



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Διαιτολογίας και Διατροφολογίας



ΤΜΗΜΑ ΔΙΑΙΤΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Οι Επιπτώσεις της Χορήγησης Συμπληρώματος Βιταμίνης D στην Απόδοση Αθλητών Ποδηλασίας

The Effects of Vitamin D Supplementation on the Performance of Cyclists

Κυριλής Μάριος (3520014)
Μαρινάκης Δημήτριος (3520073)
Στεργίου Ολύμπιος (3520100)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Πέτρος Ντίνας, PhD
Εξωτερικός Διδάσκοντας Τμήματος Διαιτολογίας και Διατροφολογίας, Πανεπιστημίου
Θεσσαλίας

Τρίκαλα, 2025

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Βιταμίνη D	5
1.2 Μεταβολισμός & Σύνθεση Βιταμίνης D.....	6
1.3 Μηχανισμός Δράσης Βιταμίνης D.....	7
1.4 Η Σημασία της Βιταμίνης D για τους Αθλητές.....	9
1.4.1 Οστική Υγεία	9
1.4.2 Κατάγματα λόγω στρες	9
1.4.3 Λειτουργία & Ανάπλαση Σκελετικών Μυών	10
1.4.4 Μυοσκελετικοί Τραυματισμοί & Αποκατάσταση	12
1.4.5 Ανοσοποιητικό Σύστημα.....	14
1.4.6 Φλεγμονή.....	17
1.4.7 Μυϊκή Δύναμη & Ισχύς	17
1.4.8 Μέγιστη Πρόσληψη Οξυγόνου (VO2max) & Καρδιοαναπνευστική Ικανότητα (CRF)	18
1.4.9 Νευρικό Σύστημα.....	20
1.4.10 Καρδιαγγειακή Λειτουργία.....	20
1.5 Η Σχέση της Βιταμίνης D με την Οστική Πυκνότητα (BMD) και Περιεκτικότητα σε Ανόργανα Αλατα (BMC) σε Επαγγελματίες Ποδηλάτες	22
1.6 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατάσταση Βιταμίνης D στους Αθλητές.....	26
1.7 Ανεπάρκεια Βιταμίνης D στον Αθλητικό Πληθυσμό	28
1.8 Ανεπάρκεια Βιταμίνης D στους Αθλητές Ποδηλασίας (Ερευνητικά Δεδομένα)	31
1.9 Κατάσταση Βιταμίνης D στους Αθλητές	32
1.10 Συμπληρωματική Χορήγηση Βιταμίνης D & Αθλητική Απόδοση (Ερευνητικά Δεδομένα) ..	34
2. Υλικά και Μεθοδολογία	37
2.1 Διαδικασίες Αναζήτησης και Επιλογής Μελετών	37
2.2 Κριτήρια Επιλογής και Αποκλεισμού Μελετών.....	37
2.3 Εξαγωγή Δεδομένων.....	37
3. Αποτελέσματα.....	41
3.1 Αποτελέσματα Αναζήτησης και Επιλογής Μελετών.....	41
3.2 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Μελετών	42
3.3 Σύνθεση Αποτελεσμάτων.....	42
4. Συζήτηση	53
4.1 Σύνοψη των κυριότερων ευρημάτων	53
4.2 Δυνατά Σημεία και Πιθανή Μεροληψία στη Διαδικασία Ανασκόπησης.....	53
4.3 Συστάσεις Συμπληρωματικής Λήψης Βιταμίνης D για Βελτιστοποίηση της Αθλητικής Απόδοσης.....	54
5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	57

Βιβλιογραφία	58
--------------------	----

Περίληψη

Τα ερευνητικά δεδομένα υποδεικνύουν πως η διατήρηση της συγκέντρωσης της βιταμίνης D ορού σε επαρκή επίπεδα, είτε η λήψη βιταμίνης D με την μορφή συμπληρώματος, μπορεί να έχει ευεργετική επίδραση στην απόδοση σε επαγγελματίες αθλητές. Ωστόσο, η γνώση γύρω από το αν υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της βιταμίνης D και της απόδοσης των αθλητών ποδηλασίας, είναι αρκετά περιορισμένη. Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι να εξετάσει την πιθανή επίδραση της λήψης συμπληρωμάτων βιταμίνης D στην απόδοση των αθλητών ποδηλασίας. Για την διαδικασία αναζήτησης, αξιοποιήθηκαν οι βάσεις επιστημονικών δεδομένων PubMed, Cochrane Library και Google Scholar, από τις οποίες αντλήθηκαν συνολικά 295 δημοσιεύσεις. Από αυτές κρίθηκαν κατάλληλες οι 25. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D μπορεί να βελτιώσει την αθλητική απόδοση, καθώς φαίνεται να υπάρχει μια θετική συσχέτιση με την αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού, τη μείωση της φλεγμονής, τη βελτίωση της καρδιοαναπνευστικής ικανότητας μέσω της αύξησης της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου και την αύξηση της μυϊκής δύναμης των κάτω άκρων. Παρατηρήθηκε επίσης πως ο συνδυασμός συμπληρώματος βιταμίνης D και προπόνησης με αντιστάσεις, μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός στην βελτίωση της απόδοσης, μέσω της αύξησης της VO₂max και της αύξησης του όγκου του τετρακέφαλου, η οποία συμβάλλει στην βελτίωση του χρόνου καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικά ευρήματα που να υποδεικνύουν ότι η βιταμίνη D σχετίζεται με βελτιωμένη οστική πυκνότητα ή με αλλαγές στη σύσταση σώματος. Η σύνθεση των δεδομένων παρείχε περιορισμένα στοιχεία για την απάντηση στο ερευνητικό μας ερώτημα. Δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το αν η συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D έχει θετική επίδραση στην απόδοση αθλητών ποδηλασίας, λόγω μεγάλης ετερογένειας του δείγματος, όσον αφορά τα αθλήματα. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο ανάδειξης της περιορισμένης γνώσης στον συγκεκριμένο ερευνητικό τομέα και της ανάγκης για περισσότερες και πιο στοχευμένες μελέτες.

Λέξεις κλειδιά: βιταμίνη D, συμπληρώματα, ποδηλασία, αθλητική απόδοση, αερόβια ικανότητα

Abstract

Research evidence suggests that maintaining serum vitamin D concentrations at adequate levels, or the intake of vitamin D in the form of supplementation, may exert beneficial effects on performance in professional athletes. However, knowledge regarding whether a positive association exists between vitamin D and the performance of cycling athletes remains rather limited. The aim of the present thesis is to examine the potential effect of vitamin D supplementation on the performance of elite cyclists. For the literature search, the scientific databases PubMed, Cochrane Library, and Google Scholar were utilized, yielding a total of 295 publications, of which 25 were deemed eligible. The results indicated that vitamin D supplementation may enhance athletic performance, as there appears to be a positive association with increased serum vitamin D concentration, reduction of inflammation, improvement of cardiorespiratory fitness through increased maximal oxygen uptake (VO₂max) and enhanced lower-limb muscle strength. It was also observed that the combination of vitamin D supplementation and resistance training may be particularly effective in improving performance by increasing VO₂max and quadriceps volume, which contributes to improved time performance by enabling greater power output. No statistically significant findings were

observed, indicating that vitamin D is associated with improved bone mineral density or changes in body composition. The synthesis of the data provided limited evidence to answer our research question. No definitive conclusions can be drawn regarding whether vitamin D supplementation has a positive effect on the performance of cycling athletes, due to substantial heterogeneity of the sample in terms of sport disciplines. The results of this thesis can serve as an indicator of the limited knowledge in this specific research area and highlight the need for further and more cycling-specific studies.

Keywords: vitamin D, supplementation, cycling, athletic performance, aerobic capacity

1. Εισαγωγή

1.1 Βιταμίνη D

Η βιταμίνη D ανήκει στην κατηγορία των λιποδιαλυτών βιταμινών και ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά στο λάδι από συκώτι μπακαλιάρου. Έκτοτε έχει αναγνωριστεί ως απαραίτητη βιταμίνη, δρώντας ως πρόδρομος στεροειδών για μια σειρά μεταβολικών και βιολογικών διεργασιών στον ανθρώπινο οργανισμό [1]. Η βιταμίνη D είναι μια σεκοστεροειδής ορμόνη που επηρεάζει τον μεταβολισμό του ασβεστίου αλλά και του φωσφόρου [2]. Ο ρόλος της είναι να διευκολύνει την εντερική απορρόφηση του ασβεστίου και του φωσφόρου, αλλά και να διατηρεί τα επίπεδα ασβεστίου στο αίμα, συμμετέχοντας έμμεσα στην διατήρηση της υγείας των οστών [3,4,5,6,7]. Διεγείρει επίσης τη διαφοροποίηση των οστεοκλαστών και την επαναρρόφηση ασβεστίου από τα οστά και προάγει την ενασβεστίωση της οστικής θεμέλιας ουσίας [8]. Συντίθεται στο δέρμα και παράγεται στο σώμα μετά από έκθεση στο ηλιακό φως για 15-20 λεπτά [9]. Αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό συστατικό που θα πρέπει να λαμβάνεται από τη διατροφή όταν δεν μπορούν να συντεθούν επαρκείς ποσότητες, κυρίως μέσω της πρόσληψης τροφών πλούσιων σε πρωτεΐνες, όπως ο κρόκος αυγού, το ψάρι και τα γαλακτοκομικά προϊόντα [10,11]. Η βιταμίνη D είναι ένα μικροθρεπτικό συστατικό, καθώς η έλλειψή του μπορεί να αντιμετωπιστεί και με την χορήγηση συμπληρωμάτων. Συναντάται σε δύο βιολογικά ανενεργές μορφές, τη χοληκαλσιφερόλη (βιταμίνη D₃, από ζωικές πηγές) και την εργοκαλσιφερόλη (βιταμίνη D₂, από φυτικές πηγές), και στην βιολογικά ενεργή της μορφή, την καλσιτριόλη [1,7,8]. Η εργοκαλσιφερόλη (ή βιταμίνη D₂), αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό και προέρχεται είτε εξωγενώς μέσω της διατροφής, είτε συντίθεται ενδογενώς από μύκητες και ζυμομύκητες μέσω της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Η βιταμίνη D₂ είναι δύσκολο να ληφθεί μέσω της διατροφής, επειδή πολύ λίγα τρόφιμα από τη φύση τους περιέχουν τη βιταμίνη. Ενδεδειγμένες πηγές βιταμίνης D₂ αποτελούν κατά κύριο λόγο τα φυτικά τρόφιμα, όπως τα μανιτάρια (αποτέλεσμα επιμόλυνσης από μύκητες. Από την άλλη, η βιταμίνη D₃ περιέχεται επίσης σε ζωικές διαιτητικές πηγές, όπως λιπαρά ψάρια (σκουμπρί, σολομός, σαρδέλες), ιχθυέλαιο, αυγά και συκώτι ή, σε μικρότερες ποσότητες, κρέας, γαλακτοκομικά προϊόντα, εντόσθια πουλερικών και σε εμπλουτισμένα τρόφιμα όπως τα δημητριακά πρωινού, αλλά σε ποσότητες που πιστεύεται ότι είναι ανεπαρκείς για την επίτευξη της βέλτιστης συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού [1,2,7,8,9,12,13,14].

Παρ' όλα αυτά, πάνω από το 90% της βιταμίνης D στο ανθρώπινο σώμα συντίθεται στο δέρμα υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η προβιταμίνη D (7-δεϋδροχοληστερόλη) μετατρέπεται υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας τύπου B (UVB) σε προ-βιταμίνη D₃ και τελικά σε βιταμίνη D₃ [2,9,95,97,98]. Και οι δύο μορφές θεωρούνται προορμονικές ενώσεις, ικανές να αυξήσουν τα κυκλοφορούντα επίπεδα της 25(OH)D ορού, αφού πρώτα μετατραπούν μέσω ενζυμικών αντιδράσεων [1]. Αν και η

βιταμίνη D2 μεταβολίζεται το ίδιο με τη βιταμίνη D3, η βιταμίνη D3 θεωρείται πιο ευνοϊκή πηγή βιταμίνης D, επειδή έχει πιο ισχυρή συγγένεια με την πρωτεΐνη που δεσμεύει τη βιταμίνη D και είναι κατά τα δύο τρίτα πιο αποτελεσματική στην αύξηση και τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης βιταμίνης D στον ορό [11,18]. Για το λόγο αυτό, η βιταμίνη D3 είναι η πιο κοινή μορφή της βιταμίνης που χορηγείται ως συμπλήρωμα [7,11]. Η κυκλοφορούσα 25-διυδροξυβιταμίνη D, αποτελεί τον δείκτη μέτρησης της κατάστασης βιταμίνης D του ανθρώπου [19].

1.2 Μεταβολισμός & Σύνθεση Βιταμίνης D

Η βιταμίνη D είναι μια λιποδιαλυτή βιταμίνη που συντίθεται κυρίως στο δέρμα. Η χοληκαλσιφερόλη (ή βιταμίνη D3), είναι η κύρια πηγή της ενδογενούς βιταμίνης D και σχηματίζεται μέσω της αλληλεπίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας B (UVB) [μήκος κύματος 290-315nm] μετά την έκθεση στον ήλιο για διάστημα 15-30 λεπτών [1,9], με την 7-δεϋδροχοληστερόλη στα βαθύτερα στρώματα της επιδερμίδας. Από την αλληλεπίδραση αυτή, προκύπτει η προβιταμίνη D3, η οποία στη συνέχεια υφίσταται γρήγορα έναν θερμο-επαγόμενο ισομερισμό για να σχηματιστεί η βιταμίνη D3, η οποία αποθηκεύεται μέσα στην πλασματική μεμβράνη κάθε κυττάρου του δέρματος [1,2,12,14,18,20,21].

Η βιταμίνη D δεν είναι μια «ζωτική αμίνη» με την πραγματική έννοια της λέξης, αλλά δρα ως προ-ορμόνη. Ανεξάρτητα εάν η βιταμίνη D3 ή η βιταμίνη D2 συντίθεται στο δέρμα ή καταναλώνεται μέσω διατροφικών πηγών ή συμπληρωμάτων, απαιτείται μεταβολισμός σε δύο φάσεις στο σώμα προκειμένου να μετατραπεί στην ενεργή της μορφή [10]. Η βιταμίνη D είναι μια σεκο-στεροειδής ορμόνη, καθώς ένας από τους δακτυλίους της δομής της κυκλοπεντανοπερυδροφαινανθρένης έχει σπασμένο δεσμό άνθρακα-άνθρακα στον δακτύλιο B. Ως εκ τούτου, η βιταμίνη D₃ είναι βιολογικά ανενεργή και απαιτεί υδροξυλίωση αρχικά σε 25(OH)D₃ στο ήπαρ και στη συνέχεια σε 1α,25(OH)₂D₃ ή 24R,25-διυδροξυβιταμίνη D₃ [24R,25(OH)₂D₃] στα νεφρά, ώστε να μετατραπεί σε ενεργό μεταβολίτη, ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τους υποδοχείς βιταμίνης D (VDRs) στους ιστούς στόχους (οστά, κύτταρα του ανοσοποιητικού, μυϊκά κύτταρα) και ασκεί της λειτουργίες του [4,7,8,22]. Το ένζυμο 1α-υδροξυλάση, μέλος της οικογένειας των μιτοχονδριακών ενζύμων κυτοχρώματος P450, είναι απαραίτητο για τη μετατροπή και ρυθμίζεται από την παραθυρεοειδή ορμόνη, τον ινοβλαστικό αυξητικό παράγοντα 23 (FGF23) και την 1,25(OH)D₂. Η PTH διεγείρει, ενώ οι FGF23 και 1,25(OH)₂D αναστέλλουν τη δραστηριότητα της 1α-υδροξυλάσης [9].

Η βιταμίνη D που λαμβάνεται από την έκθεση στον ήλιο, τα τρόφιμα ή τα συμπληρώματα, είναι βιολογικά αδρανής και πρέπει υποβάλλεται σε δύο υδροξυλίωσεις στον οργανισμό για να αποκτήσει ενεργή μορφή, με την πρώτη να γίνεται στο ήπαρ από το ένζυμο CYP2R1 όπου μετατρέπεται σε 25-υδροξυβιταμίνη D3 (καλσιδιόλη). Η δεύτερη υδροξυλίωση εκτελείται στους νεφρούς και σε άλλους ιστούς από το ένζυμο CYP27B1 για να σχηματίσει την 1,25-διυδροξυβιταμίνη D3 (καλσιτριόλη) που είναι η βιολογικά ενεργή μορφή. Στην πραγματικότητα, το ένζυμο CYP27B1 υπάρχει σε πολλά κύτταρα-στόχους του σώματος, για να επιτρέπει την τοπική σύνθεση καλσιτριόλης [9,10,12,15,16,21,23]. Η 1,25-διυδροξυβιταμίνη D3 [1,25(OH)₂D₃] διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της απορρόφησης ασβεστίου και φωσφόρου στο έντερο και στη διέγερση της δημιουργίας νέου οστικού ιστού μέσω νεογένεσης. Έρευνες σε ζώα έχουν δείξει ότι ποντίκια με έλλειψη του υποδοχέα της βιταμίνης D (VDR) παρουσιάζουν μειωμένη υγεία των οστών και εξασθενημένη μυϊκή λειτουργία, αναδεικνύοντας τη σημασία του VDR στους ζωντανούς οργανισμούς [4]. Ο ενεργός μεταβολίτης της βιταμίνης D μεταφέρεται στην κυκλοφορία του αίματος από τη δεσμευτική πρωτεΐνη βιταμίνης D (BPD) και είναι σε θέση να ενεργοποιήσει τους υποδοχείς της βιταμίνης D που βρίσκονται σε διάφορους ιστούς και όργανα του σώματος. Οι υποδοχείς βιταμίνης D (VDRs) εντοπίζονται σε όλα τα ανθρώπινα κύτταρα που διαθέτουν πυρήνα, όμως

μόνο η ενεργοποιημένη μορφή της βιταμίνης D μπορεί να αλληλοεπιδράσει με τους ιστούς-στόχους δεσμεύοντας τον πυρηνικό υποδοχέα της βιταμίνης, ο οποίος αποτελεί σημαντικό ρυθμιστή της γονιδιακής μεταγραφής σε ιστούς του σώματος όπως – αλλά δεν περιορίζεται σε – τα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος, οι σκελετικοί μύες και τα οστά [20].

Ο υποδοχέας της βιταμίνης D (VDR) έχει εντοπιστεί σε διάφορα όργανα όπως το ήπαρ, το λίκπος, οι μύες, οι νεφροί, η καρδιά, ο εγκέφαλος, το έντερο, το δέρμα και το πάγκρεας [6,15, 24]. Η βιολογικά ενεργή μορφή της βιταμίνης D [1,25(OH)₂D] συνδέεται με τους υποδοχείς βιταμίνης D προκαλώντας την έκφραση περισσότερων από 900-1000 (έως και 2000) παραλλαγών γονιδίων [3], τα οποία επηρεάζουν την ομοιόσταση και τον μεταβολισμό του ασβεστίου και των φωσφορικών αλάτων στα οστά και τους σκελετικούς μύες, [13] διεργασίες που αφορούν την ανοσοποιητική λειτουργία, την πρωτεϊνική σύνθεση, τη σύνθεση ορμονών, την καρδιαγγειακή λειτουργία, τη φλεγμονώδη απόκριση, την κυτταρική ανάπτυξη, την κυτταρική ανανέωση και αναγέννηση και τη μυοσκελετική ρύθμιση [6,10,12,15,25]. Μερικές γονιδιακές εκφράσεις μάλιστα, μπορεί να αποσπάσουν οφέλη σχετικά με τη βελτίωση της αθλητικής απόδοσης, καθώς επηρεάζουν τη μυϊκή πρωτεϊνική σύνθεση, τη μυϊκή δύναμη, το μέγεθος των μυών, τον χρόνο αντίδρασης, την ισορροπία, τον συντονισμό, την αντοχή, τη φλεγμονή και την ανοσία – παράγοντες καθοριστικοί για την αθλητική υγεία και την αθλητική απόδοση. Η βέλτιστη λειτουργία αυτών των βιολογικών διεργασιών που σχετίζονται με τον αθλητισμό, συμβαίνει όταν τα επίπεδα αποθήκευσης της βιταμίνης D πλησιάζουν εκείνα που επιτυγχάνονται με τη φυσική, ολική έκθεση στον ήλιο το καλοκαίρι [11]. Τα επίπεδα της 25(OH)D, που θεωρείται η μορφή της αποθηκευμένης βιταμίνης στο σώμα, θα πρέπει να ελέγχονται τακτικά, καθώς το 15% του παγκόσμιου πληθυσμού εμφανίζει ανεπάρκεια βιταμίνης D, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει μεταξύ άλλων στη μείωση της ποιότητας της προπόνησης και σε αυξημένη συχνότητα τραυματισμών και ασθενειών στον αθλητικό και μη πληθυσμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο τα νεφρικά κύτταρα (και τα κοκκιώματα σε χρόνιες διαταραχές που σχηματίζουν κοκκιώματα) μπορούν να εξάγουν ενεργοποιημένη βιταμίνη D στην κυκλοφορία για να καλύψουν τις συστηματικές απαιτήσεις [3,20].

1.3 Μηχανισμός Δράσης Βιταμίνης D

Η κλασική δράση της βιταμίνης D ως «βιταμίνη» σχετίζεται με τη διατήρηση της ομοιόστασης του ασβεστίου, η οποία επηρεάζει την υγεία των οστών και των μυών, ενώ οι ορμονικές της δράσεις επιτελούνται μέσω της σύνδεσής της με τον υποδοχέα βιταμίνης D (VDR) [7]. Οι λειτουργίες της βιταμίνης D εκτελούνται στο σώμα μέσω δύο οδών: μέσω ενδοκρινών και αυτοκρινών μηχανισμών. Ο ενδοκρινής μηχανισμός είναι ο πιο μελετημένος και λειτουργεί αυξάνοντας την εντερική απορρόφηση ασβεστίου και την οστεοκλαστική δραστηριότητα. Η βιταμίνη D είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη, την πυκνότητα και την αναδόμηση των οστών. Όταν τα επίπεδα βιταμίνης D μειώνονται κάτω από τα φυσιολογικά όρια, η παραθορμόνη (PTH) αυξάνει την οστική απορρόφηση για να καλύψει τις απαιτήσεις του σώματος για ασβέστιο. Αυτό σημαίνει ότι, τα χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D οδηγούν σε αύξηση της οστικής ανανέωσης με πρόσθετο κίνδυνο τραυματισμού των οστών, όπως κατάγματα λόγω στρες, που είναι πολύ συχνά στους αθλητές [26,27].

