



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΔΙΑΙΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

**Επίδραση της χορήγησης Spirulina Nigrita στη δραστικότητα αντιοξειδωτικών
ενζύμων σε ορό και ερυθροκύτταρα μετά από πρόκληση ασκησιογενούς
μυϊκής βλάβης.**

Πτυχιακή εργασία

Αργύριος Δ. Ζώης

Αθήνα, 2022



HAROKOPIO UNIVERSITY

SCHOOL OF HEALTH SCIENCE AND EDUCATION

DEPARTMENT OF NUTRITION AND DIETETICS

The effects of Spirulina Nigrita supplementation on the activity of antioxidant enzymes in serum and erythrocytes after exercise induced muscle damage.

Bachelor thesis

Argyrios D. Zois

Athens, 2022



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΔΙΑΙΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων:

Τζώρτζης Νομικός

**Αναπληρωτής καθηγητής, Επιστήμης Διατροφής και Διαιτολογίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Σμαραγδή Αντωνοπούλου

**Καθηγήτρια, Επιστήμης Διατροφής και Διαιτολογίας, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Ρωξάνη Τέντα

**Αναπληρώτρια καθηγήτρια, Επιστήμης Διατροφής και Διαιτολογίας,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

Ο Ζώης Αργύριος

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- 3)** Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Εικόνων.....	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Περίληψη.....	12
Abstract.....	14
1. Ασκησιογενής μυϊκή βλάβη	15
1.1. Τι είναι η Ασκησιογενής Μυϊκή Βλάβη (Exercise Induced Muscle Damage, EIMD):	15
1.2. Αιτιολογία και Παθογένεση:	15
1.2.1. Φάση 1	15
1.2.2. Φάση 2	16
1.3. Κλινικά Συμπτώματα της EIMD	18
1.4. Επίδραση της EIMD σε αθλητές:	20
1.4.1 Πότε είναι ο αθλητής περισσότερο επιρρεπής σε EIMD και πως μπορεί αυτό να αποφευχθεί?	20
2. Οξειδωτικό stress και Ασκησιογενής Μυϊκή Βλάβη	21
2.1. Λίγα λόγια για τις ελεύθερες ρίζες (free radicals) και το οξειδωτικό stress.....	21
2.2. Προέλευση προοξειδωτικών παραγόντων στους μύες κατά την έκκεντρη συστολή.	22
2.3. Σημασία του οξειδωτικού stress λόγω άσκησης στους σκελετικούς μύες.....	23
2.3.1. Αύξηση αντιοξειδωτικής ικανότητας.	23
2.3.2. Επίδραση των ROS στην παραγωγή μυϊκής τάσης.	23
2.3.3. Η επίδραση των ROS στην προσαρμογή του μυός μετά την άσκηση.....	24
2.4. Τελικά το οξειδωτικό στρες λόγω άσκησης αποτελεί παράγοντα κινδύνου?.....	25
3. Σπειρουλίνα.....	25
3.1. Τι είναι η Σπειρουλίνα;.....	26
3.2. Ποια είναι η σημασία της Σπειρουλίνας;.....	26
3.2.1. Λίγα Λόγια για τη Διατροφική αξία της Σπειρουλίνας.....	26
3.2.2. Η Σπειρουλίνα στη Βιομηχανία Τροφίμων.	27
3.2.3. Σπειρουλίνα και ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία του Ανθρώπου.....	28
4. Σπειρουλίνα και οξειδωτικό στρες.....	29
4.2. Η Σπειρουλίνα ως αντιοξειδωτικός παράγοντας.	29
5. Σπειρουλίνα και άσκηση.	29
5.1. Αθλήματα στα οποία η δράση της Σπειρουλίνας έχει αποδειχτεί εργογόνος.	30
5.2. Πιθανοί μηχανισμοί που εξηγούν την εργογόνο δράση της σπειρουλίνας.	32
6.1. Σχεδιασμός Μελέτης.....	33
6.1.1. Προφίλ εθελοντών.	35
6.1.2. Πρωτόκολλο άσκησης.	35

6.2.	Ανθρωπομετρικές μετρήσεις και Εργομετρία.....	36
6.2.1.	Ανθρωπομετρικές μετρήσεις.	36
6.2.2.	Σύσταση σώματος.	36
6.2.3.	Εκτίμηση φυσικής κατάστασης.	36
6.2.4.	Προσδιορισμός μυϊκής δύναμης.....	36
6.2.5.	Προσδιορισμός γωνιών άρθρωσης του αγκώνα.....	36
6.2.6.	Αντίληψη της έντασης καθυστερημένου μυϊκού πόνου.	37
6.2.7.	Μέτρηση περιμέτρου βραχίονα.....	37
6.3.	Βιοχημικές μετρήσεις.....	37
6.3.1.	Αιμοληψίες.....	37
6.3.2.	Απομόνωση ορού και πλάσματος από το αίμα.	38
6.3.3.	Προσδιορισμός δραστικότητας υπεροξειδικής δισμουτάσης ορού (SOD3) με τη μέθοδο οξειδάσης της ξανθίνης / ξανθίνης / κυτοχρώματος c.	38
6.3.4.	Αρχή μεθόδου.	39
6.3.5.	Αναλυτική πορεία.....	39
6.4.	Στατιστική ανάλυση.	39
7.1.	Επίδραση συμπληρωματικής χορήγησης σπειρουλίνας σε βασικά σωματομετρικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των εθελοντών.....	40
7.1.1.	Σωματομετρικά Χαρακτηριστικά.	40
7.1.2.	Μεταβολικοί δείκτες.	41
7.1.3.	Επίδραση της παρέμβασης στη δραστικότητα της SOD3.....	42
7.1.4.	Συσχέτιση επιπέδων SOD3 με τα ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά στις 2 παρεμβάσεις (Placebo και Spirulina).	43
7.1.5.	Επίδραση παρέμβασης σε εργομετρικούς δείκτες ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης.	45
7.1.5.	Επίδραση της παρέμβασης στη δραστικότητα της SOD3	47
8.1.	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....	52
8.1.1.	Επίδραση της χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά.	52
8.1.2.	Επίδραση χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στους μεταβολικούς δείκτες.....	53
8.1.3.	Επίδραση της χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στο αντιοξειδωτικό ένζυμο SOD.....	53
8.1.4.	Επίδραση της συμπληρωματικής χορήγησης σπειρουλίνας στη μεταβολή της δραστικότητας SOD μετά το πρωτόκολλο AMB.....	54
8.1.5.	Επίδραση του φύλου στη δραστικότητα του ενζύμου SOD.	54
8.1.6.	Αξιολόγηση της συσχέτισης ανθρωπομετρικών και μεταβολικών χαρακτηριστικών των εθελοντών με τη δραστικότητα SOD στις 2 παρεμβάσεις.....	55
8.2.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μελέτης.....	55
	Συμπεράσματα.....	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Αλλαγές της τετανικής τάσης σε σχέση με το μήκος της ίνας.	16
Σχήμα 2 Δομή μυϊκής ίνας ⁵	18
Σχήμα 3 Δομικές αλλοιώσεις των μυϊκών ινών τις πρώτες ώρες μετά την άσκηση. ⁷	19
Σχήμα 4 Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των επιπέδων ROS σε μια μυϊκή ίνα και της παραγωγής μυϊκής τάσης.	24
Σχήμα 5 Καλλιέργειες Σπειρουλίνας στη Χαβάη. ¹⁵	28
Σχήμα 6 Πειραματικός σχεδιασμός μελέτης.....	34
Σχήμα 7 Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το δοσολογικό σχήμα ανάλογα τα κιλά του κάθε εθελοντή	35
Σχήμα 8 Οπτική αναλογική κλίμακα πόνου (VAS)	37
Σχήμα 9 Σύγκριση μέσων τιμών των συγκεντρώσεων SOD στο πλάσμα πριν και 14 ημέρες μετά την κάθε παρέμβαση.....	43
Σχήμα 10 Μέση ροπή σε συνάρτηση με τον Χρόνο για σπειρουλίνα και για placebo.....	46
Σχήμα 11 Επί τοις εκατό μεταβολή της Μέσης Ροπής σε συνάρτηση με τον Χρόνο για σπειρουλίνα και για placebo.	46
Σχήμα 12 Αντισταθμιζόμενος Πόνος σε συνάρτηση με τον Χρόνο για την παρέμβαση με placebo και για την παρέμβαση με σπειρουλίνα.	47
Σχήμα 13 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο για spirulina και εικονικό συμπλήρωμα.....	47
Σχήμα 14 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο για spirulina και εικονικό συμπλήρωμα	48
Σχήμα 15 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Placebo για άνδρες και για γυναίκες.....	48
Σχήμα 16 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Spirulina για άνδρες και για γυναίκες.....	49
Σχήμα 17 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Placebo για άνδρες και για γυναίκες	49
Σχήμα 18 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Spirulina για άνδρες και για γυναίκες.....	50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Σωματομετρικά χαρακτηριστικά συμμετεχόντων πριν την έναρξη και μετά τις 2 εβδομάδες χορήγησης του κάθε σκευάσματος (placebo, spirulina).....	40
Πίνακας 2 Μεταβολικοί δείκτες των εθελοντών πριν την έναρξη και ύστερα από 2 εβδομάδες χορήγησης κάθε σκευάσματος (placebo, spirulina).	41
Πίνακας 3 Συσχέτιση επιπέδων SOD πλάσματος με ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά πριν την παρέμβαση με Placebo.....	43
Πίνακας 4 Συσχέτιση επιπέδων SOD πλάσματος με ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά πριν την παρέμβαση με Spirulina.	44

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

EIMD	Exercise Induced Muscle Damage
ROS	Reactive Oxygen Species
DOMS	Delayed onset muscle soreness
CK	Κρεατινική κινάση
RBE	Repeated bout effect
RNS	Reactive nitrogen species
OTS	Overtraining syndrome
SOD	Υπεροξειδική δισμουτάση
CAT	Καταλάση
GPx	Υπεροξειδάση της γλουταθειόνης
TAC	Total antioxidant capacity
ΔΜΣ	Δείκτης μάζας σώματος
MPO	Μυελοπεροξειδάση
CRP	C-αντιδρώσα πρωτεΐνη
Ox-LDL	Οξειδωμένη λιποπρωτεΐνη χαμηλής πυκνότητας
LDH	Γαλακτική αφυδρογονάση

Περίληψη

Εισαγωγή: Η ασκησιογενής μυϊκή βλάβη είναι ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο που χαρακτηρίζεται πρωτίστως από δομικές αλλοιώσεις των μυϊκών ινών και διαταραχές κυρίως στην ομοιόσταση του ασβεστίου και δευτερευόντως από φλεγμονώδη απόκριση που είναι συνυφασμένη με την αύξηση οξειδωτικών δεικτών. Το φαινόμενο εμφανίζεται ύστερα από καταπόνηση των κινητικών μονάδων των σκελετικών μυών τόσο γυμνασμένων όσο και αγύμναστων ατόμων, ιδιαίτερα εκτελώντας πλειομετρικές συστολές, και έχει επιζήμιες επιπτώσεις στις επιδόσεις των αθλητών. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει πληθώρα ερευνών που αποσκοπεί στην πρόληψη και την αποτελεσματική αποκατάσταση των αθλητών από την EIMD. Η Σπειρουλίνα, ένα φωτοσυνθετικό κυανοβακτήριο με εξαιρετικά υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο και υποσχόμενη αντιοξειδωτική δράση αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος για τους ερευνητές ως διατροφικό συμπλήρωμα για αθλητές.

Σκοπός: Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής μελέτης είναι η διερεύνηση της επίπτωσης της χορήγησης συμπληρώματος *Spirulina Nigrita* στην δραστηριότητα του αντιοξειδωτικού ενζύμου υπεροξειδική δισμουτάση (SOD) έπειτα από πρόκληση ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης σε υγιείς εθελοντές.

Μέθοδοι: Η μελέτη είναι μία τυχαιοποιημένη, διπλά τυφλή, διασταυρούμενη, ελεγχόμενη με εικονικό σκεύασμα κλινική μελέτη με συμπλήρωμα διατροφής σπειρουλίνας. Το δείγμα αποτελείτο από 14 εθελοντές με μέτριο κινητικό προφίλ. Η μελέτη περιλάμβανε 2 σκέλη καθένα από τα οποία είχε διάρκεια 15 ημέρες όπου οι συμμετέχοντες λάμβαναν είτε εικονικό σκεύασμα (placebo) είτε σπειρουλίνα. Οι εθελοντές υποβλήθηκαν σε πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης κάμψης αγκώνα στο μη επικρατές άκρο με σκοπό την πρόκληση ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης. Δείγματα ορού, πλάσματος και ερυθροκυττάρων λήφθηκαν πριν τη χορήγηση συμπληρώματος, αμέσως πριν την άσκηση, αμέσως μετά την άσκηση, 24, 48 και 72 ώρες μετά την άσκηση. Στα χρονικά αυτά διαστήματα προσδιορίστηκε η δραστηριότητα της SOD στο πλάσμα.

Αποτελέσματα: Το πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης που χρησιμοποιήθηκε για την πρόκληση ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης ήταν αποτελεσματικό όπως φάνηκε από τους εργομετρικούς δείκτες AMB (αύξηση αντίληψης πόνου VAS και μείωση μέγιστης ισομετρικής ροπής). Στους μεταβολικούς δείκτες παρατηρήθηκε μια στατιστικά σημαντική μείωση των τριγλυκεριδίων κατά την παρέμβαση με εικονικό σκεύασμα αλλά όχι με σπειρουλίνα. Παρομοίως, υπήρξε μια στατιστικά σημαντική αύξηση της ολικής χοληστερόλης κατά την παρέμβαση με placebo, αλλά όχι με σπειρουλίνα. Όσον αφορά το αντιοξειδωτικό ένζυμο SOD, η συγκέντρωση του ενζύμου στο πλάσμα δεν φάνηκε να επηρεάζεται από την παρέμβαση σπειρουλίνας ή placebo. Επιπλέον το φύλο δεν φάνηκε να επηρεάζει τα επίπεδα SOD στο πλάσμα, παρόλο που στις γυναίκες υπήρχε η τάση να ξεκινούν με υψηλότερα επίπεδα SOD συγκριτικά με τους άνδρες. Τέλος, διερευνώντας τη συσχέτιση ανάμεσα στα επίπεδα SOD πριν την παρέμβαση (Σπειρουλίνα και placebo) και τα ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά των εθελοντών φάνηκε να υπάρχει μια τάση για αρνητική συσχέτιση με την μέγιστη και τη μέση ροπή, χωρίς όμως να είναι στατιστικά σημαντική.

Συμπεράσματα: Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η συμπληρωματική χορήγηση της σπειρουλίνας δεν επηρέασε σημαντικά τα επίπεδα αντιοξειδωτικού ενζύμου SOD στο πλάσμα σε σύγκριση με το εικονικό συμπλήρωμα τόσο σε συνθήκες ηρεμίας όσο και μετά από πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης στα άνω άκρα.

Λέξεις κλειδιά: Ασκησιογενής μυϊκή βλάβη, Οξειδωτικό στρες, Σπειρουλίνα, υπεροξειδική δισμουτάση.

Abstract

Introduction: Exercise induced muscle damage is a multifactorial phenomenon which is primarily defined by structural alterations in myofibrils and calcium homeostatic disorders both of which ignite a secondary inflammatory response that is related to a significant elevation in the levels of oxidative markers. EIMD naturally occurs after intense strain of skeletal muscle motor units not only in untrained but also trained individuals, especially while conducting plyometric muscle contractions, leading to a detrimental decrease in athletic performance. In recent years, the scientific community has amassed an abundance of research material aiming on the prevention and the effective recuperation of athletes from EIMD. Spirulina, a photosynthetic cyanobacterium with an exceptionally high protein content and a quite promising antioxidant effect has piqued the interest of scientists as a nutritional supplement for athletes.

Aim: The aim of this present study is the investigation of the effects of Spirulina Nigrita supplementation on the activity of the antioxidant enzyme superoxide dismutase (SOD) after exercise induced muscle damage has been established in healthy volunteers.

Methods: This is a randomized, double blind, crossover, placebo controlled clinical study including a Spirulina Nigrita nutritional supplement. The study sample consists of 14 healthy, moderately active volunteers. This study encapsulates 2 parts with a duration of 15 days each, wherein the participants received either the placebo drug or the spirulina supplement. Participants were submitted to an exercise induced muscle damaging protocol that includes eccentric elbow contraction of the non-dominant hand. Serum, plasma and erythrocyte samples were obtained before supplementation, immediately before exercise, immediately post exercise, 24, 48 and 72 hours post exercise. At the aforementioned timetables plasma superoxide dismutase activity was measured.

Results: The eccentric exercise protocol used to induce muscle damage turned out to be effective according to the ergometric EIMD indexes (heightened sense of pain VAS and lower maximal isometric torque). Metabolic indexes showed a statistically significant decrease in triglycerides in the placebo intervention but not in the spirulina intervention. Similarly, total cholesterol rose significantly in the placebo intervention but not in the spirulina intervention. As far as the antioxidant enzyme SOD is concerned, it's concentration in plasma showed no response before, during or after both interventions. Furthermore, sex did not affect the concentration of plasma SOD, even though women generally started at higher concentrations in contrast to men. Last but not least, while investigating the correlation between the levels of plasma SOD before the intervention (Spirulina and Placebo) and both descriptive characteristics and metabolic indexes it was evident that a tendency for a negative correlation between SOD levels and average torque and peak torque existed, with no statistic significance whatsoever.

Conclusion: The results obtained that Spirulina supplementation did not significantly affect the plasma levels of the antioxidant enzyme SOD in contrast to the control (placebo) group, not only pre but also post the eccentric exercise protocol for the upper limbs.

Keywords: Exercise Induced Muscle Damage, Oxidative Stress, Spirulina, Superoxide dismutase

Θεωρητικό Μέρος

1. Ασκησιογενής μυϊκή βλάβη

1.1. Τι είναι η Ασκησιογενής Μυϊκή Βλάβη (Exercise Induced Muscle Damage, EIMD):

Η εντατική και έκκεντρη άσκηση, δηλαδή η άσκηση κατά την οποία το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την τάση που παράγουν οι εγκάρσιες γέφυρες του μυός¹, από ένα άτομο, του οποίου οι μυϊκές μονάδες είναι αγύμναστες στο συγκεκριμένο είδος, μπορεί να προκαλέσει ασκησιογενή μυϊκή βλάβη, η οποία χαρακτηρίζεται από δομικές αλλαγές που περιλαμβάνουν βλάβες στα σαρκομερίδια, τον κυτταροσκελετό, μεμβρανικές βλάβες καθώς και αυξημένη διαπερατότητα πρωτεϊνών από το σαρκείλημμα. Από λειτουργική σκοπιά η διαταραγμένη μετάδοση δύναμης, η αλλοιωμένη ομοιόσταση ασβεστίου, η διακοπή της ζεύξης διέγερσης-συστολής καθώς μεταβολικές αλλαγές οδηγούν σε απώλεια δύναμης. Ακόμη, η ασκησιογενής μυϊκή βλάβη επιφέρει φλεγμονώδη απάντηση η οποία εμφανίζεται με συγκεκριμένα κλινικά συμπτώματα όπως οίδημα, μειωμένο εύρος κίνησης, αυξημένη μυϊκή τάση και πόνος². Τα συμπτώματα αυτά εμφανίζονται από 1 έως 14 ημέρες μετά την αρχική συνεδρία άσκησης. Παρόλο που η ασκησιογενής μυϊκή βλάβη αποτελεί τροχοπέδη στις προπονήσεις των αθλητών, φαίνεται να διαδραματίζει καίριο ρόλο στην προσαρμογή του μυός. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως μυϊκή βλάβη λόγω άσκησης μπορεί να προκληθεί από ισομετρικές και ισοτονικές συστολές, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια της άσκησης. Συνήθως όμως EIMD παρατηρείται στην έκκεντρη συστολή υψηλής έντασης, πιθανότατα λόγω του μικρότερου αριθμού κινητικών μονάδων που χρησιμοποιούνται. Αναφέρεται επίσης ότι κατά την έκκεντρη άσκηση απαιτείται μικρότερο ποσό μεταβολικής ενέργειας, εφόσον ο μυς επεκτείνεται από εξωτερικές δυνάμεις, και επιβαρύνεται λιγότερο το καρδιαγγειακό σύστημα, γεγονότα που καθιστούν τις έκκεντρες ασκήσεις κατάλληλες για τον γηραιό πληθυσμό^{2,3}.

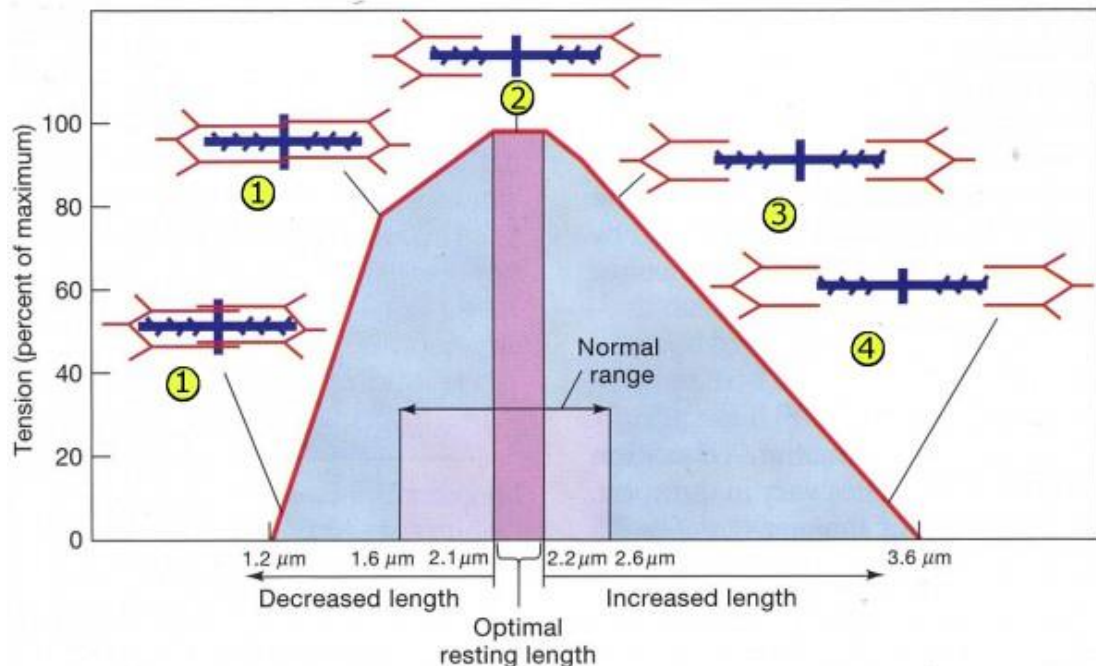
1.2. Αιτιολογία και Παθογένεση:

Οι περίπλοκοι μηχανισμοί που σχετίζονται με την EIMD μπορούν να απλοποιηθούν σε 2 φάσεις. Στην πρώτη φάση (1) όπου προκύπτουν οι αρχικές βλάβες και οφείλονται στη μηχανική διαδικασία της άσκησης και στην δεύτερη φάση (2) όπου οι βλάβες των ιστών πολλαπλασιάζονται μέσω της διαδικασίας που σχετίζεται με τη φλεγμονώδη απόκριση³.

1.2.1. Φάση 1

- ❖ **Υπερέκταση σαρκομερούς:** Αυτό είναι το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη EIMD. Συγκεκριμένα, εξαιτίας των διαφορών τάσης-μήκους μεταξύ των σαρκομερών, τα πιο αδύναμα από αυτά σε μία μυϊκή ίνα υποδέχονται τη μεγαλύτερη επιμήκυνση. Πιθανόν αυτό συμβαίνει διότι η επικάλυψη νηματίων ακτίνης-μυοσίνης δεν βρίσκεται στο ιδανικό σημείο ή είναι βραχύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα σαρκομερή. Κατά τη διάρκεια της έκκεντρης άσκησης όπου το μήκος μιας μυϊκής ίνας είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ιδανικό μήκος, τα συγκεκριμένα αδύναμα σαρκομερή επιμηκύνονται ραγδαία μέχρι το σημείο όπου σταματάει να υπάρχει

επικάλυψη μυονηματίων και σταματά να παράγεται ενεργός μυϊκή τάση (Σχήμα 1⁴). Με την επιμήκυνση της μυϊκής ίνας η διαδικασία αυτή συνεχίζεται επαναληπτικά στοχοποιώντας πάντοτε τα πιο αδύναμα σαρκομερή. Όταν ο μυς χαλαρώσει η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται ως επί τω πλείστω και τα μυονηματία στην πλειοψηφία τους επικαλύπτονται ξανά, όχι όμως όλα. Ακόμη, εφόσον τα μυοϊνίδια βρίσκονται αγκυροβολημένα στη μεμβράνη μέσω του συμπλέγματος δυστροφίνης, η υπερέκταση των σαρκομερών μπορεί να επιφέρει μεμβρανικές βλάβες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης και την εμπόδιση του συστήματος ζεύξης-διέγερσης-συστολής².



Σχήμα 1. Αλλαγές της τετανικής τάσης σε σχέση με το μήκος της ίνας.

