuZn-SOD**,**Mn-SOD**,**EC-SOD**=ισοένζυμα της δισμουτάσης του σουπεροξειδίου, **CAT** = καταλάση, **GPX** =υπεροξειδάση της γλουταθειόνης, **GR**=αναγωγάση της γλουταθειόνης, **GSH** = ανηγμένη γλουταθειόνη, **GSSG** =οξειδωμένη γλουταθειόνη, **TG**=Total glutathione, **TAS**= **TAC** = συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα, **UA** = ουρικό οξύ, **TBA**=**TBARS** =ουσίες που αντιδρούν με θειοβαρβιτουρικό οξύ, **F2-Isop** =**-Isop**= Ισοπροστάνια, **PC**=πρωτεϊνικά καρβονύλια, **MDA**= μηλονοδιαλδεΐδη, **CD**=συζευγμένα διένια, **CK** =κρεατινική κινάση, **O₂•**=ανιόν υπεροξειδίου του οξυγόνου.

Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανασκόπησης διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία ως προς την απόκριση (ποιοτική ή ποσοτική) των δεικτών οξειδοαναγωγικής κατάστασης, μετά από οξεία ή χρόνια συστηματική άσκηση, σε γυμνασμένα παιδιά και εφήβους. Οι παραπάνω διαφορές μπορεί πιθανόν να προκύπτουν εξαιτίας των διαφορετικών μοντέλων παρέμβασης (διάρκεια, συχνότητα, ένταση κ.τ.λ.) που χρησιμοποιήθηκαν, του διαφορετικού επιπέδου φυσικής κατάστασης των συμμετεχόντων, της διαφορετικής προπονητικής ηλικίας, της διαφορετικής ημερήσιας πρόσληψης αντιοξειδωτικών μέσω της διατροφής ή ακόμα και των διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης των οξειδοαναγωγικών δεικτών. Είναι φανερό ότι υπάρχει μια ένδεια δεδομένων όσον αφορά στην επίδραση που έχει η οξεία άσκηση στην οξειδοαναγωγική κατάσταση, αφού αποτελέσματα υπάρχουν μόνο για το άθλημα της κολύμβησης, ενώ όσον αφορά στην χρονική εκτίμηση της αξιολόγησης των μεταβολών στην οξειδοαναγωγική κατάσταση αυτές σταματούν αμέσως μετά το τέλος της άσκησης. Γενικά, φαίνεται ότι η άσκηση προκαλεί πρόσκαιρα οξειδωτικό στρες, ακόμα και στα γυμνασμένα παιδιά, αλλά μέσω της προπόνησης φαίνεται να συντελούνται προσαρμογές στο σύστημα άμυνας, που περιορίζουν την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου. Αναμφισβήτητα, γεγονός είναι ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Σημασία για τον Αγωνιστικό Αθλητισμό

Η επιστήμη του αθλητισμού συνεχώς εξελίσσεται για να μπορέσει να αντιμετωπίσει τις όλο και μεγαλύτερες απαιτήσεις για τη βελτίωση των ανθρώπινων ικανοτήτων, αλλά παράλληλα να προσάψει και να προάγει το επίπεδο της υγείας των αθλητών. Η ανασκόπηση που προηγήθηκε είχε σκοπό να αναδείξει τις καινούργιες μεθόδους που αναπτύσσονται μέσω της εκτίμησης δεικτών οξειδωτικής καταστροφής (ισοπροσάνια, πρωτεϊνικά καρβονύλια κτλ), καθώς και αντιοξειδωτικών δεικτών (ολική αντιοξειδωτική ικανότητα, καταλάση κτλ) με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και την θωράκιση της υγείας. Οι παραπάνω δείκτες ίσως φανούν χρήσιμοι στο μέλλον για μια αποτελεσματικότερη ρύθμιση της προπόνησης και την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων. Η συστηματική παρακολούθηση τέτοιων δεικτών πιθανόν να δώσει πιο ακριβή στοιχεία στους προπονητές για την αποφυγή της υπερπροπόνησης, την ορθολογικότερη ρύθμιση της διατροφής και κατά συνέπεια τη διασφάλιση ενός υψηλού επιπέδου υγείας και απόδοσης των νεαρών αθλητών τους.

Βιβλιογραφία

- Alshammari, E., Shafi, S., Nurmi-Lawton, J., Taylor, A., Lanham-New, S., & Ferns, G. (2010). Altered antioxidant and trace-element status in adolescent female gymnasts. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 20(4), 291-298.
- Armon, Y., Cooper, D. M., Flores, R., Zanonato, S., & Barstow, T. J. (1991). Oxygen-Uptake Dynamics during High-Intensity Exercise in Children and Adults. *Journal of Applied Physiology*, 70(2), 841-848.
- Benitez-Sillero, J., Perez-Navero, J., Tasset, I., Guillen-Del Castillo, M., Gil-Campos, M., & Tunez, I. (2009). Influence of intense exercise on saliva glutathione in prepubescent and pubescent boys. *European Journal of Applied Physiology*, 106(2), 181-186.
- Cavas, L., & Tarham, L. (2004). Effects of vitamin-mineral supplementation on cardiac marker and radical scavenging enzymes and MDA levels in young swimmers. *International Journal of Sport and Nutrition and Exercise Metabolism*, 14(2), 133-146.
- Cooper, D. M., Nemet, D., & Galassetti, P. (2004). Exercise, stress, and inflammation in the growing child: from the bench to the playground. *Current Opinion in Pediatrics*, 16(3), 286-292.
- Dennis, B. A., Ergul, A., Gower, B. A., Allison, J.D., & Davis, C. L. (2013). Oxidative stress and cardiovascular risk in overweight children in an exercise intervention program. *Childhood Obesity*, 9(1), 15-21.
- Djordjevic, D., Cubrilo, D., Macura, M., Barudzic, N., Djuric, D., & Jakovljevic, V. (2011). The influence of training status on oxidative stress in young male handball players. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 351(1-2), 251-259.