Ο δεύτερος μηχανισμός δράσης της βιταμίνης D περιλαμβάνει την αυτοκρινή οδό. Τα τελευταία 10 χρόνια, έχει καταστεί σαφές ότι η σεκοστεροειδής ορμόνη, 1,25-διυδροξυ-βιταμίνη D (καλσιτριόλη), δεν παράγεται αποκλειστικά από τα νεφρά, αν και ο νεφρός εκπληρώνει την ενδοκρινική λειτουργία της βιταμίνης D εκκρίνοντας καλσιτριόλη στον ορό, για τη διατήρηση της οικονομίας ασβεστίου. Η τοπικά παραγόμενη και ενδοκυτταρικά ρυθμιζόμενη καλσιτριόλη —ανεξάρτητη από την καλσιτριόλη ορού— επηρεάζει άμεσα πολλά κύτταρα και ιστούς, εκπληρώνοντας τις πολλαπλές αυτοκρινείς λειτουργίες της βιταμίνης D [28]. Αν και δεν είναι τόσο γνωστό, αυτό το μονοπάτι είναι απαραίτητο αφού φιλοξενεί πολλές

από τις βασικές μεταβολικές διεργασίες του οργανισμού, όπως διεργασίες σηματοδότησης, έκφραση και γενετική απόκριση, πρωτεϊνική σύνθεση ορμονών, ανοσοποιητική/φλεγμονώδη απόκριση, ανακύκλωση και κυτταρική σύνθεση. Χωρίς τη βιταμίνη D, η ικανότητα αποτελεσματικής ανταπόκρισης σε φυσιολογικά και παθολογικά συμπτώματα θα αλλοιωνόταν εντελώς. Η βιταμίνη D λειτουργεί ως ρυθμιστής έως και 2000 γονιδίων που εμπλέκονται στην ανάπτυξη των κυττάρων, τη λειτουργία του ανοσοποιητικού και τη σύνθεση πρωτεϊνών [12]. Όργανα που εμπλέκονται σε αθλητικές προσπάθειες, με στοιχεία ενδοκυτταρικής αυτοκρινούς παραγωγής και ρύθμισης της καλσιτριόλης, περιλαμβάνουν την καρδιά, τους πνεύμονες, τον μυελό των επινεφριδίων, τους νευρώνες, τους μύες, την υπόφυση, τα οστά και τον εγκέφαλο. Η αυτοκρινής οδός φαίνεται να είναι η πιο σημαντική σε σχέση με τη δράση της βιταμίνης D στη λειτουργία των σκελετικών μυών. Οι στόχοι για τον υποδοχέα βιταμίνης D έχουν εντοπιστεί σχεδόν σε κάθε ιστό του σώματος. Ο υποδοχέας της βιταμίνης D (VDR) ρυθμίζει την έκφραση σε εκατοντάδες γονίδια που εκτελούν βασικές σωματικές λειτουργίες. Η ανακάλυψη του στους μύες, υποδηλώνει τη σημασία του ρόλου της βιταμίνης D στον μυϊκό ιστό. Επί του παρόντος, η υπάρχουσα θεωρία είναι ότι μια επαρκής συγκέντρωση βιταμίνης D στο αίμα είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της γονιδιωματικής λειτουργίας. Αυτός ο ρόλος του γενετικού ρυθμιστή που φαίνεται να έχει η βιταμίνη D, εξηγεί το πώς μπορεί να επηρεάσει μια ποικιλία φυσιολογικών λειτουργιών, όπως η υγεία των οστών, η μυϊκή λειτουργία, η φλεγμονή και η ανοσία, όλα σημαντικά για την υγεία, την προπόνηση και την απόδοση των αθλητών. [12,26,27,28] Ο ακριβής μηχανισμός μέσω του οποίου η βιταμίνη D ενισχύει την αθλητική απόδοση παραμένει αντικείμενο συνεχούς έρευνας. Ένας προτεινόμενος μηχανισμός σχετίζεται με την αυξημένη παρουσία της 1,25(OH)₂D και την ύπαρξη υποδοχέων της βιταμίνης D (VDR) εντός των μυϊκών κυττάρων, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της δέσμευσης του ασβεστίου κατά τη σύσπαση των μυϊκών ινών [4].

Ο υποδοχέας της βιταμίνης D (VDR) αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά μέσα σε μυϊκά κύτταρα σε καλλιεργημένα μυοβλαστικά κύτταρα αρουραίων το 1985, επιβεβαιώνοντας τον μυϊκό ιστό ως στόχο της βιταμίνης D. Έκτοτε, ο VDR έχει εντοπιστεί σε ιστούς όπως οι λείοι και καρδιακοί μύες, το ήπαρ, οι παραθυρεοειδείς αδένες, οι πνεύμονες, το παχύ έντερο, τα οστά και το δέρμα, ενώ απομονώθηκε και από τον ανθρώπινο σκελετικό μυ το 2001 [22,29]. Έχει επίσης φανεί ότι ο VDR παρουσιάζει διάφορους γενετικούς πολυμορφισμούς, οι οποίοι ενδέχεται να επηρεάζουν τη λειτουργία του στον σκελετικό μυ. Για να εκτιμηθεί η σημασία του VDR στον σκελετικό μυ των ποντικών, εξετάστηκαν γενετικά τροποποιημένα ποντίκια με διαγραφή του γονιδίου του VDR. Τα ποντίκια χωρίς VDR παρουσίασαν μυϊκές ίνες τετρακέφαλου και άλλες μυϊκές ομάδες μικρότερες κατά 20% από τα ποντίκια με φυσιολογικά επίπεδα VDR. Επιπλέον, τα ποντίκια χωρίς VDR εμφάνισαν αυξημένη έκφραση των μυογενετικών παραγόντων μεταγραφής myf5, E2A και myogenin σε σύγκριση με τα φυσιολογικά ποντίκια, υποστηρίζοντας έναν άμεσο ρόλο της 1,25-OH βιταμίνης D και του VDR τόσο στις μεταβολικές διαδικασίες όσο και στη ρύθμιση της μεταγραφής του σκελετικού μυ [13,29]. Μακροπρόθεσμα, η 1,25-διυδροξυβιταμίνη D μπορεί ενδεχομένως να συμβάλλει στη διεύρυνση και τον πολλαπλασιασμό των μυϊκών ινών ταχείας συστολής και να επιταχύνει τη διαδικασία της λιπόλυσης εντός του κύκλου του τρικαρβοξυλικού οξέος (TCA). Επιπλέον, η ανίχνευση των υποδοχέων βιταμίνης D στους σκελετικούς μύες, πιθανότατα σημαίνει πως η βιταμίνη D έχει ουσιαστικό ρόλο στην λειτουργία τους. Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκαν εύλογες απορίες γύρω από το αν η ανεπάρκεια βιταμίνης D μπορεί να συμβάλει στη βλάβη των σκελετικών μυών.

Μέχρι πρόσφατα, αρκετές μελέτες έδειξαν ότι η αύξηση των επιπέδων 25(OH)D ορού σε συγκεκριμένους πληθυσμούς, επηρεάζει θετικά τη μυϊκή δύναμη και τη μυϊκή μάζα, ωστόσο στον αθλητικό πληθυσμό τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι διαφορετικά [13]. Έχουν αναφερθεί περιπτώσεις κατά τις οποίες οι αθλητές παρουσιάζουν συχνά αξιοσημείωτη

επικράτηση ανεπαρκών επιπέδων βιταμίνης D. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως ο αυξημένος μεταβολικός τους ρυθμός, η συνεχής προπόνηση σε εσωτερικούς χώρους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ο περιορισμένος χρόνος έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία από το ηλιακό φως, καθώς και η έλλειψη κατάλληλων μέτρων για την παρακολούθηση και διατήρηση επαρκών επιπέδων 25(OH)D στον ορό, εξαιτίας της έντονης φυσικής καταπόνησης. Οι προπονητές, οι αθλητές, οι γυμναστές και οι επαγγελματίες υγείας στον χώρο του αθλητισμού ασχολούνται ολοένα και περισσότερο με την επάρκεια της βιταμίνης D στους αθλητές και την πιθανή της συσχέτιση με τη δύναμη, την προπονητική κατάσταση και τη συνολική τους αθλητική απόδοση [4].

1.4 Η Σημασία της Βιταμίνης D για τους Αθλητές

Η βιταμίνη D αποτελεί ένα κρίσιμο θρεπτικό συστατικό για την διατήρηση της υγείας και ευεξίας. Πρόσφατες μελέτες μάλιστα έχουν δείξει πως η βιταμίνη D μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην βελτίωση της προπόνησης αλλά και της αθλητικής απόδοσης σε αθλητές ποδηλασίας και όχι μόνο.

1.4.1 Οστική Υγεία

Η βιταμίνη D επηρεάζει την υγεία των οστών ενεργοποιώντας την έκφραση γονιδίων που ενισχύουν την εντερική και νεφρική απορρόφηση του ασβεστίου και την ανανέωση των οστών. Με την αύξηση της εντερικής απορρόφησης ασβεστίου για τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης ασβεστίου στον ορό, η βιταμίνη D θεωρείται ότι είναι απαραίτητη για βέλτιστη οστική υγεία και την πρόληψη διαταραχών των οστών όπως η ραχίτιδα, η οστεοπόρωση και τα κατάγματα που σχετίζονται με το στρες. Μια μελέτη μάλιστα, έδειξε ότι η συμπλήρωση με 800 IU βιταμίνης D και 2.000mg ασβεστίου την ημέρα για μια περίοδο 8 εβδομάδων μείωσε τη συχνότητα των καταγμάτων που σχετίζονται με το στρες [18]. Ελλείψει της ενεργού μορφής της βιταμίνης D [1,25(OH)₂D], η απορρόφηση του ασβεστίου μπορεί να περιοριστεί [101,102], καθώς απορροφάται μόνο το 10–15% του διατροφικού ασβεστίου. Ωστόσο, όταν τα επίπεδα 25(OH)D στο πλάσμα υπερβαίνουν ή είναι ίσα με 75 nmol/L, εκτιμάται ότι ≥30% του ασβεστίου μπορεί να απορροφηθεί από τη διατροφή - και μόνο 10-15% όταν η συγκέντρωση είναι χαμηλότερη - παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ποσότητα ασβεστίου, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της οστικής πυκνότητας [23,30]. Η επίδραση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ενισχυμένη με βιταμίνη D έκφραση των εντερικών πρωτεϊνών που προάγουν την απορρόφηση του ασβεστίου. Επιπλέον, η συγκέντρωση βιταμίνης D στο αίμα φαίνεται πως σχετίζεται με την οστική πυκνότητα (BMD) ή/και την περιεκτικότητα των οστών σε μεταλλικά στοιχεία, κυρίως στην περιοχή του ισχίου και της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης των γυναικών σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους. [B] Η αποφυγή ανεπάρκειας βιταμίνης D [συγκέντρωση 25(OH)D >25 nmol/L] θεωρείται σημαντικός παράγοντας για τη μεγιστοποίηση της ποσότητας οστικής μάζας προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος εμφάνισης οστεοπόρωσης [23].

1.4.2 Κατάγματα λόγω στρες

Τα αναδυόμενα στοιχεία υποδηλώνουν ότι η βιταμίνη D μπορεί να είναι σημαντική για την πρόληψη καταγμάτων στρες σε αθλητικούς πληθυσμούς. Τα κατάγματα λόγω στρες, παρατηρούνται συχνά σε αθλητές και αντιπροσωπεύουν το 0,7% έως 20% όλων των κλινικών τραυματισμών στην αθλητιατρική. Τα κατάγματα από στρες συμβαίνουν συνήθως στην κνήμη, την περόνη και τα οστά του μηριαίου οστού του ποδιού, καθώς και στα οστά του ταρσού και

του μεταταρσίου του ποδιού, και μια χαμηλή κατάσταση βιταμίνης D [25(OH)D πλάσματος <50 nmol/l] φαίνεται πως συσχετίζεται με την προοπτική σημαντικά αυξημένου κινδύνου καταγμάτων λόγω στρες. Αν και έχει ήδη διατυπωθεί ότι τα επίπεδα βιταμίνης D μπορούν να επηρεάσουν την οστική πυκνότητα (BMD), δεν υπάρχουν αρκετά επιστημονικά στοιχεία σχετικά με τον ρόλο της βιταμίνης D στην επούλωση των καταγμάτων. Μια ανασκόπηση διαπίστωσε ότι η βιταμίνη D μειώνει, αυξάνει ή δεν έχει καμία επίδραση στη φάση σχηματισμού μαλακού τύλου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επούλωσης του κατάγματος. Άλλες μελέτες, κατέληξαν σε αντικρουόμενα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση της βιταμίνης D στη φάση της ανοργανοποίησης του τύλου. Ωστόσο, σε μια πρόσφατη έρευνα βρέθηκε ότι οι ασθενείς που παρουσίασαν καθυστερημένη σταθεροποίηση κατάγματος, διαγνώστηκαν με χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D ορού [25(OH)D.] Τα κατάγματα από στρες σε ελίτ αθλητές επηρεάζουν άμεσα την προπόνηση και τον ανταγωνισμό. Ωστόσο, υπάρχει έλλειψη στοιχείων σχετικά με τη σχέση μεταξύ των καταγμάτων από στρες και της κατάστασης της βιταμίνης D σε επαγγελματίες αθλητές, συμπεριλαμβανομένου του εάν η λήψη συμπληρωμάτων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο καταγμάτων [12,16,23].

Ο Knechtle et al. ανέφερε ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D αποτελεί παράγοντα κινδύνου για κατάγματα κόπωσης στους αθλητές. Οι Shimasaki et al. έδειξαν ότι τα κατάγματα κόπωσης του πέμπτου μεταταρσίου ήταν 5,1 και 2,9 φορές πιο συχνά σε αθλητές με επίπεδα 25(OH)D 10 και 20 ng/mL, αντίστοιχα. Σε πρόσφατη μελέτη, οι Millward et al. ανέφεραν ότι το ποσοστό καταγμάτων κόπωσης σε αθλητές με χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D ήταν κατά 12% υψηλότερο σε σύγκριση με εκείνους με φυσιολογικά επίπεδα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διόρθωση των χαμηλών επιπέδων βιταμίνης D μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο καταγμάτων κόπωσης στους αθλητές.

Λαμβάνοντας υπόψη τις βασικές λειτουργίες της βιταμίνης D, ο πιθανός μηχανισμός με τον οποίο τα χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D στον ορό οδηγούν σε αυξημένη εμφάνιση καταγμάτων κόπωσης στους αθλητές μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητός. Η βιταμίνη D είναι σημαντική για τα οστά επειδή συμβάλλει στην ορυκτοποίησή τους και στη ρύθμιση του ασβεστίου. Χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D στον ορό προκαλούν σημαντική μείωση της απορρόφησης ασβεστίου από το έντερο, γεγονός που αυξάνει τα επίπεδα της παραθυρεοειδούς ορμόνης και, κατά συνέπεια, οδηγεί στην ενεργοποίηση των οστεοκλαστών, οι οποίοι διασπούν τη μήτρα κολλαγόνου των οστών [10,26,27]. Επομένως, διάφορα προληπτικά μέτρα είναι σημαντικά για τη διατήρηση και αποκατάσταση των φυσιολογικών επιπέδων βιταμίνης D και την πρόληψη των καταγμάτων κόπωσης στους αθλητές. Οι Sikora-Klak et al. συνέστησαν τη χορήγηση συμπληρωμάτων βιταμίνης D για τη θεραπεία αθλητών με ανεπάρκεια ή έλλειψη βιταμίνης D. Σε πρόσφατη μελέτη, οι Williams et al. έδειξαν ότι τα συμπληρώματα βιταμίνης D (50.000 IU / εβδομάδα για 8 εβδομάδες) μείωσαν σημαντικά τη συχνότητα εμφάνισης καταγμάτων κόπωσης από 7,51% σε 1,65% σε αθλητές με ανεπάρκεια ή έλλειψη βιταμίνης D, ωστόσο η μείωση αυτή δεν ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0.07$) [31]. Αν και απαιτούνται περισσότερες μελέτες για την καλύτερη κατανόηση των επιδράσεων των συμπληρωμάτων βιταμίνης D, τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι τα συμπληρώματα βιταμίνης D μπορεί να είναι αποτελεσματικά στη μείωση των καταγμάτων κόπωσης [10,16].

1.4.3 Λειτουργία & Ανάπλαση Σκελετικών Μυών

Ο μυοσκελετικός πόνος και η αδυναμία είναι καλά εδραιωμένα συμπτώματα ανεπάρκειας βιταμίνης D, που μπορούν να υποχωρήσουν με την αναπλήρωση μέσω συμπληρωμάτων, ωστόσο οι μηχανισμοί που ερμηνεύουν τη σχέση αυτή δεν έχουν ακόμη προσδιοριστεί. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν πως η βιταμίνη D έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας ισχυρός ρυθμιστής της φυσιολογίας των σκελετικών μυών. Πιο συγκεκριμένα, την καθορίζει ενεργοποιώντας την έκφραση γονιδίων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και τη διαφοροποίηση

των μυών, ιδιαίτερα σε ίνες ταχείας συστολής (τύπου II) [2,6,12,30]. Γίνεται διαρκώς συζήτηση σχετικά με το εάν ο υποδοχέας της βιταμίνης D (VDR) υπάρχει στην πραγματικότητα στους μύες, καθώς παραμένει μη ανιχνεύσιμος σε ώριμους σκελετικούς μύες, μετά από χρώση με ένα αντίσωμα που αντιδρά μόνο με τις πρωτεΐνες του VDR. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο VDR ήταν μη ανιχνεύσιμος στους σκελετικούς, καρδιακούς και λείους μυς και ότι ίσως ο ρόλος της βιταμίνης D στη λειτουργία αυτών των μυών δεν εμπλέκει τον VDR. Ωστόσο, οι ανεπάρκειες στις τεχνικές διαδικασίες (όπως η ανοσοκυτταροχημική χρώση) για την ανίχνευση των VDR μπορεί να ευθύνονται για την έλλειψη αποτελεσμάτων σχετικά με την απομόνωση των VDR στα ανθρώπινα μυϊκά κύτταρα. [Δ] Άλλες μελέτες κάνουν λόγο για τον εντοπισμό δύο υποδοχέων βιταμίνης D στον μυϊκό ιστό - ο ένας ενεργεί ως πυρηνικός υποδοχέας μέσω του οποίου τροποποιείται η μεταγραφή και η μετάφραση των γονιδίων-στόχων. Αυτό το εύρημα υποδηλώνει ότι η βιταμίνη D προάγει τον πολλαπλασιασμό και τη διαφοροποίηση των μυϊκών κυττάρων [12,18].

Η βιταμίνη D διεγείρει τη σύνθεση πρωτεϊνών του σκελετικού μυ μέσω σηματοδότησης που μεσολαβείται από τους υποδοχείς της βιταμίνης D και ενδέχεται να βελτιώνει τη λειτουργία της καρδιάς και του ενδοθελίου. Ως εκ τούτου, η αποφυγή χαμηλών επιπέδων 25(OH)D και η επίτευξη επάρκειας βιταμίνης D μπορεί να είναι σημαντική τόσο για την άσκηση δύναμης όσο και για την αντοχή [32]. Ο δεύτερος υποδοχέας βρίσκεται στην κυτταρική μεμβράνη και έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει την αλληλεπίδραση μεταξύ ακτίνης και μυοσίνης στο σαρκομέριο, καθιστώντας ισχυρότερη τη δύναμη της μυϊκής συστολής. Αυτό υποδηλώνει ότι οι μύες ανταποκρίνονται στη φυσιολογικά ενεργή μορφή της βιταμίνης D, γεγονός που πιθανότατα μπορεί να βοηθήσει στην εξήγηση των επιδράσεων της βιταμίνης D στην λειτουργία των σκελετικών μυών [12,18]. Επιπρόσθετα, βιοψίες ασθενών με ανεπάρκεια βιταμίνης D, έχουν υποδείξει ατροφία των μυϊκών ινών τύπου 2 και διευρυμένα διαστήματα μεταξύ των μυοϊνιδίων πριν από την έναρξη θεραπείας με βιταμίνη D και σημαντική βελτίωση της εικόνας τους ύστερα από αυτή. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τόσο οι γονιδιωματικές όσο και οι μη γονιδιωματικές επιδράσεις της βιταμίνης D, είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση των μυών. Στην πραγματικότητα, η βιταμίνη D επηρεάζει τη μεταφορά του ασβεστίου και φωσφορικών αλάτων από τους μύες μέσω των κυτταρικών μεμβρανών, τον μεταβολισμό των φωσfolιπιδίων και τον πολλαπλασιασμό και τη διαφοροποίηση των μυϊκών κυττάρων [12]. Η βιταμίνη D μπορεί να έχει και μη γονιδιωματικές επιδράσεις όπως τη ρύθμιση της σαρκοπλασματικής πρόσληψης ασβεστίου και της κυτταρικής σηματοδότησης.