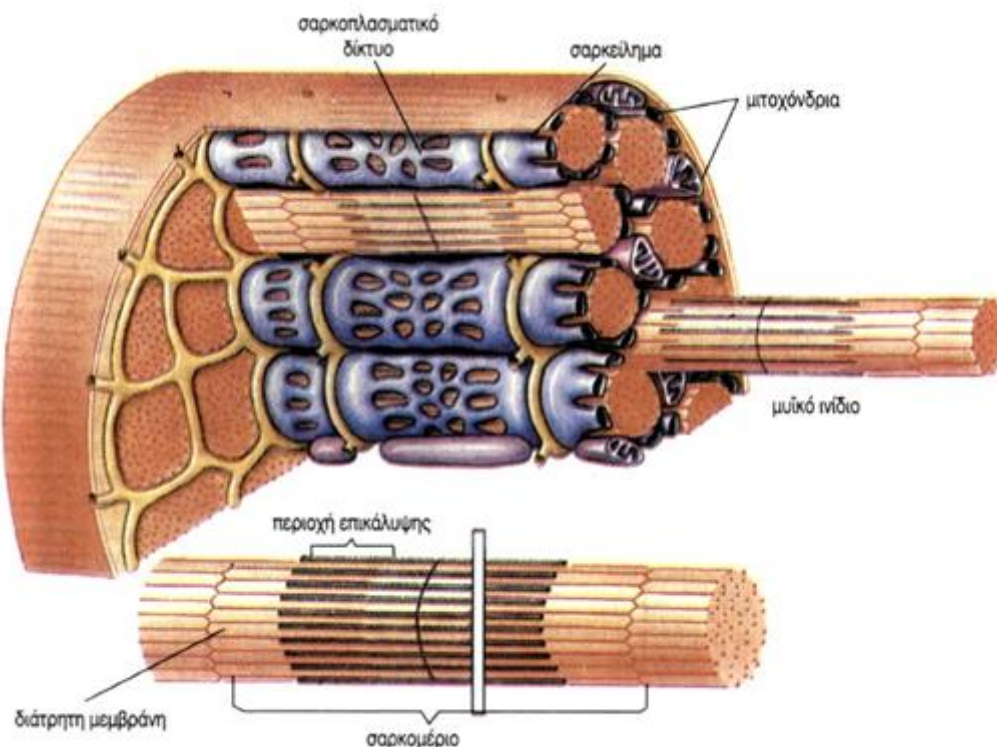
- ❖ **Βλάβες στην εξωκυττάρια μήτρα:** Άλλος παράγοντας που συμβάλλει στις μηχανικές βλάβες είναι η διαταραχή του συνδετικού ιστού γύρω από τον μυ, που αποτελείται κυρίως από κολλαγόνο ενωμένο με ιντεγκρίνες και συμπλέγματα πρωτεογλυκανών. Τα συμπλέγματα αυτά συνδέουν την εξωκυττάρια μήτρα στον κυτταροσκελετό επιτρέποντας την μετάδοση δύναμης από το εξωτερικό του μυ στο εσωτερικό και αντίστροφα².

1.2.2. Φάση 2

- ❖ **Διαταραγμένη ομοιότητα Ca^{2+} :** Οι μεμβρανικές βλάβες αρχίζουν με τη διαταραχή των T-σωληναρίων και επηρεάζουν αρνητικά το σύστημα ζεύξης-διέγερσης. Σε αυτή τη φάση η μείωση της μυϊκής τάσης μπορεί να αντιστραφεί με καφεΐνη, η οποία ανοίγει τους υποδοχείς ρυανοδίνης (δίαυλοι Ca^{2+}) παρακάμπτοντας το μονοπάτι ζεύξης-διέγερσης. Στη συνέχεια όμως το σαρκοπλάσματικό δίκτυο επηρεάζεται και αυτό εφόσον είναι ενωμένο με τα σωληνάρια-T μέσω των ποδικών προεκβολών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη είσοδο Ca^{2+} στο κυτοσόλιο, όπου συνδέεται με την τροπονίνη και πυροδοτεί μια τοπική συστολή λόγω βλάβης. Επιπλέον, η ανεξέλεγκτη είσοδος Ca^{2+} στο κυτοσόλιο ενεργοποιεί το μεταβολικό μονοπάτι φωσφολιπάσης-προσταγλαδίνης και την πρωτεόλυση από την καλπαΐνη. Η ενεργοποιημένη φωσφολιπάση A_2 επιφέρει επιπλέον βλάβες στο μυ αποδομώντας την μεμβράνη. Η καλπαΐνη 3 αντίστοιχα είναι ένα ασβεστιο-εξαρτώμενο

πρωτεολυτικό ένζυμο το οποίο είναι σχετικά εξειδικευμένο και στοχοποιεί τις γραμμές-Z των σκελετικών μυών προκαλώντας ενζυμική αποδόμηση των πρωτεϊνών^{2,3}.

- ❖ **Φλεγμονή:** Η επακόλουθη φλεγμονή φαίνεται να αποτελεί κρίσιμο σημείο για την επιδιόρθωση και την προσαρμογή των μυϊκών ινών που έχουν υποστεί βλάβες. Πληθώρα κυττάρων του ανοσοποιητικού συστήματος εισέρχονται στους υπό καταστροφή ιστούς μεταξύ των οποίων: μαστοκύτταρα, ουδετερόφιλα, ρυθμιστικά T-λεμφοκύτταρα, ηωσινόφιλα και CD8 T-λεμφοκύτταρα. Τα ουδετερόφιλα είναι τα πρώτα που θα εντοπιστούν στο σημείο φλεγμονής μέσα στις πρώτες 2-24 ώρες, έλκονται πιθανόν εξαιτίας της ενζυμικής πρωτεόλυσης από την ασβεστιο-εξαρτώμενη καλπαΐνη. Τα ουδετερόφιλα απομακρύνουν από το κύτταρο, μέσω φαγοκύτωσης, μυϊκές πρωτεΐνες που βρίσκονται σε κατάσταση αποσύνθεσης καθώς και άλλα κυτταρικά υπολείμματα. Ταυτόχρονα όμως, τα ουδετερόφιλα παράγουν μεγάλες συγκεντρώσεις κυτταροτοξικών μορίων, όπως ανιόντα ρίζας υπεροξειδίου ($O_2^{\cdot -}$), και άλλες ενεργές μορφές οξυγόνου και αζώτου με αποτέλεσμα να συντελούν στην περαιτέρω καταστροφή των μυϊκών κυττάρων. Για αυτό και η φλεγμονώδης απάντηση αυτή αποτελεί και δευτερογενή παράγοντα μυϊκής βλάβης. Τα ουδετερόφιλα μπορούν να παραμείνουν σε αυξημένη συγκέντρωση στο μυϊκό κύτταρο έως και 5 ημέρες, συνήθως όμως αντικαθίστανται από μακροφάγα την πρώτη κιόλας μέρα. Τα μακροφάγα όπως και τα ουδετερόφιλα έχουν την ικανότητα να παράγουν πρωτεολυτικά ένζυμα και κυτταροτοξικά μόρια τα οποία εν μέρει επιδεινώνουν την μυϊκή βλάβη. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι παρόλο που οι δραστικές μορφές οξυγόνου (ROS) έχουν κυτταροτοξική δράση, φαίνεται να δρουν και σαν δευτερεύοντα μόρια μεταγωγής σήματος (redox signaling) στη γονιδιακή ρύθμιση με σκοπό την προσαρμογή του μυός στην άσκηση. Τα μυϊκά κύτταρα από μόνα τους έχουν μια αντιφλεγμονώδη δράση. Κατά τη διάρκεια της άσκησης τα μυϊκά κύτταρα παράγουν αντιφλεγμονώδεις μυοκίνες όπως: ιντερλευκίνη-6, ανταγωνιστής υποδοχέα ιντερλευκίνης-1, ιντερλευκίνη-4, και ιντερλευκίνη-10 με αποτέλεσμα να διαμεσολαβούν στη δημιουργία μιας αντιφλεγμονώδους απάντησης στην EIMD^{2,3}.
- ❖ **Μεταβολικοί Παράγοντες:** Παρόλο που οι μηχανικές βλάβες και η φλεγμονώδης απάντηση που αναφέρθηκαν προηγουμένως αποτελούν τα σημαντικότερα σημεία στην παθογένεση της EIMD, θεμιτό είναι να γίνει μια αναφορά και στους μεταβολικούς παράγοντες που πιθανόν συντελούν στην επιδείνωση της κατάστασης. Αρχικά, με την άσκηση εξαντλούνται τα μυϊκά αποθέματα γλυκογόνου με άμεσο αποτέλεσμα την έλλειψη ATP. Εξαιτίας της έλλειψης ATP οι μεμβρανικές πρωτεΐνες μεταφοράς (Ca^{2+} -ATPάση) στο σαρκοπλασματικό δίκτυο υπολειπώνονται, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων Ca^{2+} στο κυτοσόλιο. Η αυξημένη συγκέντρωση ιόντων Ca^{2+} όπως αναφέρθηκε προηγουμένως πυροδοτεί το μονοπάτι της ενζυμικής ασβεστιο-εξαρτώμενης πρωτεόλυσης καθώς και την μεμβρανική λύση μέσω της φωσφολιπάσης A_2 , επιφέροντας επιπλέον βλάβες στα μυϊκά κύτταρα. Σημειώνεται όμως, ότι η παραπάνω υπόθεση φαίνεται να παίζει μεγαλύτερο ρόλο σε ασκήσεις αντοχής όπου η έκκεντρη συστολή δεν είναι κυρίαρχη².



Σχήμα 2 Δομή μυϊκής ίνας⁵

1.3. Κλινικά Συμπτώματα της EIMD

- ❖ **Απώλεια Δύναμης:** Η εκτίμηση της απώλειας δύναμης περιέχει συνήθως την μέτρηση της μέγιστης ροπής από εκούσια συστολή και την μείωση του ρυθμού ανάπτυξης μυϊκής τάσης. Η εκτίμηση απώλειας δύναμης αποτελεί ένα έγκυρο και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση της σοβαρότητας της EIMD. Εξ ορισμού η ήπια EIMD χαρακτηρίζεται από μείωση της μέγιστης ροπής κατά ~20%, με λίγες ή καθόλου μορφολογικές δυσμορφίες και πλήρη ανάκτηση δύναμης μέσα σε 48 ώρες. Αντίστοιχα, η μέτρια EIMD χαρακτηρίζεται από μείωση μέγιστης ροπής κατά 20-50% και ήπια φλεγμονή, ενώ η βαριά EIMD χαρακτηρίζεται από >50% μείωση της μέγιστης ροπής και εν τω βάθει βλάβη ιστών. Μετρώντας την μυϊκή τάση αμέσως μετά την έκκεντρη άσκηση παρατηρείται μείωση απόδοσης της τάξης 25% η οποία διαρκεί περίπου 3 ημέρες, και ακολουθείται από μια μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης περίπου 3 φορές μεγαλύτερη (75%). Προφανές είναι ότι η πρώτη μείωση της δύναμης οφείλεται στις μηχανικές βλάβες των μυϊκών ινών εξαιτίας της έκκεντρης άσκησης ενώ η δεύτερη και μεγαλύτερη μείωση της δύναμης οφείλεται στην επακόλουθη φλεγμονή. Αξιοσημείωτο είναι επίσης να αναφερθεί ότι η μείωση της μυϊκής τάσης κατά την έκκεντρη άσκηση είναι απόρροια μεταξύ των όσων αναφέρθηκαν στην παθογένεση της EIMD, καθώς και λόγω της μειωμένης ταχύτητας αγωγής των δυναμικών ενέργειας λόγω των μεμβρανικών βλαβών του σαρκειλήματος^{2,6}.

Ultrastructural changes first hours after exercise



Σχήμα 3 Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται οι δομικές αλλοιώσεις των μυϊκών ινών τις πρώτες ώρες μετά την άσκηση. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η φυσιολογική δομή των μυϊκών ινών έτσι όπως πρέπει να είναι. Στην μεσαία εικόνα παρατηρούμε μια εστιακή ήπια βλάβη μικρού μεγέθους η οποία συνήθως επηρεάζει 1 με 2 σαρκομερή, θεραπεύεται σε μικρό χρονικό διάστημα (2-3 μέρες) και είναι πολύ συχνή σε «κανονικές» ασκήσεις. Στην τελευταία εικόνα παρατηρούμε μια μέτρια/σοβαρή βλάβη όπου συνήθως επηρεάζει περισσότερα από 10 σαρκομερή, ο χρόνος επούλωσης είναι μεγαλύτερος (~1 εβδομάδα).⁷

- ❖ **Μειωμένο εύρος κίνησης:** Το μειωμένο εύρος κίνησης είναι αποτέλεσμα των βλαβών της εξωκυττάριας μήτρας και του οιδήματος. Εμφανίζεται αμέσως μετά την άσκηση και συνήθως η ανάκτηση αρχίζει μετά από 24 ώρες².
- ❖ **Οίδημα και Υπερτροφία:** Η διάκριση μεταξύ οιδήματος και υπερτροφίας είναι εξαιρετικά δύσκολη εφόσον και τα 2 έχουν ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του μυός. Συνήθως όμως το οίδημα εμφανίζεται τις πρώτες φορές μετά από έκκεντρη άσκηση και μπορεί να γίνεται αντιληπτό έως και 2-3 μήνες αργότερα, ενώ η υπερτροφία επέρχεται μετά από έναν αριθμό συνεδρίων με έκκεντρη άσκηση και χαρακτηρίζεται από συσσώρευση συσταλτικών πρωτεϊνών. Το οίδημα αντιθέτως προέρχεται από τις αλλαγές στην ωσμωτική ισορροπία του ενδοκυττάριου και εξωκυττάριου υγρού².
- ❖ **Πόνος:** Το μυϊκό άλγος ή αλλιώς η καθυστερημένη έναρξη μυϊκού πόνου (Delayed onset muscle soreness, DOMS), συνήθως εμφανίζεται 12-48 ώρες μετά την άσκηση και κορυφώνεται 24-72 ώρες μετά την άσκηση. Χαρακτηρίζεται συχνά από μυϊκή ακαμψία, μυϊκή ευαισθησία και τοπικό πόνο. Ο μυϊκός πόνος αξιολογείται συνήθως με μια οπτική αναλογική κλίμακα. Θεωρείται ότι το μυϊκό άλγος προέρχεται από μικροτραύματα εξαιτίας της μηχανικής βλάβης που προκλήθηκε από την άσκηση και από την καταστροφή των σαρκομερών. Ένα μέρος της αντίδρασης αυτής οφείλεται και στην ισταμίνη η οποία απελευθερώνεται από κύτταρα του ανοσοποιητικού και διεγείρει τους αλγοϋποδοχείς στους μυς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καθυστερημένη έναρξη μυϊκού πόνου (DOMS) δεν σχετίζεται με την σοβαρότητα της EIMD και της φλεγμονής^{2,6}.
- ❖ **Αύξηση μυϊκών πρωτεϊνών στο πλάσμα:** Οι ενδοκυττάριας μυϊκές πρωτεΐνες μπορούν να διαρρεύσουν στον εξωκυττάριο χώρο και το πλάσμα μετά από βλάβες του

σαρκεϊλλήμματος. Μετά από πρόκληση EIMD στο πλάσμα μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση σε πολλές πρωτεΐνες (πχ. μυοσφαιρίνη, κρεατινική κινάση, βαριές αλυσίδες μυοσίνης κ.α.). Η παρουσία αυτών των πρωτεϊνών στο πλάσμα εξαρτάται αφενός από τη διαρροή τους και αφετέρου από το ρυθμό απομάκρυνσής τους. Η κρεατινική κινάση είναι η περισσότερο μελετημένη πρωτεΐνη-δείκτης στην EIMD καθώς είναι η πιο ευαίσθητη και βρίσκεται στο πλάσμα σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από τις υπόλοιπες².

- ❖ **Αύξηση εξωκυττάρων πρωτεϊνών και χρωστικών ουσιών στα μυϊκά κύτταρα:** Εκτός από την έξοδο ενδοκυττάρων πρωτεϊνών στο πλάσμα συμβαίνει και η ακριβώς αντίθετη διαδικασία κατά την οποία εξωκυττάρια πρωτεΐνες εισέρχονται στα μυϊκά κύτταρα. Σε αυτή την περίπτωση τα κυριότερα μόρια-δείκτες στην EIMD είναι η αλβουμίνη, καθώς και διάφορες χρωστικές ουσίες οι οποίες όταν χορηγούνται στην κυκλοφορία του αίματος μπορούν να εισέλθουν στο εσωτερικό των μυϊκών κυττάρων όπως η μπλε χρωστική Έβανς².
- ❖ **Αλλαγές στο ηλεκτρομυογράφημα:** Η μέθοδος του ηλεκτρομυογραφήματος για την αξιολόγηση της EIMD είναι πολύ συχνή καθώς δεν είναι καθόλου επεμβατική και μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές κατά συνέχεια, σε αντίθεση με την παραλαβή βιολογικών δειγμάτων αίματος. Ακόμη φαίνεται να έχει υψηλή ακρίβεια καθώς έχει υψηλή συσχέτιση με τις μετρήσεις της κρεατινικής κινάσης που προαναφέρθηκε. Στη συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι για την αξιολόγηση της μυϊκής καταστροφής όπως η αύξηση των διακυμάνσεων της δύναμης κατά τη διάρκεια παρατεταμένης συστολής, μειωμένη ταχύτητα αγωγής της ηλεκτρικής ώσης κ.α.²

1.4. Επίδραση της EIMD σε αθλητές:

Οι επαγγελματίες αθλητές είναι υποχρεωμένοι να προπονούνται σκληρά προκειμένου να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του αθλήματός τους. Οι ολόένα και περισσότερο εξαντλητικές προπονήσεις είναι απαραίτητες για την προετοιμασία των αθλητών για τους επερχόμενους διαγωνισμούς, ωστόσο η εντατική άσκηση φαίνεται να οδηγεί σε EIMD. Συγκεκριμένα, παρόλο που τα κλινικά σημεία και συμπτώματα της EIMD που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα είναι πιο έντονα σε πληθυσμούς που είναι αγύμναστοι, αυξημένα επίπεδα δεικτών που χαρακτηρίζουν την EIMD (Κρεατινική κινάση, μυϊκό άλγος) έχουν παρατηρηθεί και σε αθλητές οι οποίοι είναι συνηθισμένοι σε έκκεντρες ασκήσεις και ασκήσεις αντιστάσεων, όταν αυτοί ακολουθήσαν πρωτόκολλα που επιφέρουν μυϊκές βλάβες. Έχει αποδειχθεί ότι τα αυξημένα επίπεδα κρεατινικής κινάσης (CK) έχουν ως αποτέλεσμα την μειωμένη απόδοση των αθλητών σε αγωνίσματα ταχύτητας και αντοχής. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, παρατεταμένες περίοδοι με αυξημένα επίπεδα EIMD είναι πιθανό να θέσουν σε κίνδυνο την ετοιμότητα του αθλητή για τις επακόλουθες προπονήσεις, να μειώσουν την ποιότητα της προπόνησης και την προσαρμογή του αθλητή καθώς και να αυξήσουν τον κίνδυνο τραυματισμού⁸.

1.4.1 Πότε είναι ο αθλητής περισσότερο επιρρεπής σε EIMD και πως μπορεί αυτό να αποφευχθεί?

Συνοπτικά, οι σεζόν των επαγγελματιών αθλητών μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές φάσεις⁸:

❖ **Φάση ανάπαυσης:** Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, ο αθλητής δεν προπονείται καθόλου ή συμμετέχει σε πολύ εύκολες προπονήσεις. Η φάση αυτή παρέχει στον αθλητή τη δυνατότητα να αναρρώσει από την σεζόν η οποία προηγήθηκε και να προετοιμαστεί για τη σεζόν η οποία θα ακολουθήσει. Η διακοπή των προπονήσεων και η περίοδος χαλάρωσης έχουν ως αποτέλεσμα την επιδείνωση της σωματικής κατάστασης του αθλητή (μείωση αντοχής, ταχύτητας, δύναμης, ευλυγισίας κ.α.)

❖ **Φάση προετοιμασίας:** Αμέσως μετά έπεται η φάση της προετοιμασίας. Ο κύριος στόχος της φάσης αυτής είναι η σωματική και τεχνική προετοιμασία του αθλητή για την επερχόμενη **φάση διαγωνισμών**. Η αρχική περίοδος της φάσης αυτής αποτελείται από συνεχείς προπονήσεις με αυξανόμενη δυσκολία για τον αθλητή, με αποτέλεσμα την εμφάνιση της EIMD. Τα επίπεδα της EIMD καθώς και των βιοδεικτών που παρατηρούνται διαφέρουν από άθλημα σε άθλημα. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι με την επιτυχή ολοκλήρωση των εντατικοποιημένων προπονήσεων, βελτιώνονται τα συμπτώματα της EIMD. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται προσαρμογή του μυός ύστερα από άσκηση (Repeated Bout Effect, RBE) και είναι αποτέλεσμα κυτταρικής, μηχανικής και νευρωνικής προσαρμογής.

Στους επαγγελματίες αθλητές παρατηρείται συνήθως RBE στα αρχικά στάδια της φάσης προετοιμασίας εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων προπονήσεων. Σημαντικό όμως είναι το εύρημα ότι RBE προκύπτει σε επαγγελματίες αθλητές και μετά από προπονητικά προγράμματα τα οποία είναι δομημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν την προσαρμογή και χαρακτηρίζονται από περιοδικές εναλλαγές στις προπονητικές ασκήσεις. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η συνεχής παρακολούθηση των αθλητών αποτελεί κομβικό σημείο για να επιτρέψει στους ειδικούς να επιλέξουν το ιδανικό προπονητικό πρόγραμμα το οποίο θα προσφέρει την βέλτιστη RBE και ως εκ τούτου ανακούφιση από την συμπτωματολογία της EIMD⁸.

2. Οξειδωτικό stress και Ασκησιογενής Μυϊκή Βλάβη

2.1. Λίγα λόγια για τις ελεύθερες ρίζες (free radicals) και το οξειδωτικό stress.

Ελεύθερη ρίζα ονομάζεται κάθε άτομο ή μόριο με ένα ή περισσότερα ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα, σε αντίθεση με τις μη-ελεύθερες ρίζες, οι εξωτερικές στιβάδες των οποίων καλύπτονται από ζεύγη ηλεκτρονίων με αντίθετη στροφορμή (spin)⁹. Η ιδιότητα αυτή έχει κατά κανόνα ως αποτέλεσμα την ισχυρή τάση των ελευθέρων ριζών να αποσπών ηλεκτρόνια από άλλες ενώσεις που βρίσκονται γύρω τους. Όλα τα βασικά συστατικά των κυττάρων (DNA, λιπίδια, πρωτεΐνες, υδατάνθρακες) αποτελούν στόχο των δραστικών ελευθέρων ριζών οι οποίες σχηματίζονται με αφετηρία το οξυγόνο. Κατά συνέπεια η δημιουργία δραστικών ελευθέρων ριζών στα κύτταρα θα είχε καταστροφικές συνέπειες λόγω της ανεξέλεγκτης οξειδωτικής τους δράσης. Υπάρχουν όμως αρκετά μόρια-αναστολείς των ελευθέρων ριζών που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν τον καταρράκτη αντιδράσεων που προκαλούν οι ελεύθερες ρίζες και έτσι να προστατεύουν τα κύτταρα. Τα μόρια αυτά ονομάζονται αντιοξειδωτικά. Σε περιπτώσεις διαταραχής της ισορροπίας μεταξύ των

προοξειδωτικών και των αντιοξειδωτικών μηχανισμών εις βάρος του δευτέρου σκέλους, προκαλείται το λεγόμενο οξειδωτικό στρες. Μία τέτοια περίπτωση είναι και η ασκησιογενής μυϊκή βλάβη στην οποία οι δραστικές μορφές οξυγόνου (Reactive Oxygen Species, ROS) αυξάνονται σε συγκέντρωση πολύ μεγαλύτερη από τη φυσιολογική και προκαλούν όπως αναφέρθηκε πολλές βλάβες στη δομή και τη λειτουργία των μυϊκών ινών⁹.

2.2. Προέλευση προοξειδωτικών παραγόντων στους μύες κατά την έκκεντρη συστολή.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η δημιουργία δραστικών μορφών οξυγόνου είναι ένα απολύτως φυσιολογικό γεγονός κατά την οξειδωτική φωσφορυλίωση των μιτοχονδρίων. Υπολογίζεται ότι 2-5% από το μοριακό οξυγόνο που καταναλώνεται στα μιτοχόνδρια μετατρέπεται σε $O_2^{\cdot -}$ (προοξειδωτικός παράγοντας). Επομένως θεωρήθηκε λογικό ότι σε καταστάσεις αυξημένης οξειδωτικής φωσφορυλίωσης, όπως κατά τη διάρκεια συστολής του μυός, θα αυξανόταν και το παραπάνω ποσοστό παραγωγής ανιόντος υπεροξειδίου $O_2^{\cdot -}$ και κατ' επέκταση άλλων ROS. Φάνηκε όμως στη συνέχεια ότι κάτι τέτοιο όχι μόνο δεν ισχύει, αλλά κατά τη διάρκεια άσκησης του μυός το ποσοστό παραγωγής ελευθέρων ριζών μειώνεται σε σχέση με το ποσοστό παραγωγής ελευθέρων ριζών σε ηρεμία. Αποδεικνύεται δηλαδή ότι τα μιτοχόνδρια δεν είναι υπεύθυνα για την παραγωγή ROS πέραν του φυσιολογικού στην ΕΙΜΔ¹⁰. Επομένως εγείρεται το ερώτημα: από που προέρχονται οι δραστικές ελεύθερες ρίζες;

- ❖ Η κύρια πηγή δημιουργίας ROS κατά την συστολή του μυός είναι το ένζυμο **οξειδάση του NADPH**. Συγκεκριμένα στα σκελετικά μυϊκά κύτταρα εκφράζονται 2 ισομορφές του ενζύμου οξειδάση του NADPH η NOX2 και η NOX4. Η ισομορφή NOX2 βρίσκεται μέσα στο σαρκείλημμα και τα T-σωληνάρια ενώ η ισομορφή NOX4 βρίσκεται στο σαρκοπλασματικό δίκτυο και στα μιτοχόνδρια. Η ισομορφή NOX4 είναι συνεχώς ενεργή και δεν εξαρτάται από άλλα μόρια (αγωνιστές), ενώ αντίθετα η ισομορφή NOX2 ενεργοποιείται από μόρια αγωνιστές όπως η αγγειοτενσίνη II, το μηχανικό στρες και διάφορες κυτταροκίνες. Είναι επομένως προφανές ότι η ισομορφή NOX4 συμβάλλει στη δημιουργία ROS στα μυϊκά κύτταρα σε κατάσταση ηρεμίας, ενώ η ισομορφή NOX2 είναι ο μείζων δημιουργός δραστικών μορφών οξυγόνου κατά τη συστολή του μυός¹⁰.
- ❖ **Φωσφολιπάση A_2** : Η φωσφολιπάση A_2 είναι ένα ένζυμο το οποίο όπως προαναφέρθηκε σε καταστάσεις διαταραγμένης ομοιόστασης Ca^{2+} ενεργοποιείται και υδρολύει τα φωσφολιποειδή των κυτταρικών μεμβρανών για να απελευθερώσει αραχιδονικό οξύ. Το αραχιδονικό οξύ είναι πρόδρομο μόριο για τη δημιουργία ενζύμων που απελευθερώνουν ROS κατά την λειτουργία τους όπως οι λιποξυγενάσες. Εξίσου σημαντικό είναι και το γεγονός ότι η φωσφολιπάση A_2 ενεργοποιεί το ένζυμο NADPH οξειδάση που όπως προαναφέρθηκε προωθεί την παραγωγή ROS στα μιτοχόνδρια και το κυτταρόπλασμα¹⁰.
- ❖ Είναι γνωστό ότι μεμβρανικές βλάβες καθώς και βλάβες στις μυϊκές πρωτεΐνες προάγουν την εισβολή λευκοκυττάρων στους μυϊκούς ιστούς που βρίσκονται υπό καταστροφή. Τα ουδετερόφιλα συγκεκριμένα κατά τη δράση τους δημιουργούν οξειδωτικούς παράγοντες όπως υπεροξείδιο του υδρογόνου και υποχλωριώδες οξύ (ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας). Ακόμη ας μην ξεχνάμε και τα μακροφάγα τα οποία παράγουν μονοξείδιο του αζώτου το οποίο έχει την ικανότητα να προκαλεί περαιτέρω βλάβες στην κυτταρική μεμβράνη².