- Djordjevic, D., Jakovljevic, V., Cubrilo, D., Zlatkovic, M., Zivkovic, V., & Djuric, D. (2010). Coordination between nitric oxide and superoxide anion radical during progressive exercise in elite soccer players. *The Open Biochemistry Journal*, 4, 100-106.
- Goldfarb, A. H. (1993). Antioxidants: role of supplementation to prevent exercise-induced oxidative stress. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(2), 232-236.
- Gomes, E.C., Silva, A.N., & de Oliveira, M.R. (2012). Oxidants, antioxidants, and the beneficial roles of exercise-induced production of reactive species. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2012.
- Gougoura, S., Nikolaidis, M., Kostaropoulos, I., Jamurtas, A., Koukoulis, G., & Kouretas, D. (2007). Increased oxidative stress indices in the blood of child swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 100(2), 235-239.
- Inal, M., Akyu, F., Turgut, Z., & Getsfrid, W. (2001). Effect of aerobic and anaerobic metabolism on free radical generation swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(4), 564-567.
- Kabasakalis, A., Kalitsis, K., Nikolaidis, M., Tsalis, G., Kouretas, D., Loupos, D., & Mougios, V. (2009). Redox, iron, and nutritional status of children during swimming training. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(6), 691-696.
- Kelly, A. S., Steinberger, J., Olson, T.P., & Dengel, D. R. (2007). In the absence of weight loss, exercise training does not improve adipokines or oxidative stress in overweight children. *Metabolism*, 56(7), 1005-1009.
- Llorente-Cantarero, F. J., Gil-Campos, M., Benitez-Sillero, J. D., Munoz-Villanueva, M. C., Tunez, I., & Perez-Navero, J.L. (2012). Prepubertal children with suitable fitness and physical activity present reduced risk of oxidative stress. *Free Radical Biology & Medicine*, 53(3), 415-420.
- Mihailidis, Y., Jamurtas, A.Z., Nikolaidis, M.G., Fatouros, I G., Koutedakis, Y., Papassotiriou, I., & Kouretas, D. (2007). Sampling time is crucial for measurement of aerobic exercise-induced oxidative stress. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(7), 1107-1113.
- Miyazaki, H., Oh-ishi, S., Ookawara, T., Kizaki, T., Toshinai, K., Ha, S., Haga S., Ji LL., Ohno, H. (2001). Strenuous endurance training in humans reduces oxidative stress following exhausting exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 84(1-2), 1-6.
- Nasca, M., Zhang, R., Hazen, S. L., Hall, H., Dennis, M., & Stanley, L. (2010). Increased oxidative stress in healthy children following an exercise program: A pilot study. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 31(5), 386-392.
- Nikolaidis, M. G., Jamurtas, A. Z., Paschalis, V., Fatouros, I. G., Koutedakis, Y., & Kouretas, D. (2008). The effect of muscle-damaging exercise on blood and skeletal muscle oxidative stress: Magnitude and time-course considerations. *Sports Medicine*, 38(7), 579-606.
- Nikolaidis, M.G., Kyparos, A., Hadziioannou, M., Panou, N., Samaras, L., Jamurtas, A.J., & Kouretas, D. (2007). Acute exercise markedly increases blood oxidative stress in boys and girls. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(2), 197-205.
- Ookawara, T., Haga, S., Sung, H., Oh-h-ishi, S., Toshinai, K., Ji, L., Suzuki K., Kizaki, T. & Ohno H. (2003). Effects of endurance training on three superoxide dismutase isoenzymes in human plasma. *Free Radical Research*, 37(7), 713-719.
- Powers, S. K., DeRuisseau, K. C., Quindry, J., & Hamilton, K. L. (2004). Dietary antioxidants and exercise. *Journal of Sports Sciences*, 22(1), 81-94.
- Powers, S. K., Ji, L., & Leeuwenburgh, C. (1999). Exercise training-induced alterations in skeletal muscle antioxidant capacity: a brief review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(7), 987-997.
- Santos-Silva, A., Rebelo, M., Belo, L., Guerra, A., Rego, C., Castro, E., & Quintanilha, A. (2001) Leukocyte activation, erythrocyte damage, lipid profile and oxidative stress imposed by high competition physical exercise in adolescents. *Clinica Chimica Acta*, 306(1-2), 119 -126.
- Tanner, J.M. (1972). Growth at Adolescence. Second Edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Urso, M. L., & Clarkson, P. M. (2003). Oxidative stress, exercise, and antioxidant supplementation. *Toxicology*, 189(1-2), 41-54.
- Zanconato, S., Buchthal, S., Barstow, T.J., & Cooper, D.M. (1993). 31P-magnetic resonance spectroscopy of leg muscle metabolism during exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology*, 74(5), 2214-2218.