Σε σχέση με τη σωματική άσκηση και τον αντίκτυπό της στους αθλητές, υποστηρίζεται ότι η χαμηλή διαθεσιμότητα βιταμίνης D στον οργανισμό μπορεί να βλάψει άμεσα τη μυϊκή δύναμη και απόδοση, όμως τα στοιχεία είναι περιορισμένα. Σε αθλητές μάλιστα με ανεπάρκεια βιταμίνης D, η λήψη συμπληρωμάτων σε δόση που αυξάνει τη συγκέντρωση της βιταμίνης στο αίμα, φαίνεται να βελτιώνει ορισμένες παραμέτρους μυϊκής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της ισομετρικής δύναμης του τετρακέφαλου. Αυτό μοιάζει ένα σημαντικό εύρημα για τους αθλητές ποδηλασίας καθώς ο τετρακέφαλος συμμετέχει σημαντικά στην προσπάθεια ώθησης του πηδαλίου προς τα κάτω. Σε τραυματισμένους αθλητές, η ανεπαρκής βιταμίνη D φαίνεται επίσης να καθυστερεί την αποκατάσταση και την αποκατάσταση μετά από ορθοπεδική χειρουργική επέμβαση. Από κλινικής άποψης, προτείνεται επίσης πιθανή συσχέτιση μεταξύ της βιταμίνης D και της μυϊκής λειτουργίας, καθώς η μυοπάθεια συσχετίστηκε έντονα με σοβαρή ανεπάρκεια της βιταμίνης. Μια έρευνα διαπίστωσε ότι το 93% των ασθενών που παρουσίασαν κοινά κλινικά συμπτώματα μη ειδικού μυοσκελετικού πόνου είχαν ανεπάρκεια βιταμίνης D. Τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω υποδηλώνουν ότι η βιταμίνη D θα μπορούσε να βελτιώσει τη μυϊκή μάζα και τη δύναμη και θα μπορούσε να επιταχύνει την αποκατάσταση των μυών από το στρες που προκαλεί η έντονη άσκηση [12,30].

Η βιταμίνη D έχει επίσης συσχετιστεί με τη βελτίωση της μιτοχονδριακής λειτουργίας στους σκελετικούς μύες. Η οξειδωτική φωσφορυλίωση στα μιτοχόνδρια αποτελεί την κύρια πηγή ATP για τη μυϊκή σύσπαση, και έχει βρεθεί πως είναι μειωμένη σε άτομα με σοβαρή ανεπάρκεια βιταμίνης D. Μελέτη των Sinha et al. έδειξε ότι η θεραπεία με χολοκαλσιφερόλη οδήγησε σε βελτίωση των επιπέδων 25(OH)D και ταυτόχρονη αύξηση της μέγιστης οξειδωτικής φωσφορυλίωσης και μείωση του χρόνου ημίσειας αποκατάστασης της φωσφοκρεατίνης, υποδηλώνοντας βελτιωμένη ενεργειακή λειτουργία των μυών [2].

Με το ασβέστιο να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ρύθμισης της λειτουργίας των σκελετικών μυών, οποιαδήποτε παρέμβαση στη διαχείριση του ασβεστίου μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα συστολής των μυών. Επομένως, η βιταμίνη D μπορεί να επηρεάσει τη μυϊκή λειτουργία μέσω της μεταγραφής πρωτεϊνών που σχετίζονται με το ασβέστιο και μέσω των συνολικών επιπέδων ασβεστίου στο αίμα. Ωστόσο, η βιταμίνη D παίζει επίσης ρόλο στην ενίσχυση της μεταγραφής πρωτεϊνών, που δεν σχετίζονται άμεσα με τον μεταβολισμό του ασβεστίου. Μια τέτοια πρωτεΐνη, η οποία έχει άμεση σχέση με τους σκελετικούς μύες είναι η IGFBP-3. Η έκφρασή της ρυθμίζεται μεταξύ άλλων και από τη βιταμίνη D και είναι μέλος της οικογένειας IGFBP, η οποία συνδέει την IGF-1 στο πλάσμα, στην εξωκυττάρια μήτρα και στις επιφάνειες των κυττάρων. Η σύνδεση της IGF-1 με τις πρωτεΐνες IGFBP μπορεί να έχει τόσο ανασταλτικές όσο και διεγερτικές επιδράσεις στη λειτουργία της IGF-1. Δεδομένου του ότι η IGF-1 προκαλεί πολλαπλασιασμό, διαφοροποίηση και υπερτροφία των σκελετικών μυών και αποτελεί βασικό συστατικό για τη μυϊκή αναγέννηση, η βιταμίνη D μπορεί να έχει κεντρικό ρόλο σε όλες αυτές τις διαδικασίες μέσω της ρύθμισης της πρωτεΐνης IGFBP-3 [29].

Μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη δοκιμή παρέμβασης σε 20 υγιείς άνδρες με χαμηλές συγκεντρώσεις 25(OH)D στον ορό (<20 ng/ml) έδειξε ότι μια στρατηγική συμπληρωμάτων με 4000 IU VitD3 ημερησίως για 6 εβδομάδες αύξησε τις συγκεντρώσεις στον ορό και σε σύγκριση με την ομάδα εικονικού φαρμάκου, οδηγούσε σε βελτιώσεις στους δείκτες ανάκτησης, αναγέννησης και υπερτροφίας των σκελετικών μυών που ελήφθησαν επεμβατικά μετά από υψηλής έντασης έκκεντρη σύσπαση των μυών. Αυτά τα δεδομένα υποδηλώνουν ένα πιθανό ρόλο της VitD στις επανορθωτικές διεργασίες στους σκελετικούς μύς, που μπορεί να επηρεάσει ευεργετικά την υπερτροφία των σκελετικών μυών όταν οι συγκεντρώσεις της VitD στον ορό είναι πάνω από το όριο ανεπάρκειας. Αυτά τα αποτελέσματα ευθυγραμμίζονται με δεδομένα παρατήρησης που υποδηλώνουν μια συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων 25(OH)D στον ορό και της λειτουργικής αποκατάστασης των σκελετικών μυών στον άνθρωπο, μετά από έκκεντρες μυϊκές συσπάσεις [20].

1.4.4 Μυοσκελετικοί Τραυματισμοί & Αποκατάσταση

Οι μυοσκελετικοί τραυματισμοί περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων που επηρεάζουν τα οστά, τους μύες, τους τένοντες και τους συνδέσμους. Οι αθλητές είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε αυτά τα προβλήματα λόγω των υψηλών σωματικών απαιτήσεων και της επαναλαμβανόμενης φύσης της προπόνησης και των αγώνων τους. Η βιταμίνη D είναι κρίσιμη για πολλές βιολογικές διεργασίες στο μυοσκελετικό σύστημα, και φαίνεται να υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της επάρκειας βιταμίνης D και της βέλτιστης μυϊκής λειτουργίας. Οι υποδοχείς βιταμίνης D (VDR) έχουν εντοπιστεί σε μυϊκές ίνες του σκελετικού μυός, γεγονός που υποδεικνύει άμεση επίδραση της βιταμίνης D στη μυϊκή λειτουργία [33]. Σε καταστάσεις ανεπάρκειας βιταμίνης D, όπως η ραχίτιδα, παρατηρείται γενικευμένος μυοσκελετικός πόνος με βαθιά μυοπάθεια, συμπεριλαμβανομένης της μυϊκής αδυναμίας, υποτονίας και επακόλουθων ανωμαλιών στο βάδισμα και αυξημένος κίνδυνος χρόνιου μυοσκελετικού πόνου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μυϊκές ίνες τύπου II (ταχείας συστολής) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις επιπτώσεις της ανεπάρκειας βιταμίνης D. Οι μυϊκές ίνες τύπου II είναι εξαιρετικά σημαντικές σε αθλήματα που απαιτούν έκρηξη και επιτελούν καθοριστικό

ρόλο στην κορυφαία αθλητική απόδοση και την αποφυγή πτώσεων. Τα χαμηλότερα επίπεδα ή η ανεπάρκεια 25(OH)D, συσχετίζονται άμεσα με λιπώδη διήθηση των μυών, οδηγώντας τις μυϊκές ίνες τύπου 2 σε ατροφία. Δεν είναι γνωστό εάν η λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D μπορεί να αναστρέψει τη διαδικασία της λιπώδους διήθησης, αλλά μπορεί να αναστρέψει την ατροφία που παρατηρείται στις μυϊκές ίνες τύπου 2. Επιπλέον, η αναστροφή της ατροφίας των ινών τύπου II πιστεύεται ότι μειώνει κατά 20% τον κίνδυνο πτώσης με τα κατάλληλα συμπληρώματα βιταμίνης D. Τα συμπληρώματα σε δόσεις < 600 IU την ημέρα είναι αναποτελεσματικά στη μείωση του κινδύνου πτώσης, με το ελάχιστο επίπεδο 25(OH)D που απαιτείται για μέγιστο όφελος να είναι 24 ng/mL. Η αύξηση των επιπέδων βιταμίνης D παρέχει πολλαπλά οφέλη για το μυοσκελετικό σύστημα. Μεταξύ αυτών βρίσκονται η αυξημένη πρωτεϊνοσύνθεση των μυών, αυξημένη συγκέντρωση ATP, αυξημένη δύναμη, αυξημένο ύψος, ταχύτητα και δύναμη άλματος, η μείωση του κινδύνου καταπονητικών καταγμάτων, η ρύθμιση της φλεγμονώδους απόκρισης μετά από τραυματισμό, η διατήρηση της οστικής πυκνότητας, η βελτιωμένη ικανότητα άσκησης και γενικότερα ολική βελτίωση της αθλητικής απόδοσης. Επιπλέον, τα αυξημένα επίπεδα βιταμίνης D μειώνουν τον εκφυλισμό των μυϊκών πρωτεϊνών και αναστρέφουν τις μυαλγίες. Τα οφέλη των συμπληρωμάτων δεν περιορίζονται μόνο στους μύες, καθώς είναι γνωστό ότι η βιταμίνη D παίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία των οστών και στην πρόληψη των καταγμάτων [11,16,33].

Πολλές είναι οι μελέτες που έχουν δείξει ότι τα επίπεδα βιταμίνης D στον ορό του αίματος σχετίζονται με μυοσκελετικούς τραυματισμούς. Ο Smith et al. [23] αξιολόγησε τη συχνότητα εμφάνισης ανεπάρκειας βιταμίνης D σε ασθενείς με κατάγμα ποδιού ή αστραγάλου χαμηλής ενέργειας. Αναφέρθηκε ότι 35 από τους 75 ασθενείς είχαν επίπεδα βιταμίνης D < 30 ng/mL, και 10 ασθενείς είχαν επίπεδα < 20 ng/mL, γεγονός που υποδηλώνει ότι η υποβιταμίνωση D είναι συχνή σε ασθενείς με τραυματισμούς ποδιού ή αστραγάλου. Επιπλέον, τα επίπεδα βιταμίνης D στον ορό ήταν σημαντικά χαμηλότερα σε ασθενείς με κατάγματα σε σύγκριση με αυτούς με διαστρέμματα αστραγάλου. Παρόμοια ευρήματα έχουν παρατηρηθεί και σε αθλητές. Οι Rebolledo et al. διαπίστωσαν ότι το 50% των παικτών του NFL παρουσίασαν τραυματισμούς μυών των κάτω άκρων ή του κορμού, υποδηλώνοντας ότι αυτοί οι τραυματισμοί σχετίζονται σημαντικά με χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D στον ορό. Επιπλέον, υποδηλώθηκε ότι τα ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο τραυματισμών των οπίσθιων μηριαίων μυών [10]. Σε μια μελέτη στην οποία συμπεριλήφθηκαν επαγγελματίες και μη επαγγελματίες αθλητές, διαπιστώθηκε πως η διατήρηση υψηλών επιπέδων βιταμίνης D σε αθλητές ποδηλασίας, επιταχύνει σημαντικά την ανάρρωση των μυών, ύστερα από έντονης έντασης προπόνηση ποδηλασίας. Αυτό αποτελεί σημαντικό εύρημα καθώς η επαρκής επισκευή και ενδυνάμωση των μυών συμβάλλει καθοριστικά στην διατήρηση συνέπειας ανάμεσα στις προπονήσεις, αλλά και στην ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων εμφάνισης κάποιου μυϊκού τραυματισμού.

Η μυϊκή βλάβη από την άσκηση (Exercise-Induced Muscle Damage – EIMD), εκδηλώνεται αμέσως μετά από πολύ έντονη άσκηση με συμπτώματα μυϊκού πόνου και προσωρινής απώλειας μυϊκής λειτουργίας και μπορεί να διαρκέσει έως και 2 εβδομάδες, επηρεάζοντας την απόδοση και το πρόγραμμα προπονήσεων των αθλητών ποδηλασίας και όχι μόνο. Σε ζωικά μοντέλα, έχουν καταγραφεί αυξημένες δυνατότητες αναγέννησης του σκελετικού μυ ύστερα από χορήγηση υψηλών δόσεων βιταμίνης D, όμως ο μικρός όγκος υψηλής ποιότητας μελετών σε αθλητές έχει δείξει ασυνεπή αποτελέσματα όσον αφορά τη συσχέτιση της βιταμίνης D με την αποκατάσταση των μυών και την κόπωση [19]. Η ταχεία ανάρρωση παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα στους αθλητές που αντιμετωπίζουν άγχος, φλεγμονή και αναδιαμόρφωση των μυϊκών ενδοκυττάρων συστατικών μετά την άσκηση και επιτρέπει την προπόνηση υψηλής έντασης με υψηλότερη συχνότητα. Η πιθανή αποτελεσματικότητα της βιταμίνης D στην ανάρρωση αποδίδεται στον ουσιαστικό της ρόλο στην τροποποίηση της φλεγμονής τόσο στην έμφυτη όσο και στην επίκτητη ανοσία. Ο

ανθρώπινος σκελετικός μυϊκός ιστός αντιδρά στη διέγερση που προκαλείται από την προπόνηση και στη βλάβη των ιστών, αναδιαμορφώνοντας τα ενδοκυτταρικά μυϊκά συστατικά του. Κατά τη διάρκεια της ανάρρωσης από την άσκηση ή από τραυματισμό, η έκφραση του υποδοχέα βιταμίνης D αυξάνεται και με τη βοήθεια της 1^α-υδροξυλάσης συντίθεται ο βιολογικά ενεργός μεταβολίτης της βιταμίνης D, η 1,25-διυδροξυ βιταμίνη D, η οποία με τη σειρά της αυξάνει τη μυογονική διαφοροποίηση και πολλαπλασιασμό και αναστέλλει τη μυοστατίνη, έναν ανασταλτικό ρυθμιστή της σύνθεσης μυών των μυοβλαστών C2C12 [1,2,13]. Αυτή η αυξημένη αναγέννηση των σκελετικών μυών παρατηρήθηκε σε ζωικά μοντέλα και πιο συγκεκριμένα στα ποντίκια. Ειδικότερα, οι μύες των ποντικών με υψηλότερη δόση βιταμίνης D οδηγήθηκαν σε απόπτωση πολύ αργότερα από τους μύες των ποντικών με χαμηλότερη δόση βιταμίνης. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένα σημάδι συσχέτισης της βιταμίνης D με την αύξηση των πρωτεϊνών που είναι απαραίτητες για την επιδιόρθωση των σκελετικών μυών. Οι δυνατότητες αναγέννησης ζωικών μοντέλων είναι σημαντικά υψηλότερες από τους ανθρώπους γι' αυτό και δεν μπορούν να μεταφερθούν στον άνθρωπο στο σύνολό τους [13].

Η ανακάλυψη ότι η λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D πιθανόν να επιταχύνει την ανάκτηση της μυϊκής δύναμης λίγο μετά την έντονη σωματική δραστηριότητα υποστηρίχθηκε από μελέτες σε λιγότερο δραστήρια άτομα και χαμηλές δόσεις βιταμίνης. Σε μια τυχαιοποιημένη, διπλά τυφλή, ελεγχόμενη με εικονικό φάρμακο μελέτη, οι Barker et al έδειξαν ότι 4.000 IU βιταμίνης D την ημέρα για διάστημα 35 ημερών σε υγιείς και μέτρια ενεργούς ενήλικες, μείωσαν την αύξηση των ηπατικών βιοδεικτών αλανίνης (ALT) και ασπαρτικού (AST) αμέσως μετά από δέκα σετ των δέκα επαναλήψεων ισομετρικών ομόκεντρων αλμάτων. Αν και η μέγιστη απόδοση μειώθηκε και στις δύο ομάδες, η απόδοση μειώθηκε μόνο κατά 6% στην ομάδα με συμπληρώματα, ενώ η απόδοση της ομάδας εικονικού φαρμάκου μειώθηκε κατά 32% μετά την προπόνηση. Αυτή η απόκλιση παρέμεινε ακόμη και μετά από 48 ώρες. Μια μελέτη με κορυφαίους κωπηλάτες έδειξε ότι η ημερήσια πρόσληψη 3.000 IU βιταμίνης D3 ήταν ευεργετική για το μεταβολισμό του σιδήρου αλλά ανεπαρκής για επαρκή μυϊκή αποκατάσταση. Μια άλλη ελεγχόμενη με εικονικό φάρμακο μελέτη με 22 ποδοσφαιριστές οι οποίοι λάμβαναν συμπλήρωμα 50.000 IU βιταμίνης D την εβδομάδα για οκτώ εβδομάδες, τόνισε ότι παρόλο που υπήρξε αύξηση της βιταμίνης D στον ορό, δεν υπήρξε καμία αλλαγή στις παραμέτρους της μυϊκής βλάβης. Ως εκ τούτου, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να αποσαφηνιστεί η πιθανή επίδραση της βιταμίνης D στη φάση της ανάρρωσης στον αθλητικό πληθυσμό [13].

Πρόσθετα οφέλη της βιταμίνης D σχετικά με την υγεία έχουν αποσαφηνιστεί τις τελευταίες δεκαετίες με την αναγνώριση των υποδοχέων της βιταμίνης D σε σχεδόν κάθε ιστό και κύτταρο στο ανθρώπινο σώμα συμπεριλαμβανομένων των κυττάρων του εντέρου, των οστών, του εγκεφάλου, της καρδιάς και του ανοσοποιητικού. Αυτές οι ανακαλύψεις οδήγησαν σε αναδυόμενες ενδείξεις ότι η βιταμίνη D μπορεί να σχετίζεται με την πρόληψη μη σκελετικών, αυτοάνοσων και χρόνιων ασθενειών όπως καρδιαγγειακά νοσήματα, υπέρταση, διαβήτης, διάφορες μορφές καρκίνου, ρευματοειδή αρθρίτιδα και φλεγμονώδη νόσο του εντέρου, και μπορεί επίσης να επηρεάσει τη λειτουργία του ανοσοποιητικού και τις φλεγμονώδεις αποκρίσεις [18].

1.4.5 Ανοσοποιητικό Σύστημα

Έχει αναφερθεί ότι η λειτουργία του ανοσοποιητικού μπορεί να διαταραχθεί από την υπερβολική προπόνηση, τους ψυχολογικούς στρεσογόνους παράγοντες, τα διαταραγμένα πρότυπα ύπνου και την κακή διατροφή. Ως εκ τούτου, για να αντιμετωπίσουν τον υψηλό όγκο προπόνησης και το φορτίο συχνότητας, είναι σημαντικό για τους επαγγελματίες αθλητές να έχουν βέλτιστο ύπνο και διατροφή για να βοηθήσουν στη διατήρηση ενός υγιούς ανοσοποιητικού συστήματος. Μεταξύ των πολλών πιθανών ρόλων που έχει η βιταμίνη D στο

ανθρώπινο σώμα, υπάρχουν στοιχεία πως τα άτομα με υψηλότερη κατάσταση βιταμίνης D εμφανίζουν χαμηλότερη συχνότητα λοιμώξεων του αναπνευστικού. Επιπλέον, μια συστηματική ανασκόπηση και μετα-ανάλυση τυχαιοποιημένων ελεγχόμενων δοκιμών διαπίστωσε ότι η καθημερινή ή εβδομαδιαία λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D είχε ως αποτέλεσμα στατιστικά σημαντική μείωση του ποσοστού των συμμετεχόντων που εμφάνισαν τουλάχιστον μία οξεία λοίμωξη του αναπνευστικού συστήματος - οι προστατευτικές επιδράσεις της συμπλήρωσης βιταμίνης D ήταν ισχυρότερες σε εκείνους με ανεπάρκεια 25(OH)D (<25 nmol/l) [23].

Διαφορετικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η βιταμίνη D επηρεάζει την έμφυτη και προσαρμοστική ανοσία μέσω της δράσης της στο VDR. Οι υποδοχείς της βιταμίνης D και το ένζυμο 1-α υδροξυλάση, το οποίο υδροξυλιώνει την 25(OH)D, υπάρχουν σε πολλά κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι λειτουργικά σημαντικά. Παραδείγματα κυττάρων που περιέχουν VDR και 1-α υδροξυλάση είναι T και B λεμφοκύτταρα και ουδετερόφιλα [12,21,23]. Η βιταμίνη D επηρεάζει τόσο τα T όσο και τα B κύτταρα. Σε συνθήκες ηρεμίας, η έκφραση των VDRs παρουσιάζει χαμηλή δραστηριότητα τόσο στα T όσο και στα B κύτταρα, αλλά σε μολυσματικές ασθένειες αυξάνουν τη δραστηριότητά τους, γεγονός που υποδηλώνει κρίσιμο ρόλο στην προσαρμοστική ανοσία.[E] Η βιταμίνη D μπορεί επίσης να ρυθμίσει προς τα πάνω τα αντιμικροβιακά πεπτίδια. Αυτά τα ανοσοκύτταρα έχουν ανασταλτική δράση και μπορούν να ρυθμίσουν προς τα κάτω τις προφλεγμονώδεις κυτοκίνες (πρωτεΐνες που εκκρίνονται από άλλα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος), όπως ο παράγοντας νέκρωσης όγκων-άλφα (TNF-άλφα) και η ιντερλευκίνη-6 (IL-6), η οποία μετατρέπει τα μονοκύτταρα σε μακροφάγα και παράγει περισσότερες φλεγμονώδεις κυτοκίνες. [12,21,23,34,38]. Στα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος, η 1,25-υδροξυβιταμίνη D ενισχύει την έμφυτη ανοσοαπόκριση κυρίως μέσω της ικανότητάς της να διεγείρει την καθελικιδίνη, ένα αντιμικροβιακό πεπτίδιο σημαντικό για την άμυνα έναντι παθογόνων οργανισμών, ενώ ταυτόχρονα αναστέλλει την προσαρμοστική ανοσοαπόκριση κυρίως μέσω της αναστολής της ωρίμανσης των δένδριτικών κυττάρων (DC) τα οποία είναι σημαντικά για την παρουσίαση αντιγόνων, μειώνοντας τον πολλαπλασιασμό των T-λεμφοκυττάρων και μεταβάλλοντας την ισορροπία διαφοροποίησης των T-κυττάρων [8,21,35]. Η ιντερλευκίνη-6 μπορεί να αυξηθεί νωρίς στην έντονη προπόνηση και πιστεύεται να σχετίζεται με την εμφάνιση μυϊκής βλάβης κατά την προπόνηση.