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι οι δραστικές μορφές οξυγόνου καθώς και άλλων οξειδωτικών παραγόντων είναι ως επί το πλείστο αποτέλεσμα της λειτουργίας των ενζύμων NADPH οξειδάση, Φωσφολιπάση A₂ και της δράσης των κυττάρων του ανοσοποιητικού συστήματος. Αναφέρεται όμως ότι υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί παραγωγής ROS όπως το ένζυμο οξειδάση της ξανθίνης.

2.3. Σημασία του οξειδωτικού stress λόγω άσκησης στους σκελετικούς μύες.

Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό το γεγονός ότι το οξειδωτικό stress στον άνθρωπο σχετίζεται με την εμφάνιση πολλών χρόνιων παθήσεων όπως διάφοροι τύποι καρκίνου, καρδιαγγειακή νόσος, νευροεκφυλιστικές παθήσεις όπως το Alzheimer's και το Parkinson's¹⁰. Ταυτόχρονα όμως τις 2 τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφορίας που φανερώνει τις ευεργετικές επιδράσεις της τακτικής άσκησης στον γενικό πληθυσμό, μειώνοντας τον κίνδυνο για όλες τις χρόνιες παθήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Εφόσον όμως είναι αποδεδειγμένο το γεγονός ότι η τακτική άσκηση, είτε υψηλής έντασης αερόβια, είτε άσκηση αντιστάσεων, προάγει την δημιουργία των "βλαβερών" ROS και RNS (Reactive Nitrogen Species) εντείνοντας έτσι το οξειδωτικό στρες στον οργανισμό, δημιουργείται το ερώτημα με ποιόν τρόπο η άσκηση καταφέρνει όχι μόνο να προφυλάσσει τον άνθρωπο από πολλές παθολογικές καταστάσεις, αλλά και να επιφέρει διάφορες καλοδεχούμενες αλλαγές στο σώμα του (πχ. υπερτροφία, αύξηση δύναμης και ευλυγισίας κα.). Μολονότι η απάντηση είναι αρκετά σύνθετη, χρειάζεται να κατανοήσουμε αρχικά τη σημασία του οξειδωτικού στρες εξαιτίας της άσκησης στον ανθρώπινο οργανισμό.

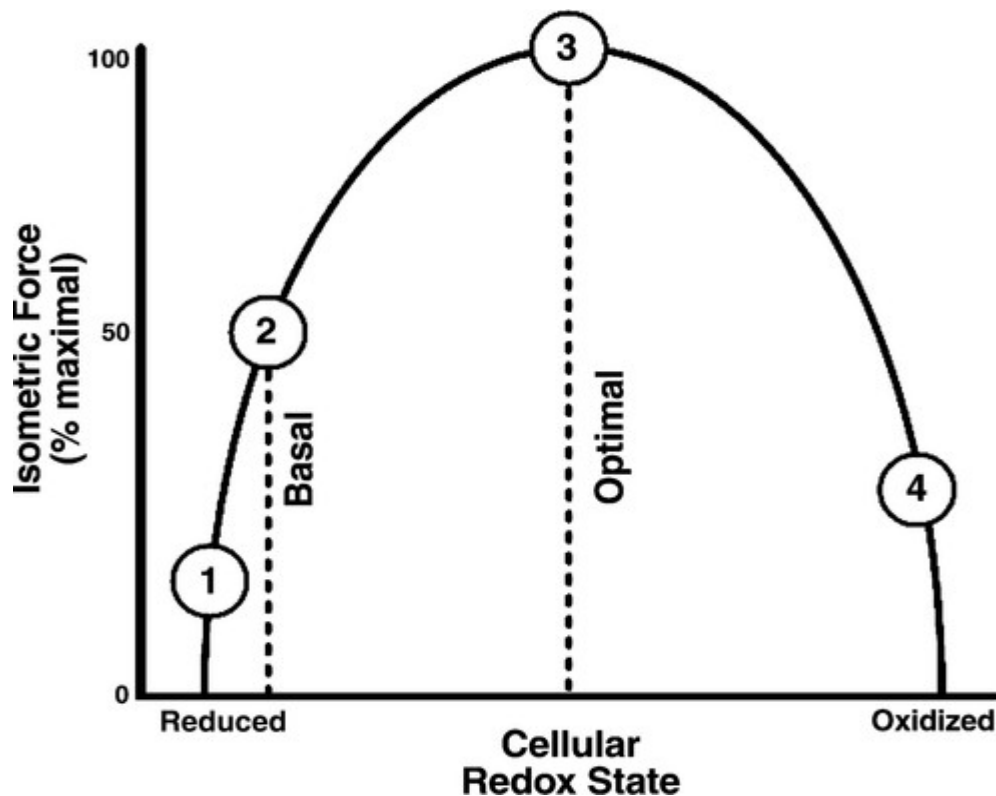
2.3.1. Αύξηση αντιοξειδωτικής ικανότητας.

Ξεκινώντας, είναι θεμιτό να αναφερθεί ότι η ένταση και η διάρκεια της άσκησης σχετίζεται με την παραγωγή οξειδωτικών παραγόντων και επομένως οξειδωτικού στρες. Συγκεκριμένα ασκήσεις μικρής διάρκειας (<1 λεπτό) και μικρής έντασης (<30% VO_{2max}) φαίνεται να μην εμφανίζουν αύξηση σε βιοδείκτες οξειδωτικού στρες. Ωστόσο, τόσο η βραχυπρόθεσμη (5 συνεχόμενες μέρες) όσο και η μακροπρόθεσμη (12 εβδομάδες) άσκηση αντοχής φαίνεται ότι αυξάνει την ενεργότητα αντιοξειδωτικών ενζύμων των συγκεκριμένων μυών εξαλείφοντας έτσι το οξειδωτικό στρες που προκαλείται από τη σύσπαση των μυών κατά τη διάρκεια της άσκησης¹⁰.

2.3.2. Επίδραση των ROS στην παραγωγή μυϊκής τάσης.

Η διαταραγμένη ρύθμιση της ισορροπίας οξειδωτικών και αντιοξειδωτικών παραγόντων (δηλ. οξειδωτικό στρες) λόγω της άσκησης περιλαμβάνεται ως παράγοντας στο σύνδρομο υπερπροπόνησης (Overtraining Syndrome, OTS). Το σύνδρομο αυτό χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες περιόδους κόπωσης καθώς και επιπλοκές στην προσαρμογή έπειτα από εντατικές προπονήσεις ή/και διαγωνισμούς. Η κόπωση των σκελετικών μυών (muscle fatigue) ορίζεται ως μια μείωση της μέγιστης παραγωγής μυϊκής τάσης κατά τη συστολή του μυός και επηρεάζεται από το μηχανισμό συστολής καθώς και από μεταβολικούς παράγοντες που περιλαμβάνουν το γαλακτικό οξύ, τον ανόργανο φώσφορο (Pi), τη συγκέντρωση ιόντων πρωτονίων (H⁺), τις δραστικές μορφές οξυγόνου (ROS) και άλλους μηχανισμούς που μπορούν να εντείνουν τη μυϊκή κόπωση¹¹. Η επίδραση των ROS στην παραγωγή μυϊκής τάσης έχει φανεί ότι είναι διφασική και εξαρτάται από τα επίπεδα των ROS στη μυϊκή ίνα (Σχήμα 2¹²). Συγκεκριμένα, σε έναν ξεκούραστο μυ υπάρχει ένα βέλτιστο επίπεδο ROS στο οποίο ο μυς παράγει τη μέγιστη τάση. Πειράματα

έδειξαν ότι η επιλεκτική απομάκρυνση της ρίζας ανιόντος υπεροξειδίου ($O_2^{\cdot-}$) καθώς και του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) από τη μυϊκή ίνα χρησιμοποιώντας τα αντιοξειδωτικά ένζυμα SOD και CAT αντίστοιχα, οδήγησε σε μείωση της μέγιστης μυϊκής δύναμης. Αντίθετα πειράματα στα οποία αυξήθηκαν τα επίπεδα των ROS στη μυϊκή ίνα πάνω από το βέλτιστο σημείο οδήγησαν στο ίδιο εύρημα, δηλαδή τη μείωση της ικανότητας παραγωγής μυϊκής τάσης. Αναφέρεται ότι οι μηχανισμοί που εξηγούν το παραπάνω εύρημα δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητοί και απαιτούν περαιτέρω έρευνα¹⁰.



Σχήμα 4 Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των επιπέδων ROS σε μια μυϊκή ίνα και της παραγωγής μυϊκής τάσης. Να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται από το διάγραμμα η μέγιστη δύναμη δε μπορεί να επιτευχθεί με επίπεδα ROS που οφείλονται μόνο στην κατάσταση ηρεμίας (φυσιολογική παραγωγή δραστικών μορφών O_2 κατά την αερόβια αναπνοή).

2.3.3. Η επίδραση των ROS στην προσαρμογή του μυός μετά την άσκηση

Σαφώς όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, οι δραστικές μορφές οξυγόνου παρόλες τις καταστροφικές επιδράσεις που έχουν για το κύτταρο στην κατάσταση φλεγμονής, αποτελούν ένα καίριο κομμάτι για την προσαρμογή του μυϊκού κυττάρου ύστερα από την άσκηση. Στην προκειμένη περίπτωση οι δραστικές μορφές οξυγόνου δρουν σαν δευτερογενή μόρια-αγγελιοφόροι που στοχεύουν στην γονιδιακή ρύθμιση αυξάνοντας ή μειώνοντας την έκφραση των γονιδίων στόχων. Πιο συγκεκριμένα, μερικά από τα μόρια-στόχους των ROS στην οξειδοαναγωγική σηματοδότηση (redox signaling) είναι ο πυρηνικός παράγοντας κάπα-B (Nf-kB, Nuclear Factor kappa-B) και ο PGC-1α στις μυϊκές ίνες. Και τα 2 αυτά μόρια οδηγούν στην αύξηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των μυϊκών ινών καθώς και τη βιογένεση μιτοχονδρίων. Επιπλέον ένα άλλο μόριο στόχος ο Nrf2 οδηγεί και αυτό στην αύξηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των κυττάρων καθορίζοντας την έκφραση παραγόντων που συμμετέχουν στον

αντιοξειδωτικό μηχανισμό του μονοπατιού της γλουταθειόνης καθώς και ενζύμων που συμμετέχουν στη δημιουργία NADPH. Τα παραπάνω, επαληθεύονται εν μέρει και από ευρήματα ερευνών σε ανθρώπους και ζώα στα οποία μπλοκάρεται η μεταγωγή σήματος μέσω οξειδοαναγωγής των ROS (redox signaling blocking), με αποτέλεσμα να αποτρέπονται οι προαναφερθείσες αλλαγές των μυϊκών κυττάρων ύστερα από άσκηση. Αξιοσημείωτο είναι επίσης να αναφερθεί ότι η μεταγωγή σήματος μέσω των ROS εμπλέκεται και στον μηχανισμό που προκαλεί υπερτροφία ύστερα από άσκηση με αντιστάσεις ενεργοποιώντας την πρωτεϊνοσύνθεση μυϊκών πρωτεϊνών¹⁰.

2.4. Τελικά το οξειδωτικό στρες λόγω άσκησης αποτελεί παράγοντα κινδύνου?

Εδώ και αρκετά χρόνια η απάντηση σε αυτό το ερώτημα ήταν κάπως διπλωματική, δηλαδή ότι οι δραστικές μορφές οξυγόνου που προκαλούνται από την άσκηση έως ένα σημείο έχουν θετική επίδραση στην υγεία, ενώ πέρα από αυτό το σημείο η «υπερπαραγωγή βλαβερών ROS» οδηγεί σε αρνητικές συνέπειες. Το σημείο αυτό καθορίζεται από την ικανότητα των αντιοξειδωτικών μηχανισμών να περιορίζουν τη δράση των ROS, δηλαδή η επίδραση των ROS στην υγεία του ανθρώπου εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των οξειδωτικών και των αντιοξειδωτικών παραγόντων. Τα τελευταία χρόνια όμως η πεποίθηση ότι η υπερπαραγωγή των ROS μέσω της άσκησης έχει και βλαβερές συνέπειες άρχισε να αλλάζει. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα που να αποδεικνύουν ότι μέσω της άσκησης και μόνο η συγκέντρωση των ROS μπορεί να αυξηθεί σε τέτοιο σημείο που να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στα κύτταρα καθώς και να περιορίσει την αντιοξειδωτική ικανότητα των μυών. Η θεωρία αυτή στηρίζεται σε διάφορες παραδοχές όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι η ένταση και η διάρκεια της άσκησης που απαιτείται για την παραγωγή τόσο υψηλών συγκεντρώσεων ROS, δεν μπορεί να υποστηριχθεί από το καρδιαγγειακό σύστημα καθώς και εξαιτίας της κόπωσης των μυών λόγω της αυξανόμενης συσσώρευσης ROS. Επιπλέον, ας μην ξεχνάμε και το γεγονός ότι η τακτική άσκηση οδηγεί στην αύξηση της συγκέντρωσης αντιοξειδωτικών ενζύμων στα μυϊκά κύτταρα συνεισφέροντας έτσι στην περαιτέρω καταπολέμηση των ROS. Το γεγονός όμως ότι οι βλαβερές ρίζες οξυγόνου που παράγονται κατά την άσκηση δεν έχουν αρνητική επίδραση στα μυϊκά κύτταρα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι δε συμβάλλουν στην εμφάνιση άλλων παθήσεων ιδιαίτερα παθήσεις για τις οποίες ευθύνεται κατά κόρον το οξειδωτικό στρες (πχ. καρκίνος, αθηροσκλήρωση, Alzheimer's κα.). Κάτι τέτοιο όμως όχι μόνο δεν ισχύει αλλά η άσκηση έχει ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα προστατεύοντας τελικά τον πληθυσμό από τις χρόνιες παθήσεις. Η εξήγηση σε αυτό το παράδοξο μέχρι στιγμής δεν είναι καθόλου ολοκληρωμένη και τα αποτελέσματα των ερευνών, κυρίως επιδημιολογικών μελετών, που προέκυψαν μπορούν απλά να μας δείξουν ότι η άσκηση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου και μάλιστα περισσότερη άσκηση συνεπάγεται με θετικότερα αποτελέσματα για την υγεία. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι τα επίπεδα ROS που παράγονται από την άσκηση μεγάλης έντασης και μακράς διάρκειας δεν οδηγούν σε καταστροφικές για την υγεία επιπτώσεις¹⁰.

3. Σπειρουλίνα

3.1. Τι είναι η Σπειρουλίνα;

Σπειρουλίνα είναι το εμπορικό όνομα που έχει δοθεί για να περιγράψει κυρίως δύο είδη κυανοβακτηρίων: τα *Arthrospira platensis* και *Arthrospira maxima*. Κυανοβακτήρια, ή αλλιώς γνωστά ως κυανοφύκη, είναι ένα φύλο μικροοργανισμών τα οποία διαθέτουν την ικανότητα να φωτοσυνθέτουν. Για τον λόγο αυτό τα κυανοβακτήρια περιλαμβάνονται συνήθως στην ομάδα των μικροφυκών, αν και τα πρώτα είναι προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί σε αντίθεση με τα φύκη που κατατάσσονται στους ευκαρυωτικούς μικροοργανισμούς. Τα κυανοβακτήρια θεωρούνται ότι ήταν οι πρώτοι μικροοργανισμοί που εξελίχθηκαν έτσι ώστε να μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας σε οργανικό άνθρακα. Σήμερα τα κυανοβακτήρια καλλιεργούνται μαζικώς από τον άνθρωπο εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας των βιομηχανικών χρήσεων τους. Η σπειρουλίνα έγινε γνωστή κυρίως εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητάς της σε πρωτεΐνη, που αγγίζει το 60% σε υγρή βάση και το 70% σε ξηρή βάση αντίστοιχα, όταν καλλιεργείται σε ιδανικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, η σπειρουλίνα είναι πλούσια πηγή σε χλωροφύλλες, καροτενοειδή και φυκοχλωροπρωτεΐνες, ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία τροφίμων ως χρωστικές ουσίες. Οι χρωστικές αυτές παρόλο που δεν είναι τόσο σταθερές όσο διάφορες άλλες συνθετικές ενώσεις, έχουν το πλεονέκτημα επειδή έχουν ευεργετική δράση στην υγεία του ανθρώπου. Συγκεκριμένα, ένα απλό παράδειγμα είναι ότι τα καροτενοειδή έχουν δράση προβιταμίνης Α μέσα στο σώμα μας και η κατανάλωσή τους σχετίζεται με τη βελτίωση του ανοσοποιητικού συστήματος, το μειωμένο κίνδυνο εμφάνισης εκφυλιστικών χρόνιων νόσων, καρδιαγγειακών παθήσεων και ορισμένους τύπους καρκίνων. Αναφέρεται ότι η σπειρουλίνα έχει εγκριθεί ως ένα γενικά ασφαλές τρόφιμο/συμπλήρωμα από τον FDA (Food and Drugs Administration) στις ΗΠΑ, καθώς και εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης της από τα παλιά χρόνια στην Ευρώπη μπορεί να εμπορευματοποιηθεί χωρίς την ανάγκη για συμμόρφωση με τον κανονισμό 2015/2283 για νέα τρόφιμα¹³.

3.2. Ποια είναι η σημασία της Σπειρουλίνας;

3.2.1. Λίγα Λόγια για τη Διατροφική αξία της Σπειρουλίνας.

Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι η σύσταση σε μακροθρεπτικά συστατικά (πρωτεΐνες, λιπίδια, υδατάνθρακες) διαφέρει στα διάφορα γένη και φύλα των μικροφυκών, παρόλο που έχει φανεί ότι τα κυανοβακτήρια έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και υδατάνθρακες και μικρότερη σε λιπίδια και τέφρα σε σχέση με τους ευκαρυωτικούς μικροοργανισμούς μικροφυκών. Η σύσταση των μικροοργανισμών αυτών δεν επηρεάζεται μόνο από το γένος του μικροοργανισμού, αλλά και από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία, ακτινοβολία, αλμυρότητα κα. Από το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό ότι οι συνθήκες αυτές μπορούν και είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τροποποιηθούν προκειμένου ο μικροοργανισμός που καλλιεργείται να έχει την επιθυμητή σύσταση και χαρακτηριστικά σε βαθμό που αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί. Μια σημαντική τροποποίηση της σύστασης των μικροφυκών αυτών είναι η αύξηση της περιεκτικότητας των λιπιδίων που επιτυγχάνεται με καλλιέργεια σε συνθήκες έλλειψης αζώτου και προκαλείται επειδή ενεργοποιούνται εναλλακτικές μεταβολικές πορείες. Η ικανότητα αυτή των μικροφυκών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία για την παραγωγή βιοκαυσίμων¹³.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η σπειρουλίνα περιέχει υψηλό ποσοστό πρωτεϊνικού περιεχομένου. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας) η σπειρουλίνα έχει μία από τις υψηλότερες περιεκτικότητες τόσο πρωτεϊνών όσο και απαραίτητων αμινοξέων που έχουν ανιχνευθεί ποτέ, καθιστώντας την μια ιδανική πηγή πρωτεΐνης. Οι σημαντικότερες πρωτεΐνες που έχουν ανιχνευθεί στη σπειρουλίνα είναι κυρίως φυκοχιλοπρωτεΐνες όπως η φυκοκυανίνη, η φυκοερυθρίνη και η αλλοφυκοκυανίνη που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων, στη φαρμακοβιομηχανία καθώς και ως προϊόντα αισθητικής εξαιτίας των ποικίλων χρωμάτων τους.

Όσον αφορά τη σύσταση των λιπαρών οξέων, στη σπειρουλίνα έχουν παρατηρηθεί κυρίως το γ-λινολενικό οξύ (18:3, n-6) και το παλμιτικό οξύ (16:0). Η ανίχνευση μεγάλων συγκεντρώσεων γ-λινολενικού προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον και εξαιτίας της προστασίας που προσφέρει το συγκεκριμένο λιπαρό οξύ ενάντια σε καρδιαγγειακές παθήσεις, υπερχοληστερολαιμία καθώς και άλλες παθολογικές καταστάσεις. Επιπλέον, ανιχνεύθηκαν σε μικρότερες συγκεντρώσεις και άλλα λιπαρά οξέα όπως πολυακόρεστα σαν το εικοσαπεντανοϊκό οξύ (20:5, n-3) και το εικοσιδυαεξαενοϊκό οξύ (22:6, n-3).

Συνεχίζοντας με τα μικροθρεπτικά συστατικά, η σπειρουλίνα φαίνεται να είναι μια καλή πηγή βιταμινών και μετάλλων. Συγκεκριμένα η σπειρουλίνα περιέχει κυρίως μέταλλα όπως κάλιο, νάτριο, σελήνιο, σίδηρο, μαγνήσιο, ψευδάργυρο και ασβέστιο, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μια πλούσια πηγή σε βιταμίνες του συμπλέγματος Β. Ειδικότερα, η βιταμίνη B₁₂ φαίνεται να εμφανίζεται με μια ανενεργό μορφή που αναφέρεται ως ψευδοβιταμίνη B₁₂. Παρά το γεγονός ότι η βιταμίνη B₁₂ βρίσκεται σε αυτή τη μορφή, έρευνες έδειξαν ότι μόλις 4g ξηρής βιομάζας από συμπλήρωμα σπειρουλίνας αρκούν για να καλύψουν την ημερήσια πρόσληψη για την βιταμίνη B₁₂. Όπως προαναφέρθηκε η σπειρουλίνα περιέχει καροτενοειδή όπως το β-καροτένιο, η ζεαξανθίνη και η ασταξανθίνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον ανθρώπινο οργανισμό οι παραπάνω ενώσεις μετατρέπονται σε Βιταμίνη Α in vivo, καθώς και ότι οι φυσικές πηγές καροτενοειδών προτιμώνται από τις συνθετικές επειδή οι πρώτες βρίσκονται σε ένα μείγμα trans και cis ισομερών ενώ οι συνθετικές ενώσεις είναι συνήθως μόνο trans ισομερή. Τέλος θεμιτό είναι να γίνει μια αναφορά σε μια άλλη εξίσου σημαντική ουσία που περιέχεται στη σπειρουλίνα, τη χλωροφύλλη. Η χλωροφύλλη είναι μια χρωστική ουσία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τροφίμων και έχει πολυάριθμες ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η χλωροφύλλη έχει αντιμεταλλαξιογόνες, αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις και αντιμικροβιακές ικανότητες.

Συνοψίζοντας, μπορεί να ειπωθεί ότι ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες καλλιέργειας η σπειρουλίνα μπορεί να αποδειχθεί μια πλούσια πηγή πρωτεϊνών, πολυακόρεστων λιπαρών οξέων, βιταμινών και μετάλλων¹³.

3.2.2. Η Σπειρουλίνα στη Βιομηχανία Τροφίμων.

Εδώ και πολλούς αιώνες η Σπειρουλίνα χρησιμοποιείται σαν τρόφιμο σε διάφορες συνταγές στη δίαιτα του ανθρώπου, ενώ τα τελευταία χρόνια φαίνεται να χρησιμοποιείται ως υλικό για την παραγωγή ή και τον εμπλουτισμό πολλών τροφίμων. Οι περισσότερες έρευνες πάνω στη χρήση της σπειρουλίνας στην βιομηχανία τροφίμων αφορούν τρόφιμα όπως ζυμαρικά, ψωμί και μπισκότα. Τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι πολύ ενθαρρυντικά για τη χρήση της σπειρουλίνας στην παραγωγή και τη βελτίωση των τροφίμων που αναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα,

φάνηκε ότι σε όλα τα τρόφιμα που ενσωματώθηκε, αυξήθηκε το πρωτεϊνικό περιεχόμενο, οι πολυφαινόλες καθώς και η αντιοξειδωτική ικανότητα του τροφίμου. Ταυτόχρονα δεν φάνηκε να επηρεάζεται η πέψη και ο γλυκαιμικός δείκτης του τροφίμου, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις υπήρξε βελτίωση στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του. Όλα αυτά οδήγησαν σε μεγάλη αποδοχή των τροφών αυτών από το καταναλωτικό κοινό. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η σπειρουλίνα ενσωματώνεται σε ένα τρόφιμο σε συγκέντρωση τουλάχιστον 1,5%, τότε το τρόφιμο κατατάσσεται ως τρόφιμο υψηλό σε σίδηρο και σελήνιο. Εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη η σπειρουλίνα αξιολογήθηκε και ως πιθανό υποκατάστατο κρέατος, κάτι που είναι πολύ συχνό στις μέρες μας, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τελικό προϊόν είχε αυξημένη περιεκτικότητα σε φαινολικό και φλαβονοειδές περιεχόμενο καθώς και μεγαλύτερη αντιοξειδωτική ικανότητα. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η σπειρουλίνα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη λειτουργικών τροφίμων εξαιτίας των ευεργετικών δράσεων που προσφέρει η κατανάλωσή της¹³. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο να γίνει αναφορά σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Ουαγκαντουγκού, την πρωτεύουσα της Μπουρκίνα Φάσο στην Αφρική¹⁴. Ο σκοπός της έρευνας ήταν η αξιολόγηση γευμάτων σπειρουλίνας και μισόλας (τύπος αλεύρου) στη διατροφική κατάσταση υποσιτισμένων παιδιών. Στην έρευνα έλαβαν μέρος 550 παιδιά ηλικίας κάτω των 5 ετών εκ των οποίων τα 455 ήδη έπασχαν από σοβαρό Μαρασμό, 57 έπασχαν από ήπιο Μαρασμό και 38 έπασχαν από μαρασμό και σύνδρομο Kwashiorkor. Τα αποτελέσματα της μεγάλης αυτής έρευνας έδειξαν ότι η σπειρουλίνα αποτελεί ένα καλό συμπλήρωμα φαγητού για υποσιτισμένα παιδιά, ιδιαίτερα όταν υπάρχει συνδυασμός γευμάτων σπειρουλίνας και μισόλας όπου η θεραπεία είναι αποτελεσματικότερη συγκριτικά με την απλή αύξηση πρωτεΐνης και ενέργειας στη δίαιτα υποσιτισμένων παιδιών.



Σχήμα 5 Καλλιέργειες Σπειρουλίνας στη Χαβάη.¹⁵

3.2.3. Σπειρουλίνα και ευεργετικές επιδράσεις στην υγεία του Ανθρώπου.

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει μια απλή αναφορά σε ορισμένες παθολογικές καταστάσεις της υγείας του ανθρώπου στις οποίες η σπειρουλίνα έχει αποδειχθεί ότι παρέχει θεραπευτική δράση. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η σπειρουλίνα παρέχει προστασία απέναντι στην υπέρταση, τον σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2, ορισμένους τύπους καρκίνων, την παχυσαρκία, την υπεργλυκαιμία και την υπερχοληστερολαιμία. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι από τα παραπάνω προκύπτει ότι η σπειρουλίνα παρέχει εκτενή προστασία έναντι στο μεταβολικό σύνδρομο, ένα πολυπαραγοντικό σύνδρομο που είναι αποτέλεσμα συννοσηροτήτων που προαναφέρθηκαν (δυσλιπιδαιμία, υπεργλυκαιμία, παχυσαρκία, υπέρταση κα.). Ακόμη η σπειρουλίνα φαίνεται να έχει σημαντικές προοπτικές στην πρόληψη ασθενειών μειώνοντας

όπως φάνηκε τη νοσηρότητα από λοιμώξεις του ανώτερου ανοσοποιητικού. Οι ακριβείς μοριακοί μηχανισμοί με τους οποίους η σπειρουλίνα επιτυγχάνει όλα τα παραπάνω δεν θα συζητηθούν εκτενέστερα εφόσον ξεπερνούν τον σκοπό της εργασίας αυτής¹³.

4. Σπειρουλίνα και οξειδωτικό στρες.

4.2. Η Σπειρουλίνα ως αντιοξειδωτικός παράγοντας.

Οι αντιοξειδωτικές ικανότητες της σπειρουλίνας μπορούν εν μέρει να αποδοθούν στο γεγονός ότι περιέχει αρκετά ισχυρά αντιοξειδωτικά μόρια όπως η βιταμίνη C, η βιταμίνη E, β-καροτένιο, φυκοκυανίνη κα. Σύμφωνα με έναν μικρό όγκο ερευνητικών δεδομένων που είναι διαθέσιμος, φάνηκε ότι η χορήγηση συμπληρωμάτων σπειρουλίνας οδηγεί σε μια σημαντική αύξηση της Συνολικής Αντιοξειδωτικής Ικανότητας (Total Antioxidant Capacity, TAC) ιδιαίτερα όταν η δόση συμπληρώματος ήταν μεγαλύτερη από 5 g/ημέρα για τουλάχιστον 12 εβδομάδες και όταν η ηλικία των ατόμων που λαμβάνουν το συμπλήρωμα είναι μικρότερη από 60 έτη. Συνεχίζοντας, η σπειρουλίνα δεν φάνηκε να έχει στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα στην ενεργότητα του ενζύμου GPx. Παρομοίως, η χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας φάνηκε να οδηγεί σε αμυδρή αύξηση της ενεργότητας του ενζύμου SOD με εξαίρεση όταν ο δείκτης μάζας σώματος (ΔΜΣ) των ατόμων που λαμβάνουν το συμπλήρωμα είναι μικρότερος από 25 kg/m², η ηλικία των ατόμων μικρότερη από τα 40 έτη και η δόση συμπληρώματος μεγαλύτερη από 5 g/ημέρα ανεξάρτητα από τη διάρκεια χορήγησης όπου η αύξηση στην ενεργότητα ήταν σημαντική. Επομένως, προτάθηκε ότι η σπειρουλίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιοξειδωτικός παράγοντας. Απόρροια του γεγονότος αυτού είναι οι ποικίλες θετικές κλινικές επιδράσεις που έχει δυνητικά η σπειρουλίνα σε διαταραχές που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες (διάφοροι τύποι καρκίνων, αθηροσκλήρωση, άσθμα κα.)¹⁶.

5. Σπειρουλίνα και άσκηση.

Η χρήση της σπειρουλίνας ως ένα λειτουργικό τρόφιμο καθώς και ως ένα φαρμακευτικό προϊόν εξαιτίας των θετικών αποτελεσμάτων που έχει εμφανίσει σε κλινικές δοκιμές, έχει ερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό τις προηγούμενες δεκαετίες και έχουν αποδειχτεί τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματά της. Τα τελευταία χρόνια το αυξανόμενο ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο κυανοβακτήριο σε συνδυασμό με έναν αριθμό κλινικών δοκιμών που έδειξαν ότι η σπειρουλίνα παρέχει προστασία απέναντι σε καρδιαγγειακά νοσήματα, την αναιμία καθώς και βελτιώνει τη λειτουργία του ανοσοποιητικού, οδήγησε τους ερευνητές στην εξιχνίαση της πιθανής εργογόνου δράσης της σπειρουλίνας σε διάφορα αθλήματα. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι ο όγκος των δεδομένων στο συγκεκριμένο πεδίο είναι ακόμη πενιχρός και οι λίγες δημοσιευμένες μελέτες είναι πολύ περιορισμένες.

5.1. Αθλήματα στα οποία η δράση της σπειρουλίνας έχει αποδειχτεί εργογόνος.

- ❖ Η εργογόνος δράση της σπειρουλίνας έχει ερευνηθεί σε αθλήματα όπως το τρέξιμο και η ποδηλασία¹⁷. Στα αθλήματα αυτά διαπιστώθηκε η προστασία που προσφέρει το συμπλήρωμα σπειρουλίνας ενάντια στην εξάντληση και στην κόπωση του αθλητή. Συγκεκριμένα, αυξήθηκε ο απαιτούμενος χρόνος για την εξάντληση ή και την κόπωση των αθλητών. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε αλλαγή στην καύση των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται από τον μεταβολισμό των αθλητών. Ειδικότερα, υπήρξε μια σημαντική μείωση στην οξείδωση των υδατανθράκων με ταυτόχρονη αύξηση στην οξείδωση των λιπιδίων κατά τη διάρκεια αγώνα τρεξίματος 2 ωρών με ένταση 70-75% VO_{2max} . Η παραπάνω παρατήρηση ίσως εξηγεί εν μέρει και την αυξημένη αντοχή των αθλητών, εφόσον τα αποθέματα γλυκογόνου διατηρούνται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επιτρέποντας έτσι τη διατήρηση μεγάλης έντασης άσκησης για μεγαλύτερη διάρκεια.
- ❖ Άλλο άθλημα στο οποίο η χορήγηση της σπειρουλίνας έχει ερευνηθεί είναι η ποδηλασία χεριών (προπόνηση του άνω μέρος του σώματος)¹⁸. Σε αντίθεση με τη ποδηλασία και την προπόνηση του κατώτερου σώματος, οι παραπάνω ασκήσεις χρησιμοποιούνται σε αθλήματα όπως κωπηλασία, καθώς και αθλήματα χεριών (παραολυμπιακοί αγώνες). Αναφέρεται, ότι υπάρχουν ορισμένες θεμελιώδεις φυσιολογικές διαφορές ανάμεσα στις ασκήσεις που προπονούν το ανώτερο μέρος του σώματος σε σχέση με αυτές που προπονούν το κατώτερο μέρος του σώματος. Αρχικά, οι ασκήσεις του ανώτερου σώματος κινητοποιούν μικρότερο αριθμό κινητήριων μονάδων, εξαιτίας της μικρότερης μυϊκής μάζας, και έχουν μειωμένη αερόβια ικανότητα και ως αποτέλεσμα οδηγούν στην αυξημένη αναερόβια γλυκόλυση (μυϊκές ίνες τύπου II). Το παραπάνω γεγονός οδηγεί σε πιο γρήγορη κόπωση και εξάντληση των αθλητών εξαιτίας των παραπροϊόντων που συσσωρεύονται στις μυϊκές ίνες από την αναερόβια γλυκόλυση. Μια ακόμη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η αιματική ροή ανά μυϊκή μονάδα είναι μεγαλύτερη στο ανώτερο σώμα από το κατώτερο. Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παραδοχές, ερευνητές υπέθεσαν ότι η σπειρουλίνα θα είναι λογικό να παρέχει εργογόνο δράση στις παραπάνω ασκήσεις. Πράγματι, τα ευρήματα έδειξαν ότι η χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας 6 g/ημέρα για 1 εβδομάδα οδήγησε σε σημαντική μείωση της πρόσληψης οξυγόνου, μείωση των καρδιακών παλμών κατά τη διάρκεια της άσκησης, αύξηση της αιμοσφαιρίνης καθώς και αύξηση της πρόσληψης οξυγόνου όταν ακολουθήθηκε πρωτόκολλο που σταδιακά οδηγεί σε εξάντληση. Από τα παραπάνω ευρήματα η σπειρουλίνα μπορεί να θεωρηθεί ότι παρέχει αποτελεσματική εργογόνο δράση σε υπομέγιστες και μέγιστες εντάσεις σε ασκήσεις ανώτερου σώματος όπου η πρόσληψη οξυγόνου αποτελεί περιοριστικό παράγοντα.
- ❖ Το τελευταίο άθλημα στο οποίο ερευνήθηκαν οι δυνατότητες της σπειρουλίνας είναι το Rugby και μάλιστα σε επαγγελματίες αθλητές¹⁹. Το Rugby όπως και τα περισσότερα ομαδικά αθλήματα αποτελούν ουσιαστικά μια διαλειμματικού τύπου άσκηση, δηλαδή άσκηση που αποτελείται από διαστήματα όπου οι αθλητές αναλαμβάνουν έντονες δραστηριότητες (τρέξιμο με υψηλή ταχύτητα, απότομη επιτάχυνση/επιβράδυνση, απότομη αλλαγή κατεύθυνσης και σφοδρές συγκρούσεις) και ακολουθούνται από διαστήματα όπου οι αθλητές αναλαμβάνουν δραστηριότητες ελάσσονος προσπάθειας ή και ξεκουράζονται (απλό περπάτημα). Η διαλειμματικού τύπου άσκηση έχει ως

αποτέλεσμα ο αθλητής να ασκείται σε υψηλές εντάσεις για περισσότερο συνολικά χρόνο συγκριτικά με τη συνεχόμενη μέθοδο άσκησης. Ο διαλειμματικός χαρακτήρας του αθλήματος αυτού οδηγεί τους αθλητές εξαιτίας των υψηλών εντάσεων και των σφοδρών συγκρούσεων σε ασκησιογενή μυϊκή βλάβη και επακόλουθη φλεγμονή. Η συγκεκριμένη έρευνα είναι η μοναδική που εξετάζει τη χορήγηση σπειρουλίνας σε επαγγελματίες αθλητές και μελετά τα αποτελέσματά σχετικά με το οξειδωτικό στρες, την φλεγμονή καθώς και τις μυϊκές βλάβες. Ειδικότερα, όσον αφορά τους δείκτες οξειδωτικού στρες που μελετήθηκαν δεν παρατηρήθηκε αλλαγή σε επίπεδα αντιοξειδωτικών δεικτών όπως τα ένζυμα SOD, GPx. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι στην έρευνα αυτή μετρήθηκαν και δείκτες που είναι ενδεικτικοί της υπεροξείδωσης των λιπιδίων εξαιτίας της άσκησης όπως η ox-LDL και οι F2-ισοπροστανίνα. Παρόλο που τα επίπεδα ox-LDL δεν εμφάνισαν διαφορές ανάμεσα στην ομάδα ελέγχου και την ομάδα που έλαβε συμπληρώματα σπειρουλίνας, τα F2-Ισοπροστανίνα αυξήθηκαν σημαντικά αμέσως μετά την άσκηση στην ομάδα ελέγχου σε σχέση με την ομάδα που έλαβε σπειρουλίνα και τα επίπεδα F2-Ισοπροστανινών ήταν μικρότερα στην ομάδα σπειρουλίνας 24 ώρες μετά την άσκηση σε σχέση με τα επίπεδα πριν την άσκηση. Τα ευρήματα αυτά αποδεικνύουν ότι η σπειρουλίνα προστατεύει ενάντια στην υπεροξείδωση λιπιδίων που προκαλείται από άσκηση. Στη συνέχεια, οι δείκτες φλεγμονής που μελετήθηκαν ήταν η C-αντιδρώσα πρωτεΐνη (CRP) και η μυελοπεροξειδάση (MPO). Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν μόνο στα επίπεδα της CRP τα οποία ήταν χαμηλότερα στην ομάδα σπειρουλίνας 24 ώρες μετά την προπόνηση σε σχέση με πριν την προπόνηση, ακόμη ενώ τα επίπεδα CRP αυξήθηκαν σημαντικά στην ομάδα ελέγχου αμέσως μετά την προπόνηση, στην ομάδα σπειρουλίνας τα επίπεδα CRP δεν φάνηκε να έχουν σημαντική αύξηση αμέσως μετά την προπόνηση. Επιβεβαιώνεται με τα παραπάνω ευρήματα η αντιφλεγμονώδης δράση της σπειρουλίνας σε επαγγελματίες αθλητές. Τέλος δείκτες μυϊκής βλάβης που μελετήθηκαν είναι η κρεατινική κινάση (CK) και η γαλακτική αφυδρογονάση (LDH). Παρόμοια, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν διαφορές στα επίπεδα LDH, αλλά παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα επίπεδα CK. Συγκεκριμένα, αμέσως μετά την προπόνηση η ομάδα ελέγχου είχε αυξημένα επίπεδα CK σε αντίθεση με την ομάδα σπειρουλίνας και η ομάδα σπειρουλίνας 24 ώρες μετά την προπόνηση είχε χαμηλότερα επίπεδα CK σε σχέση με πριν την προπόνηση. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν την προστασία που προσφέρει η σπειρουλίνα ενάντια στην EIMD καθώς και την αποτελεσματικότερη και πιο γρήγορη ανάρρωση.

- ❖ Ωστόσο, υπάρχουν και έρευνες όπως αυτή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας²⁰, η οποία έδειξε ότι η χορήγηση σπειρουλίνας για τις 4 επακόλουθες ημέρες μετά από ένα πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης δεν απέφερε σημαντικά θετικά αποτελέσματα στην οξειδωτική κατάσταση, τη μυϊκή βλάβη και την αθλητική απόδοση στην ομάδα σπειρουλίνας σε σχέση με την ομάδα ελέγχου. Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα ήταν αποθαρρυντικά για τη χορήγηση σπειρουλίνας στην έρευνα αυτή μπορεί να αποδοθεί και στους ποικίλους περιορισμούς της ίδιας έρευνας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η σπειρουλίνα δεν έχει εργογόνο δράση σε αναερόβιες ασκήσεις. Μερικοί από τους σημαντικότερους περιορισμούς της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η μικρή διάρκεια στην οποία χορηγήθηκε το συμπλήρωμα σπειρουλίνας (4 ημέρες), η απώλεια μέτρησης των

βιοδεικτών που αντικατοπτρίζουν τη φλεγμονώδη απόκριση καθώς και το γεγονός ότι στην έρευνα συμμετείχαν μόνο αρσενικά άτομα.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι η χορήγηση σπειρουλίνας μπορεί να εμφανίσει εργογόνο δράση σε διάφορα αθλήματα αερόβια και μη. Ωστόσο, οι μοριακοί μηχανισμοί πίσω από τις δράσεις της σπειρουλίνας στην άσκηση δεν είναι ακόμη κατανοητοί με αποτέλεσμα να μην είμαστε ακόμα σίγουροι εάν αυτή η εργογόνος δράση προέρχεται απλά από την βελτίωση της θρεπτικής κατάστασης ή και την αποκατάσταση τυχών ανεπαρκειών σε μικροθρεπτικά συστατικά.

5.2. Πιθανοί μηχανισμοί που εξηγούν την εργογόνο δράση της σπειρουλίνας.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η επιστημονική κοινότητα δεν έχει ακόμα εξιχνιάσει τους μοριακούς μηχανισμούς πίσω από την εργογόνο δράση της σπειρουλίνας εις βάθος. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν οι πιο πιθανοί μηχανισμοί που προσπαθούν να εξηγήσουν την εργογόνο δράση της σπειρουλίνας¹⁷.

- ❖ **Αντιοξειδωτική δράση:** Οι αντιοξειδωτικές ικανότητες της σπειρουλίνας έχουν ήδη συζητηθεί στην παρούσα εργασία σε προηγούμενη ενότητα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της σπειρουλίνας σαν αντιοξειδωτικός παράγοντας είναι αφενός η ποικιλία ικανών αντιοξειδωτικών μορίων που περιέχει (β-καροτένιο, φυκοκυανίνη κα.) και αφετέρου η αύξηση της ενεργότητας των αντιοξειδωτικών ενζύμων πιθανόν μέσω της ενεργοποίησης της μεταβολικής πορείας του Nrf2 που αποτρέπει και την υπεροξείδωση των λιπιδίων. Μια ακόμη πιθανή εξήγηση στην αντιοξειδωτική ικανότητα που παρέχει η σπειρουλίνα όσον αφορά την άσκηση είναι και η συγκέντρωση του κυανοβακτηρίου σε κυστεΐνη (0,45 g κυστεΐνης σε 100 g σπειρουλίνας). Η κυστεΐνη είναι ένα μη απαραίτητο αμινοξύ το οποίο παίζει καίριο ρόλο στη διατήρηση των ιδανικών επιπέδων της γλουταθειόνης και της ισορροπίας της οξειδωτικής κατάστασης καθώς και της μυϊκής λειτουργίας. Ωστόσο, παρόλα τα ενθαρρυντικά ευρήματα για την αντιοξειδωτική ικανότητα της σπειρουλίνας, η χορήγηση συμπληρωμάτων σπειρουλίνας είναι ακόμη αμφιλεγόμενη στην επιστημονική κοινότητα. Συγκεκριμένα, προειδοποιείται ότι η χορήγηση συμπληρωμάτων σπειρουλίνας ,εξαιτίας της αντιοξειδωτικής της δράσης, πιθανόν να επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα εμποδίζοντας τα μεταβολικά μονοπάτια των ελευθέρων ριζών (redox signaling) που είναι υπεύθυνα για την προσαρμογή μετά την άσκηση (υπερτροφία, πρωτεϊνοσύνθεση, βιογένεση μιτοχονδρίων). Συνεπώς, απαιτείται περεταίρω έρευνα για την αξία χορήγησης συμπληρωμάτων σπειρουλίνας σαν αντιοξειδωτικά σε αθλητές¹⁷.
- ❖ **Πρωτεϊνική Σύσταση:** Ένας αριθμός ερευνητών αναφέρει ότι η υψηλή πρωτεϊνική σύσταση της σπειρουλίνας (~65%) σε συνδυασμό με την υψηλή βιολογική αξία των περιεχόμενων πρωτεϊνών ευθύνεται εν μέρει για την αύξηση της μέγιστης και μέσης μυϊκής τάσης που έχει παρατηρηθεί σε ορισμένες μελέτες¹⁷.
- ❖ **Περιεκτικότητα Σιδήρου:** Η υψηλή περιεκτικότητα και βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου στα συμπληρώματα σπειρουλίνας αποδείχτηκε ότι έχει θετικές επιδράσεις σχετικά με την αιμοποίηση τόσο σε κλινικό όσο και σε αθλητικό περιβάλλον. Ο μοριακός μηχανισμός πίσω από αυτή τη δράση της σπειρουλίνας δεν έχει εξακριβωθεί ακόμη, αλλά φαίνεται ότι η χορήγηση συμπληρωμάτων του κυανοβακτηρίου οδηγεί σε αύξηση

της αιμοσφαιρίνης σε υγιείς άνδρες αθλητές χωρίς διαγνωσμένη ανεπάρκεια σιδήρου. Είναι γνωστό ότι τα επίπεδα σιδήρου στις αποθήκες του οργανισμού παίζουν σημαντικό ρόλο στην αιμοποίηση και ειδικότερα στη σύνθεση της αιμοσφαιρίνης η οποία έχει το ρόλο μεταφορέα για το οξυγόνο από τους πνεύμονες στους μύες. Επομένως, φαίνεται λογικό η σπειρουλίνα να έχει θετικές επιδράσεις στην οξειδωτική ικανότητα των μυών και να εμφανίζει εργογόνο δράση σε αθλήματα όπως η ποδηλασία και η «ποδηλασία χειρός» όπως έχει παρατηρηθεί¹⁷.

- ❖ **Ενίσχυση αιμοποίησης μέσω του σπλήνα:** Ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι η σπειρουλίνα εξαιτίας της συγκέντρωσής της σε νιτρικά θεωρητικά είναι ικανή να προκαλέσει συσπάσεις στον σπλήνα με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αιμοποίησης μέσω της απελευθέρωσης ερυθροκυττάρων¹⁷.

Είναι προφανές ότι η σπειρουλίνα είναι ένα κυανοβακτήριο με ευρύ φάσμα εφαρμογών: ως λειτουργικό τρόφιμο ή πρόσθετο στη βιομηχανία τροφίμων, ως εναλλακτική πηγή βιοκαυσίμων, ως φάρμακο στο κλινικό κομμάτι της ιατρικής, ως διατροφικό σκεύασμα για την καταπολέμηση του λιμού στις αναπτυσσόμενες χώρες κυρίως της Αφρικής και ως ανερχόμενο βοήθημα για τον αθλητικό κόσμο. Παρόλο που υπηρετεί τον άνθρωπο από τα παλιά χρόνια έως και σήμερα υπάρχουν πολλές πτυχές και ιδιότητες του μικροοργανισμού που μας είναι ακόμη εντελώς άγνωστες. Η άγνοια μας για το κυανοβακτήριο σε καμία περίπτωση δε δικαιώνει τη μεγάλη χρησιμότητα που έχει προσφέρει αλλά και αναμφίβολα θα συνεχίσει να προσφέρει στο ανθρώπινο γένος. Είναι καθήκον της επιστημονικής κοινότητας να συνεχίσει και να εντείνει τις έρευνες, ιδιαίτερα στο νεότερο πεδίο που αφορά τη σπειρουλίνα και την άσκηση, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η πραγματική αξία καθώς και η βοήθεια που μπορεί να προσφέρει το κυανοβακτήριο.