Από την άλλη πλευρά, έχει αποδειχθεί ότι η βιταμίνη D μειώνει την παραγωγή άλλων προφλεγμονωδών κυτοκινών όπως η ιντερφερόνη, ιντερλευκίνη-2 και παράγοντας νέκρωσης όγκου-6. Τα χαμηλά επίπεδα VITD στο γενικό πληθυσμό και στους αθλητές (ειδικά μετά από έντονη άσκηση) έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της IL6 και του TNF-α. Επομένως, η βιταμίνη D βελτιώνει αυτή τη φλεγμονώδη απόκριση. Υποστηρίζοντας τα παραπάνω, η ανεπάρκεια της βιταμίνης D στους αθλητές συνδέεται με υψηλότερη συχνότητα ασθενειών, συμπεριλαμβανομένων των κοινών κρυολογημάτων, της γρίπης και της γαστρεντερίτιδας. Στους αθλητές, η συχνότητα των αναπνευστικών παθήσεων είναι υψηλότερη (ειδικά σε επίπεδο ελίτ), υποδηλώνοντας ότι τα χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D μπορεί να ευνοούν την ευαισθησία αυτών των επαγγελματιών σε λοιμώξεις του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, ενώ τα άτομα με υψηλότερα επίπεδα βιταμίνης D δείχνουν χαμηλότερη τάση [12]. Από μελέτες στις οποίες ερευνήθηκε η ρευματοειδής αρθρίτιδα, προτείνεται ότι η βιταμίνη D μπορεί να παίζει ρόλο στον πολλαπλασιασμό των T-κυττάρων, αναστέλλοντας έτσι την έκφραση φλεγμονωδών κυτοκινών όπως η IL-6, η IL-17 και η IL-23. Επιπλέον, η βιταμίνη D μπορεί επίσης να ρυθμίσει προς τα πάνω την παραγωγή αντιφλεγμονωδών κυτοκινών (όπως IL-4, IL-10 και IL-13).

Η έμφυτη ανοσία επηρεάζεται αρνητικά από τα χαμηλά επίπεδα διαθεσιμότητας βιταμίνης D στον οργανισμό επειδή η παραγωγή της καθελικιδίνης (μια αντιμικροβιακή πρωτεΐνη κρίσιμη για την έμφυτη ανοσία) εξαρτάται από τη βιταμίνη D. Η βιταμίνη D3

συμβάλλει επίσης στην άμυνα έναντι παθογόνων μικροοργανισμών όπως το *Mycobacterium tuberculosis* μέσω της καθελικιδίνης. Οι υποδοχείς τύπου Toll ενεργοποιούνται, προκαλώντας την ανοδική ρύθμιση των VDR, τα οποία επάγουν επομένως τη μεταγραφή των γονιδίων που ανταποκρίνονται στη βιταμίνη D που οδηγεί στην παραγωγή της καθελικιδίνης [21,23,35]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η βιταμίνη D έχει την ικανότητα να ενεργοποιεί τη γονιδιακή έκφραση των AMP (αντιμικροβιακά πεπτίδια ευρέος φάσματος), τα οποία εκκρίνονται από το έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των μακροφάγων και επιθηλιακών κυττάρων στην αναπνευστική οδό, και βοηθούν στην άμυνα ενάντια στα εισβάλλοντα παθογόνα βακτήρια, μύκητες και ιούς. Στους αθλητές, είναι γνωστό ότι η παρατεταμένη έντονη προπόνηση έχει κατασταλτική επίδραση στη λειτουργία του ανοσοποιητικού και αυξάνει τον κίνδυνο μόλυνσης του ανώτερου αναπνευστικού. Η βιταμίνη D λοιπόν μπορεί να επηρεάσει την ευαισθησία τέτοιων λοιμώξεων στους αθλητές. Μια μελέτη διαπίστωσε ότι τα επίπεδα βιταμίνης D στο αίμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης συσχετίστηκαν αρνητικά με ασθένειες του ανώτερου αναπνευστικού κατά τη διάρκεια της σεζόν. Το σημείο διακοπής εμφανίστηκε στα ~95 nmol/L έτσι ώστε οι αθλητές που διατηρούσαν αποθέματα χαμηλότερα από το σημείο διακοπής είχαν ένα ή περισσότερα επεισόδια ασθένειας, ενώ εκείνοι με υψηλότερα αποθέματα είχαν ένα ή λιγότερα επεισόδια [30].

Η βιταμίνη D είναι ένας ισχυρός ρυθμιστής του έμφυτου και προσαρμοστικού ανοσοποιητικού συστήματος και διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στον έλεγχο της σηματοδότησης και ενεργοποίησης του υποδοχέα αντιγόνου των T-κυττάρων του ανθρώπου. Αυτό υποδηλώνει έναν πιθανό ρόλο της βιταμίνης D στην αποφυγή λοιμώξεων όπως η νόσος της ανώτερης αναπνευστικής οδού (URTI), η οποία, από την άποψη της αθλητικής απόδοσης, σημαίνει απώλεια ημερών προπόνησης και πιθανώς ημερών αγώνα [20,21,24]. Μια ελεγχόμενη κλινική μελέτη εξέτασε την επίδραση της κατάστασης των επιπέδων βιταμίνης D στη συχνότητα, τη σοβαρότητα και τη διάρκεια των επεισοδίων URTI σε 225 αθλητές αντοχής κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής προπονητικής περιόδου 16 εβδομάδων. Το πλάσμα αναλύθηκε για συνολική 25(OH)D στην έναρξη και στο τέλος της μελέτης. Το 38% των αθλητών στην αρχή και το 55% στο τέλος της μελέτης είχαν επίπεδα συγκεντρώσεως 25(OH)D στο πλάσμα 12-20 ng/ml και <12 ng/ml αντίστοιχα. Στην ομάδα με συγκέντρωση 25(OH)D στο πλάσμα <12 ng/ml, ένα σημαντικό υψηλότερο ποσοστό αθλητών παρουσίασε συμπτώματα URTI σε σχέση με την ομάδα με βέλτιστες συγκεντρώσεις VitD (>48 ng/ml). Επιπλέον, ο αριθμός των ημερών με συμπτώματα και ο βαθμός σοβαρότητας συμπτωμάτων στην ομάδα με VitD <12 ng/ml ήταν σημαντικά υψηλότερος. Ενδιαφέρον από αυτή την άποψη είναι ότι η βέλτιστη ποσότητα 25(OH)D στην κυκλοφορία για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ανοσοποιητικού φαινόταν να είναι υψηλότερη από αυτή που θεωρείται επαρκής από τις τρέχουσες κατευθυντήριες γραμμές [20,35]

Τέλος, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η βιταμίνη D έχει ανοσοτροποποιητικά αποτελέσματα, καθώς τα αυξημένα επίπεδα βιταμίνης D φαίνεται να μειώνουν τη φλεγμονή. Οι προφλεγμονώδεις κυτοκίνες όπως ο TNF-α και η ιντερλευκίνη-6 αυξάνονται όταν τα επίπεδα της 25(OH)D στον ορό είναι χαμηλά, ειδικά μετά από έντονες περιόδους άσκησης. Αυτή η περίοδος αυξημένης φλεγμονής έχει θεωρηθεί ως μία από τις πιθανές αιτίες της «υπερπροπόνησης ή του λεγόμενου συνδρόμου «υπερβολής». Θεωρητικά, εάν οι αθλητές αύξαναν τα επίπεδα βιταμίνης D με συμπληρώματα, η φλεγμονή θα μειωνόταν και η προπόνηση θα μπορούσε να συνεχιστεί πιο γρήγορα [11]. Ωστόσο, μια μελέτη σε επαγγελματίες ποδοσφαιριστές η οποία αξιολόγησε την επίδραση της λήψης 20.000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D3, 2 φορές την εβδομάδα για διάστημα 8 εβδομάδων, στην απελευθέρωση της IL-6, παρατήρησε μια στατιστικά μη σημαντική αύξηση της IL-6 ($p < 0.05$), ενώ δεν κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συμπλήρωση με βιταμίνη D3 έχει ανοσορρυθμιστική επίδραση [36]. Ομοίως, μια συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας με μετα-ανάλυση από

τους Saedmocheshi et al. [37] έδειξε πως μόνο στις 2 εκ των 6 εξεταζόμενων ανασκοπήσεων παρατηρήθηκε συσχέτιση μεταξύ της βιταμίνης D και της μείωσης της IL-6 και του TNF-a.

1.4.6 Φλεγμονή

Η βιταμίνη D δρα μέσω του ανοσοποιητικού συστήματος για τον έλεγχο της φλεγμονής. Ειδικότερα, αυξάνει την παραγωγή αρκετών αντιφλεγμονωδών κυτοκινών (αυξητικός παράγοντας μετασχηματισμού και ιντερλευκίνες -4, -10, -13) και μειώνει την παραγωγή προφλεγμονωδών κυτοκινών όπως η ιντερλευκίνη-6, η ιντερφερόνη-γ, η ιντερλευκίνη-2 και ο παράγοντας TNF-a [10,30,38].

Σύμφωνα με μελέτες, τα άτομα με υψηλότερα επίπεδα βιταμίνης D, παρουσίασαν χαμηλότερα επίπεδα δεικτών φλεγμονής στο αίμα τους, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στην μείωση του κινδύνου τραυματισμού αλλά και γενικότερα στην προώθηση της συνολικής υγείας του ποδηλάτη. Η φλεγμονή συνδέεται με μυϊκό πόνο και τραυματισμό, επομένως η μείωση του κινδύνου φλεγμονής μπορεί να επιφέρει βελτίωση στη μυϊκή υγεία και ασφαλώς βελτίωση στην αθλητική απόδοση.

Τα χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D σε αθλητές αντοχής, έχουν συσχετιστεί με αυξημένο δείκτη φλεγμονής και υψηλό κίνδυνο τραυματισμών που σχετίζονται με τη φλεγμονή. Επίσης, έχει βρεθεί ότι η βιταμίνη D σε συνδυασμό με την αερόβια άσκηση βελτιώνουν την ανοχή στην άσκηση σε ασθματικούς ασθενείς, υποδηλώνοντας ότι η βιταμίνη D και η αερόβια άσκηση μαζί, μπορεί να παρέχουν αντιφλεγμονώδη αποτελέσματα στους πνεύμονες [25]. Επιπλέον, η βιταμίνη D έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στη μείωση του οξειδωτικού στρες που προκαλείται ύστερα από υψηλής έντασης άσκηση. Γενικά, η έντονη σωματική άσκηση προκαλεί αύξηση στα επίπεδα γαλακτικού οξέος, φλεγμονή και οξειδωτικό στρες μέσω μυϊκών τραυματισμών, οι οποίοι με τη σειρά τους οδηγούν σε σημαντική αύξηση των επιπέδων τροπονίνης, μυοσφαιρίνης, κινάσης της κρεατίνης (CK) και TNF-a στον ορό [10]. Η βιταμίνη D λοιπόν, μπορεί να μειώσει τη μυϊκή κόπωση καθώς φαίνεται ότι εμφανίζει αντίστροφη συσχέτιση με τους παράγοντες αυτούς [38].

1.4.7 Μυϊκή Δύναμη & Ισχύς

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν αρκετές συνδέσεις μεταξύ των επιπέδων της βιταμίνης D και της απόδοσης δύναμης σε υγιή άτομα και αθλητές. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D σχετίζεται σημαντικά με τη σωματική απόδοση, ειδικά με την ισχύ και τη δύναμη [10]. Η βιταμίνη D φαίνεται να προάγει τη μυογένεση και τη σύνθεση μυϊκής πρωτεΐνης, αυξάνοντας το ποσοστό των μυϊκών ινών τύπου II, οι οποίες σχετίζονται με την παραγωγή υψηλής ισχύος, τη γρήγορη μυϊκή συστολή και τη μυϊκή ανάπτυξη [2]. Έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί για να εξηγηθεί η επίδραση της βιταμίνης D στη λειτουργία των μυών (δηλαδή στη δύναμη και στην ισχύ). Η ενεργοποιημένη μορφή της βιταμίνης D έχει αναφερθεί ότι ασκεί βιολογικά αποτελέσματα μέσω της σύνδεσής της με τους υποδοχείς της βιταμίνης D, οι οποίοι βρίσκονται στα περισσότερα εξωσκελετικά ανθρώπινα κύτταρα, συμπεριλαμβανομένων των σκελετικών μυών [10]. Προτείνεται ότι η βιταμίνη D3 μπορεί να αυξήσει τη δύναμη και την απόδοση του σκελετικού μυϊκού ιστού πιθανώς μέσω της ευαισθητοποίησης των σημείων δέσμευσης ασβεστίου στο σαρκοπλασματικό δίκτυο, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες μυϊκές συσπάσεις [1,10,13]. Υπάρχουν επίσης περαιτέρω στοιχεία ότι η βιταμίνη D3 συγκεκριμένα, μπορεί να αυξήσει το μέγεθος και τον αριθμό των μυϊκών ινών τύπου II και να βελτιώσει τη μυϊκή λειτουργία μέσω μορφολογικών προσαρμογών και βελτιωμένης διαθεσιμότητας ασβεστίου [1,10]. Ο αριθμός των πυρηνικών υποδοχέων βιταμίνης D στα κύτταρα σχετίζεται με τη μυϊκή λειτουργία· επομένως, η βιταμίνη D μπορεί να επηρεάζει δυνητικά τη σύνθεση μυϊκών πρωτεϊνών, τον νευρομυϊκό έλεγχο και τις μυϊκές

ίνες τύπου II. Ιδιαίτερα, ο νευρομυϊκός έλεγχος και οι ίνες τύπου II είναι σημαντικοί παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε παραγωγή υψηλής δύναμης και ταχεία μυϊκή σύσπαση [10]. Ωστόσο, αυτά τα ευρήματα δεν έχουν ακόμη επαληθευτεί σε μελέτες με αθλητές.

Τα δεδομένα για τη μυϊκή δύναμη και την αθλητική απόδοση σε αθλητές είναι περιορισμένα και τα αποτελέσματα είναι αμφιλεγόμενα. Οι λίγες μελέτες που διερεύνησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ της μυϊκής δύναμης και της κατάστασης της βιταμίνης D ορού σε αθλητές δεν βρήκαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ τους. Μια σύγκριση μεταξύ αθλητών με επαρκή (>50 nmol/l) και αθλητών με ανεπαρκή (<50 nmol/l) κατάσταση βιταμίνης D δεν έδειξε διαφορές στο άλμα αντίθετης κίνησης και στην αερόβια φυσική κατάσταση (VO_{2max}). Σε αθλητές με σοβαρή ανεπάρκεια (<20 ng/ml), ανεπαρκή (20-32 ng/ml) και επαρκή βιταμίνη D (>32 ng/ml), διερευνήθηκε η μυϊκή δύναμη επέκτασης/κάμψης του γόνατος και ραχιαία κάμψη αστραγάλου/πελματιαία κάμψη. Είναι ενδιαφέρον ότι η ισοκινητική δύναμη των κάτω άκρων δεν ήταν σημαντικά διαφορετική όταν συγκρίθηκαν και οι τρεις ομάδες. Αναφέρεται ότι αν και η βιταμίνη D μπορεί να έχει ευεργετικές επιδράσεις στους σκελετικούς μύες των αθλητών, δεν έχει καμία επίδραση στην απόδοση των αθλητών που δεν παρουσιάζουν ανεπάρκεια βιταμίνης D. Ωστόσο, ορισμένες μελέτες σχετικά με τη μυϊκή δύναμη και τη βιταμίνη D σε αθλητές δεν έδειξαν καμία επίδραση στην απόδοση παρόλο που το επίπεδο βιταμίνης D ήταν ανεπαρκές. Σε ορισμένες μελέτες, η μυϊκή λειτουργία και η αθλητική απόδοση βελτιώθηκαν μόνο σε αθλητές με ανεπάρκεια βιταμίνης D. Παρόμοια με άλλες μελέτες η λήψη συμπληρωμάτων με 20.000 και 40.000 IU βιταμίνης D για 6 και 12 εβδομάδες σε αθλητές σε επίπεδο συλλόγων αύξησε τη συγκέντρωση βιταμίνης D, αλλά δεν παρατηρήθηκε βελτίωση στην απόδοση [13]. Άλλη μελέτη στην οποία εξετάστηκαν τα επίπεδα βιταμίνης D σε επαγγελματίες ποδηλάτες και μη, έδειξε πως τα άτομα με υψηλότερα επίπεδα βιταμίνης D παρουσίασαν αυξημένη μυϊκή δύναμη συγκριτικά με τα άτομα με χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D. Αυτό είναι σημαντικό για τους ποδηλάτες, καθώς η μυϊκή δύναμη είναι παράγοντας ζωτικής σημασίας για την παραγωγή υψηλών επιπέδων ισχύος κατά την ώθηση του πεντάλ στη διάρκεια του αγώνα. Στην ίδια μελέτη, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια εποχιακή διακύμανση σχετικά με την ικανότητα εκγύμνασης των μυών, με την μέγιστη ικανότητα εκγύμνασης να εμφανίζεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν δηλαδή η απορρόφηση της βιταμίνης D μέσω του ηλίου είναι στο υψηλότερο επίπεδο.

Τα αντικρουόμενα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας αναφορικά με τα οφέλη της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D στην αθλητική απόδοση, αφήνουν ανοιχτό το ενδεχόμενο ότι τα ενδεχόμενα οφέλη της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D στην απόδοση ίσως περιορίζονται μόνο σε αθλητές με σημαντική έλλειψη βιταμίνης D [1].

1.4.8 Μέγιστη Πρόσληψη Οξυγόνου (VO_{2max}) & Καρδιοαναπνευστική Ικανότητα (CRF)

Στους αθλητές, η επίδραση της βιταμίνης D έχει διερευνηθεί κατά κύριο λόγο αναφορικά με τη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2max}), την αντοχή και την απόδοση δύναμης. Ενώ φάνηκε πως η VO_{2max} , η αντοχή και η δύναμη επηρεάζονται θετικά, δεν φάνηκε το ίδιο και για την αερόβια απόδοση. Ο μηχανισμός ο οποίος δρα στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου όταν τα επίπεδα 25(OH)D στον ορό αυξάνονται, δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος. Ωστόσο, αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από τα ένζυμα CYP (κυτόχρωμα P), τα οποία ενεργοποιούν τη βιταμίνη D3 σε 1,25-διυδροξυ βιταμίνη D3, περιέχουν πρωτεΐνες που περιέχουν αίμη και θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη συγγένεια δέσμευσης του οξυγόνου με την αιμοσφαιρίνη. Επιπλέον, VDRs υπάρχουν στον μυοκαρδιακό και αγγειακό ιστό, υποδηλώνοντας ότι η 1,25-διυδροξυ βιταμίνη D μπορεί να επηρεάσει το VO_{2max} μέσω της ικανότητας μεταφοράς και αύξησης του οξυγόνου στο αίμα [13]. Στα ενδοθηλιακά κύτταρα των αιμοφόρων αγγείων έχουν εντοπιστεί υποδοχείς βιταμίνης D (VDRs), καθώς επίσης και

το ένζυμο 1- α -hydroxylase, το οποίο είναι απαραίτητο για την ενεργοποίηση αυτών των υποδοχέων στην ορμονική τους μορφή. Έχει αποδειχθεί ότι άτομα με χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D παρουσιάζουν ανωμαλίες σε διάφορους δείκτες αγγειακής λειτουργίας, όπως η διαστολή της βραχιόνιας αρτηρίας εξαρτώμενη από την ενδοθηλιακή λειτουργία (flow-mediated dilation) και η αντιδραστική υπεραιμία. Ένας ακόμη μηχανισμός που θεωρείται ότι ευθύνεται για τη συσχέτιση της βιταμίνης D με την καρδιοαναπνευστική αντοχή, είναι το σύστημα ρενίνης – αγγειοτενσίνης - αλδοστερόνης. Σε άτομα με χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D, το σύστημα αυτό δεν ενεργοποιείται κατάλληλα, με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση της ευαισθησίας σε πνευμονική υπέρταση και πιθανόν υπερτροφία της αριστερής κοιλίας. Βάσει αυτών των συσχετιστικών δεδομένων, εικάζεται ότι οι αρνητικές συνέπειες της ανεπαρκούς συγκέντρωσης βιταμίνης D στην αγγειακή υγεία και στην υπερτροφία της αριστερής κοιλίας, μπορεί να μειώνουν τις τιμές της VO_{2max} . Επιπλέον, δεδομένου ότι έχει αποδειχθεί πως η βιταμίνη D₃ ενεργοποιεί την οδό p38 MAPK (mitogen-activated protein kinase) σε πειραματόζωα, είναι πιθανό ότι επαρκείς συγκεντρώσεις βιταμίνης D να συμβάλλουν σε ορισμένες από τις προσαρμογές του σκελετικού μυός στην αερόβια άσκηση, όπως αύξηση της μιτοχονδριακής μάζας, βελτίωση της οξειδωτικής ικανότητας των μυών και αύξηση της ευαισθησίας της πρόσληψης γλυκόζης από τους μύες στην ινσουλίνη [2,38].

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει θετική συσχέτιση μεταξύ της VO_{2max} και της συγκέντρωσης 25(OH)D στον ορό σε μη αθλητές. Ωστόσο, δεν ελήφθησαν υπόψη πρόσθετες μεταβλητές, όπως η ταυτόχρονη χρήση πολυβιταμινούχων σκευασμάτων και συμπληρωμάτων διατροφής. Οι μελέτες για την αλληλεπίδραση μεταξύ αερόβιας ισχύος (που καθορίζεται από το VO_{2max}) και της βιταμίνης D σε αθλητές είναι αντιφατικές. Οι Koundourakis et al. βρήκαν μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των τιμών 25(OH)D και επιλεγμένων παραμέτρων απόδοσης σε άνδρες επαγγελματίες ποδοσφαιριστές. Παρατηρήθηκε μια γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών 25(OH)D πριν και μετά τη σεζόν με μετρήσεις της ομόκεντρης μυϊκής δύναμης και VO_{2max} .

Σε μια άλλη μελέτη, οι νεαροί ποδοσφαιριστές έλαβαν είτε βιταμίνη D (5.000 IU/ημέρα) είτε εικονικό φάρμακο κατά τη διάρκεια οκτώ εβδομάδων εντατικής προπόνησης (διαλειμματική προπόνηση υψηλής έντασης, HIIT). Στην ομάδα που έλαβε το συμπλήρωμα, η συγκέντρωση βιταμίνης D αυξήθηκε κατά 119% και η VO_{2max} κατά 20%. Στην ομάδα του εικονικού φαρμάκου, η συγκέντρωση βιταμίνης D μειώθηκε κατά 8,4% και η VO_{2max} αυξήθηκε κατά 13%, υποδηλώνοντας ότι η λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D μπορεί να έχει ευεργετική, αν και μέτρια, επίδραση στην αερόβια ικανότητα σε νεαρούς ποδοσφαιριστές. Σε μια άλλη μελέτη σε ελαφριού βάρους κωπηλάτες, παρατηρήθηκαν επαρκώς υψηλά επίπεδα βιταμίνης D (> 30 ng/ml) κατά τη διάρκεια μιας προπονητικής φάσης οκτώ εβδομάδων όπου χορηγούνταν ημερησίως είτε 6.000 μονάδες βιταμίνης D είτε εικονικό φάρμακο. Σημειώθηκε επίσης σημαντική αύξηση στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (12,1% έναντι 10,3% με το εικονικό φάρμακο), καθώς και αύξηση των επιπέδων βιταμίνης D κατά περίπου 400% [13].

Η καρδιοαναπνευστική ικανότητα (CRF) είναι ένας σημαντικός καθοριστικός παράγοντας της αερόβιας απόδοσης. Σε υγιείς ενήλικες ($n=200$, 54% γυναίκες, μέση ηλικία $40 \pm 14,4$ έτη, μέση VO_{2max} $34 \pm 10,3$ ml/kg/min), η συγκέντρωση 25(OH)D στον ορό προέβλεψε CRF (θετική συσχέτιση $r=0,29$, $p=0,0001$) μετά από προσαρμογή για την ηλικία, το φύλο και τον δείκτη μάζας σώματος. Αν και ο μηχανισμός στον οποίο βασίζεται αυτή η συσχέτιση δεν είναι πλήρως σαφής, φαίνεται εύλογο να υποθέσουμε ότι ένας παράγοντας που συμβάλλει μπορεί να είναι η βελτίωση της ανοσολογικής και μυϊκής λειτουργίας/αναγέννησης που τελικά μεταφράζεται σε λιγότερες ημέρες προπόνησης που χάνονται λόγω ασθένειας και τραυματισμού [20].

1.4.9 Νευρικό Σύστημα

Η βιταμίνη D επηρεάζει το κεντρικό και το περιφερικό νευρικό σύστημα. Οι υποδοχείς της βιταμίνης D υπάρχουν σε όλο τον εγκέφαλο, συμπεριλαμβανομένου του πρωτογενούς κινητικού φλοιού, που είναι η περιοχή που συντονίζει την κίνηση. Με τη σειρά της, η βιταμίνη D επηρεάζει επίσης τη διαφοροποίηση των νευρώνων, την ωρίμανση και την ανάπτυξη. Ασκεί επίσης άμεσα νευροπροστατευτικά αποτελέσματα μέσω της σύνθεσης πρωτεϊνών που παίζουν ζωτικό ρόλο στη νευρική δραστηριότητα, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης.

Η λειτουργία του νευροδιαβιβαστή GABA (γ-αμινοβουτυρικό οξύ), αποτελεί ουσιαστικά το κύριο «φρένο» στον εγκέφαλο, καθώς επηρεάζει τη μυϊκή χαλάρωση μέσω των κορτικοσπονδυλικών νευρώνων. Η βιταμίνη D φαίνεται πως επιδρά στη λειτουργία του GABA, της σεροτονίνης και της ντοπαμίνης, πράγμα που είναι ζωτικής σημασίας για τον συντονισμό των μυών και την αποφυγή της κεντρικής κόπωσης, μια κατάσταση που σχετίζεται με τη συναπτική συγκέντρωση αρκετών νευροδιαβιβαστών. Τα υψηλά ποσοτά σεροτονίνης και ντοπαμίνης μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της άσκησης λόγω της επίδρασής τους στο γενικό αίσθημα κόπωσης και στην αντίληψη της προσπάθειας. Ένας άλλος μηχανισμός, μέσω του οποίου η βιταμίνη D επηρεάζει τον εγκέφαλο και τις αθλητικές επιδόσεις, μπορεί να περιλαμβάνει τους υποδοχείς πόνου, ή μάλλον, το αισθητήριο νευρικό κύτταρο που ανταποκρίνεται σε επιβλαβή ερεθίσματα στέλνοντας σήματα στον νωτιαίο μυελό και τον εγκέφαλο. Οι υποδοχείς πόνου είναι γεμάτοι VDRs και 1α-υδροξυλάση. Όταν αυτοί οι υποδοχείς μεταφέρουν σήματα πόνου στον εγκέφαλο, λαμβάνει χώρα μια ανασταλτική φυσική απόκριση. Η συνάφεια αυτού του μηχανισμού και της σωματικής δραστηριότητας/βιταμίνης D είναι με βάση πρόσφατα ευρήματα σε μελέτες σε ζώα που υποδεικνύουν ότι η εξάντληση της βιταμίνης D θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερευαισθησία στον πόνο στον βαθύ μυϊκό ιστό και απώλεια ισορροπίας χωρίς να επηρεάσει τη μυϊκή ισχύ ή τη δερματική ερεθιστική αντίδραση. Με βάση αυτό το εύρημα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η υπερευαισθησία στον βαθύ μυϊκό ιστό θα μπορούσε να προκαλέσει ψευδή εμφάνιση μυαλγίας κατά τη διάρκεια της φυσικής δραστηριότητας, που θα μπορούσε να μειώσει την απόδοση σε άτομα με ανεπάρκεια βιταμίνης D [12].

1.4.10 Καρδιαγγειακή Λειτουργία

Η Καρδιά του Αθλητή

Η τακτική έντονη σωματική άσκηση συνδέεται με διάφορες δομικές και καρδιακές ηλεκτροφυσιολογικές προσαρμογές που βελτιώνουν τη διαστολική πλήρωση και διευκολύνουν τη διαρκή αύξηση της καρδιακής παροχής, η οποία είναι απαραίτητη για την αθλητική απόδοση. Η συντριπτική πλειοψηφία των αθλητών εμφανίζει σχετικά ελαφρές δομικές και ηλεκτρικές αλλαγές, οι οποίες θεωρούνται εντός του συμβατικού ορισμού των φυσιολογικών ορίων. Τέτοιες καρδιακές προσαρμογές είναι συλλογικά γνωστές ως «Καρδιά του Αθλητή». Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τις προσαρμογές της καρδιάς των αθλητών, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου άθλησης, της διάρκειας και της έντασης της προπόνησης, της ηλικίας, της εθνικότητας, του φύλου, της ανθρωπομετρίας και της κατάχρησης ουσιών για τη βελτίωση της απόδοσης. Ένα μικρό ποσοστό αθλητών αναπτύσσει έντονες αλλαγές που επικαλύπτονται με φαινοτυπικές εκφράσεις καρδιακής νόσου που εμπλέκονται σε αιφνίδιο καρδιακό θάνατο που σχετίζεται με την άσκηση (SCD). Αναγνωρίζεται επίσης ότι πολλοί επαγγελματίες αθλητές έχουν ανεπάρκεια βιταμίνης D και, επί του παρόντος, καμία μελέτη δεν έχει εξετάσει τη συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων βιταμίνης D και της καρδιακής δομής και λειτουργίας σε υγιείς αθλητές. Ένα πράγμα που πρέπει να έχουμε κατά νου είναι ότι πρόσφατη έρευνα έχει εντοπίσει μια συσχέτιση μεταξύ VITD και αιφνίδιου καρδιακού θανάτου σε

αθλητές, βρίσκοντας μια ισχυρή σχέση μεταξύ σοβαρής ανεπάρκειας VITD και αιφνίδιου καρδιακού θανάτου [13].

Ανάλογα το είδος προπόνησης που ακολουθούν οι αθλητές υψηλού επιπέδου, αναμένεται ότι θα παρουσιάζουν διαφορετική καρδιακή μορφολογία (συχνά αναφερόμενη ως «καρδιά του αθλητή») σε σύγκριση με τους μη ενεργούς συνομηλίκους τους (Weiner & Baggish 2012). Για παράδειγμα, αθλητές και καλά προπονημένα άτομα που συμμετέχουν σε δυναμικές ασκήσεις, όπως το τρέξιμο μεγάλων αποστάσεων, εμφανίζουν αυξημένη καρδιακή παροχή, η οποία οφείλεται σε αυξημένο όγκο παλμού και χαμηλότερο καρδιακό ρυθμό. Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι η φυσιολογία της καρδιάς εξαρτάται από το είδος του αθλήματος, την ηλικία, την εθνικότητα, τη γενετική και τη σύσταση σώματος.

Αν και η έρευνα μέχρι σήμερα δεν έχει επικεντρωθεί στις άμεσες επιδράσεις της συμπλήρωσης βιταμίνης D στη φυσιολογική καρδιακή μορφολογία, μια διατμηματική μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε 506 διεθνείς επαγγελματίες αθλητές (ποδοσφαιριστές, χειροσφαιριστές, πετοσφαιριστές και καλαθοσφαιριστές) από το Κατάρ έδειξε ότι όσοι είχαν συγκέντρωση 25(OH)D που ταξινομήθηκε ως «σοβαρά ανεπαρκής» ή «ανεπαρκής» (<25 και 25–50 nmol/l, αντίστοιχα) είχαν μικρότερη ρίζα αορτής, μικρότερη διάμετρο δεξιού και αριστερού κόλπου, μικρότερη διάμετρο μεσοκοιλιακού διαφράγματος, μικρότερη διάμετρο αριστερής κοιλίας και μικρότερη μάζα αριστερής κοιλίας, γεγονός που πιθανώς επηρεάζει αρνητικά την καρδιακή παροχή. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί άμεση σχέση μεταξύ της κατάστασης της βιταμίνης D και της καρδιακής μορφολογίας, λόγω της έλλειψης επαρκών δεδομένων στη βιβλιογραφία για την καθιέρωση αιτιότητας και των μηχανισμών που διέπουν αυτές τις συσχετίσεις. Οι σχέσεις μεταξύ της κατάστασης της βιταμίνης D και των καρδιακών παραμέτρων παρέμειναν σημαντικές όταν ελέγχθηκαν για τη σύσταση σώματος, την ηλικία και την εθνικότητα όσον αφορά τον αριστερό κόλπο, το μεσοκοιλιακό διάφραγμα κατά τη διαστολή, τη διάμετρο της αριστερής κοιλίας κατά τη διαστολή, τη μάζα της αριστερής κοιλίας και τον όγκο της αριστερής κοιλίας κατά τη διαστολή. Ωστόσο, οι ερευνητές δεν έλαβαν υπόψη το είδος της προπόνησης και δεν προσδιορίστηκε ποια αθλητική ομάδα είχε χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D. Η καρδιοαναπνευστική ικανότητα σε ανταγωνιστικούς αθλητές χόκεϊ επί πάγου δεν συσχετίστηκε με την κατάσταση της βιταμίνης D μετά από δοκιμασία άσκησης σε δαπέδου κύλισης για πατινάζ ($r = -0.103$, $P = 0.469$) (Fitzgerald et al. 2014). Ομοίως, οι Forney et al. (2014) δεν βρήκαν καμία συσχέτιση μεταξύ της καρδιοαναπνευστικής ικανότητας και της κατάστασης της βιταμίνης D σε μια ομάδα γυναικών αθλητριών ($r = -0.214$, $P = 0.379$). Ωστόσο, οι άνδρες πανεπιστημιακοί αθλητές που είχαν επαρκή επίπεδα 25(OH)D (>87 nmol/l) εμφάνισαν 20% υψηλότερη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2max}) σε σύγκριση με τους ανεπαρκείς (<87 nmol/l) συναθλητές τους. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι οι άνδρες συμμετέχοντες είχαν ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D από τις γυναίκες αθλήτριες (μέσες τιμές: 33,0 έναντι 36,7 nmol/l, αντίστοιχα) και μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων 25(OH)D (46–124 έναντι 48–173 nmol/l, αντίστοιχα). Συνεπώς, το εύρος της επίδρασης της κατάστασης της βιταμίνης D στην καρδιαγγειακή υγεία παραμένει αβέβαιο, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα από προοπτικές μελέτες [23].

Μηχανισμός δράσης βιταμίνης D στην καρδιαγγειακή λειτουργία

Οι υποδοχείς της βιταμίνης D (VDRs) είναι παρόντες σε όλη την καρδιά και το αγγειακό σύστημα, εντοπίζονται συγκεκριμένα στα μυοκύτταρα και στους καρδιακούς ινοβλάστες. Η ενεργοποιημένη μορφή της βιταμίνης D, συμμετέχει στη δομική αναδιαμόρφωση του καρδιακού μυός και του αγγειακού ιστού και ενεργοποιεί την ικανότητα συστολής των μυοκυττάρων. Υπάρχουν επιστημονικές ενδείξεις ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D έχει μακροχρόνιες καρδιαγγειακές δυσμενείς επιπτώσεις. Η ανεπάρκεια βιταμίνης D επηρεάζει αρνητικά την καρδιακή συσταλτικότητα, τον αγγειακό τόνο, την περιεκτικότητα σε

καρδιακό κολλαγόνο και την ωρίμανση του καρδιακού ιστού. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D προκαλεί αύξηση των επιπέδων παραθορμόνης (PTH) που μπορεί να οδηγήσει σε υπερτροφία της αριστερής κοιλίας. Αυτή η υπερτροφία μπορεί να αλλάξει την ικανότητα πλήρωσης της κοιλίας και το κλάσμα εξώθησης οδηγώντας σε πιθανή υποξία του μυϊκού ιστού και μείωση της αθλητικής απόδοσης. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι σε ασθενείς που παρουσίασαν σοβαρή ανεπάρκεια βιταμίνης, η συμπληρωματική θεραπεία οδήγησε σε βελτίωση της λειτουργίας των καρδιακών μυών. Σε αγγειακό επίπεδο, υπάρχουν υποδοχείς βιταμίνης D στο αγγειακό τοίχωμα, επομένως πιστεύεται ότι η βιταμίνη D μπορεί να επηρεάζει την αγγειακή φυσιολογία και την παθοφυσιολογία της. Η ανεπάρκεια βιταμίνης D σχετίζεται με αυξημένη αρτηριακή ακαμψία και ενδοθηλιακή δυσλειτουργία στα αιμοφόρα αγγεία και προάγει την αθηρογένεση. Η σοβαρή ανεπάρκεια βιταμίνης D προκαλεί μεταβολή στην προσαρμοστική ανοσοαπόκριση ευνοώντας την αγγειακή δυσλειτουργία, την αντίσταση στην ινσουλίνη και την αρτηριοσκλήρωση. Αυτοί οι παράγοντες είναι κρίσιμοι για την απόδοση αερόβιας και αναερόβιας άσκησης και την ικανότητα αντίστασης. Επιπλέον, τα χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D στον ορό μπορούν να προκαλέσουν παθολογική υπερτροφία του μυοκαρδίου, αυξημένη αρτηριακή πίεση και ενδοθηλιακή δυσλειτουργία. Αυτή η συρροή αλλαγών υποστηρίζει την υπόθεση ότι τα ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την καρδιοαναπνευστική ικανότητα, επηρεάζοντας την παροχή οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών στους μύες που συμμετέχουν στην άσκηση. Πρόσφατα δεδομένα έχουν δείξει υψηλό επιπολασμό ανεπάρκειας βιταμίνης D μεταξύ των εθνοτήτων, ιδιαίτερα μεταξύ των Άραβων αθλητών. Η ανεπάρκεια βιταμίνης D σχετίζεται επίσης με υπέρταση, οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου, στεφανιαία νόσο, καρδιακή ανεπάρκεια και εγκεφαλικά επεισόδια, καθώς και με άλλες ασθένειες που σχετίζονται με καρδιαγγειακά νοσήματα. Η δυσλειτουργία του μυοκαρδίου μπορεί επίσης να προκύψει λόγω της αυξημένης απελευθέρωσης προφλεγμονωδών κυτταροκινών, της καταστολής των αντιφλεγμονωδών κυτταροκινών και της ίνωσης του μυοκαρδίου, η οποία μπορεί να αναπτυχθεί ως αποτέλεσμα της δευτερογενούς υπερπαραθυρεοειδισμού που προκαλείται από την ανεπάρκεια βιταμίνης D. Μέχρι σήμερα, η συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων βιταμίνης D, της εθνικότητας και της καρδιαγγειακής λειτουργίας σε αθλητικούς πληθυσμούς δεν έχει μελετηθεί [13,39].

1.5 Η Σχέση της Βιταμίνης D με την Οστική Πυκνότητα (BMD) και Περιεκτικότητα σε Ανόργανα Άλατα (BMC) σε Επαγγελματίες Ποδηλάτες

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια αυξανόμενη ανησυχία στην αθλητική επιστήμη σχετικά με την υγεία των οστών, ειδικά στα αθλήματα που δεν προκαλείται κάποιου είδους πρόσκρουση. Η πρόσληψη ασβεστίου (Ca) και βιταμίνης D (VitD) έχει περιγραφεί μεταξύ των πιο σημαντικών διατροφικών παραγόντων που σχετίζονται με τη μέγιστη απόκτηση οστικής μάζας. Όσον αφορά τον τρόπο ζωής, η σωματική δραστηριότητα και η συμμετοχή σε αθλήματα κατά τις περιόδους ανάπτυξης έχει αποδειχθεί ότι είναι καθοριστικής σημασίας για την απόκτηση οστικής μάζας. Ωστόσο, δεν έχουν όλα τα αθλήματα την ίδια οστεογονική δράση. Οι τιμές της περιεκτικότητας σε ανόργανα άλατα (BMC) και της πυκνότητας (BMD) των οστών ποικίλλουν μεταξύ των αθλημάτων λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών κάθε αθλήματος: υπάρχουν τα αθλήματα υψηλής επιρροής, όπως η γυμναστική ή το μπάσκετ, και τα αθλήματα μεγάλης διάρκειας και αντοχής όπως το κολύμπι ή η ποδηλασία. [40]

Παρά τα σαφή γενικά οφέλη για την υγεία που σχετίζονται με την τακτική ποδηλασία δρόμου, η ανταγωνιστική ποδηλασία έχει συσχετιστεί με χαμηλή οστική πυκνότητα (BMD). Ο μεταβολισμός των οστών είναι μια πολύπλευρη διαδικασία, συμπεριλαμβανομένων βιολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων και όταν αυτοί οι παράγοντες είναι ανισορροπημένοι, μπορεί να συμβούν αρνητικές σκελετικές προσαρμογές. Το οστό

αναδιαμορφώνεται ως απόκριση στο στέλεχος που του επιβάλλεται και το στέλεχος κάτω από ένα ελάχιστο όριο θα προκαλέσει οστική απορρόφηση. Οι δραστηριότητες που φέρουν βάρος έχουν σταθερά ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη BMD από τις δραστηριότητες που δεν φέρουν βάρος. Η αγωνιστική ποδηλασία, επομένως, με την ελάχιστη εξωτερική φόρτίσή της σε περιοχές όπως το ισχίο, η λεκάνη και η οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης, χαρακτηρίζεται ως μη οστεογόνο άθλημα. [41]

Συγκεκριμένα, μελέτες που εξέτασαν επαγγελματίες ποδηλάτες έχουν δείξει χαμηλές τιμές στους δείκτες υγείας των οστών, οι οποίοι μπορεί κατά συνέπεια να αυξήσουν τον κίνδυνο τραυματισμού ή πρώιμης έναρξης οστικής νόσου (οστεοπόρωση). Ένας από τους παράγοντες που ευθύνεται για την κατάσταση αυτή είναι η έλλειψη πρόσκρουσης δύναμης από τη φύση του αθλήματος, που φυσιολογικά διεγείρει την αναδιαμόρφωση των οστών. [42] Οι επαγγελματίες ποδηλάτες εκτελούν εξαιρετικά μεγάλους όγκους προπόνησης και ανταγωνισμού (20–30 ώρες/εβδομάδα: 500–1.000 χλμ/εβδομάδα), περνώντας μεγάλο μέρος της ημέρας τους πάνω στο ποδήλατο. Δεδομένου του ότι κατά την περίοδο ανάρρωσης οι ποδηλάτες βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε καθιστή ή ύπτια θέση, λαμβάνουν ανεπαρκή ισχυρά οστεογονικά ερεθίσματα στην διάρκεια της καθημερινότητάς τους [43].