ΣΚΟΠός

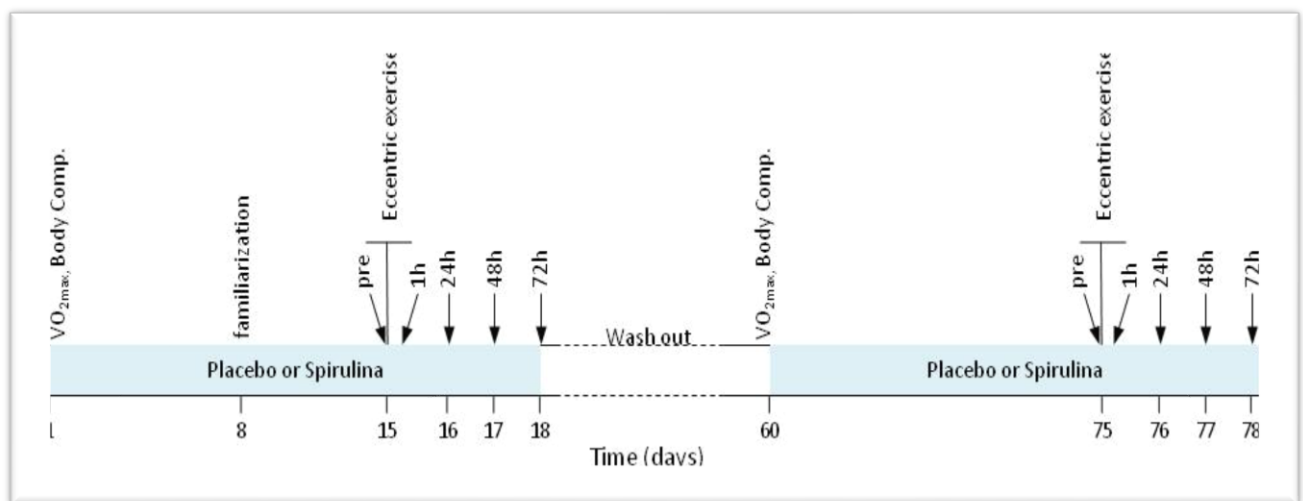
Στόχος της πτυχιακής μελέτης ήταν να αξιολογηθεί η επίδραση της *Spirulina Nigrita* στην δραστικότητα του αντιοξειδωτικού ενζύμου της υπεροξειδικής δισμουτάσης ορού (SOD3) έπειτα από πρωτόκολλο πρόκλησης ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης σε υγιείς εθελοντές. Κύριοι στόχοι της μελέτης ήταν: α) να βρεθεί αν η χορήγηση *Spirulina Nigrita* για 15 μέρες μπορεί να επηρεάσει τη δραστικότητα του ενζύμου, β) να βρεθεί αν πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης στα άνω άκρα μπορεί επηρεάσει τη δραστικότητα του ενζύμου και γ) αν η χορήγηση *Spirulina Nigrita* μπορεί να επηρεάσει την μεταβολή αυτή

Μεθοδολογία

6.1. Σχεδιασμός Μελέτης.

Η μελέτη είναι μία τυχαιοποιημένη, διπλά τυφλή, διασταυρούμενη, ελεγχόμενη με εικονικό σκεύασμα κλινική μελέτη με συμπλήρωμα διατροφής *Spirulina Nigrita*.

Η παρέμβαση που πραγματοποιήθηκε στους εθελοντές αποτελούταν από δύο σκέλη. Στο κάθε σκέλος χορηγήθηκε στον εθελοντή, με τυχαία σειρά, είτε συμπλήρωμα σπειρουλίνας, είτε εικονικό σκεύασμα για 15 μέρες πριν τη διεξαγωγή ενός πρωτοκόλλου έκκεντρης άσκησης που θα προκαλούσε στους εθελοντές ασκησιογενή μυϊκή βλάβη στο μη επιδέξιο χέρι. Η χορήγηση του συμπληρώματος συνεχίστηκε και για 3 ημέρες μετά το πρωτόκολλο της άσκησης. Μετά από μία περίοδο τουλάχιστον 6 εβδομάδων όπου δεν πραγματοποιήθηκε στους εθελοντές καμία παρέμβαση ούτε χορηγήθηκε κανένα σκεύασμα πραγματοποιήθηκε εκ νέου η διαδικασία, με το αντίθετο σκεύασμα αυτή τη φορά. Ο σχεδιασμός φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 6 Πειραματικός σχεδιασμός μελέτης

Πριν την έναρξη του κάθε σκέλους της παρέμβασης ο κάθε εθελοντής εκτιμήθηκε διατροφικά, εργοφυσιολογικά, σωματομετρικά και κλινικά. Παράλληλα, έγινε λήψη δειγμάτων αίματος και εκπνεόμενου αέρα πριν την έναρξη της συμπληρωματικής χορήγησης, πριν την άσκηση καθώς και 1, 24, 48 και 72 ώρες μετά την άσκηση και για τα δύο σκέλη της παρέμβασης.

Το συμπλήρωμα που χορηγήθηκε στους εθελοντές ήταν εμπορικά διαθέσιμο ως *Spirulina Nigrita* (web page, www.spirulinanigrita.com) σε μορφή σκόνης, ενώ το εικονικό σκεύασμα ήταν βρώσιμη μαλτοδεξτρίνη σε μορφή σκόνης. Τόσο το συμπλήρωμα όσο και το εικονικό σκεύασμα ενσωματώθηκαν σε όμοιες κάψουλες των 500 mg από πιστοποιημένη εταιρεία. Ο κάθε εθελοντής λάμβανε το συμπλήρωμα ή το εικονικό σκεύασμα με βάση τα κιλά του σωματικού του βάρους σε δοσολογία $\sim 42\text{mg/Kg}$ σ.β. (Εικόνα 5), για 15 μέρες πριν την έναρξη του πρωτοκόλλου της άσκησης καθώς και για τρεις μέρες αφότου ολοκλήρωνε το κάθε πρωτόκολλο άσκησης. Πριν την έναρξη της παρέμβασης ο κάθε εθελοντής υπέγραψε συμφωνητικό εθελοντικής συμμετοχής ενώ η μελέτη έχει πάρει έγκριση από την Επιτροπή Ηθικής και Δεοντολογίας (ΕΗΔΕ) του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου (17/09/2019)

42mg/kg ΣΒ	55mg/kg LBM
108,3 (112,5-104,2kg) : 13caps (4550mg)	47,7-54,1 kg: 8 caps (2800mg)
100 (104,2-95,8kg) : 12 caps (4200mg)	54,2 - 60,4kg: 9 caps (3150mg)
91,6 (95,8-87,5kg) : 11caps (3850mg)	60,5 - 66,8 kg : 10 caps (3500mg)
83 (87,5-79,2kg) : 10caps (3500mg)	66,9 - 73,2 kg : 11 caps (3850mg)
75 (79,2-70,8kg) : 9caps (3150mg)	73,3 - 80 kg : 12 caps (4200mg)
66,6 (70,8-62,5kg) : 8caps (2800mg)	
58,3 (62,5-54,2kg) : 7caps (2450mg)	
50 (54,2-45,8kg) : 6caps (2100mg)	

Σχήμα 7 Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το δοσολογικό σχήμα ανάλογα τα κιλά του κάθε εθελοντή

6.1.1. Προφίλ εθελοντών.

Στη μελέτη έλαβαν μέρος υγιείς άνδρες και γυναίκες οι οποίοι ήταν μη καπνιστές και παρουσίαζαν μέτριο κινητικό προφίλ χωρίς συστηματική συμμετοχή σε προπονήσεις. Η ηλικία των εθελοντών κυμαινόταν μεταξύ 19-35 ετών. Τα κριτήρια αποκλεισμού εθελοντών από τη συμμετοχή τους στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν τα εξής:

- Χρόνιες παθήσεις όπως χρόνια φλεγμονώδης νόσος, αυτοάνοσα νοσήματα, καρκίνος, καρδιακή ανεπάρκεια και καρδιακή νόσος.
- Λήψη αντιφλεγμονωδών, αντιαιμοπεταλικών φαρμάκων, ασπιρίνης, ινσουλίνης, υπολιπιδαιμικής αγωγής και συμπληρωμάτων διατροφής.

Η αναζήτηση των συμμετεχόντων πραγματοποιήθηκε προφορικά, έπειτα από ενημερώσεις που έγιναν στους φοιτητές του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, με τη βοήθεια των μέσων κοινωνικής δικτύωσης καθώς και με κατάλληλα διαμορφωμένες αφίσες που παρουσίαζαν το ερευνητικό πρωτόκολλο, σε συνεργασία με τα μέλη της ερευνητικής ομάδας.

6.1.2. Πρωτόκολλο άσκησης.

Το πρωτόκολλο διεξήχθη στον χώρο του Χαροκοπείου πανεπιστημίου και πιο συγκεκριμένα στο εργαστήριο εργοφυσιολογίας του Τμήματος Επιστήμης Διαιτολογίας Διατροφής κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και μετά από προγραμματισμένη 12ωρη νηστεία των εθελοντών. Οι εθελοντές μετά την άφιξή τους στο εργαστήριο πραγματοποίησαν μια ολιγόλεπτη προθέρμανση για περίπου πέντε λεπτά, τόσο με στατικές διατάσεις, κυρίως των άνω άκρων, όσο και με την πραγματοποίηση καθιστής άσκησης στο "χειροποδήλατο". Στη συνέχεια οι εθελοντές ακολούθησαν ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο άσκησης με τη βοήθεια ισοκινητικού δυναμομέτρου (BIODEX System 3 Pro, NY, USA), το οποίο βρίσκεται στους χώρους του εργαστηρίου εργοφυσιολογίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου.

Το πρωτόκολλο περιλάμβανε 80 μέγιστες έκκεντρες μυϊκές συστολές, δηλαδή 10 σετ των 8 επαναλήψεων, των καμπτήρων μυών του αγκώνα του μη επιδέξιου χεριού των εθελοντών. Ο

δοκιμαζόμενος έπρεπε να αντισταθεί με όλη του τη δύναμη στην κίνηση του βραχίονα του δυναμομέτρου το οποίο θα ανάγκαζε τελικά το «άνοιγμα» της άρθρωσης του αγκώνα μεταξύ των προεπιλεγμένων θέσεων. Σε κάθε εκκεντρική συστολή, το εύρος της κίνησης καθορίστηκε στις 90° με αρχική γωνία του αγκώνα τις 110° και τελική τις 20°, ενώ η γωνιακή ταχύτητα του 30°/sec. Μεταξύ των δύο διαδοχικών επαναλήψεων του ιδίου σετ ο εθελοντής πραγματοποιούσε ένα μικρό διάλλειμα για ξεκούραση περίπου για 10 δευτερόλεπτα καθώς και μετά την ολοκλήρωση του σετ των 8 επαναλήψεων δινόταν στον εθελοντή 1 λεπτό ξεκούρασης. Για την αποφυγή ανεπιθύμητων τραυματισμών, λόγω μη έγκαιρης ετοιμότητας του δοκιμαζομένου, η έναρξη κάθε εκκεντρικής συστολής πραγματοποιούνταν πάντοτε με την τελική απόφαση να ανήκει στον δοκιμαζόμενο.

6.2. Ανθρωπομετρικές μετρήσεις και Εργομετρία.

6.2.1. Ανθρωπομετρικές μετρήσεις.

Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό του σωματικού βάρους των εθελοντών πραγματοποιήθηκαν σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας (Seca, Αμβούργο, Γερμανία) και με ακρίβεια 0,1kg. Όσο αφορά το ύψος, μετρήθηκε με τη χρήση εντοιχισμένου αναστημόμετρου (Seca, Αμβούργο, Γερμανία) και με ακρίβεια 0,5cm, χωρίς οι εθελοντές να φορούν τα υποδήματά τους. Από τα παραπάνω υπολογίστηκε και ο Δείκτης Μάζας Σώματος (ΔΜΣ, BMI).

6.2.2. Σύσταση σώματος.

Η σύσταση του σώματος των εθελοντών, προσδιορίστηκε περίπου μία εβδομάδα πριν από την έναρξη του πρωτοκόλλου της άσκησης για κάθε εθελοντή ξεχωριστά. Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδο της απορροφησιομετρίας ακτίνων Χ διπλής ενέργειας (dual-energy X-ray absorptiometry, DXA), χρησιμοποιώντας των σαρωτή σώματος (model DPX, Lunar Corp., Madison, WI, software version 3.6), του τμήματος επιστήμης Διαιτολογίας-Διατροφής του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου. Τέλος, οι εθελοντές είχαν ενημερωθεί να μην καταναλώσουν φαγητό ή μεγάλη ποσότητα υγρών τις προηγούμενες τρεις ώρες για τη μέτρηση αυτή.

6.2.3. Εκτίμηση φυσικής κατάστασης.

Για την εκτίμηση της φυσικής δραστηριότητας των εθελοντών χρησιμοποιήθηκε το ερωτηματολόγιο IPAQ (International Physical Activity Questionnaire)(Hagstromer, Oja, & Sjostrom, 2006), στο οποίο περιλαμβάνονται ερωτήσεις σχετικά με τη συχνότητα και τη διάρκεια των διαφόρων δραστηριοτήτων καθώς και το χρόνο περπατήματος και των καθιστικών συμπεριφορών των εξεταζόμενων.

6.2.4. Προσδιορισμός μυϊκής δύναμης.

Η μέτρηση της μέγιστης ισομετρικής ροπής, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ισοκινητικού δυναμομέτρου (BIODEX System 3 Pro, NY, USA) το οποίο βρίσκεται στο εργαστήριο εργοφυσιολογίας του Τμήματος Επιστήμης Διαιτολογίας Διατροφής.

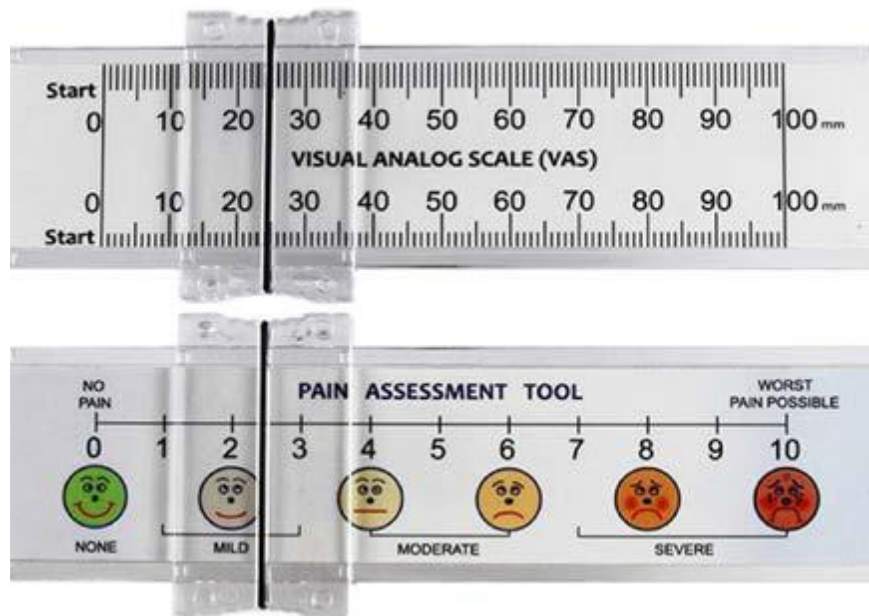
6.2.5. Προσδιορισμός γωνιών άρθρωσης του αγκώνα.

Στους εθελοντές πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για να καθοριστεί το εύρος κίνησης της άρθρωσης του αγκώνα (Range of Motion, ROM) το οποίο εκτιμήθηκε μετρώντας την γωνία

μέγιστης κάμψης του αγκώνα (Flexed Angle, FANG) και την γωνία ανάπαυσης του αγκώνα σε απουσία μυϊκής σύσπασης (Relaxed Angle, RANG), με τη χρήση γωνιομέτρου.

6.2.6. Αντίληψη της έντασης καθυστερημένου μυϊκού πόνου.

Η αξιολόγηση του καθυστερημένου μυϊκού πόνου έγινε με τη χρήση μίας κλίμακας υποκειμενικής αξιολόγησης (Visual Analog Scale – VAS), η οποία συνίσταται σε μία ευθεία γραμμή μήκους 100 χιλιοστών όπου η μία της άκρη αντιστοιχεί στην ένδειξη «καθόλου πόνος» και η άλλη της στην ένδειξη «ανυπόφορος πόνος» (Εικόνα 6). Ζητήθηκε από τους εθελοντές να υποδείξουν το σημείο της κλίμακας που αντιστοιχούσε στον πόνο που αισθανόταν, όταν ο ερευνητής ψηλαφούσε την περιοχή της κατάφυσης του βραχιονίου μυός.



Σχήμα 8 Οπτική αναλογική κλίμακα πόνου (VAS)

6.2.7. Μέτρηση περιμέτρου βραχίονα.

Η τιμή της περιμέτρου του βραχιονίου στο μέσον του προσδιορίστηκε με τη χρήση μεζούρας ακριβείας στο μέσον της ευθείας που ορίζουν το πλάγιο όριο του ακρωμίου και η παρακονδύλια απόφυση του βραχιονίου.

6.3. Βιοχημικές μετρήσεις.

6.3.1. Αιμοληψίες.

Όλες οι αιμοληψίες έγιναν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του Εργαστηρίου Διατροφής και Κλινικής Διαιτολογίας από έμπειρο προσωπικό. Πριν από κάθε αιμοληψία προηγήθηκε ένα 12ώρο νηστείας. Σε κάθε αιμοληψία ελήφθησαν συνολικά 12 mL αίματος. Από αυτά, τα 6 mL χρησιμοποιήθηκαν για την απομόνωση ορού (vacutainers ορού) και τα 6 mL για απομόνωση πλάσματος και ερυθροκυττάρων (vacutainers με αντιπηκτικό EDTA).

6.3.2. Απομόνωση ορού και πλάσματος από το αίμα.

Διαλύματα

- Φυσιολογικός ορός (NaCl 0,15 M)

Αναλυτική πορεία

Απομόνωση πλάσματος και ερυθροκυττάρων

- Έγινε λήψη 6 mL αίματος σε σωλήνες αιμοληψίας κενού με αντιπηκτικό EDTA.
- Φυγοκέντρηση στα 1500 g για 10 λεπτά στους 4 °C.
- Λήψη υπερκευμένου (πλάσμα) σε σωλήνες τύπου errendorfs και αποθήκευση στους -80 °C.
- Συμπλήρωση της ποσότητας που αφαιρέθηκε με προσθήκη φυσιολογικού ορού και φυγοκέντρηση στα 200 g για 8 λεπτά στους 4 °C.
- Απόρριψη της άνω φάσης, συμπλήρωση της ποσότητας που αφαιρέθηκε με προσθήκη φυσιολογικού ορού και φυγοκέντρηση στα 1500 g για 10 λεπτά στους 4 °C.
- Απόρριψη υπερκευμένου, αποθήκευση των ερυθροκυττάρων σε σωλήνες τύπου errendorfs και αποθήκευση στους -80 °C.

Απομόνωση ορού

- Έγινε λήψη 6 mL αίματος σε σωλήνες αιμοληψίας κενού δίχως αντιπηκτικό.
- Φυγοκέντρηση στα 1500 g για 20 λεπτά στους 4 °C.
- Λήψη υπερκευμένου σε σωλήνες τύπου errendorfs και αποθήκευση στους -80 °C.

6.3.3. Προσδιορισμός δραστηριότητας υπεροξειδικής δισμουτάσης ορού (SOD3) με τη μέθοδο οξειδάσης της ξανθίνης / ξανθίνης / κυτοχρώματος c.

Όργανα

- Φωτόμετρο (Spectrophotometer Pharmacia Biotech, Novaspec II)
- Υδρόλουτρο για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στους 37 °C

Διαλύματα

- Ρυθμιστικό διάλυμα φωσφορικού καλίου 0,05M, PH 7,8. Ζυγίζονται 3,40g KH_2PO_4 και διαλύονται σε 500ml απιονισμένο νερό. Η ρύθμιση του pH γίνεται με διάλυμα KOH 1N.
- Ρυθμιστικό διάλυμα φωσφορικού καλίου 0,05M, PH 7,8/EDTA 0,1Mm. Ζυγίζονται 0,0093g EDTA και διαλύονται σε 250mL ρυθμιστικού διαλύματος φωσφορικού καλίου 0,05M, Ph 7,8. Η ρύθμιση του pH γίνεται με διάλυμα KOH 1N.
- Διάλυμα KOH 4N: Ζυγίζονται 11,222g KOH (MW=56) σε 50ml H_2O .
- Stock διάλυμα κυτοχρώματος c 1mM: Ζυγίζονται 250mg κυτοχρώματος c (MW=13000) για 19,23mL ρυθμιστικού διαλύματος φωσφορικού καλίου 0,05M, pH 7,8. Φυλάσσεται στους -20 °C.
- Διάλυμα ξανθίνης 1mM : Ζυγίζονται 0,0174g και διαλύονται σε 100mL ρυθμιστικού διαλύματος KH_2PO_4 0,05M, pH 7,8. Φυλάσσεται στους -20 °C.

- Stock διάλυμα οξειδάσης της ξανθίνης 3 units/mL: Η αρχική συγκέντρωση του προϊόντος είναι 32 units/mL. Αναδιάλυση σε όγκο 2,1mL με ρυθμιστικό διάλυμα PBS/EDTA. Φυλάσσεται στους -20 °C.
- Working διάλυμα οξειδάσης της ξανθίνης 0,3 units/mL : αρραίωση 1:10 του stock διαλύματος.
- Στερεό sodium dithionite.
- SOD assay cocktail: Σε 141mL ρυθμιστικού διαλύματος φωσφορικού καλίου 0,05M, pH 7,8/EDTA 0,1mM προστίθενται 7,5mL stock διαλύματος ξανθίνης. Προστίθενται 1,5mL διάλυμα κυτοχρώματος c. Ελέγχεται η συγκέντρωση του κυτοχρώματος c με προσθήκη μικρής ποσότητας σε κυψελίδα οπτικής διαδρομής 1cm και μετρώντας την απορρόφηση στα 550nm. Προστίθενται μερικοί κρύσταλλοι στερεού sodium dithionite, αναδεύεται και μετράται ξανά η απορρόφηση, η οποία πρέπει να αυξηθεί ακριβώς κατά 0,2.

6.3.4. Αρχή μεθόδου.

Οι υπεροξειδικές δισμουτάσες είναι μεταλλοένζυμα που καταλύουν την οξειδοαναγωγή του ανιόντος υπεροξειδίου σε μοριακό οξυγόνο και έτσι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον αντιοξειδωτικό μηχανισμό του κυττάρου. Η οξειδάση της ξανθίνης καταλύει την αντίδραση της ξανθίνης με το οξυγόνο, δίνοντας υπεροξείδιο με ρυθμό 1μM/min. Αυτό αντιδρά με το ferricytochrome c και το ανάγει σε ferrocycytochrome c, προκαλώντας αύξηση της απορρόφησης στα 550nm, με αύξηση του συντελεστή μοριακής απορρόφησης κατά 20000 cm⁻¹ (από 9000 στα 29000 cm⁻¹). Η παρουσία SOD στο μίγμα της αντίδρασης μειώνει την παραγωγή O₂⁻ και συνεπώς την αναγωγή του κυτοχρώματος c σε βαθμό τόσο μεγαλύτερο όσο και η δραστηριότητα της SOD.

6.3.5. Αναλυτική πορεία.

Τοποθετούνται 3mL SOD assay cocktail σε κυψελίδα και μηδενίζεται η απορρόφηση στα 550nm. Τοποθετείται η κατάλληλη ποσότητα διαλύματος οξειδάσης της ξανθίνης, ώστε η αύξηση της απορρόφησης να είναι ~ 0,02 A/min (η αύξηση της απορρόφησης να βρίσκεται μεταξύ 0,015 και 0,025 A/min). Αυτή είναι η ταχύτητα του control. Προστίθεται κατάλληλη ποσότητα δείγματος (10-50μL) που να περιέχει ~ 1 unit SOD σε 3mL SOD assay cocktail και επαναλαμβάνεται το βήμα 2. Σε αυτή την περίπτωση η απορρόφηση στα 550nm θα είναι χαμηλότερη. Η % αναστολή υπολογίζεται ως εξής:

$$\% \text{ Inhibition} = [(\text{control} - \text{sample}) / \text{control}] \times 100$$

Υπολογίζεται ο αριθμός των SOD units στο δείγμα, χρησιμοποιώντας των τύπο:

$$\text{Units} = \% \text{ Inhibition} / (100 - \% \text{ Inhibition})$$

6.4. Στατιστική ανάλυση.

Η κανονικότητα των συνεχών μεταβλητών εξετάστηκε με εφαρμογή του ελέγχου Kolmogorov - Smirnov. Όλες οι συνεχείς μεταβλητές παρουσιάζονται ως μέσος όρος ± SD (standard deviation, τυπική απόκλιση). Οι συσχετίσεις μεταξύ των συνεχών μεταβλητών έγιναν με τη χρήση του

συντελεστή συσχέτισης Pearson. Για τη μελέτη της επίδρασης του χρόνου της παρέμβασης, καθώς και του είδους της παρέμβασης στις μεταβολές των μετρούμενων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε η απλή συσχετισμένη ανάλυση διακύμανσης για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Εξαιτίας των πολλαπλών συγκρίσεων χρησιμοποιήθηκε η διόρθωση κατά Bonferroni, προκειμένου να γίνει διόρθωση του σφάλματος τύπου I, ώστε να προσεγγίζει το επίπεδο σημαντικότητας που έχει οριστεί για τους στατιστικούς ελέγχους αυτής της μελέτης. Όλες οι αναφερόμενες τιμές πιθανοτήτων (p) βασίζονται σε αμφίπλευρους ελέγχους και συγκρίνονται στο επίπεδο σημαντικότητας του 5%. Για τον υπολογισμό των AUC χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GraphPad Prism έκδοση 8. Για όλους τους στατιστικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPSS έκδοση 18.0 (Statistical Package for social sciences, SPSS Inc., Chicago, Illinois, U.S.A.).

Αποτελέσματα

7.1. Επίδραση συμπληρωματικής χορήγησης σπειρουλίνας σε βασικά σωματομετρικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των εθελοντών

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ερμηνεία και ανάλυση των βασικών σωματομετρικών και βιοχημικών χαρακτηριστικών των εθελοντών πριν την έναρξη και 14 ημέρες μετά την συμπληρωματική χορήγηση σπειρουλίνας και placebo.

7.1.1. Σωματομετρικά Χαρακτηριστικά.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των σωματομετρικών χαρακτηριστικών των εθελοντών που συμμετείχαν στο πρωτόκολλο πριν την έναρξη και ύστερα από 14 ημέρες συμπληρωματικής χορήγησης *Spirulina Nigrita* και Placebo.

Πίνακας 1 Σωματομετρικά χαρακτηριστικά συμμετεχόντων πριν την έναρξη και μετά τις 2 εβδομάδες χορήγησης του κάθε σκευάσματος (placebo, spirulina).

Μεταβλητές	Intervention	Pre (MO $\pm$ SD)	Post (MO $\pm$ SD)	P value
Φύλο (Αρσενικό/Θηλυκό)	N=14 (8 male, 6 female)			
Ηλικία (Χρόνια)	24,4 $\pm$ 3,9			
Ύψος (m)	170,9 $\pm$ 8,2			
Βάρος (kg)	Placebo	67,6 $\pm$ 11,6	67,7 $\pm$ 11,6	0,646
	Spirulina	68,8 $\pm$ 12,2	69,1 $\pm$ 12,2	0,255
ΔΜΣ (kg/m ²)	Placebo	23,0 $\pm$ 2,3	23,0 $\pm$ 2,3	0,603
	Spirulina	23,4 $\pm$ 2,6	23,5 $\pm$ 2,5	0,28
Συνολικό λίπος %	Placebo	20,5 $\pm$ 4,3	20,8 $\pm$ 4,9	0,517
	Spirulina	21,5 $\pm$ 5,7	21,7 $\pm$ 5,6	0,615
Συνολική μάζα λίπους (kg)	Placebo	13,7 $\pm$ 3,7	14,0 $\pm$ 3,9	0,399
	Spirulina	14,8 $\pm$ 4,8	15,0 $\pm$ 4,7	0,58

Συνολική άλιπη μάζα (kg)	Placebo	53,2 ± 9,8	53,2 ± 9,8	0,965
	Spirulina	53,9 ± 10,4	53,7 ± 10,2	0,643
Συνολικό νερό Σώματος (kg)	Placebo	39,0 ± 7,2	38,9 ± 7,1	0,779
	Spirulina	39,4 ± 7,7	39,3 ± 7,4	0,727
Λίπος χεριού %	Placebo	20,4 ± 4,8	20,9 ± 5,4	0,315
	Spirulina	21,4 ± 6,1	22,2 ± 5,7	0,33
Μάζα λίπους χεριού (kg)	Placebo	0,7 ± 0,2	0,7 ± 0,2	0,272
	Spirulina	1,3 ± 1,9	1,3 ± 1,8	1,000
Άλιπη μάζα χεριού (kg)	Placebo	2,9 ± 0,8	2,9 ± 0,9	1,000
	Spirulina	2,9 ± 0,8	2,9 ± 0,8	0,29
Συστολική πίεση (mmHg)	Placebo	121,5 ± 14,0	117,8 ± 18,7	0,192
	Spirulina	117,4 ± 17,6	117,2 ± 20,4	0,951
Διαστολική πίεση (mmHg)	Placebo	69,2 ± 10,0	67,0 ± 8,8	0,432
	Spirulina	71,5 ± 6,9	69,7 ± 7,1	0,434
Παλμοί καρδιάς (bpm)	Placebo	73,9 ± 13	75,5 ± 14,4	0,673
	Spirulina	77,2 ± 13,2	73,8 ± 12,2	0,179
Περιφέρεια μέσης (cm)	Placebo	79,5 ± 11,1	79,6 ± 11,0	0,784
	Spirulina	81,0 ± 13,1	81 ± 12,3	1,000
Περιφέρεια μηρών (cm)	Placebo	98,8 ± 5,8	99,0 ± 5,7	0,58
	Spirulina	100,2 ± 6,1	99,8 ± 6,2	0,076

Στη μελέτη συμμετείχαν 14 εθελοντές (8 άνδρες, 6 γυναίκες). Στον Πίνακα 1 παρατηρούμε ότι κανένα από τα χαρακτηριστικά των εθελοντών δεν διαφοροποιείται σημαντικά μετά την παρέμβαση, για κανένα από τα δύο σκευάσματα (pre vs post, $p > 0.05$).

Επίσης, δε φάνηκε κάποια σημαντική διαφορά όταν συγκρίναμε τα χαρακτηριστικά των εθελοντών μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων της παρέμβασης, είτε πριν την έναρξη είτε μετά τις δύο εβδομάδες χορήγησης (placebo vs spirulina, $p > 0.05$).

7.1.2. Μεταβολικοί δείκτες.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των μεταβολικών δεικτών των εθελοντών, πριν την έναρξη και ύστερα από 14 ημέρες χορήγησης κάθε σκευάματος (spirulina, placebo).

Πίνακας 2 Μεταβολικοί δείκτες των εθελοντών πριν την έναρξη και ύστερα από 2 εβδομάδες χορήγησης κάθε σκευάματος (placebo, spirulina).

Variables	Intervention	Pre (MO ± SD)	Post (MO ± SD)	P value
Βάρος (Kg)	Placebo	70,9 ± 17,1	71,2 ± 17,4	0,403
	Spirulina	68,8 ± 12,2	69,1 ± 12,2	0,255
ΔΜΣ (Kg/m ²)	Placebo	23,8 ± 4,0	23,9 ± 4,1	0,391

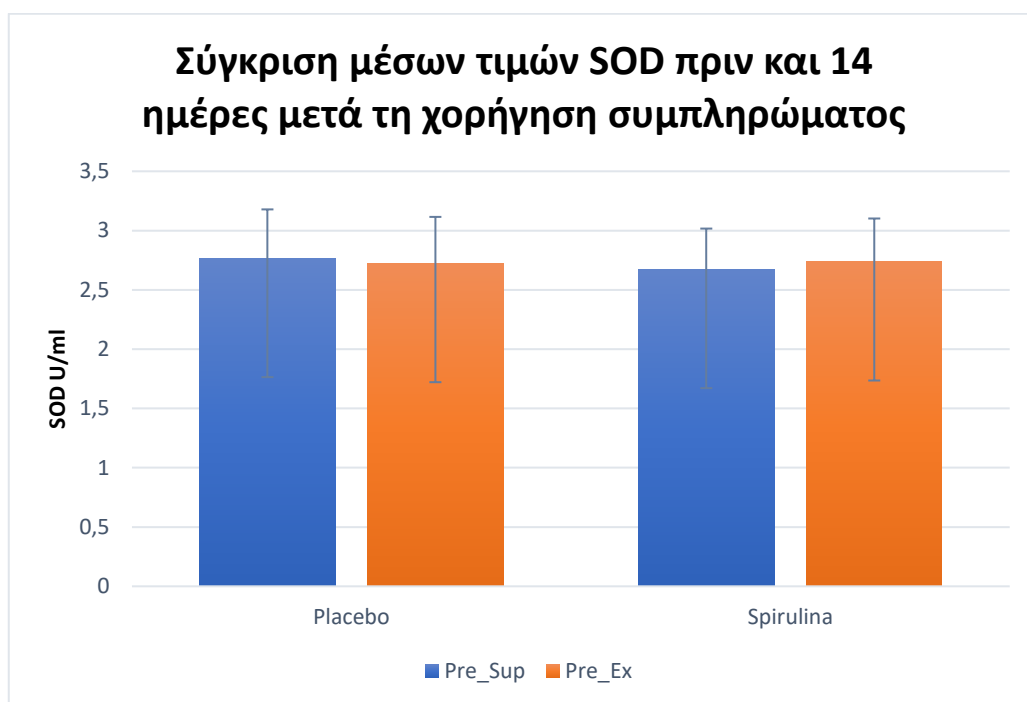
	Spirulina	23,4 ± 2,6	23,5 ± 2,5	0,280
Συνολικό λίπος (%)	Placebo	21,2 ± 5,1	21,6 ± 5,6	0,473
	Spirulina	21,5 ± 5,7	21,7 ± 5,6	0,615
Άλιπη μάζα (Kg)	Placebo	55 ± 11,7	55 ± 11,7	0,965
	Spirulina	53,9 ± 10,4	53,7 ± 10,2	0,643
Συστολική πίεση (mg/dl)	Placebo	121,9 ± 13,5	117,9 ± 17,9	0,145
	Spirulina	117,4 ± 17,6	117,2 ± 20,4	0,951
Διαστολική πίεση (mg/dl)	Placebo	70,2 ± 10,4	68,2 ± 9,6	0,430
	Spirulina	71,5 ± 6,9	69,7 ± 7,1	0,434
Παλμοί καρδιάς (Bpm)	Placebo	75,6 ± 14,1	76,9 ± 14,8	0,719
	Spirulina	77,2 ± 13,2	73,8 ± 12,2	0,179
Γλυκόζη (mg/dl)	Placebo	93,4 ± 8,5	91,3 ± 6,8	0,176
	Spirulina	93,9 ± 11,4	91,6 ± 9,4	0,621
Τριγλυκερίδια (mg/dl)	Placebo	130,0 ± 57,4	106,9 ± 43,4	0,008
	Spirulina	123,7 ± 59,2	113,0 ± 60,1	0,133
Ολική χοληστερόλη (mg/dl)	Placebo	177,5 ± 44,1	188,0 ± 50,0	0,040
	Spirulina	182,4 ± 37,4	175 ± 37,0	0,146

Στον Πίνακα 2 παρατηρούμε ότι ύστερα από 2 εβδομάδες χορήγησης του εικονικού σκευάσματος υπάρχει μία σημαντική μείωση στις τιμές των τριγλυκεριδίων και μία σημαντική αύξηση στις τιμές της ολικής χοληστερόλης ($p = 0,008$ και $p = 0,040$ αντίστοιχα), το οποίο δεν παρατηρείται κατά την παρέμβαση με τη σπειρουλίνα.

Επίσης δε φάνηκε κάποια σημαντική διαφορά όταν συγκρίναμε τις τιμές των μεταβολικών δεικτών των εθελοντών μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων της παρέμβασης, είτε πριν την έναρξη είτε μετά τις δύο εβδομάδες χορήγησης (placebo vs spirulina, $p > 0.05$).

7.1.3. Επίδραση της παρέμβασης στη δραστικότητα της SOD3

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σύγκριση των μέσων τιμών της SOD πριν τη χορήγηση σκευάσματος (σπειρουλίνας ή Placebo) και 14 ημέρες μετά τη λήψη σκευάσματος, πριν όμως πραγματοποιηθεί το πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης.



Σχήμα 9 Σύγκριση μέσων τιμών των συγκεντρώσεων SOD στο πλάσμα πριν (Μπλε, $\pm$ τυπικό σφάλμα) και 14 ημέρες μετά (Κόκκινο, $\pm$ τυπικό σφάλμα) την κάθε παρέμβαση (Placebo και Σπειρουλίνα) (N=14).

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στις μέσες τιμές δραστικότητα της SOD3 πλάσματος και στις παρεμβάσεις με σπειρουλίνα ή placebo.

7.1.4. Συσχέτιση επιπέδων SOD3 με τα ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά στις 2 παρεμβάσεις (Placebo και Spirulina).

Στους Πίνακες 3 και 4 πραγματοποιήθηκε διερεύνηση συσχέτισης των επιπέδων συγκέντρωσης SOD3 και των ανθρωπομετρικών και μεταβολικών χαρακτηριστικών των εθελοντών πριν και 14 ημέρες μετά την παρέμβαση με εικονικό σκεύασμα και σκεύασμα σπειρουλίνας αντίστοιχα.

Intervention = Placebo

Πίνακας 3 Συσχέτιση επιπέδων SOD πλάσματος με ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά πριν την παρέμβαση με Placebo.

	SOD3_PreS		
	Pearson Correlation	Sig. (2-tailed)	N
age	-,433	,107	15
WEIGHT PRE SUPL	-,282	,309	15
BODY MASS INDEX	-,314	,255	15
TANITA TOTAL FAT %	,090	,749	15
TANITA FREE FAT MASS kg	-,348	,204	15

	-,483	,068	15
PEAK TORQUE N-M			
	-,480	,070	15
AVERAGE PEAK TORQUE N-M			
	,057	,861	12
DXA TISSUE FAT %			
DXA TOTAL FAT g	-,222	,488	12
	-,351	,263	12
DXA TOTAL LEAN g			
SP_PreE	-,097	,742	14
	-,207	,478	14
DIASTOLIC BLOOD PRESSURE			
	,180	,537	14
HEART RATE per minute			
	-,417	,138	14
WAIST CIRCUMFERENCE cm			
CK_PreS	-,255	,378	14
LDH_PreS	-,137	,628	15
GLU_PreS	-,252	,365	15
TG_PreS	-,282	,308	15
TC_PreS	,208	,458	15
UricA_PreS	-,456	,088	15

Intervention = Spirulina

Πίνακας 4 Συσχέτιση επιπέδων SOD πλάσματος με ανθρωπομετρικά και μεταβολικά χαρακτηριστικά πριν την παρέμβαση με Spirulina.

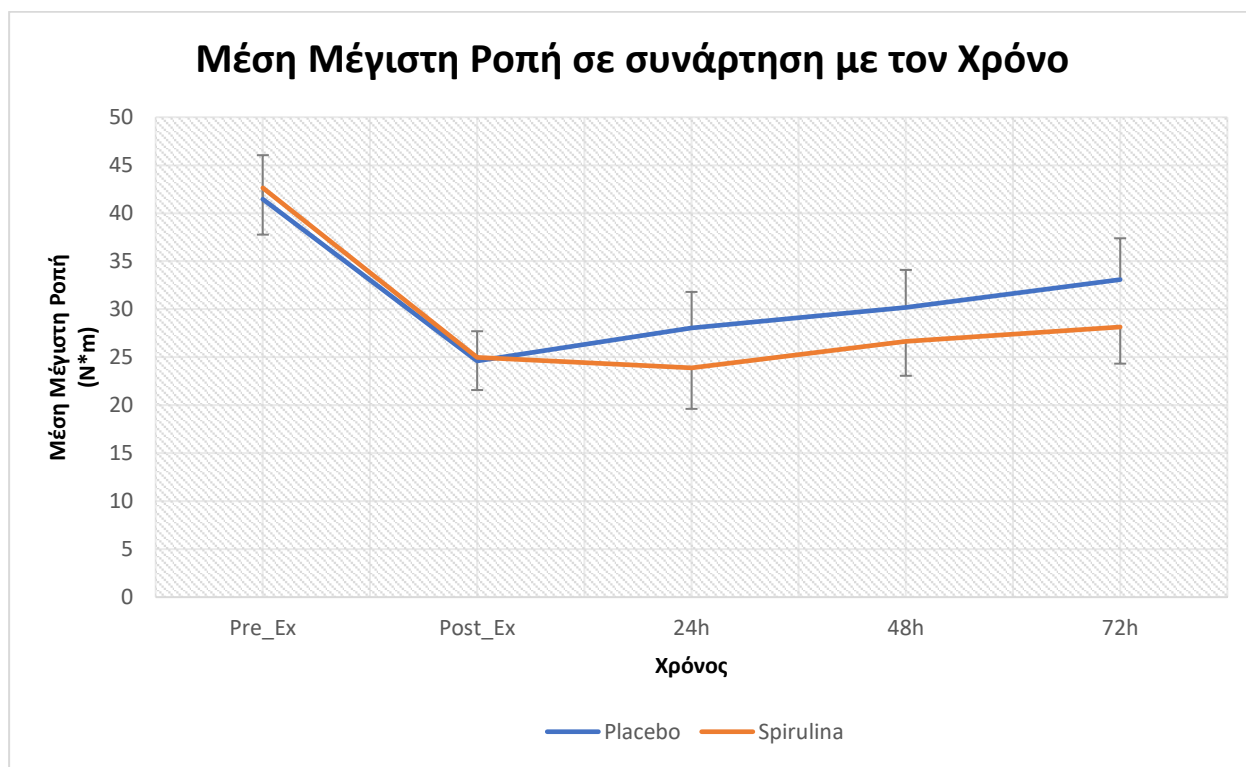
	SOD3_PreS		
	Pearson Correlation	Sig. (2-tailed)	N
age	-,367	,197	14
WEIGHT PRE SUPL	-,299	,299	14
BODY MASS INDEX	-,340	,234	14
TANITA TOTAL FAT %	,242	,405	14
TANITA FREE FAT MASS kg	-,373	,189	14
PEAK TORQUE N-M	-,513	,061	14

AVERAGE PEAK TORQUE N-M	-,475	,086	14
DXA TISSUE FAT %	1,000	.	2
DXA TOTAL FAT g	1,000	.	2
DXA TOTAL LEAN g	-1,000	.	2
SP_PreE	-,149	,626	13
DIASTOLIC BLOOD PRESSURE	-,335	,263	13
HEART RATE per minute	,311	,302	13
WAIST CIRCUMFERENCE cm	-,396	,181	13
CK_PreS	,195	,523	13
LDH_PreS	,001	,996	14
GLU_PreS	,251	,386	14
TG_PreS	-,324	,258	14
TC_PreS	,125	,669	14
UricA_PreS	-,425	,130	14

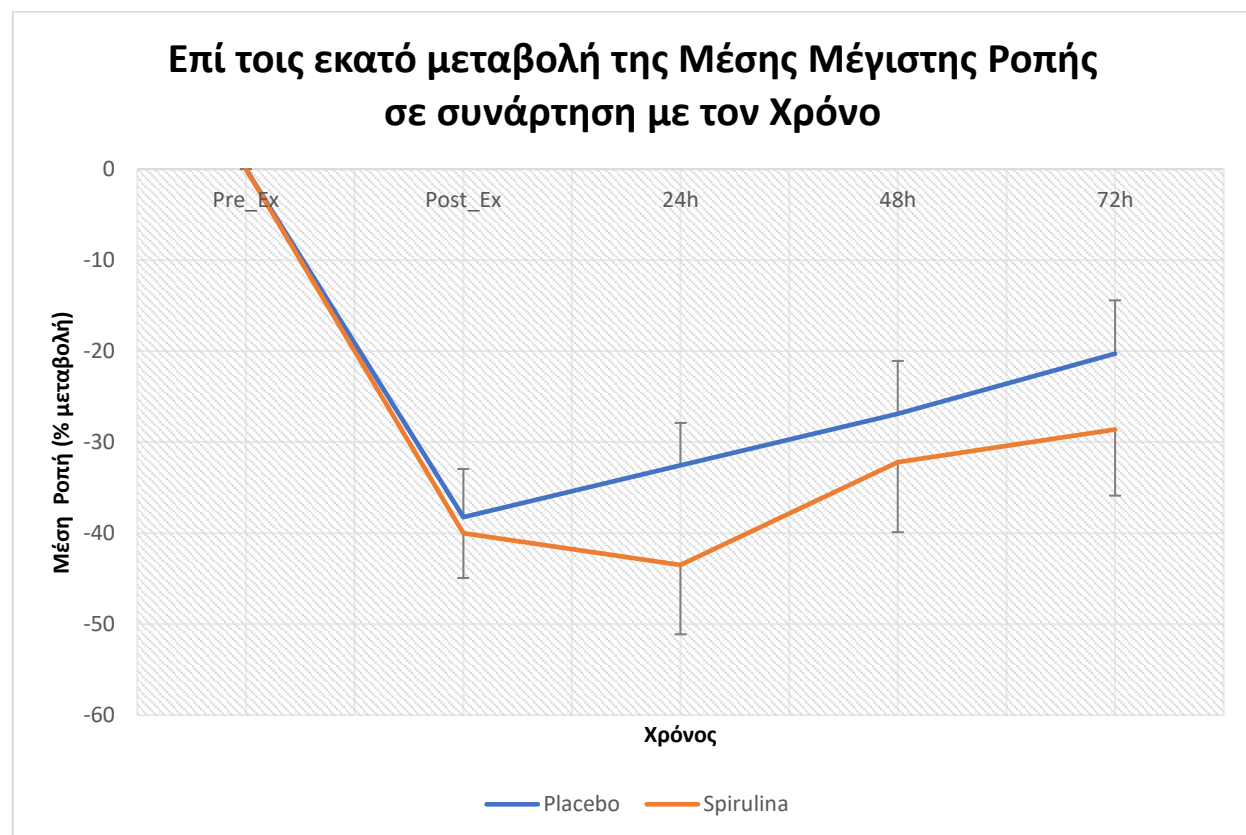
Παρατηρούμε από τα παραπάνω ευρήματα ότι τόσο στην παρέμβαση με το εικονικό σκεύασμα όσο και στην παρέμβαση με σπειρουλίνα δεν υπάρχει κάποιο ανθρωπομετρικό χαρακτηριστικό ή μεταβολικός δείκτης που να εμφανίζει μια στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τη δραστηριότητα της επίπεδα SOD3 στο πλάσμα. Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει μια τάση τόσο στην παρέμβαση με placebo όσο και στην παρέμβαση με σπειρουλίνα, η μέγιστη ροπή (για Placebo $p=0,068$, $r=-0,483$ και για σπειρουλίνα $p=0,061$, $r=-0,513$) και η μέση ροπή (για Placebo $p=0,061$, $r=-0,513$ και για σπειρουλίνα $p=0,086$, $r=-0,475$) να συσχετίζονται αρνητικά με τα επίπεδα SOD3. Ακόμα και αυτή η τάση όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική.

7.1.5. Επίδραση παρέμβασης σε εργομετρικούς δείκτες ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης.

Στα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές μέγιστης ροπής καθώς και η επί τοις εκατό μεταβολή τους από την αρχική μέτρηση, κατά την καταγραφή της δύναμης στο ισοκινητικό μηχάνημα για 5 χρονικές στιγμές (1, 24, 48 και 72 ώρες μετά την έκκεντρη άσκηση) μετά από κατανάλωση spirulina ή Placebo.

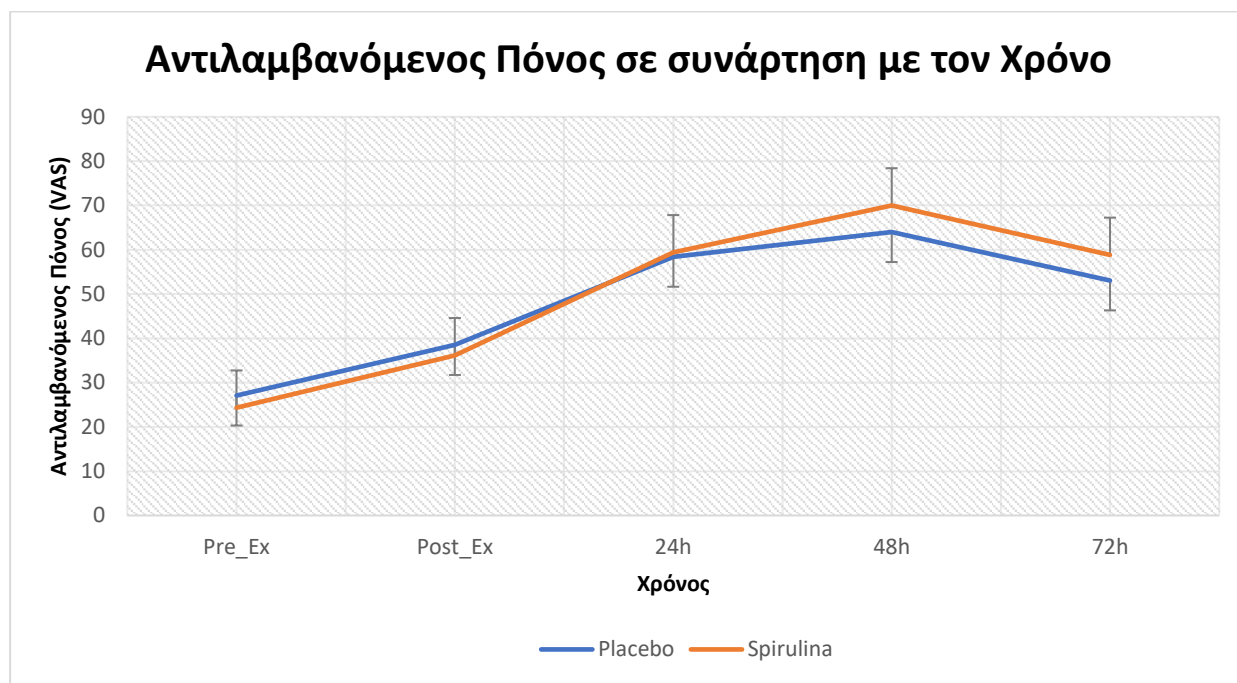


Σχήμα 10 Μέση ροπή σε συνάρτηση με τον Χρόνο για σπειρουλίνα (κόκκινο – τυπικό σφάλμα) και για placebo (μπλε + τυπικό σφάλμα) (N=14).



Σχήμα 11 Επί τοις εκατό μεταβολή της Μέσης Ροπής σε συνάρτηση με τον Χρόνο για σπειρουλίνα (κόκκινο – τυπικό σφάλμα) και για placebo (μπλε + τυπικό σφάλμα) (N=14).