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να καθορίσει την υγεία των οστών στους επαγγελματίες ποδηλάτες, είναι η διαθεσιμότητα ενέργειας (EA), συγκεκριμένα η ποσότητα διατροφικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη μετά την προπόνηση άσκησης για όλες τις μεταβολικές διεργασίες, που εκφράζεται σε σχέση με την άλιπη μάζα. Πράγματι, ελίτ άνδρες και γυναίκες ποδηλάτες έχουν αναγνωριστεί ως πληθυσμός με κίνδυνο για LEA, το οποίο μπορεί τελικά να οδηγήσει στο σύνδρομο σχετικής ενεργειακής ανεπάρκειας στον αθλητισμό (RED-S). Η σχετική ενεργειακή ανεπάρκεια στον αθλητισμό, (RED-S), όπως περιγράφεται από τη Διεθνή Ολυμπιακή Επιτροπή, αναφέρεται στην ανεπαρκή ενεργειακή διαθεσιμότητα τόσο σε άνδρες όσο και σε γυναίκες αθλητές, που μπορεί να οδηγήσει σε επιζήμια αποτελέσματα σε πολλαπλά συστήματα του οργανισμού και κατ' επέκταση στην αθλητική απόδοση [12]. Η ανταγωνιστική ποδηλασία και η προπόνηση στο υψηλότερο επίπεδο απαιτούν υψηλό φόρτο άσκησης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, πράγμα που μπορεί να διαταράξει την ομοιόσταση του ασβεστίου. Πολλοί επαγγελματίες ποδηλάτες λοιπόν, διατρέχουν υψηλό κίνδυνο σχετικής ενεργειακής ανεπάρκειας στον αθλητισμό (RED-S), η οποία έχει συνδεθεί με απώλεια σκελετικής μάζας. Αυτό μπορεί να συμβεί εν μέρει λόγω των πρακτικών απώλειας βάρους για τη διατήρηση χαμηλού αγωνιστικού βάρους για ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (με τη βελτίωση της αναλογίας ισχύος προς βάρος – ένας από τους καλύτερους δείκτες απόδοσης ειδικά σε αγώνες με πολύ ανηφορικό έδαφος) και της υψηλής ενεργειακής δαπάνης που σχετίζεται με μεγάλους όγκους προπόνησης και αγώνων. Η πρόσληψη ενέργειας μπορεί επίσης να είναι σκόπιμα χαμηλή όταν οι αθλητές στοχεύουν να μειώσουν τη μάζα σώματος για να ενισχύσουν την αναλογία ισχύος προς μάζα. Οι ποδηλάτες συχνά επιλέγουν να ακολουθούν δίαιτες που περιορίζουν τους υδατάνθρακες ή την συνολική προσλαμβανόμενη ενέργεια για να μειώσουν τη μάζα σώματος και τη μάζα λίπους με στόχο τη βελτίωση της αναλογίας ισχύος/βάρους, καθώς αυτός είναι ένας από τους καλύτερους δείκτες απόδοσης, ειδικά σε αγώνες με πολύ ανηφορικό έδαφος [41,42,43]. Αν και υπάρχουν πολλές πιθανές συνέπειες της χαμηλής ενεργειακής διαθεσιμότητας (EA), η ποσοτικοποίηση της οστικής πυκνότητας (BMD) αποτελεί έναν καθιερωμένο, αντικειμενικό και κλινικά σημαντικό δείκτη μακροχρόνιας χαμηλής ενεργειακής διαθεσιμότητας [12].

Ένας άλλος παράγοντας που θα μπορούσε να επηρεάζει αρνητικά την BMD στους ελίτ ποδηλάτες είναι η δερματική απώλεια ασβεστίου μέσω της εφίδρωσης, η οποία μπορεί να φτάσει τα ~150mg/h. Ως απόκριση στη δερματική απώλεια ασβεστίου, ο παραθυρεοειδής αδένας προάγει την αυξημένη απελευθέρωση της παραθυρεοειδούς ορμόνης (PTH), η οποία ενεργοποιεί την διαδικασία αφαλάτωσης του οστικού ιστού, για να μπορέσει να αποτρέψει ή να μετριάσει τη μείωση των επιπέδων ασβεστίου στον ορό. Εάν αυτός ο μηχανισμός

ενεργοποιείται χρόνια, μπορεί να είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει στη χαμηλή BMD σε επαγγελματίες ποδηλάτες [42,43]. Οι βραχυπρόθεσμες συνέπειες της χαμηλής BMD στους αθλητές περιλαμβάνουν αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων λόγω στρες και τραυματικών καταγμάτων οστών. Τα κατάγματα λόγω στρες, ωστόσο, φαίνονται πολύ ασυνήθιστα στους ελίτ ποδηλάτες λόγω του ελάχιστου οστικού στρες κατά τη διάρκεια της ποδηλασίας. Τα τραυματικά κατάγματα των οστών, από την άλλη πλευρά, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα μεταξύ των ελίτ ποδηλατών λόγω του σημαντικού κινδύνου ατυχημάτων κατά τη διάρκεια της προπόνησης και του αγώνα. Επιπλέον, οι μισοί από τους ποδηλάτες που έχουν υποστεί κατάγματα, έχουν υποβληθεί στη συνέχεια σε χειρουργική επέμβαση, τονίζοντας τη σημασία αυτού του προβλήματος. Μια σημαντική μακροπρόθεσμη συνέπεια της χαμηλής μέγιστης οστικής μάζας σε ελίτ ποδηλάτες θα μπορούσε να είναι αυξημένος κίνδυνος καταγμάτων των οστών αργότερα στη ζωή. Έχει προταθεί ότι η υψηλή μέγιστη οστική μάζα κατά την πρώιμη ενήλικη ζωή είναι ο μοναδικός πιο σημαντικός παράγοντας για την πρόληψη της οστεοπόρωσης με τη γήρανση. Μια αύξηση της μέγιστης οστικής μάζας κατά 10% έχει υπολογιστεί ότι καθυστερεί την εμφάνιση της οστεοπόρωσης κατά 13 χρόνια [43]. Ωστόσο, ως άθλημα που δεν φέρει βάρος, η ποδηλασία συνδέεται συχνά με χαμηλότερα επίπεδα οστικής μάζας, με τα δύο τρίτα των ενηλίκων επαγγελματιών και κορυφαίων ποδηλατών δρόμου να ταξινομούνται ως οστεοπενικοί [42]. Χωρίς θεραπεία, η χαμηλή BMD μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ευαισθησία σε κατάγματα. Αυτό καθιστά τη χαμηλή BMD στους ποδηλάτες ιδιαίτερα ανησυχητική, λόγω του υψηλού επιπολασμού των πτώσεων και φυσικά της επακόλουθης ευπάθειας σε κατάγματα [41].

Υπάρχουν πολλές μελέτες που έχουν αξιολογήσει την επίδραση των ετών εκπαίδευσης και συμμετοχής σε αγώνες, σε υψηλού επιπέδου ποδηλάτες δρόμου (καλά εκπαιδευμένοι, ερασιτέχνες και επαγγελματίες ποδηλάτες) στους δείκτες της υγείας των οστών. Πρόσφατα οι Martínez-Noguera et al. βρήκαν χαμηλότερα επίπεδα BMD και χαμηλή περιεκτικότητα των οστών σε μεταλλικά στοιχεία (BMC) στους επαγγελματίες ποδηλάτες σε σύγκριση με τους ερασιτέχνες. Λίγα χρόνια πριν, οι Klomsten et al. παρατήρησαν ότι οι ποδηλάτες δρόμου της εθνικής ελίτ της Νορβηγίας είχαν χαμηλότερη BMD σε σύγκριση με τους δρομείς και ένα μεγάλο ποσοστό ταξινομήθηκε στην κατηγορία χαμηλής BMD ($Z\text{-score} \leq -1$), παρά το γεγονός ότι ήταν εξαιρετικά προπονημένοι [42]. Η κλινική συνέπεια του $Z\text{-score} < -1$, ερμηνεύεται ως σημαντικά αυξημένος κίνδυνος τραυματισμού [12].

Οι Keay et al. διερεύνησαν τα επίπεδα ενεργειακής διαθεσιμότητας και την οστική υγεία 50 επαγγελματιών ποδηλατών του Ηνωμένου Βασιλείου, που αγωνίζονταν σε διεθνές ($n=4$), εθνικό ($n=20$) και περιφερειακό ($n=26$) επίπεδο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η οστική πυκνότητα (BMD) των συμμετεχόντων ήταν χαμηλότερη στην σπονδυλική στήλη (οσφυϊκή μοίρα). Τέσσερις από τους ποδηλάτες εμφάνισαν μάλιστα διαφορά $> 1SD$ μεταξύ γειτονικών σπονδύλων. Καταγράφηκαν επίσης 30 κατάγματα, τα οποία προκλήθηκαν από πτώσεις από το ποδήλατο, 2 περιπτώσεις με αθλητών με πολλαπλά κατάγματα σπονδύλων, που απαιτούσαν εσωτερική οστεοσύνθεση και οστικά μοσχεύματα, καθώς και 1 κάταγμα λεκάνης σε ποδηλάτη με προηγουμένως μη διαγνωσμένη οστεοπόρωση. Στους ποδηλάτες με χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα ($n=14$), η προηγούμενη ενασχόλησή τους με ασκήσεις με βάρη φάνηκε να μετριάξει την μείωση της BMD της οσφυϊκής μοίρας ($p<0.001$), ενώ στους ποδηλάτες με επαρκή διαθεσιμότητα ενέργειας ($n=36$) τα πολύ χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D ($Z\text{-score} -2.2$, ισοδύναμο με 43 nmol/L) συσχετίστηκαν σημαντικά με χαμηλή BMD στην οσφυϊκή μοίρα ($p<0.006$) [12].

Σε άλλη μελέτη, ύστερα από ένα χρόνο προπόνησης και αγώνων ποδηλασίας σε επαγγελματικό επίπεδο, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της BMD στα πόδια, τον κορμό, τα πλευρά και τη λεκάνη ($p \leq 0,05$) και μια πτωτική τάση στη συνολική BMD στους επαγγελματίες ποδηλάτες ($p = 0,061$). Ένας άλλος σημαντικός δείκτης υγείας των οστών είναι η BMC. Διαπιστώθηκε σημαντική μείωση στη BMC, καθώς και στο BA, στα χέρια και τη

σπονδυλική στήλη σε επαγγελματίες ποδηλάτες μετά από μία σεζόν. Οι ταξινομήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για τη διάγνωση της οστεοπενίας είναι μια τιμή T-score >1,0 έως <2,5 SD, ενώ για την οστεοπόρωση το όριο T-score είναι $\geq 2,5$ SD κάτω από το μέσο όρο των νεαρών ενηλίκων. Παρατηρήθηκε μείωση του Z-score και πτωτική τάση του T-score στους επαγγελματίες ποδηλάτες μετά από μία σεζόν. Πολύ λίγες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει το T-score για την αξιολόγηση της κατάστασης της υγείας των οστών σε ποδηλάτες, κυρίως για τη μέτρηση της BMD και της BMC. Οι Nichols et al. παρατήρησαν ότι το 67% των κορυφαίων ποδηλατών θα ταξινομούνταν είτε ως οστεοπενικοί (52%) είτε ως οστεοπορωτικοί (15%) είτε στη σπονδυλική στήλη και στο ισχίο είτε και στα δύο. Επιπλέον, οι Smathers et al. βρήκαν σημαντικά χαμηλότερες τιμές για το T-score και το Z-score για όλες τις θέσεις της σπονδυλικής στήλης σε ποδηλάτες σε σύγκριση με τους ελέγχους [42].

Σε μελέτη που διερευνήθηκαν οι αλλαγές της BMD σε αθλητές ποδηλασίας, διατυπώθηκε πως στις περιοχές του αυχένα του μηριαίου, του ισχίου, της λεκάνης και της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης, παρατηρήθηκε χαμηλότερη BMD στους ποδηλάτες σε σχέση με το γκρουπ ελέγχου. Επίσης, οι προπονημένοι ποδηλάτες παρουσίασαν υψηλότερη πιθανότητα να πληρούν τα διαγνωστικά κριτήρια οστεοπενίας ή οστεοπόρωσης. Τα ερευνητικά αποτελέσματα ωστόσο, παραμένουν αντικρουόμενα, καθώς ορισμένες μελέτες, αναφέρουν πως παρατηρήθηκε μείωση της BMD στους ποδηλάτες, εξαιτίας των επιβαρυνμένων προπονήσεων σε συνδυασμό με τους αγώνες σε διάστημα 5 μηνών, 12 μηνών και 7 ετών αντίστοιχα, γεγονός που έρχεται σε αντιπαράθεση με αποτελέσματα άλλων μελετών, σύμφωνα με τα οποία δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική αλλαγή στην τιμή της BMD στους ποδηλάτες σε διάστημα μεγαλύτερο των 6 μηνών [41].

Με βάση αυτές τις μελέτες, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι η ποδηλασία είναι ένα άθλημα που μπορεί να προκαλέσει μείωση στους δείκτες υγείας των οστών, όπως το T-score και το Z-score, καθώς και το BMD και το BMC αυξάνοντας τον κίνδυνο κατάγματος οστού. Η επιδείνωση της υγείας των οστών στους ποδηλάτες είναι ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα. Χαρακτηριστικά όπως χαμηλό μηχανικό φορτίο στον σκελετό, έλλειμμα ενέργειας σε συνδυασμό με μεγάλους όγκους προπόνησης και αγώνων (500–1000 km/wk) ή αυξημένη απώλεια ασβεστίου μέσω του ιδρώτα με πιθανή τροποποίηση των επιπέδων παραθορμόνης θα μπορούσαν να συμβάλουν σε αυτό το πρόβλημα. Επομένως, είναι απαραίτητο να καθιερωθεί μια πολυπαραγοντική προσέγγιση για την επιβράδυνση αυτής της οστικής αλλοίωσης. Η καθιέρωση ενός διατροφικού σχεδίου που καλύπτει τις απαιτήσεις σε ενέργεια, πρωτεΐνες και υδατάνθρακες και η συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D, Ca⁺ και πεπτίδια κολλαγόνου σε επαγγελματίες ποδηλάτες θα μπορούσε να μειώσει τον κίνδυνο χαμηλών επιπέδων ενέργειας και τις συνέπειές τους σε μεταβολικό επίπεδο, καθώς και να επηρεάσει θετικά την υγεία των οστών [42].

Η βιταμίνη D και η πρωτεΐνη είναι μεταξύ των βασικών διατροφικών παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση της διατροφικής πρόσληψης και τακτικός έλεγχος αίματος (για βιταμίνη D) για να εκτιμηθεί εάν οι ποδηλάτες έχουν ανεπαρκή πρόσληψη ενέργειας και ασβεστίου ή/και βιταμίνης D. Απαιτείται επαρκής πρόσληψη ασβεστίου για την ανοργανοποίηση των οστών, με επαρκή επίπεδα 25-υδροξυβιταμίνης D στον ορό που προάγουν την απορρόφηση του ασβεστίου από το έντερο. Οι ελλείψεις θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, ενώ η λήψη συμπληρωμάτων πάνω από τις συστάσεις πρόσληψης φαίνεται να παρέχει μικρό ή καθόλου όφελος για την υγεία των οστών. [43]

Λήψη Συμπληρωμάτων Βιταμίνης D

Η κατανάλωση ενός γεύματος πλούσιου σε ασβέστιο πριν από την άσκηση φαίνεται πως μετριάζει την αύξηση των δεικτών οστικής απορρόφησης λόγω άσκησης, ωστόσο από

άλλες έρευνες διαπιστώθηκε ότι δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορά. Παρόμοια μελέτη, επίσης δεν βρήκε καμία διαφορά στην απώλεια BMD κατά τη διάρκεια μιας σεζόν κατά τη λήψη συμπληρωμάτων ασβεστίου και βιταμίνης D. Έτσι, τα στοιχεία για συμπλήρωση των ποδηλατών δρόμου με ασβέστιο και βιταμίνη D προκειμένου να διατηρηθεί η οστική τους υγεία, είναι περιορισμένη. Σε μια μελέτη φάνηκε πως τα κατάγματα ήταν ο δεύτερος συχνότερος τραυματισμός και οδήγησαν σε μεγάλο αριθμό ημερών που χάθηκαν λόγω τραυματισμού, για να μην αναφέρουμε τη μακροπρόθεσμη επίδραση αυτών των καταγμάτων στη νοσηρότητα των αναβατών. Εντυπωσιακά μάλιστα ήταν τα ευρήματα μιας δετούς μελέτης σχετικά με τις αποχωρήσεις από τον Γύρο της Γαλλίας, κατά την οποία διαπιστώθηκε ότι το 49% οφειλόταν σε κατάγματα, που αντιπροσωπεύει την πιο κοινή αιτία απόσυρσης. Όσον αφορά τον αντίκτυπο της ποδηλασίας δρόμου στην εναλλαγή των οστών, πολλές από τις μελέτες σημείωσαν αύξηση στους δείκτες οστικής απορρόφησης, η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεάσει αρνητικά την υγεία των οστών. Ωστόσο, δεν είναι σαφές εάν αυτό προκαλεί μείωση της οστικής μάζας [41].

1.6 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατάσταση Βιταμίνης D στους Αθλητές

Η έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία του ηλιακού φωτός είναι απαραίτητη για τη σύνθεση της βιταμίνης D στο δέρμα: αυτή η οδός παρέχει περίπου το 90% της απαιτούμενης ποσότητας βιταμίνης D [20,22,44]. Η ποσότητα της βιταμίνης που εξασφαλίζεται μέσω της διατροφής, είναι πολύ μικρή. Δεδομένων των χαμηλών ποσοτήτων βιταμίνης D σε μια συνηθισμένη δυτική διατροφή, ακόμη και μια διατροφή εμπλουτισμένη με βιταμίνη D φαίνεται να είναι ανεπαρκής για να προλάβει την εμφάνιση ανεπάρκειας της βιταμίνης [22]. Παρότι ο ήλιος παρέχει γενναιόδωρα θερμότητα και UV ακτινοβολία σε πολλά μέρη του κόσμου, η χαμηλή συγκέντρωση βιταμίνης D αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα, ακόμη και σε ηλιόλουστες περιοχές [20]. Παράγοντες όπως η συμπεριφορά απέναντι στην έκθεση στον ήλιο, ο τύπος ένδυσης, η χρήση αντηλιακών, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η παρατεταμένη παραμονή σε εσωτερικούς χώρους και η καθιστική ζωή επηρεάζουν καθοριστικά τα επίπεδα της βιταμίνης D [14,22].

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη δερματική παραγωγή της προβιταμίνης D3 σε αθλητές ως απόκριση στην υπεριώδη ακτινοβολία B από τον ήλιο. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη γεωγραφική θέση και την εποχή, υψόμετρο, η ώρα προπόνησης μέσα στην ημέρα και η προπόνηση σε εσωτερικούς χώρους. Οι παράγοντες συμπεριφοράς περιλαμβάνουν τη χρήση αντηλιακού και την περιοριστική διατροφή [12,20,22,40]. Πέρα από τους τροποποιήσιμους παράγοντες, υπάρχουν και μη τροποποιήσιμες παράμετροι, όπως γενετική προδιάθεση, περιεκτικότητα του δέρματος σε μελανίνη και η ηλικία. Όσο μεγαλύτερη η ηλικία, τόσο μικρότερη η ικανότητα του δέρματος να συνθέσει τη βιταμίνη [11,20]. Υπάρχουν όμως και διάφοροι άλλοι παράγοντες που μπορούν να συμβάλουν στον περιορισμό των επιπέδων βιταμίνης D, όπως η παχυσαρκία (ο λιπώδης ιστός μπορεί να μειώσει τη βιοδιαθεσιμότητα της 25-υδροξυβιταμίνης D) η ηπατική ανεπάρκεια, η γήρανση και το κάπνισμα. Η σχέση μεταξύ φύλου και ανεπάρκειας βιταμίνης D ή επιπέδων 25(OH)D είναι ασαφής και πολύπλοκη στους μη αθλητές. Η μείωση της βιοδιαθεσιμότητας της βιταμίνης D πιστεύεται ότι οφείλεται στη συγκράτησή της στον λιπώδη ιστό μετά από σύνθεση στο δέρμα ή πρόσληψη μέσω της διατροφής, αν και ο ακριβής μηχανισμός δεν είναι ακόμα γνωστός [2]. Όπως περιγράφεται παρακάτω, οι αθλητές που πληρούν οποιονδήποτε από αυτούς τους παράγοντες κινδύνου διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο να αναπτύξουν και να διατηρήσουν ανεπάρκεια βιταμίνης D που, στη συνέχεια, μπορεί να υπονομεύσει την αθλητική απόδοση [22,44].

Γεωγραφική θέση & εποχή

Σε σχέση με τον βαθμό έκθεσης στον ήλιο και τον αθλητικό χαρακτήρα, η απόσταση από τον ισημερινό, η εποχή και ο καιρός είναι μεταβλητές που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην σύνθεση βιταμίνης D. Κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα, υπάρχει μια αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ του γεωγραφικού πλάτους και της έντασης των υπεριώδων ακτίνων B. Παρότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ή/και σε χώρες με περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας, η ακτινοβολία UVB από τον ήλιο μπορεί να απορροφηθεί σε επαρκείς ποσότητες για τη σύνθεση βιταμίνης D, κατά τους χειμερινούς μήνες, η γωνία του ήλιου εμποδίζει την ακτινοβολία UVB να φτάσει σε γεωγραφικά πλάτη πάνω από 35–37 μοίρες. Ως αποτέλεσμα, η δερματική σύνθεση προβιταμίνης D3 μπορεί να μειωθεί σημαντικά ή να μην υπάρχει σε γεωγραφικά πλάτη $> \sim 35^\circ$ βόρεια ή νότια κατά τους χειμερινούς μήνες περίπου από Νοέμβριο - Φεβρουάριο. Υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι οι επαγγελματίες αθλητές που κατοικούν σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη ($\geq 40^\circ\text{N}$) ή που προπονούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους για το αντίστοιχο άθλημά τους, διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο ανεπάρκειας 25(OH)D ($< 50 \text{ nmol/l}$) ή ακόμη και σημαντικής ανεπάρκειας ($< 25\text{--}30 \text{ nmol/l}$) [1,2,3]. Από την άλλη πλευρά, μελέτες σε αθλητές έχουν δείξει σταθερά ότι η κατάσταση της βιταμίνης D εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εποχή. Μάλιστα μια μελέτη υπέδειξε αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D στον οργανισμό από $13,6 \pm 5,6 \text{ ng/mL}$ κατά μέσο όρο τον χειμώνα, σε $25,2 \pm 6,0 \text{ ng/mL}$ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες [44]. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από ανάλογη έρευνα σύμφωνα με την οποία η βασική χειμερινή συγκέντρωση 25(OH)D στον ορό ήταν χαμηλότερη σε σύγκριση με όλες τις άλλες εποχές στους άνδρες και χαμηλότερη σε σχέση με το καλοκαίρι και το φθινόπωρο στις γυναίκες ($P < 0.001$). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, μόνο το 9% των ανδρών και το 36% των γυναικών είχαν επαρκή επίπεδα βιταμίνης D (βασικά επίπεδα $25(\text{OH})\text{D} \geq 50 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ [32].

Υψόμετρο

Δεδομένου του ότι η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας αυξάνεται σε υψηλότερα υψόμετρα, το υψόμετρο αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη δερματική παραγωγή της προβιταμίνης D3 στους αθλητές. Σε μια μελέτη στην Νέα Υόρκη, διαπιστώθηκε πως υπάρχει μια αύξηση στην ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας B της τάξης 8-10% ανά 1.000 πόδια υψομετρικής αύξησης. Παρ' ότι δεν υπάρχει επαρκής αριθμός μελετών που να συγκρίνουν απευθείας τη συγκέντρωση της βιταμίνης D μεταξύ αθλητών σε διάφορα υψόμετρα, το προηγούμενο εύρημα μπορεί να βοηθήσει να εξηγηθεί γιατί οι υψηλότερες συγκεντρώσεις βιταμίνης D παρατηρούνται σε αθλητές που προπονούνται ή ζουν σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο [44].

Φυλή

Φαίνεται να υπάρχει και μια παράδοση σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της βιταμίνης και της εθνικότητας των αθλητών. Οι αθλητές με πιο λευκή επιδερμίδα εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D, όμως υψηλότερη οστική πυκνότητα και μειωμένο κίνδυνο κατάγματος. Επιπλέον, πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι σκουρόχρωμοι αθλητές έχουν υψηλότερο κίνδυνο να υποφέρουν από δευτερογενείς αλλοιώσεις λόγω ανεπάρκειας βιταμίνης D [12]. οι σκουρόχρωμοι αθλητές είναι πιθανό να εμφανίσουν χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D, και αυτό οφείλεται στα υψηλότερα επίπεδα μελανίνης που διαθέτει το δέρμα τους. Η μελανίνη εμποδίζει την απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας B, μειώνοντας έτσι την ποσότητα της προβιταμίνης D3 που μπορεί να συντεθεί από την έκθεση στον ήλιο [44]. Η μελανίνη στο δέρμα των Αφρικανών ή των Αφροαμερικανών μπλοκάρει σχεδόν το 99% της

παραγωγής βιταμίνης D. Παρόμοιες μειώσεις στη δερματική σύνθεση επιτυγχάνονται μετά την εφαρμογή αντηλιακού SPF 15 [11]. Μάλιστα, μελέτες έχουν υποδείξει πως οι αθλητές με σκουρόχρωμο δέρμα (υψηλή συγκέντρωση μελανίνης) χρειάζονται έως και 10 φορές περισσότερη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία B (UVB) σε σύγκριση με εκείνους με ανοιχτόχρωμο δέρμα, για να μπορέσουν να δημιουργήσουν τα ίδια αποθέματα βιταμίνης D [11,12,23].

Προπόνηση σε εσωτερικό χώρο

Οι αθλητές που προπονούνται και αγωνίζονται σε κλειστούς χώρους με βάση το άθλημά τους δεν εκτίθενται τόσο συχνά στον ήλιο, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης διαταραγμένων επιπέδων βιταμίνης D. Μια μελέτη διαπίστωσε πως οι αθλητές που συμμετέχουν σε αθλήματα εσωτερικού χώρου όπως η ποδηλασία πίστας, εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις βιταμίνης D έναντι αθλητών υπαίθριων αθλημάτων ($53,1 \pm 17,4$ έναντι $39,3 \pm 8,9$ ng/mL, $P = 0,013$) [44].

Περιοριστικές διατροφικές συμπεριφορές

Περιοριστικές διατροφικές συμπεριφορές που εφαρμόζουν οι αθλητές σε αθλήματα που ενθαρρύνουν χαμηλό σωματικό βάρος για καλύτερες επιδόσεις – η ποδηλασία ανήκει στην κατηγορία αυτή - αντιμετωπίζουν μεγαλύτερο κίνδυνο ανεπάρκειας βιταμίνης D. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δίαιτες χαμηλών θερμίδων που επιδεικνύονται από αυτούς τους αθλητές είναι πιθανό να οδηγήσουν σε ανεπαρκή διατροφική πρόσληψη βιταμίνης D3 [44]. Σε μια έρευνα όπου εξετάστηκε η συχνότητα εμφάνισης της σχετικής ενεργειακής ανεπάρκειας στον αθλητισμό (RED-S), παρατηρήθηκε ότι από ένα συνολικό δείγμα 50 επαγγελματιών αθλητών ποδηλασίας, οι 14 (28%) ταυτοποιήθηκαν με σύνδρομο χαμηλής ενεργειακής διαθεσιμότητας. Μάλιστα, 4 από αυτούς περιέγραψαν περιοδικό βραχυπρόθεσμο σκόπιμο περιορισμό ενέργειας, ειδικά γύρω από τις προπονήσεις, με περισσότερες από μια προπονήσεις νηστικοί ανά εβδομάδα, εκφράζοντας έντονα την πεποίθηση ότι η επίτευξη ενός χαμηλού σωματικού βάρους και ιδιαίτερα χαμηλού ποσοστού σωματικού λίπους, ήταν κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης στην ποδηλασία με όρους watt/kg. Ως αποτέλεσμα, οι συγκεντρώσεις τους σε βιταμίνη D ήταν χαμηλότερες από 43nmol/L [45].

1.7 Ανεπάρκεια Βιταμίνης D στον Αθλητικό Πληθυσμό

Η ανεπάρκεια βιταμίνης D αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως μια παγκόσμια επιδημία και υπολογίζεται ότι επηρεάζει πάνω από ένα δισεκατομμύριο ανθρώπους παγκοσμίως [29]. Τα δεδομένα της Τρίτης Εθνικής Έρευνας για την Υγεία και τη Διατροφή (NHANES III) έδειξαν σημαντική αύξηση στην ανεπάρκεια βιταμίνης D στις ΗΠΑ τα τελευταία 30 χρόνια, με πάνω από το 77% των Αμερικανών να θεωρούνται ότι δεν καλύπτουν επαρκώς τις ημερήσιες ανάγκες βιταμίνης D [25], ενώ το ποσοστό στον συνολικό παγκόσμιο πληθυσμό φαίνεται να ανέρχεται στο 88,1% [1].

Ο αποδεκτός ορισμός της επάρκειας βιταμίνης D είναι η 25-υδροξυβιταμίνη D3, (25(OH)D) πάνω από 30 ng/mL. Τα επίπεδα 25-OH βιταμίνης D μεταξύ 20-30 ng/ml αντιστοιχούν σε ανεπαρκή κατάσταση, ενώ επίπεδα κάτω από 20 και 10 ng/ml αντιστοιχούν σε ανεπάρκεια και σοβαρή ανεπάρκεια, αντίστοιχα [11,29]. Με βάση αυτόν τον ορισμό, η ανεπάρκεια βιταμίνης D επηρεάζει όλες τις ηλικιακές ομάδες και τα δημογραφικά στοιχεία. Πενήντα έως εβδομήντα τοις εκατό των παιδιών και των εφήβων έχουν έλλειψη βιταμίνης D. Πάνω από το 75% των λευκών και το 90% των Αφροαμερικανών και των Λατίνων έχουν έλλειψη βιταμίνης D, με την αύξηση της ηλικίας να αυξάνει την πιθανότητα ανεπάρκειας.

Επιπλέον, τα ποσοστά ανεπάρκειας έχουν διπλασιαστεί από το 1994 έως το 2004 με πολλούς παράγοντες υπεύθυνους, συμπεριλαμβανομένης της αποφυγής του ήλιου, της χρήσης αντηλιακών και των αυξανόμενων ποσοστών παχυσαρκίας που προκαλούν δέσμευση αυτής της λιποδιαλυτής βιταμίνης [11].

Παρά την ευρέως αναγνωρισμένη σημασία της βιταμίνης D, μεγάλα ποσοστά του αθλητικού πληθυσμού παρουσιάζουν ανεπάρκεια βιταμίνης D, με τον κίνδυνο να αυξάνεται σημαντικά σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, σε μεγάλα υψόμετρα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα (<50 nmol/L) και της πρώιμης άνοιξης, σε αθλήματα που εκτελούνται σε εσωτερικούς χώρους ή απαιτούν βαρύ ρουχισμό και σε αθλητές με πιο σκούρο χρώμα δέρματος [8,9,10,12,21,22,24,46,47]. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι οι αθλητές είναι αρκετά ευάλωτοι στο να εμφανίσουν χαμηλά επίπεδα βιταμίνης D, εξαιτίας του πολύ αυξημένου μεταβολισμού τους, λόγω των συνεχόμενων προπονήσεων και αγώνων στη διάρκεια του χρόνου [5]. Ωστόσο, το τι ακριβώς συνιστά ανεπάρκεια βιταμίνης D αποτελεί αντικείμενο έντονων συζητήσεων. Αν και τα τρέχοντα δεδομένα υποδεικνύουν ότι συγκέντρωση ορού 25(OH)D κάτω των 75 nmol/L μπορεί να θεωρηθεί ανεπαρκής, τουλάχιστον στους λευκούς άνδρες αθλητές, δεν είναι σαφές αν τα χαμηλά επίπεδα ολικής 25(OH)D υποδηλώνουν ομοιόμορφα ανεπάρκεια βιταμίνης D σε αθλητές διαφορετικής καταγωγής. Στην πραγματικότητα, τα επίπεδα ολικής 25(OH)D και της πρωτεΐνης δέσμευσης βιταμίνης D (VDBP) είναι χαμηλότερα στους σκουρόχρωμους σε σύγκριση με τους λευκούς αθλητές, ενώ τα επίπεδα της βιοδιαθέσιμης 25-υδροξυβιταμίνης D είναι ισοδύναμα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η 1,25(OH)D μπορεί να αποτελεί καλύτερο δείκτη της κατάστασης της βιταμίνης D [8]. Τα ανησυχητικά ποσοστά ανεπάρκειας και οι τεράστιες μεταβολικές ιδιότητες της βιταμίνης D έχουν οδηγήσει τους ερευνητές να εξετάσουν την επίδραση της βιταμίνης D, όχι μόνο στην πρόληψη ασθενειών, αλλά και στη σωματική απόδοση και τους τραυματισμούς. Η βιταμίνη D έχει εντοπιστεί στους περισσότερους ιστούς του σώματος, συμπεριλαμβανομένων των σκελετικών μυών, γεγονός που εγείρει το ενδιαφέρον για περαιτέρω εξέταση της επίδρασης της βιταμίνης D στους αθλητές και τη σωματική τους απόδοση [25].

Πολλές πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην αξιολόγηση των επιπέδων βιταμίνης D στον αθλητικό πληθυσμό, με το ποσοστό ανεπάρκειας της βιταμίνης να κυμαίνεται μεταξύ 42-83%, ποσοστό συγκρίσιμο με εκείνο του γενικού πληθυσμού [22]. Στους ελίτ αθλητές, το ποσοστό ανεπάρκειας υπερβαίνει το 50%, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να φτάνει το 70-90%, τόσο σε άνδρες όσο και σε γυναίκες [47]. Τα πολύ υψηλά ποσοστά ανεπάρκειας είναι κατά κύριο λόγο εμφανή σε αθλητές εσωτερικού χώρου, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τους αθλητές μπάσκετ (ανεπάρκεια βιταμίνης D έως 94%) και τους γυμναστές (ανεπάρκεια βιταμίνης D έως 83%) [11]. Τα αποτελέσματα μιας μεγάλης μετα-ανάλυσης με δείγμα 2313 αθλητών, υπέδειξαν πως το 56% των συμμετεχόντων είχε ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D. Η ανεπάρκεια παρουσίασε σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και ήταν φανερά υψηλότερη κατά τους χειμερινούς μήνες συγκριτικά με τις αρχές της άνοιξης, καθώς και στους αθλητές που προπονούνται σε εσωτερικούς χώρους. Η μελέτη των Aydin et al. επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των παραπάνω ευρημάτων, καθώς εντόπισε ποσοστό ανεπάρκειας βιταμίνης D της τάξης του 59% και 64% σε αθλητές που προπονούνται σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο αντίστοιχα [1,2,9].

Η μελέτη των Abulafia et al., διερεύνησε την ανεπάρκεια βιταμίνης D μεταξύ των αθλητών που εντάχθηκαν στην Ολυμπιακή Ομάδα του Ισραήλ. Από ένα συνολικό δείγμα 334 αθλητών (148 γυναίκες και 176 άνδρες ηλικίας 13-19 ετών), 25 αθλητές (7,5%) διαγνώστηκαν με ανεπάρκεια βιταμίνης D, ενώ 131 αθλητές (39,2%) είχαν ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D ($50-75$ nmol/L). Ο υψηλότερος επιπολασμός ανεπάρκειας βιταμίνης D παρατηρήθηκε στους αθλητές της γυμναστικής και των μαχητικών αθλημάτων. Διαπιστώθηκε επίσης σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση βιταμίνης D μεταξύ των εποχών. Η μέση συγκέντρωση της βιταμίνης D τον χειμώνα ήταν $74,1$ nmol/L σε σύγκριση με $86,4$ nmol/L το καλοκαίρι ($p <$

0,0005). Στο δείγμα συμπεριλήφθηκαν και 10 αθλητές αγωνισμάτων αντοχής (τρίαθλο, ποδηλασία, τρέξιμο μεγάλων αποστάσεων), εκ των οποίων οι 3 (30%) εμφάνισαν ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D [48].

Μια μελέτη σε Γερμανούς τριαθλητές ($n=86$), επιχείρησε να προσδιορίσει την επίπτωση των καταγμάτων κόπωσης στην απόδοση. Από τους 86 αθλητές [47 άνδρες και 39 γυναίκες, μέση ηλικία: 17,5 έτη ($\pm 3,3$)], οι 10 (12%) παρουσίασαν ανεπάρκεια βιταμίνης D, εκ των οποίων οι 3 είχαν τραυματισμό από κάταγμα κόπωσης. Παρ' ότι ο επιπολασμός ανεπάρκειας της βιταμίνης ήταν χαμηλός, υποδεικνύεται μια πιθανή συσχέτιση μεταξύ χαμηλών επιπέδων βιταμίνης D και καταγμάτων κόπωσης, καθώς το 30% των αθλητών με ανεπάρκεια βιταμίνης D υπέστη τραυματισμό. Η συσχέτιση αυτή όμως χρήσει περαιτέρω διερεύνησης [49].

Είναι από καιρό αναγνωρισμένο ότι τα επαρκή επίπεδα βιταμίνης D παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στην υγεία των οστών και του σκελετού, καθώς επίσης και σε μη σκελετικές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της ανοσοποιητικής λειτουργίας, της ρύθμισης της φλεγμονής και τη βελτίωση της αθλητικής απόδοσης. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, πολλές ερευνητικές μελέτες υποδεικνύουν μια θετική συσχέτιση της βιταμίνης D με την ανάπτυξη των σκελετικών μυών [30]. Η ανεπάρκεια της βιταμίνης D σχετίζεται με αυξημένη εμφάνιση διαφόρων νοσηροτήτων που συνδέονται με αυτή. Τον περασμένο αιώνα η ανεπάρκεια της βιταμίνης μελετήθηκε εκτενώς και έχει αναφερθεί ότι σχετίζεται με προβλήματα στην υγεία των οστών, όπως η οστεοπόρωση [5,12,22,46], η οστεομαλακία [12], η σπονδυλοαρθρίτιδα, η ραχίτιδα [1] και η οστεοπενία [22], με αυξημένο κίνδυνο πτώσεων και με κατάγματα λόγω στρες ή άλλους μυοσκελετικούς τραυματισμούς [9,10,14,22,29,31,46]. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης οστικής απορρόφησης που προκαλείται από την υπερέκκριση της παραθυρεοειδούς ορμόνης (PTH) [1]. Προηγούμενη έρευνα έχει δείξει πως οι αθλητές με επίπεδα 25-υδροξυβιταμίνης D (25[OH]D) στον ορό κάτω από 30-50 nmol/L φαίνεται να σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο τέτοιων τραυματισμών [46]. Ωστόσο, παραμένει άγνωστο κατά πόσο μια τέτοια ανεπάρκεια επηρεάζει την πιθανότητα τραυματισμού και την λειτουργία άλλων ιστών, όπως οι μύες, οι σύνδεσμοι και οι τένοντες. Πιθανώς να επηρεάζει την ποιότητα της προπόνησης, τη συχνότητα και τη διάρκεια τραυματισμών και ασθενειών και κατ' επέκταση την συνολική αθλητική απόδοση [29].

Επιπλέον, υποδεικνύεται ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D αυξάνει τον κίνδυνο για πολλές χρόνιες και φλεγμονώδεις ασθένειες, όπως η υπέρταση, ο διαβήτης τύπου 2, αυτοάνοσα νοσήματα η καρδιομεταβολική νόσος, εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις, η αρθρίτιδα, πολλαπλή σκλήρυνση, ορισμένες μορφές καρκίνου που μπορούν να εμφανιστούν ακόμη και στους αθλητές (καρκίνος του εντέρου και του παχέος εντέρου) [1,6,11,20,29,30]. Η βιταμίνη D θεωρείται ότι έχει καρδιοπροστατευτική επίδραση καθώς συμμετέχει σε αντι-αθηροσκληρωτικές και αντιφλεγμονώδεις δράσεις στο μυοκάρδιο, επομένως η ανεπάρκεια της έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο καρδιαγγειακών νοσημάτων και θνησιμότητας [22].

Ορισμένα δεδομένα δείχνουν ότι η ανεπάρκεια βιταμίνης D επηρεάζει αρνητικά τη μυϊκή λειτουργία, προκαλώντας αδυναμία των μυών και μείωση στη διάμετρο των μυϊκών ινών τύπου II [8,9]. Η ανεπάρκεια βιταμίνης D φαίνεται επίσης ότι έχει καταβολικές επιπτώσεις στους μυϊκούς ιστούς, προκαλεί μυϊκή αδυναμία και μυϊκούς πόνους, επιδεινώνοντας οξείς μυϊκούς τραυματισμούς και φλεγμονές ιδιαίτερα μετά από άσκηση υψηλής έντασης, γεγονός που μπορεί να μειώσει την αθλητική απόδοση. Η αύξηση της ενζυματικής δραστηριότητας που προκαλεί η άσκηση, καθιστά τους αθλητές εξίσου ευάλωτους, αν όχι περισσότερο, στην ανεπάρκεια βιταμίνης D σε σύγκριση με τον γενικό πληθυσμό [1,5,9,14,19]. Η επιδημιολογία έχει συνδέσει τα επίπεδα της 25(OH)D στο αίμα πάνω από το όριο της ανεπάρκειας (≥ 30 ng/ml) με μειωμένο κίνδυνο μυοσκελετικών παθήσεων, ωστόσο στοιχεία μετα-ανάλυσεων σχετικά με τις επιδράσεις της συμπλήρωσης βιταμίνης D έχουν αποδώσει μικτά αποτελέσματα [20]. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποιο

όριο βιταμίνης D που να αποδίδει βέλτιστα αθλητικά οφέλη, όμως η μέγιστη νευρομυϊκή απόδοση σχετίζεται με επίπεδα $25(\text{OH})\text{D} > 50 \text{ ng/mL}$, αρκετά μεγαλύτερα δηλαδή από αυτά που θεωρούνται επαρκή [11].

Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες, η ανεπάρκεια της βιταμίνης στους αθλητές μπορεί να επηρεάσει την μυϊκή δύναμη, την ισχύ και την αντοχή. Οι Carswell et al. ανέφεραν ότι τα επίπεδα βιταμίνης D συσχετίζονται θετικά με την αντοχή και ότι χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D ενδέχεται να μειώσουν την απόδοση των αθλητών σε δοκιμασίες αντοχής [10,19]. Η αποφυγή χαμηλών επιπέδων $25(\text{OH})\text{D}$ στον ορό είναι απαραίτητη για τη μυοσκελετική υγεία, με τις τρέχουσες συστάσεις του Ινστιτούτου Ιατρικής (IOM) και της Ευρωπαϊκής Αρχής για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) να προτείνουν διατήρηση συγκέντρωσης $25(\text{OH})\text{D} \geq 50 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ [32].

Μελέτες έχουν αναφέρει ότι οι αθλητές με ανεπάρκεια βιταμίνης D μπορεί να έχουν εργογονικά οφέλη όταν λαμβάνουν συμπληρώματα βιταμίνης D, όπως η αύξηση της μυϊκής δύναμης μειωμένη εμφάνιση τραυματισμών και καλύτερες αθλητικές επιδόσεις. [12,47]. Έχει παρατηρηθεί μια άμεση σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων της βιταμίνης D και της απόδοσης των αθλητών, όπως η ταχύτητα, το ύψος των αλμάτων, ο δυναμικός μυϊκός τόνος και η δύναμη της λαβής. Επιπλέον, η βιταμίνη D θεωρείται επίσης ότι βελτιώνει τη χρήση των υδατανθράκων από το σώμα κατά τη διάρκεια της άσκησης, παρέχοντας στο σώμα αυξημένη ενέργεια, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης [47]. Οι Żebrowska et al. [57] ανέφεραν ότι η λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D μπορεί να έχει θετικά αποτελέσματα στα επίπεδα $25(\text{OH})\text{D}$ στον ορό σε αθλητές που υποβλήθηκαν σε προπόνηση αντοχής. Οι Abrams et al. ανέφερε ότι τα συμπληρώματα βιταμίνης D θα μπορούσαν να αυξήσουν τη δύναμη σε αθλητές με ανεπάρκεια βιταμίνης D και ότι τα αυξημένα επίπεδα βιταμίνης D συσχετίστηκαν με χαμηλότερο ποσοστό τραυματισμών και βελτιωμένη σωματική απόδοση στον αθλητισμό [10].