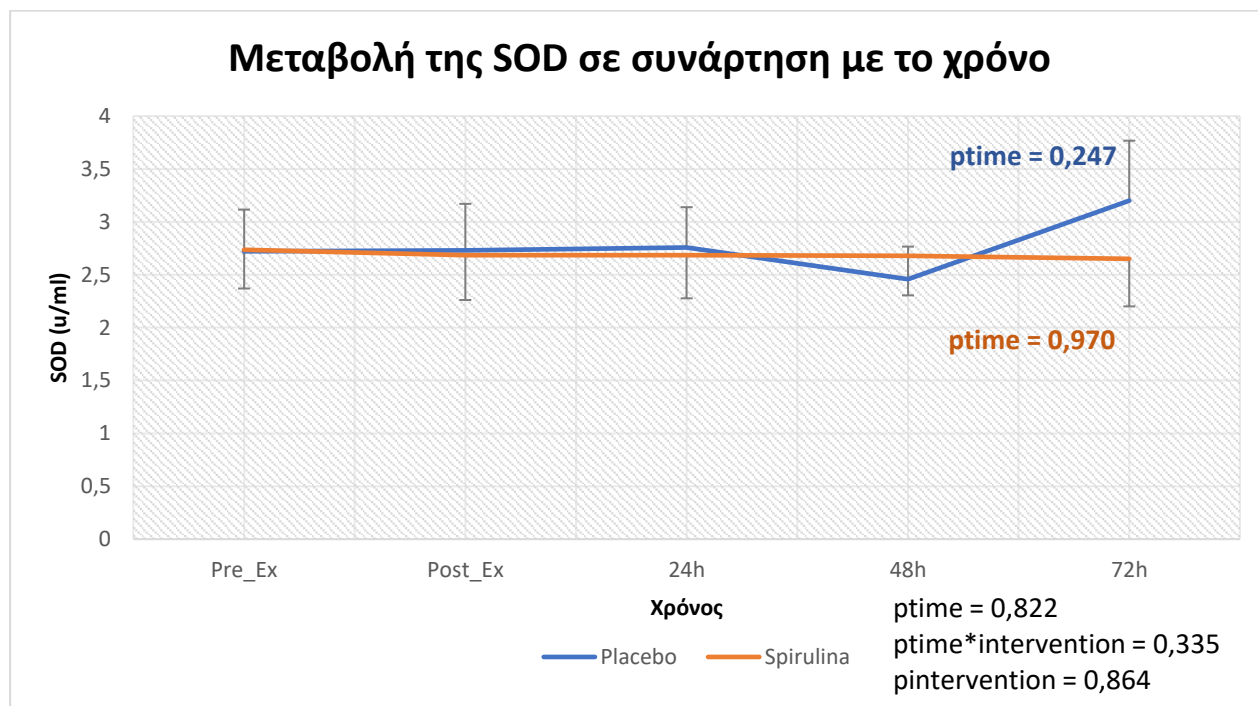
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του αντιλαμβανόμενου πόνου σε απόλυτες τιμές σε συνάρτηση με τον χρόνο για όλους τους εθελοντές.



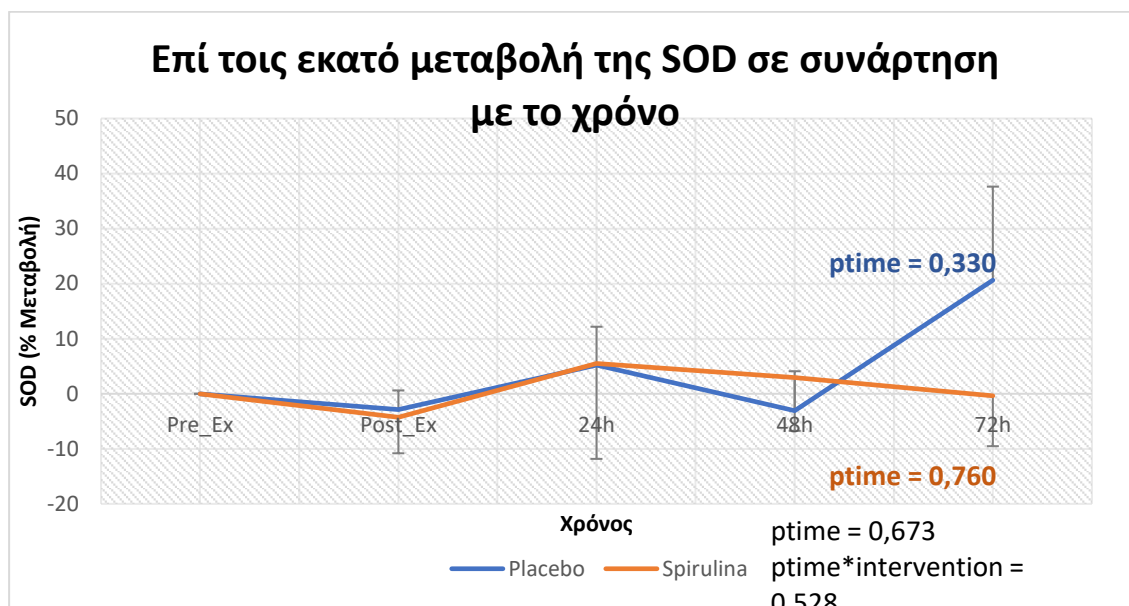
Σχήμα 12 Αντιλαμβανόμενος Πόνος σε συνάρτηση με τον Χρόνο για την παρέμβαση με placebo (Μπλε, - τυπικό σφάλμα) και για την παρέμβαση με σπειρουλίνα (Κόκκινο, + τυπικό σφάλμα) (N=14).

7.1.5. Επίδραση της παρέμβασης στη δραστικότητα της SOD3 .

Στα Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης της SOD σε απόλυτες τιμές καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή τους σε συνάρτηση με τον χρόνο αντίστοιχα.



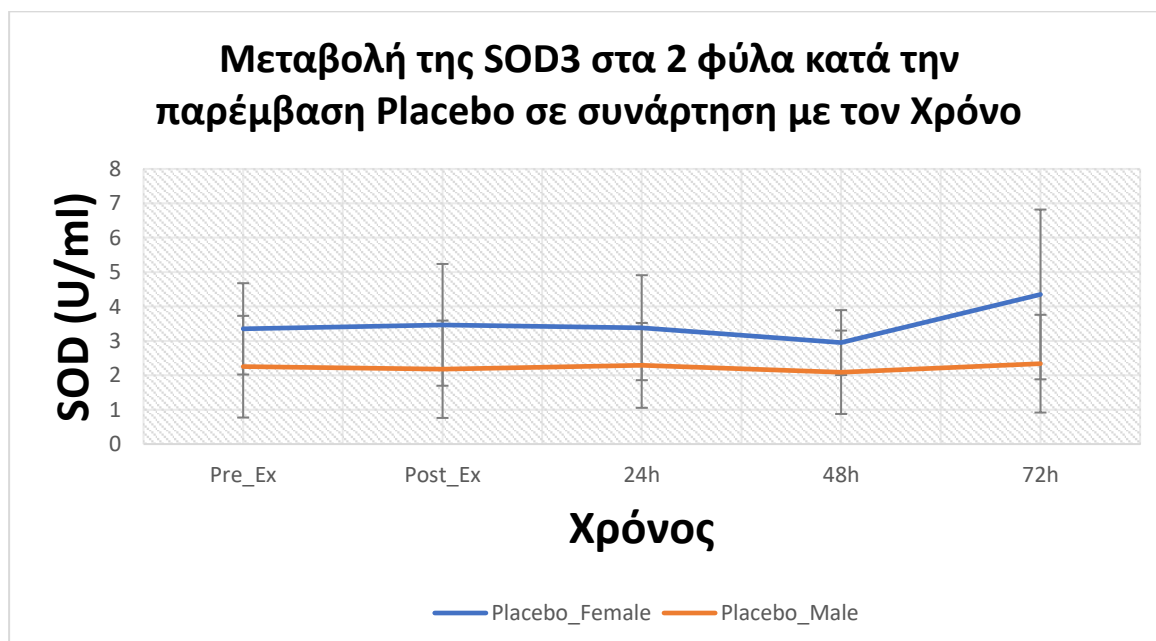
Σχήμα 13 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο για spirulina (κόκκινο, μέση τιμή - τυπικό σφάλμα) και εικονικό συμπλήρωμα (μπλε, μέση τιμή + τυπικό σφάλμα) (N=14)



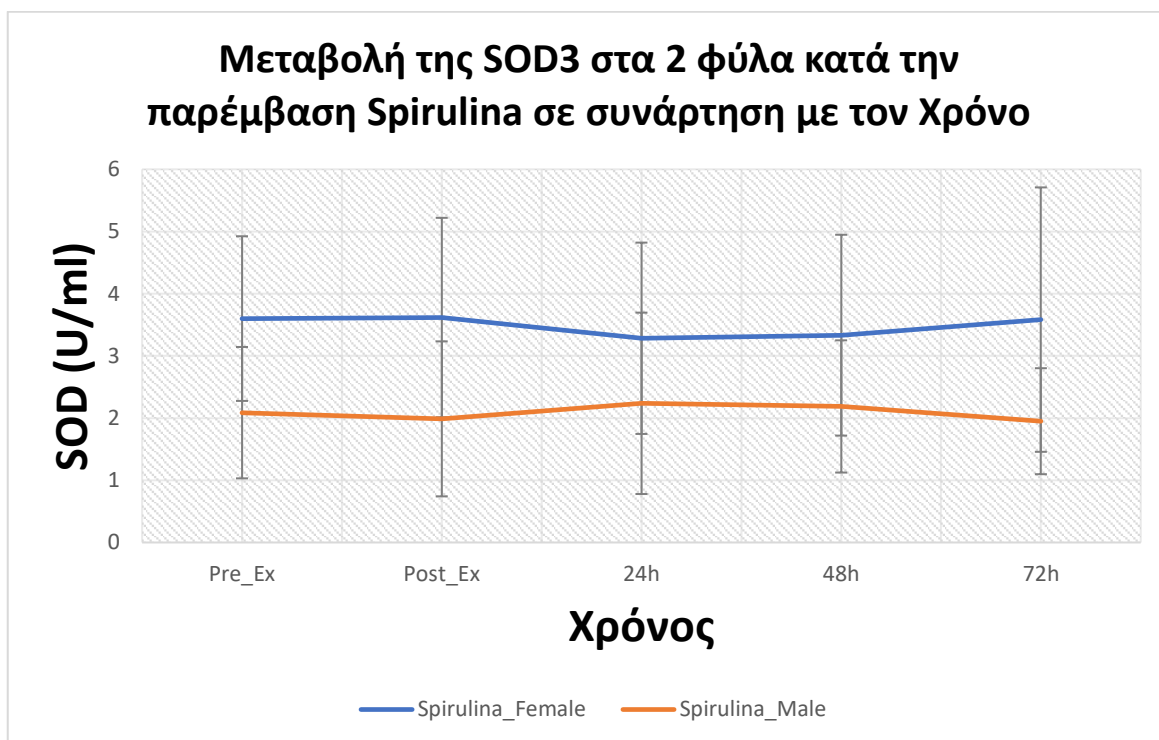
Σχήμα 14 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο για spirulina (κόκκινο, μέση τιμή – τυπικό σφάλμα) και εικονικό συμπλήρωμα (μπλε, μέση τιμή + τυπικό σφάλμα) (N=14)

Τόσο στις απόλυτες όσο και στις ποσοστιαίες τιμές της μεταβολής της δραστηριότητας της SOD παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δυο σκευασμάτων, με μεγαλύτερη την αύξηση της SOD στις 48 έως 72 ώρες για το σκεύασμα Placebo συγκριτικά με το συμπλήρωμα Spirulina Nigrita. Ωστόσο, καμία από αυτές δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

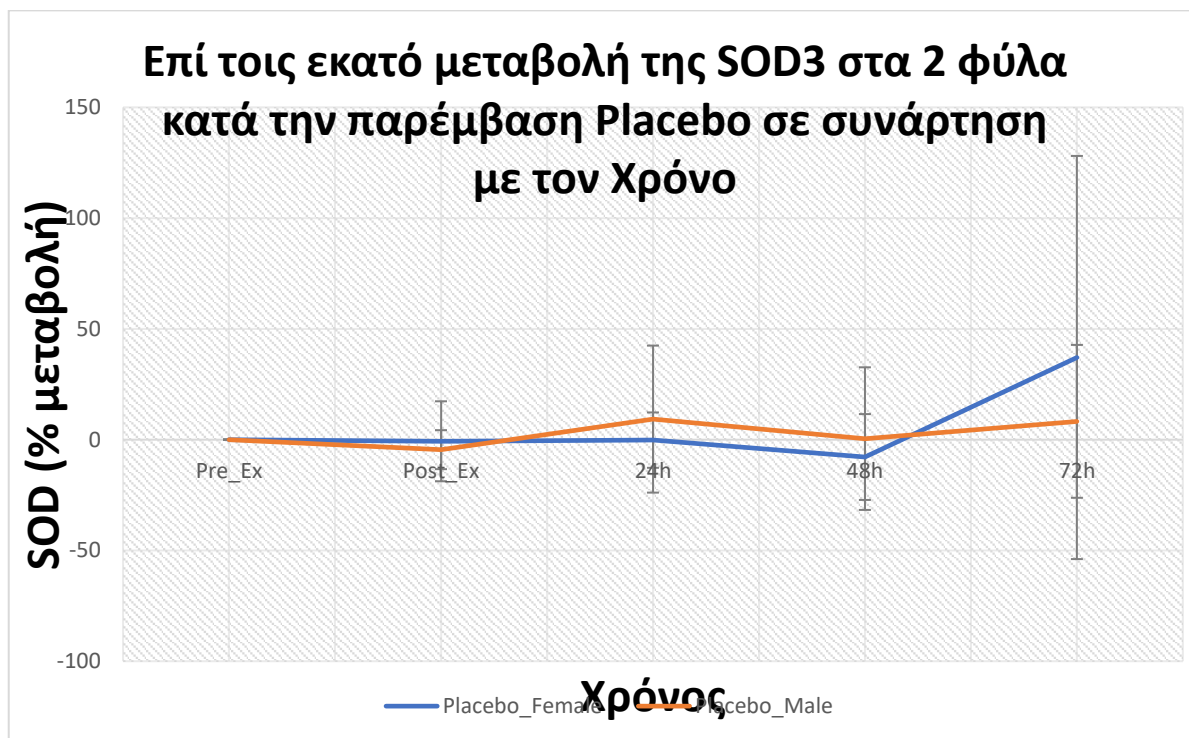
Στα Σχήματα 9 , 10 , 11 και 12 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές συγκέντρωσης καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές συγκέντρωσης της SOD για άνδρες και γυναίκες σε κάθε παρέμβαση ξεχωριστά (Placebo και Spirulina).



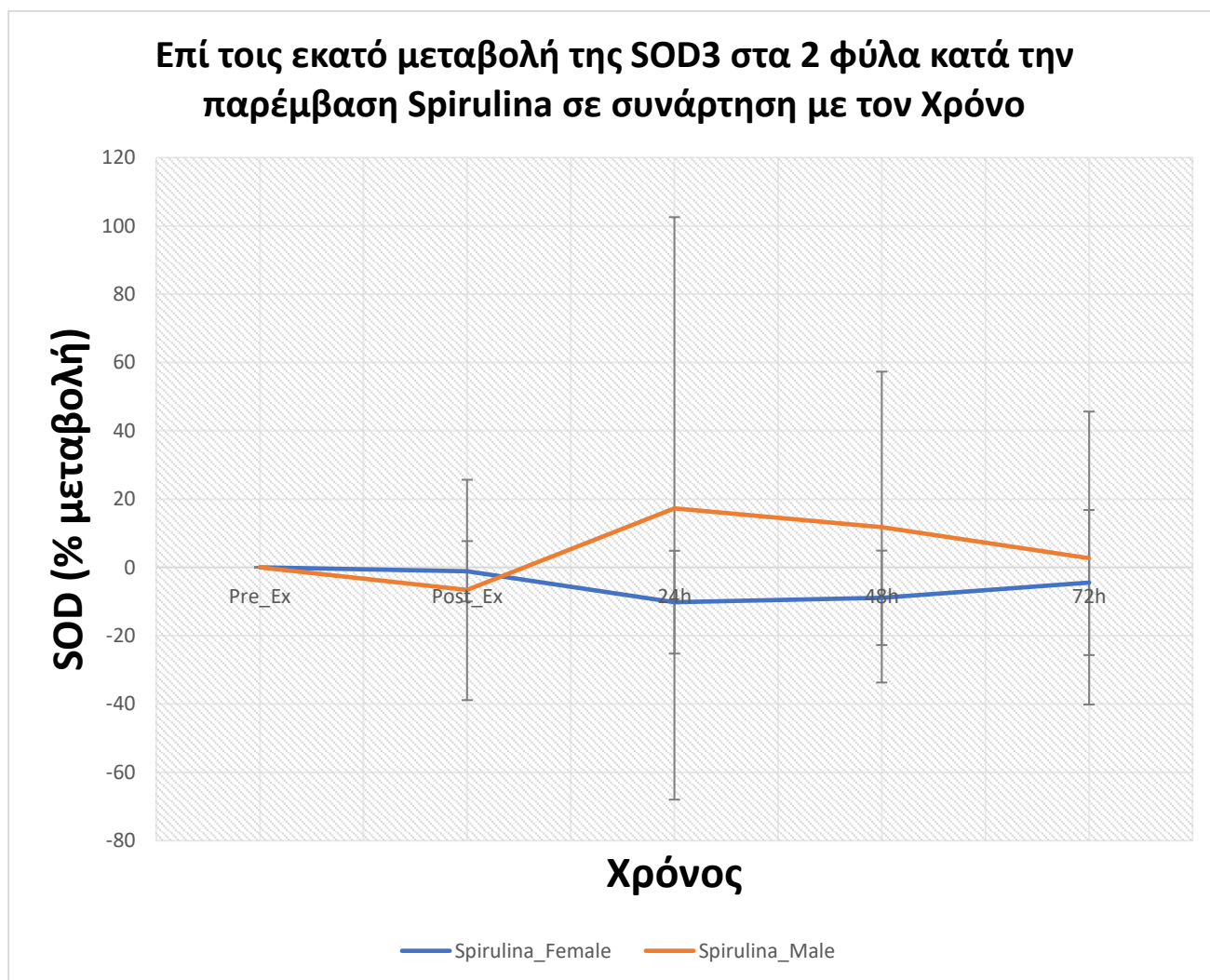
Σχήμα 15 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Placebo για άνδρες (κόκκινο, μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) και για γυναίκες (μπλε, μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) (N=14)



Σχήμα 16 Μεταβολή συγκέντρωσης SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Spirulina για άνδρες (κόκκινο, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση) και για γυναίκες (μπλε, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση) (N=14)



Σχήμα 17 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Placebo για άνδρες (κόκκινο, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση μέσης τιμής) και για γυναίκες (μπλε, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση μέσης τιμής) (N=14)



Σχήμα 18 Ποσοστιαία μεταβολή συγκέντρωσης της SOD σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την παρέμβαση με Spirulina για άνδρες (κόκκινο, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση μέσης τιμής) και για γυναίκες (μπλε, μέση τιμή $\pm$ τυπική απόκλιση μέσης τιμής) (N=14)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στα 2 φύλλα και την μεταβολή των επιπέδων SOD πλάσματος. Βλέπουμε ωστόσο ότι στο δείγμα μας οι γυναίκες ξεκινούν με μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση SOD πλάσματος συγκριτικά με τους άνδρες και στις 2 παρεμβάσεις, χωρίς όμως η διαφορά αυτή να είναι στατιστικά σημαντική.

Σχολιασμός

Το οξειδωτικό στρες, δηλαδή η ανισορροπία οξειδωτικών και αντιοξειδωτικών παραγόντων στο σύστημα, τις τελευταίες δεκαετίες έχει ενοχοποιηθεί ως κύριος ή δευτερεύων μηχανισμός για την πρόκληση πολυάριθμων μη μεταδιδόμενων παθογενειών. Επιπλέον είναι γνωστό ότι η διαδικασία της άσκησης και ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ασκησιογενή μυϊκή βλάβη ωθεί την παραγωγή τόσο οξειδωτικών αλλά και αντιοξειδωτικών παραγόντων σύμφωνα με τα νεότερα επιστημονικά δεδομένα. Παρόλο που η άσκηση ακόμα και όταν οδηγεί σε AMB σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ειπωθεί ότι συνεισφέρει στην επιδείνωση των μη μεταδιδόμενων ασθενειών, εφόσον έχει αποδειχτεί το ακριβώς αντίθετο, αποτελεί τροχοπέδη για την σωματική ακεραιότητα, την ετοιμότητα και την απόδοση των αθλητών. Το συγκεκριμένο πεδίο χρήζει περαιτέρω διερεύνησης από την επιστημονική κοινότητα προκειμένου να γίνουν πλήρως κατανοητοί διάφοροι μηχανισμοί της AMB, των ελευθέρων ριζών με απώτερο σκοπό την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των δυσκολιών και των κινδύνων που έρχονται αντιμέτωποι οι αθλητές. Η πρόκληση AMB για την περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών καθώς και των αλληλεπιδράσεων του συστήματος με εξωγενή συστατικά (πχ δίαιτα, αντιοξειδωτικά συμπληρώματα κ.α.) εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην έρευνα και συγκεκριμένα²¹:

1. Η AMB είναι εύκολα αποδεκτή τόσο από τους εθελοντές όσο και από επιτροπές βιοηθικής. Προκαλείται εύκολα με διάφορες ασκήσεις είτε στο άνω είτε στο κατώτερο μέρος του σώματος. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι η προκαλούμενη φλεγμονή δεν επηρεάζεται από την υγεία, την ηλικία, το φύλο την φυσική κατάσταση και τη σύσταση σώματος των ασθενών.
2. Η AMB προκαλείται εύκολα και σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Ο επιβλέπων επιστήμονας μπορεί να προκαλέσει AMB αναγκάζοντας την επιμήκυνση του μυός με ταυτόχρονη παραγωγή μυϊκής τάσης με τη βοήθεια διαφόρων ερεθισμάτων. Συνήθως απαιτούνται 85-300 πλειομετρικές συστολές μέγιστης προσπάθειας. Η AMB από έκκεντρη άσκηση έχει μεγαλύτερη διάρκεια και ένταση σε σχέση με άλλους τύπους άσκησης. Ταυτόχρονα η έκκεντρη άσκηση προσθέτει ελάχιστο μεταβολικό και καρδιαγγειακό φορτίο στους εθελοντές συγκριτικά με ασκήσεις αντοχής, καθιστώντας την ιδανική και ασφαλή άσκηση για γηραιότερους πληθυσμούς η άτομα που πάσχουν από καρδιαγγειακές παθολογίες.
3. Οι μοριακοί μηχανισμοί της φλεγμονώδους απόκρισης της AMB είναι ικανοποιητικά προσδιορισμένοι.
4. Οι ερευνητές έχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της φλεγμονώδους απόκρισης από την αρχή μέχρι το τέλος μέσα σε ένα ελεγχόμενο και καλά προσδιορισμένο χρονικό πλαίσιο.
5. Η AMB προσφέρει ,εκτός από τα παραδοσιακά δείγματα σάλιου και αίματος, δείγματα βιοψίας που περιλαμβάνουν τον φλεγμαίνων μυϊκό ιστό.
6. Τέλος, η κινητική κλινικών φαινοτύπων (Μείωση Μέσης και Μέγιστης Ροπής, καθυστερημένη έναρξη μυϊκού πόνου, μείωση εύρους κίνησης, περιφέρεια άκρων κ.α.) που συνδέονται με την φλεγμονώδη απάντηση μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί.

Το κυανοβακτήριο με το εμπορικό όνομα Σπειρουλίνα επιλέχθηκε ως συμπλήρωμα ανάμεσα σε άλλους υποψήφιους, εξαιτίας του ιδιαίτερα υψηλού πρωτεϊνικού περιεχομένου της καθώς και της υποσχόμενης αντιοξειδωτικής δράσης της. Ειδικότερα, η σπειρουλίνα φάνηκε να παρέχει μια δοσοεξαρτώμενη προστατευτική δράση στα νεφρά έναντι οξειδωτικού στρες, κυρίως μέσω της μείωσης της υπεροξειδωσής των λιπών και της αύξησης των αντιοξειδωτικών ενζύμων SOD, GSH και CAT, που προκλήθηκε από Cisplatin (φαρμακευτική αγωγή που χρησιμοποιείται σε σχήματα χημειοθεραπείας) σε μοντέλα ποντικών^{22,23}. Άλλη έρευνα αξιολόγησε την επίδραση της σπειρουλίνας στη χρόνια νεφρική νόσο και την καρδιαγγειακή νόσο. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η σπειρουλίνα παρείχε σημαντική προστασία ενάντια στις 2 παθολογίες μέσω της αντιοξειδωτικής δράσης των συστατικών της όπως η φυκοκυανίνη, το β-καροτένιο και οι φυκοχλοπρωτεΐνες²⁴.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν αφενός η διερεύνηση της επίδρασης της χορήγησης συμπληρώματος *Spirulina Nigrita* στα επίπεδα του αντιοξειδωτικού ενζύμου υπεροξειδική δισμουτάση στο πλάσμα υγιών εθελοντών ύστερα από 14 ημέρες χορήγησης, και αφετέρου η διερεύνηση της επίδρασης του συμπληρώματος στο ίδιο ένζυμο ύστερα από την πρόκληση ασκησιογενούς μυϊκής βλάβης μέσω ενός πρωτοκόλλου έκκεντρης κάμψης του αγκώνα του μη επιδέξιου άνω άκρου των εθελοντών.

Η επιλογή του πρωτοκόλλου άσκησης και του αριθμού των έκκεντρων επαναλήψεων για την πρόκληση της AMB έγινε βάσει της βιβλιογραφίας, καθώς έχει βρεθεί ως ο βέλτιστος τρόπος πρόκλησης υψηλής και παρατεταμένης AMB. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η έκκεντρη κάμψη του αγκώνα στο μη επιδέξιο άνω άκρο για την πρόκληση της AMB. Η επιλογή του μη επιδέξιου άνω άκρου, εκτός από τους προαναφερθέντες λόγους, έγινε λόγω της ευκολίας πρόκλησης AMB καθώς ο βραχιόνιος μυς μη προπονημένων ατόμων δεν είναι εξοικειωμένος σε έκκεντρες δραστηριότητες όπως οι μύες των κάτω άκρων οι οποίοι εκτελούν έκκεντρες κινήσεις καθημερινά²¹.

8.1. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

8.1.1. Επίδραση της χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 η χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας δεν φάνηκε να επηρεάζει στατιστικά σημαντικά κανένα από τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά των εθελοντών ύστερα από 14 ημέρες χορήγησης συγκριτικά με το εικονικό σκεύασμα.

Παρόλο που τα ευρήματα της μελέτης μας δεν ήταν σύμφωνα με αυτά της μελέτης επισκόπησης των Zarezadeh et al.²⁵, η ετερογένεια αυτή μπορεί να αποδοθεί σε μια ποικιλία παραγόντων. Ανάμεσα στους σημαντικότερους βρίσκονται η δόση και η διάρκεια της παρέμβασης, με τον δεύτερο να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα όσον αφορά το βάρος. Συγκεκριμένα η παραπάνω επισκόπηση αναφέρει ότι η χορήγηση σπειρουλίνας οδηγεί σε μια σημαντική μείωση του βάρους, ιδιαίτερα όταν η διάρκεια χορήγησης είναι τουλάχιστον 12 εβδομάδες, η δόση είναι $\geq 2\text{g}/\text{ημέρα}$ και η ηλικία των συμμετεχόντων είναι ≥ 40 έτη. Παρόμοια ήταν τα ευρήματα της παραπάνω επισκόπησης για την επίδραση της σπειρουλίνας στο ΔΜΣ.

Έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί για την δράση που παρέχει η σπειρουλίνα σε ανθρωπομετρικούς δείκτες όπως το Βάρος, ο ΔΜΣ και η περιφέρεια μέσης. Ένας από αυτούς οφείλεται στην ίδια τη σύσταση της σπειρουλίνας η οποία εξαιτίας του υψηλού πρωτεϊνικού περιεχομένου της προκαλεί την έκκριση της χολοκυστοκίνης (CCK) από τα εκκριτικά κύτταρα του δωδεκαδακτύλου. Η χολοκυστοκίνη μεταφέρει ερεθίσματα στον εγκέφαλο μέσω των νευρώνων, περιορίζοντας την βραχυπρόθεσμη λήψη τροφής. Επιπλέον, είναι γνωστή η προστασία που παρέχουν τα ω-3 λιπαρά οξέα από τη νόσο της παχυσαρκίας. Τα ω-3 λιπαρά οξέα μέσω της αρνητικής ρύθμισης των λιπογονικών γονιδίων, των αλλαγών στη σύνθεση ή/και στην αποθήκευση των λιπαρών οξέων, αποτρέπουν τη συσσώρευση κοιλιακού λίπους. Τέλος, η σπειρουλίνα μέσω των αντιφλεγμονωδών συστατικών της (πχ. πολυφαινόλες) μειώνει την παχυσαρκία που σχετίζεται με φλεγμονή.

8.1.2. Επίδραση χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στους μεταβολικούς δείκτες.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2 η χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας δεν επέφερε κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά στους μεταβολικούς δείκτες των εθελοντών σε σύγκριση με την παρέμβαση με το εικονικό σκεύασμα. Τα ευρήματα αυτά δεν συμφωνούν με την μελέτη επισκόπησης των Bohorquez et al.²⁶ όπου η χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας συσχετίστηκε με στατιστικά σημαντική μείωση των επιπέδων των τριγλυκεριδίων και της ολικής χοληστερόλης. Η ασυμφωνία αυτή πιθανόν να οφείλεται στα διαφορετικά δείγματα των 2 μελετών, η δική μας μελέτη περιλάμβανε υγιείς νέους εθελοντές ενώ αντίθετα η μελέτη επισκόπησης εξέτασε τυχαιοποιημένες κλινικές μελέτες (RCTs) με παχύσαρκους και διαβητικούς εθελοντές.

8.1.3. Επίδραση της χορήγησης συμπληρώματος Σπειρουλίνας στο αντιοξειδωτικό ένζυμο SOD.

Παρατηρούμε στο Σχήμα 3 ότι δεν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά στα επίπεδα SOD πλάσματος πριν και 14 ημέρες μετά την χορήγηση σπειρουλίνας συγκριτικά με την παρέμβαση placebo. Σύμφωνα με την μετά-ανάλυση των Naeini et al.²⁷ η συμπληρωματική χορήγηση Σπειρουλίνας οδήγησε σε οριακή αύξηση της δραστηριότητας του ενζύμου SOD, αλλά ήταν στατιστικά σημαντική μόνο όταν ο ΔΜΣ των εθελοντών ήταν μικρότερος από 25 Kg/m², η ηλικία των συμμετεχόντων ήταν μεγαλύτερη από 40 έτη και η χορηγούμενη δόση ήταν μεγαλύτερη από 5 g/ημέρα. Η δική μας έρευνα δεν ήταν απολύτως σύμφωνη με τις παραπάνω προϋποθέσεις εφόσον η δόση και η ηλικία των συμμετεχόντων ήταν μικρότερες από τις προτεινόμενες, γεγονός που ίσως δικαιολογεί εν μέρει το γεγονός ότι δεν φάνηκε κάποια διαφορά στη δραστηριότητα του ενζύμου πριν και μετά τη χορήγηση συμπληρώματος σπειρουλίνας.

Ο μηχανισμός με τον οποίο η χορήγηση συμπληρώματος Σπειρουλίνας επάγει την αύξηση της δραστηριότητας του ενζύμου SOD δεν είναι ξεκάθαρος. Ωστόσο έχει διατυπωθεί ότι η φυκοκυανίνη-C, μια πρωτεΐνη που περιέχεται στην Σπειρουλίνα, εκτός από την μη ενζυμική αντιοξειδωτική ιδιότητα που παρουσιάζει σαν μόριο σε κυτταρικά μοντέλα εμφάνισε περαιτέρω αντιοξειδωτική ικανότητα ρυθμίζοντας την δραστηριότητα αντιοξειδωτικών ενζύμων (SOD, CAT, GPx)²⁸. Όντως παρόμοια ευρήματα υποστηρίζονται από την μελέτη των Grover et al.²⁹ όπου συμπληρωματική χορήγηση φυκοκυανίνης-C με δόσεις τουλάχιστον 500 mg/Kg οδήγησαν σε

στατιστικά σημαντική αύξηση του αντιοξειδωτικού ενζύμου SOD σε ποντικούς. Ίσως το παραπάνω εύρημα εξηγεί και την ετερογένεια που οφείλεται στη δοσολογία της συμπληρωματικής χορήγησης σπειρουλίνας. Συγκεκριμένα, από την μελέτη των Khandual et al.³⁰ το περιεχόμενο φυκοκυανίνης-C στη σπειρουλίνα είναι 0,286 g/g σπειρουλίνας A. Platensis και σύμφωνα με τα παραπάνω δόσεις τουλάχιστον 500 mg/Kg απαιτούνται για την στατιστικά σημαντική αύξηση της δραστηριότητας του ενζύμου SOD. Επομένως κατά κάποιον τρόπο επαληθεύεται το εύρημα ότι δόσεις άνω των 5g/ημέρα (~1430mg Φυκοκυανίνης) σε άτομα με φυσιολογικό BMI πιθανόν οδηγούν στην αύξηση δραστηριότητας του ενζύμου SOD.

8.1.4. Επίδραση της συμπληρωματικής χορήγησης σπειρουλίνας στη μεταβολή της δραστηριότητας SOD μετά το πρωτόκολλο AMB.

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7 και 8 η μελέτη μας δεν έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές στην μεταβολή της δραστηριότητας SOD πλάσματος ανάμεσα στην παρέμβαση με σπειρουλίνα και την παρέμβαση με εικονικό σκεύασμα.

Ωστόσο, τόσο στις απόλυτες όσο και στις ποσοστιαίες τιμές της μεταβολής της δραστηριότητας της SOD παρατηρήθηκε μια τάση για αύξηση της δραστηριότητας από την μέτρηση των 48h μέχρι την μέτρηση των 72h μόνο στην παρέμβαση με Placebo, χωρίς όμως να είναι στατιστικά σημαντική. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό το εύρημα ίσως να οφείλεται στην αντιοξειδωτική ικανότητα της σπειρουλίνας. Ειδικότερα, στην παρέμβαση με σπειρουλίνα το γεγονός ότι δεν σημειώνεται παρόμοια τάση για αύξηση της δραστηριότητας SOD πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η ίδια η σπειρουλίνα λειτουργήσει σαν αντιοξειδωτικός παράγοντας με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η αύξηση της δραστηριότητας SOD για την αποκατάσταση της οξειδωτικής ισορροπίας μετά την άσκηση. Δηλαδή επηρεάζοντας έναν μηχανισμό αρνητικής ανατροφοδότησης η πιθανή και αναμενόμενη μείωση των ROS εξαιτίας της σπειρουλίνας, δεν επέφερε αύξηση στην δραστηριότητα του ενζύμου SOD.

Όσον αφορά την δραστηριότητα της SOD πλάσματος, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές εξαιτίας της άσκησης στα χρονικά σημεία όπου ελήφθησαν δείγματα αίματος. Το εύρημα αυτό υποστηρίζεται και από την μελέτη των Wadley et al.³¹, η οποία αναφέρει ότι η δραστηριότητα του ενζύμου SOD πλάσματος μεταβάλλεται στατιστικά σημαντικά μόνο ύστερα από υψηλής έντασης αερόβια άσκηση ποδηλασίας, όχι όμως ύστερα από μέτριας έντασης αερόβια άσκηση ή έκκεντρη άσκηση για πρόκληση μυϊκής βλάβης όπως το δικό μας πρωτόκολλο. Τα μέχρι στιγμής δεδομένα προτείνουν ότι η άσκηση πιθανόν να ενεργοποιεί ένα μεταβολικό μονοπάτι που περιέχει το ενδοπλασματικό δίκτυο και τη συσκευή Golgi για την έκκριση του ενζύμου SOD πλάσματος με τρόπο εξαρτώμενο από την ένταση της άσκησης. Το ένζυμο SOD στη συνέχεια απελευθερώνεται κατευθείαν μέσω της πλασματικής μεμβράνης με σκοπό να μεταβολίσει τα ανιόντα ρίζας σουπεροξειδίου που παράχθηκαν μέσω της άσκησης³¹.

8.1.5. Επίδραση του φύλου στη δραστηριότητα του ενζύμου SOD.

Στα Σχήματα 9, 10, 11 και 12 φαίνεται ότι το φύλο δεν επιδρά με κάποιον τρόπο στην δραστηριότητα και τη μεταβολή του ενζύμου SOD πλάσματος και στις 2 παρεμβάσεις. Αξιοσημείωτο είναι ωστόσο να αναφερθεί ότι υπάρχει μια τάση οι γυναίκες παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του ενζύμου SOD πλάσματος, χωρίς όμως να είναι στατιστικά σημαντικές.

Η μελέτη των Viña et al.³² αναφέρει ότι τα μιτοχόνδρια των γυναικών παράγουν περίπου την μισή ποσότητα υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂) σε σύγκριση με τους άνδρες. Ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για αυτή τη διαφοροποίηση είναι κυρίως οι ορμόνες του γυναικείου φύλου. Τα οιστρογόνα έχει αποδειχτεί ότι παρέχουν μια αντιοξειδωτική δράση μέσω της ικανότητάς τους να ρυθμίζουν την έκφραση των ενζύμων SOD και GPx. Συγκεκριμένα, τα οιστρογόνα έχουν μια θετική επίδραση στην έκφραση των παραπάνω ενζύμων στα μιτοχόνδρια μέσω της ενεργοποίησης του μεταβολικού μονοπατιού του πυρηνικού παράγοντα κ-B (NF-κB). Πιθανόν αυτός ο μηχανισμός να εξηγεί το παραπάνω εύρημα της μελέτης μας.

8.1.6. Αξιολόγηση της συσχέτισης ανθρωπομετρικών και μεταβολικών χαρακτηριστικών των εθελοντών με τη δραστικότητα SOD στις 2 παρεμβάσεις.

Στους Πίνακες 3 και 4 παρατηρούμε ότι τόσο στην παρέμβαση με το εικονικό σκεύασμα όσο και στην παρέμβαση με σπειρουλίνα δεν υπάρχει κάποιο ανθρωπομετρικό χαρακτηριστικό ή μεταβολικός δείκτης που να εμφανίζει μια στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τα επίπεδα SOD στο πλάσμα.

Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει μια τάση τόσο στην παρέμβαση με placebo όσο και στην παρέμβαση με σπειρουλίνα, η μέση ροπή και η μέγιστη ροπή να συσχετίζονται αρνητικά με τα επίπεδα SOD πλάσματος. Η εξήγηση για το εύρημα αυτό, πιθανόν να βρίσκεται στο γεγονός ότι η μέση και η μέγιστη ροπή είναι δείκτες ενδεικτικοί της φυσικής κατάστασης των εθελοντών. Δηλαδή, είναι λογικό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μέση και η μέγιστη ροπή των εθελοντών, τόσο καλύτερη είναι η φυσική τους κατάσταση με άμεσο αποτέλεσμα να έχουν καλύτερο οξειδωτικό προφίλ και να επιτυγχάνουν οξειδωτική ισορροπία με μικρότερες συγκεντρώσεις SOD πλάσματος σε σχέση με πιο αγύμναστους εθελοντές.

8.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μελέτης

Τα πλεονεκτήματα της μελέτης ήταν:

- ❖ Ήταν μια διπλά τυφλή μελέτη, δηλαδή ούτε ο επιβλέπων επιστήμονας αλλά ούτε και οι εθελοντές γνώριζαν εάν λαμβάνουν την παρέμβαση με σπειρουλίνα ή την παρέμβαση με placebo. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίστηκε η αντικειμενικότητα της μελέτης.
- ❖ Το δείγμα της μελέτης αποτελούνταν από υγιή, νέα άτομα με φυσιολογικό ΔΜΣ, μέτριο κινητικό προφίλ και τα οποία δεν κάπνιζαν, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ετερογένεια ανάμεσα στα ευρήματα της μελέτης εξαιτίας των χαρακτηριστικών των εθελοντών.
- ❖ Η δοσολογία της χορήγησης συμπληρώματος σπειρουλίνας καθορίστηκε με βάση το σωματικό βάρος εξατομικευμένα για τον κάθε εθελοντή, συμβάλλοντας στην περαιτέρω μείωση της ετερογένειας των αποτελεσμάτων.
- ❖ Το πρωτόκολλο πρόκλησης AMB καθώς και η διαδικασία εφαρμογής του από τους ερευνητές σε συνεργασία με τους εθελοντές επιτέλεσε αποτελεσματικά τον στόχο του, όπως αποδείχθηκε και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, χωρίς ωστόσο να έχει αρνητική επίδραση στην καθημερινότητα των εθελοντών. Έτσι, η πλειοψηφία των

συμμετεχόντων κατάφερε να ολοκληρώσει αποτελεσματικά και τα δυο σκέλη της μελέτης.

Τα μειονεκτήματα της μελέτης ήταν:

- ❖ Ο μικρός αριθμός συμμετεχόντων και η διαφορά μεταξύ ανδρών και γυναικών του δείγματος (6 γυναίκες, 8 άνδρες), με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η στατιστική σημαντικότητα των παρατηρήσεων στις διάφορες μετρήσεις.

Συμπεράσματα

Οι εθελοντές της μελέτης υποβλήθηκαν σε πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης με σκοπό την πρόκληση AMB, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της χορήγησης συμπληρώματος *Spirulina Nigrita* στο αντιοξειδωτικό ένζυμο SOD πλάσματος σε συνθήκες AMB. Το πρωτόκολλο έκκεντρης άσκησης λειτούργησε με επιτυχία όπως αποδείχτηκε από τους εργομετρικούς δείκτες της Μέσης Ροπής και της Αντίληψης Πόνου (VAS). Η δραστηριότητα του ενζύμου SOD πλάσματος δεν φάνηκε να διαφοροποιείται στατιστικά σημαντικά ανάμεσα στις 2 παρεμβάσεις (*Spirulina* & Placebo), χωρίς όμως αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι η συμπληρωματική χορήγηση σπειρουλίνας δεν έχει αντιοξειδωτική δράση εφόσον η ερμηνεία είναι διττή. Στην περίπτωση των ανθρωπομετρικών και μεταβολικών χαρακτηριστικών επίσης δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις 2 παρεμβάσεις. Επιπλέον, μετά την ανάλυση υποομάδων παρατηρήθηκε μια τάση των γυναικών να έχουν αυξημένη δραστηριότητα του ενζύμου SOD στο πλάσμα. Μελλοντικές προοπτικές της μελέτης αποτελούν η μέτρηση άλλων αντιοξειδωτικών ενζύμων όπως η GPx, CAT, PRDX-2, PRDX-4 και πιθανόν σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα άσκησης αντοχής υψηλής έντασης. Τέλος, απαιτούνται περισσότερες μελέτες οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψιν τα κυριότερα συστατικά της σπειρουλίνας όπως η φυκοκυανίνη-C, το β-καροτένιο κ.α. πιθανόν συγκρίνοντας ξεχωριστά την συμπληρωματική χορήγηση των συστατικών αυτών με την χορήγηση σπειρουλίνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Widmaier, E., Raff, H., & Strang, K. (n.d.). *Vander's Φυσιολογία του Ανθρώπου Οι Μηχανισμοί του Σώματος* (Ν. Γελαδάς, Ed.; 2η Ελληνική Έκδοση).
2. Stožer, A., Vodopivec, P., & Bombek, L. K. (2020). Pathophysiology of exercise-induced muscle damage and its structural, functional, metabolic, and clinical consequences. *Physiological Research*, 69(4), 565–598. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934371>
3. Owens, D. J., Twist, C., Cobley, J. N., Howatson, G., & Close, G. L. (2019). Exercise-induced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions? *European Journal of Sport Science*, 19(1), 71–85. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1505957>
4. *Lengthtension.jpg (600×368)*. (n.d.). Retrieved September 27, 2022, from <https://0d281b8236.cbault-cdnwnd.com/fc7d557c40ff4d28eeaf9bcfea4307d2/200000024-7545175c17/lengthtension.jpg>
5. *Img8_6.jpg (1135×803)*. (n.d.). Retrieved September 27, 2022, from http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2666/Biologia_A-Lykeiou_html-empl/images/img8_6.jpg
6. Markus, I., Constantini, K., Hoffman, J. R., Bartolomei, S., & Gepner, Y. (2021). Exercise-induced muscle damage: Mechanism, assessment and nutritional factors to accelerate recovery. *European Journal of Applied Physiology*, 121(4), 969–992. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04566-4>
7. ECSS .tv (Director). (2019). *IS-PM04 - Exercise-induced muscle damage: What is it, how is it detected, and why is it induced?* <https://www.youtube.com/watch?v=DDJM-bBYIC0>
8. Simmons, R., Doma, K., Sinclair, W., Connor, J., & Leicht, A. (2021). Acute Effects of Training Loads on Muscle Damage Markers and Performance in Semi-elite and Elite Athletes: A Systematic Review and

Meta-analysis. *Sports Medicine*, 51(10), 2181–2207.

<https://doi.org/10.1007/s40279-021-01486-x>

9. Γαλάρης, Δ. (n.d.). *Ελεύθερες Ρίζες και Οξειδωτικό Στρες*.

10. Powers, S. K., Deminice, R., Ozdemir, M., Yoshihara, T., Bomkamp, M. P., & Hyatt, H. (2020). Exercise-induced oxidative stress: Friend or foe? *Journal of Sport and Health Science*, 9(5), 415–425.

<https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.04.001>

11. Vargas-Mendoza, N., Angeles-Valencia, M., Morales-González, Á., Madrigal-Santillán, E. O., Morales-Martínez, M., Madrigal-Bujaidar, E., Álvarez-González, I., Gutiérrez-Salinas, J., Esquivel-Chirino, C., Chamorro-Cevallos, G., Cristóbal-Luna, J. M., & Morales-González, J. A. (2021). Oxidative stress, mitochondrial function and adaptation to exercise: New perspectives in nutrition. *Life*, 11(11).

<https://doi.org/10.3390/life11111269>

12. Powers, S. K., & Jackson, M. J. (2008). Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiological Reviews*, 88(4), 1243.

<https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007>

13. Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., González-López, C., & Acién-Fernández, F. G. (2020). Spirulina for the food and functional food industries. *Food Research International*, 137.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>

14. Simpore, J., Kabore, F., Zongo, F., Dansou, D., Bere, A., Pignatelli, S., Biondi, D. M., Ruberto, G., & Musumeci, S. (2006). Nutrition rehabilitation of undernourished children utilizing Spiruline and Misola. *Nutrition Journal*, 5. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-5-3>

15. Cysewski, G. R. (n.d.). *Commercial Production of Spirulina*.

16. Naeini, F., Zarezadeh, M., Mohiti, S., Tutunchi, H., Ebrahimi Mamaghani, M., & Ostadrahimi, A. (2021). Spirulina supplementation as an adjuvant therapy in enhancement of antioxidant capacity: A

systematic review and meta-analysis of controlled clinical trials.

International Journal of Clinical Practice, 75(10).

<https://doi.org/10.1111/ijcp.14618>

17. Gurney, T., & Spendiff, O. (2022). Algae Supplementation for Exercise Performance: Current Perspectives and Future Directions for Spirulina and Chlorella. *Frontiers in Nutrition*, 9.

<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.865741>

18. Gurney, T., & Spendiff, O. (2020). Spirulina supplementation improves oxygen uptake in arm cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 120(12), 2657–2664.

<https://doi.org/10.1007/s00421-020-04487-2>

19. Chaouachi, M., Gautier, S., Carnot, Y., Guillemot, P., Pincemail, J., Moison, Y., Collin, T., Groussard, C., & Vincent, S. (2022). Spirulina supplementation prevents exercise-induced lipid peroxidation, inflammation and skeletal muscle damage in elite rugby players.

Journal of Human Nutrition and Dietetics.

<https://doi.org/10.1111/jhn.13014>

20. Pappas, A., Tsiokanos, A., Fatouros, I. G., Poullos, A., Kouretas, D., Goutzourelas, N., Giakas, G., & Jamurtas, A. Z. (2021). The effects of spirulina supplementation on redox status and performance following a muscle damaging protocol. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.3390/ijms22073559>

21. Methenitis, S., Stergiou, I., Antonopoulou, S., & Nomikos, T. (2021). Can Exercise-Induced Muscle Damage Be a Good Model for the Investigation of the Anti-Inflammatory Properties of Diet in Humans? *Biomedicines*, 9(1), 36. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9010036>

22. Kuhad, A., Tirkey, N., Pilkhwal, S., & Chopra, K. (2006). Renoprotective Effect of *Spirulina fusiformis* on Cisplatin-Induced Oxidative Stress and Renal Dysfunction in Rats. *Renal Failure*, 28(3), 247–254. <https://doi.org/10.1080/08860220600580399>

23. Fais, G., Manca, A., Bolognesi, F., Borselli, M., Concas, A., Busutti, M., Broggi, G., Sanna, P., Castillo-Aleman, Y. M., Rivero-Jiménez, R. A., Bencomo-Hernandez, A. A., Ventura-Carmenate, Y., Altea, M., Pantaleo, A., Gabrielli, G., Biglioli, F., Cao, G., & Giannaccare, G. (2022). Wide Range Applications of Spirulina: From Earth to Space Missions. *Marine Drugs*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/md20050299>
24. Memije-Lazaro, I. N., Blas-Valdivia, V., Franco-Colín, M., & Cano-Europa, E. (2018). Arthrospira maxima (Spirulina) and C-phycocyanin prevent the progression of chronic kidney disease and its cardiovascular complications. *Journal of Functional Foods*, 43, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.01.013>
25. Zarezadeh, M., Faghfour, A. H., Radkhah, N., Foroumandi, E., Khorshidi, M., Rasouli, A., Zarei, M., Mohammadzadeh Honarvar, N., Hazhir Karzar, N., & Ebrahimi Mamaghani, M. (2021). Spirulina supplementation and anthropometric indices: A systematic review and meta-analysis of controlled clinical trials. *Phytotherapy Research*, 35(2), 577–586. <https://doi.org/10.1002/ptr.6834>
26. Bohorquez, S., Bohorquez-Medina, A. L., Benites-Zapata, V., Ignacio-Cconchoy, F., Toro-Huamanchumo, C., Bendezu-Quispe, G., Pacheco-Mendoza, J., & Hernandez, A. (2021). Impact of spirulina supplementation on obesity-related metabolic disorders: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *NFS Journal*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.09.003>
27. Naeini, F., Zarezadeh, M., Mohiti, S., Tutunchi, H., Ebrahimi Mamaghani, M., & Ostadrahimi, A. (2021). Spirulina supplementation as an adjuvant therapy in enhancement of antioxidant capacity: A systematic review and meta-analysis of controlled clinical trials. *International Journal of Clinical Practice*, 75(10), e14618. <https://doi.org/10.1111/ijcp.14618>
28. Finamore, A., Palmery, M., Bensehaila, S., & Peluso, I. (2017). Antioxidant, Immunomodulating, and Microbial-Modulating Activities

of the Sustainable and Ecofriendly *Spirulina*. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, e3247528.

<https://doi.org/10.1155/2017/3247528>

29. Grover, P., Bhatnagar, A., Kumari, N., Narayan Bhatt, A., Kumar Nishad, D., & Purkayastha, J. (2021). C-Phycocyanin-a novel protein from *Spirulina platensis*- In vivo toxicity, antioxidant and immunomodulatory studies. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1853–1859. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.037>

30. Khandual, S., Sanchez, E. O. L., Andrews, H. E., & de la Rosa, J. D. P. (2021). Phycocyanin content and nutritional profile of *Arthrospira platensis* from Mexico: Efficient extraction process and stability evaluation of phycocyanin. *BMC Chemistry*, 15(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s13065-021-00746-1>

31. Wadley, A. J., Keane, G., Cullen, T., James, L., Vautrinot, J., Davies, M., Hussey, B., Hunter, D. J., Mastana, S., Holliday, A., Petersen, S. V., Bishop, N. C., Lindley, M. R., & Coles, S. J. (2019). Characterization of extracellular redox enzyme concentrations in response to exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 127(3), 858–866. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00340.2019>

32. Viña, J., Borrás, C., Gambini, J., Sastre, J., & Pallardó, F. V. (2005). Why females live longer than males? Importance of the upregulation of longevity-associated genes by oestrogenic compounds. *FEBS Letters*, 579(12), 2541–2545. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2005.03.090>