Τέλος, η ανεπάρκεια βιταμίνης D έχει συνδεθεί με ποικίλες αρνητικές ψυχολογικές καταστάσεις, όπως σκέψεις αυτοκτονίας, γνωστική εξασθένηση, νευρολογικές βλάβες και κατάθλιψη [1,6].

1.8 Ανεπάρκεια Βιταμίνης D στους Αθλητές Ποδηλασίας (Ερευνητικά Δεδομένα)

Τα υψηλά ποσοστά ανεπάρκειας βιταμίνης D στον αθλητικό πληθυσμό, φυσικά δεν αφήνουν ανεπηρέαστους και τους αθλητές ποδηλασίας. Μελέτες ανά τα χρόνια, έχουν υποδείξει πως μεγάλο μέρος της ελίτ του αγωνίσματος της ποδηλασίας έχουν ανεπαρκή ή σημαντικά ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D.

Μια διατμηματική μελέτη με δείγμα 4037 αθλητών σε τρίαθλο και ποδηλασία (από Ισπανία) – 337 εκτός μελέτης – διαπίστωσε πως το δείγμα των ποδηλατών εμφάνισε ανεπαρκή πρόσληψη ορισμένων μικροθρεπτικών συστατικών, ανάμεσά τους και η βιταμίνη D, τα επίπεδα της οποίας ήταν αρκετά χαμηλότερα από την τιμή που θεωρείται επαρκής. Η πρόσληψη όλων των βιταμινών και ανόργανων στοιχείων υπερέβαινε τις αντίστοιχες Συστάσεις Ημερήσιας Πρόσληψης ή Επαρκείς Πρόσληψεις (AI), με εξαίρεση τις βιταμίνες D και E και, σε ορισμένες περιπτώσεις, το ασβέστιο. Η άσκηση επιβαρύνει πολλούς από τους μεταβολικούς δρόμους στους οποίους απαιτούνται μικροθρεπτικά συστατικά, ενώ η προπόνηση μπορεί να οδηγήσει σε βιοχημική προσαρμογή των μυών που αυξάνει τις ανάγκες για μικροθρεπτικά συστατικά. Οι πιο συχνά ανησυχητικές βιταμίνες και ανόργανα στοιχεία για τους αθλητές είναι το ασβέστιο και οι βιταμίνες D, C, E και του συμπλέγματος B, καθώς και ο σίδηρος, το μαγνήσιο και το σελήνιο. Η βιταμίνη D είναι απαραίτητη για την επαρκή απορρόφηση ασβεστίου και την υγεία των οστών. Ωστόσο, καθώς η βιταμίνη D δεν προσλαμβάνεται μόνο από τη διατροφή αλλά μπορεί να παραχθεί και μέσω της έκθεσης στον ήλιο, η ανεπάρκεια βιταμίνης D μπορεί να διαγνωστεί με την αξιολόγηση της συνολικής

συγκέντρωσης 25-(OH)-βιταμίνης D στον ορό. Παρόλο που ένα υψηλό ποσοστό του συνολικού δείγματος ανέφερε υψηλή πρόσληψη μικροθρεπτικών συστατικών γενικά, εντοπίστηκε μια υποομάδα — κυρίως ποδηλάτες — των οποίων η κατανάλωση ήταν κάτω από το απαιτούμενο επίπεδο [50].

Μια άλλη μελέτη, εξέτασε τα επίπεδα βιταμίνης D σε 65 ελίτ Πορτογάλους ποδηλάτες διαφορετικών ηλικιών και αγωνισμάτων ποδηλασίας (ποδηλασία δρόμου, mountain bike – cross-country και mountain bike – downhill), όλοι επιλεγμένοι από την εθνική ομάδα της Πορτογαλίας. Όλοι οι αθλητές διέμεναν στην ηπειρωτική Πορτογαλία σε γεωγραφικά πλάτη 37-42° B. Κατά τη διάρκεια πέντε μηνών, από τον Απρίλιο έως τον Αύγουστο του 2014, ελήφθησαν δείγματα περιφερικού αίματος για την εκτίμηση των επιπέδων της 25(OH) βιταμίνης D σε κατάσταση νηστείας. Τα επίπεδα ταξινομήθηκαν ως εξής: έλλειψη (<20 ng/ml), ανεπάρκεια (20-32 ng/ml) και επάρκεια (>32 ng/ml). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 63,1% των ποδηλατών μας είχε ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D, δηλαδή σχεδόν δύο στους τρεις ποδηλάτες. Μια γαλλική μελέτη (Guillaume, Chappard et al. 2012) με είκοσι εννέα επαγγελματίες ποδηλάτες δρόμου και μέσο όρο ηλικίας 26,5 ετών, από ομάδα που συμμετείχε στο Tour de France, έδειξε μέση τιμή 29,8 ng/ml $\pm$ 11,0 της 25(OH) βιταμίνης D. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν (Lombardi, Corsetti et al. 2014) σε εννέα επαγγελματίες ποδηλάτες δρόμου ιταλικής ομάδας κατά τη διάρκεια του Giro d'Italia 2011, σε τρεις χρονικές περιόδους αυτής της διοργάνωσης μεταξύ 8 και 29 Μαΐου. Οι μέσες τιμές κυμάνθηκαν από 28,3 ng/ml $\pm$ 5,1 έως 33,7 ng/ml $\pm$ 5,0. Πιο πρόσφατα, τα αποτελέσματα από δείγμα είκοσι Ισπανών ποδηλατών (Valtueña, Dominguez et al. 2014) δείχνουν πολύ χαμηλότερη μέση τιμή 25(OH) βιταμίνης D: 20,9 ng/ml $\pm$ 7,3 [51].

Οι Muros et al. το 2019, θέλησαν να αξιολογήσουν τη διατροφική πρόσληψη μιας επαγγελματικής ομάδας ποδηλασίας της Διεθνούς Ένωσης Ποδηλασίας (UCI) κατά τη διάρκεια του γύρου της Ισπανίας. Εννέα άνδρες επαγγελματίες ποδηλάτες δρόμου (31,3 $\pm$ 3,0 έτη) συμμετείχαν εθελοντικά στη μελέτη. Διατροφικά δεδομένα συλλέχθηκαν καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια του τριών εβδομάδων Γύρου. Η κατανάλωση βιταμινών γενικά υπερέβαινε τη συνιστώμενη ημερήσια πρόσληψη (ΣΗΠ), ωστόσο η πρόσληψη φυλλικού οξέος ήταν μόλις 78,7% της ΣΗΠ και η πρόσληψη βιταμίνης D ακόμη χαμηλότερη, στο 46% της ΣΗΠ [52].

Τέλος, μια μελέτη στην οποία συμμετείχαν 15 άνδρες και 23 γυναίκες ελίτ ποδηλάτες, με διακρίσεις στο Ευρωπαϊκό και Παγκόσμιο Πρωτάθλημα, καθώς και σε επίπεδο Ολυμπιακών Αγώνων, έδειξε πως η πρόσληψη των απαραίτητων βιταμινών υπερέβαινε τις συστάσεις, με εξαίρεση τη βιταμίνη B9 στις γυναίκες ποδηλάτισσες δρόμου (77,8% της Συνιστώμενης Ημερήσιας Πρόσληψης) και τη βιταμίνη D σε όλες τις ομάδες. Η επάρκεια των βιταμινών αξιολογήθηκε σε σχέση με τη ΣΗΠ/ΕΑ και η πρόσληψη βιταμίνης D ήταν φανερά ανεπαρκής σε όλες τις ομάδες ποδηλατών (άνδρες ποδηλάτες δρόμου: 44,7%; άνδρες ποδηλάτες ΧCO: 26,7%; γυναίκες ποδηλάτισσες δρόμου: 20,7%; γυναίκες ποδηλάτισσες ΧCO: 32,7%) [2]. Ωστόσο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D που έχουν παρατηρηθεί σε αθλητές ποδηλασίας, είναι εκείνα των Ισπανών ποδηλατών [1], που μάλιστα απέχουν αρκετά από τη συνιστώμενη πρόσληψη [53].

1.9 Κατάσταση Βιταμίνης D στους Αθλητές

Η κατάσταση της βιταμίνης D θα πρέπει να αξιολογείται ως μέρος μιας διατροφικής αξιολόγησης ρουτίνας. Η συγκέντρωση του κύριου κυκλοφορόντος μεταβολίτη 25(OH)D στο αίμα, θεωρείται ο καλύτερος βιοχημικός δείκτης για την κατάσταση της βιταμίνης D, τόσο σε αθλητές όσο και στον γενικό πληθυσμό. Σε αντίθεση με την 25(OH)D, ο προσδιορισμός της 1,25 υδροξυβιταμίνης D δεν αποτελεί αξιόπιστο δείκτη των συνολικών επιπέδων της βιταμίνης D, καθώς έχει πολύ μικρή διάρκεια ζωής (μόλις 15 ώρες) και οι συγκεντρώσεις της στον ορό

ρυθμίζονται από το ασβέστιο και την παραθορμόνη. Στην πραγματικότητα, τα επίπεδα της 1,25(OH)D δεν πέφτουν σημαντικά μέχρι να εμφανιστεί σοβαρή ανεπάρκεια βιταμίνης D [9,12,23]. Η συγκέντρωσή της θα πρέπει να διατηρείται στα 75 – 125 nmol/L (30–50 ng/mL), αλλά κατά προτίμηση στα 100nmol/L (40–60 ng/mL) [5,10,11,12,22,25,30]. Σε περίπτωση χαμηλότερης συγκέντρωσης, η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται ως «υποβέλτιστη» και συνδέεται άμεσα με αυξημένο κίνδυνο για οξείες ασθένειες, φλεγμονώδεις τραυματισμούς, κατάγματα λόγω στρες, μυϊκό πόνο / αδυναμία και υποβέλτιστη μυϊκή απόδοση [30]. Όταν η συγκέντρωση της βιταμίνης D είναι σε επίπεδα χαμηλότερα των 50nmol/L (<20ng/mL) τότε πρόκειται για σοβαρή ανεπάρκεια βιταμίνης D, ενώ όταν κυμαίνεται από 50-75nmol/L (20-30 ng/mL), τότε πρόκειται για απλή ανεπάρκεια [9,10,24,25]. Συνεπώς το επίπεδο των 75nmol/L (30 ng/mL), θεωρείται ως το όριο διάκρισης μεταξύ επάρκειας και ανεπάρκειας βιταμίνης D στον αθλητικό πληθυσμό, καθώς έχει αποδειχθεί ότι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ελαχιστοποιούν τις διαταραχές οστικής ανοργανοποίησης και διατηρούν την υγεία του σκελετού [10,22,25]. Οι συγκεντρώσεις βιταμίνης D ορού που υπερβαίνουν τα 150 ng/mL, ενέχουν δυνητικό κίνδυνο τοξικότητας [11]. Οι παραπάνω συστάσεις συμπίπτουν με τις κατευθυντήριες οδηγίες της Ενδοκρινολογικής Εταιρείας (Endocrine Society) [9,11,22,54]. Από την άλλη, το Ινστιτούτο Ιατρικής (IOM) έχει θέσει διαφορετικά όρια για την ανεπάρκεια βιταμίνης D. Όταν η τιμή της βιταμίνης D στον ορό κυμαίνεται από 30-50nmol/L, αυτό χαρακτηρίζεται ως απλή ανεπάρκεια, ενώ όταν είναι μικρότερη από 30nmol/L, τότε χαρακτηρίζεται ως σοβαρή ανεπάρκεια. Επίσης, το IOM έχει θέσει το ανώτατο όριο ημερήσιας πρόσληψης βιταμίνης D στις 4000 IU, σε αντίθεση με την Ενδοκρινολογική Εταιρεία, η οποία έχει θέσει το ανώτατο όριο στις 10.000 IU [1,5,6].

Η πρόσληψη βιταμίνης D αποκλειστικά από τη διατροφή ή μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι ικανή να διατηρήσει τη βιταμίνη σε επαρκή επίπεδα συνεπώς κρίνεται αναγκαία η χορήγηση συμπληρώματος [30]. Γενικά υπάρχουν λίγα στοιχεία σε αθλητές που να υποδηλώνουν ότι η βιταμίνη D είναι εργογονική στην απόδοση. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία σε ηλικιωμένους έχουν δείξει ότι η μακροχρόνια λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D (8 εβδομάδες – 3 χρόνια) μειώνει τον κίνδυνο πτώσεων, βελτιώνει τη μυϊκή λειτουργία και εξασθενεί την ατροφία των σκελετικών μυών. Αν και η βέλτιστη συγκέντρωση 25(OH)D που απαιτείται για την πρόληψη των επιβλαβών επιπτώσεων στη λειτουργία των σκελετικών μυών είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστη, με τον IOM (Institutes of Medicine) να προτείνει ότι αρκεί 25(OH)D >50 nmol/L, η Endocrine Society αναγνωρίζει ότι μπορεί να απαιτείται συγκέντρωση 25(OH)D >100 nmol/L για τη βέλτιστη λειτουργία των σκελετικών μυών, ενώ άλλοι πιστεύουν πως απαιτούνται συγκεντρώσεις μεταξύ 100-250 nmol/L. Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ωστόσο ότι τα τρέχοντα ανώτατα όρια (UL: 4000 IU/d) είναι πολύ χαμηλά, με πολύ υψηλότερες δόσεις να αποδεικνύονται ασφαλείς για χρήση (10.000 IU/d). Πρόσφατα στοιχεία σε αθλητές βρήκαν ότι η χορήγηση 5000 IU/ημέρα βιταμίνης D3 για διάστημα 8 εβδομάδων κατά τη διάρκεια του χειμώνα στο Ηνωμένο Βασίλειο (53° B) βελτίωσαν επιτυχώς τη μέση κατάσταση της βιταμίνης D από 29±25 σε 103±25 nmol/L ενώ οι ίδιοι συγγραφείς διατύπωσαν επίσης ότι η χορήγηση 20.000 και 40.000 IU/εβδομάδα βιταμίνης D3 για διάστημα 12 εβδομάδων, αύξησε τη μέση αρχική κατάσταση βιταμίνης D από 51±24 nmol/L έως 85±10 nmol/L και 91±24 nmol/L. Παρά το γεγονός ότι οι συγγραφείς παρατήρησαν σημαντικές βελτιώσεις στην κατάσταση της βιταμίνης D πετυχαίνοντας επαρκείς συγκεντρώσεις, μόνο σε μια μελέτη αναφέρθηκε βελτίωση της αθλητικής απόδοσης [54]. Ανάλογα ήταν και τα αποτελέσματα των Blume & Wolfarth, οι οποίοι εξέτασαν σε 146 νεαρούς αθλητές τους πιθανούς παράγοντες που συμβάλουν στην βελτίωση της απόδοσης. Για τις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη τα αθλήματα που επωφελούνται από την βελτιωμένη αντοχή (σκι αντοχής, ποδηλασία, κολύμβηση) και το ποδόσφαιρο, λόγω της γνώσης ότι η αερόβια προπόνηση αντοχής βελτιώνει την απόδοση στο ποδόσφαιρο. Παρ' όλα αυτά, δεν

παρατηρήθηκε κάποια συσχέτιση μεταξύ των αυξημένων επιπέδων βιταμίνης D και της βελτίωσης της απόδοσης [55].

1.10 Συμπληρωματική Χορήγηση Βιταμίνης D & Αθλητική Απόδοση (Ερευνητικά Δεδομένα)

Λόγω της ανεπάρκειας βιταμίνης D στον πληθυσμό, πολλές μελέτες ασχολούνται με τη συσχέτιση μεταξύ ανεπάρκειας βιταμίνης D και μειωμένης αθλητικής απόδοσης, η οποία οφείλεται στη μείωση της ικανότητας λειτουργίας των σκελετικών μυών. Η βιταμίνη D είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα διατροφικά συμπληρώματα μεταξύ των αθλητών παγκοσμίως [2]. Η εξωγενής χορήγηση 25(OH)D φαίνεται πως επηρεάζει την πεπνο πρωτεϊνική σύνθεση στους μύες, μέσω των υποδοχέων βιταμίνης D, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι δρα απευθείας στους μύες για να αυξήσει την πρωτεϊνοσύνθεση. Ειδικότερα, φαίνεται πως προκαλεί βελτίωση στον αναβολισμό μυϊκής πρωτεΐνης και αυξάνει την μυϊκή μάζα και δύναμη. Επιπλέον, η χορήγηση βιταμίνης D συνδυαστικά με 1000mg ασβεστίου για 3-6 μήνες ή η σκέτη χορήγηση 1000 IU εργοκαλσιφερόλης ανά ημέρα, έδειξαν σημαντικές αυξήσεις στο ποσοστό, το εμβαδόν και τη μέση διάμετρο των μυϊκών ινών τύπου II. Οι μυϊκές ίνες τύπου II αποτελούν ίνες ταχείας σύσπασης και είναι κυρίαρχες σε δυναμικές και αναερόβιες δραστηριότητες, δηλαδή βραχείας διάρκειας και υψηλής ισχύος [22,28,38,40]. Τα παραπάνω δεδομένα όμως, προήλθαν από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε ποντίκια και σε κλινικό πληθυσμό με οστεοπόρωση ή ανεπάρκεια βιταμίνης D και όχι αποκλειστικά σε αθλητές, συνεπώς απαιτούνται περαιτέρω έρευνες μελλοντικά για την επιβεβαίωση ή την απόρριψη των στοιχείων αυτών και την ισχύ που μπορεί να έχουν στον αθλητικό πληθυσμό - και ειδικότερα στους αθλητές ποδηλασίας. Ωστόσο, στους ποδηλάτες συμμετέχουν κατά κύριο λόγο οι μυϊκές ίνες τύπου I, καθώς διαθέτουν υψηλή ικανότητα αερόβιου μεταβολισμού με μεγαλύτερη μιτοχονδριακή πυκνότητα και οξειδωτική ικανότητα ενζύμων, και έτσι μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγαλύτερα αποθέματα λίπους, μυϊκού γλυκογόνου και οξυγόνου για παραγωγή ενέργειας σε αερόβιου τύπου αγωνίσματα όπως η ποδηλασία. Συνεπώς, ακόμη και αν υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ βιταμίνης D και μυϊκών ινών τύπου II, δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι επέρχεται βελτίωση στην αθλητική απόδοση σε επαγγελματίες ποδηλάτες [28,38].

Δυστυχώς, υπάρχουν περιορισμένες διαθέσιμες πειραματικές μελέτες που καταδεικνύουν βελτίωση της απόδοσης από τα συμπληρώματα βιταμίνης D. Μια αδημοσίευτη διατριβή εξέτασε την επίδραση των επιπέδων βιταμίνης D ορού στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου, για να προσδιοριστεί η πιθανή συσχέτιση της λήψης βιταμίνης D με την βελτίωση της αερόβιας ικανότητας σε αθλητές κολλεγίου. Οι αθλητές με υψηλότερα επίπεδα βιταμίνης D ορού εμφάνισαν υψηλότερη VO₂max σε σύγκριση με εκείνους με χαμηλότερα επίπεδα βιταμίνης D. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η επαρκής κατάσταση βιταμίνης D ορού στους αθλητές μπορεί να βελτιώσει την αερόβια απόδοση. Ωστόσο, τα οφέλη της συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D ενδέχεται να περιορίζονται μόνο στους αθλητές με ανεπάρκεια βιταμίνης D και όχι σε αθλητές που ήδη διαθέτουν επαρκή συγκέντρωση της βιταμίνης στον ορό [25].

Μια άλλη μετα-ανάλυση που διερεύνησε την επίδραση της βιταμίνης D₃ στη συγκέντρωση 25(OH)D και στη δύναμη των αθλητών έδειξε ότι η συνολική επίδραση της χορήγησης βιταμίνης D₃ στη μυϊκή δύναμη δεν ήταν στατιστικά σημαντική [8]. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με εκείνα μιας μελέτης των Close et al., στην οποία συμμετείχαν νεαροί αθλητές από το Ηνωμένο Βασίλειο. Οι αθλητές διακρίθηκαν τυχαία σε 3 γκρουπ και τους χορηγήθηκε είτε εικονικό φάρμακο, είτε 20.000 IU, είτε 40.000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D την εβδομάδα, για διάστημα 12 εβδομάδων. Στις πρώτες 6 εβδομάδες, οι αθλητές με αρχικά ανεπαρκείς συγκεντρώσεις της βιταμίνης διόρθωσαν την

ανεπάρκειά τους, ωστόσο δεν κατάφεραν να φτάσουν ή να ξεπεράσουν τα 40ng/mL. Με το πέρας των 12 εβδομάδων, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές βελτιώσεις στην μυϊκή απόδοση, παρ' ότι τα επίπεδα βιταμίνης D ορού είχαν σημειώσει κατά μέσο όρο αύξηση από 20,43 ng/mL σε 31,65–39,26 ng/mL. Αν και οι τελικές συγκεντρώσεις 25(OH)D που ελήφθησαν από τους αθλητές δεν θεωρούνταν πλέον ανεπαρκείς (>20 ng/mL), οι ερευνητές υπέθεσαν ότι μπορεί να απαιτούνται υψηλότερα συνολικά επίπεδα βιταμίνης D ορού (>40ng/mL) για την τεκμηρίωση της ενισχυμένης μυϊκής απόδοσης στον αθλητικό πληθυσμό. Μια μεγαλύτερη δοκιμή συμπληρωμάτων βιταμίνης D στο Ηνωμένο Βασίλειο (n = 61 αθλητές, n = 31 υγιή άτομα ελέγχου) οδήγησε σε υψηλότερα μέσα επίπεδα 25(OH)D, ως αποτέλεσμα χορήγησης 5000 IU βιταμίνης D3/ημέρα για οκτώ εβδομάδες και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν μοιάζουν πολλά υποσχόμενα για τη βελτίωση της αθλητικής απόδοσης. Αυτό το σχήμα συμπλήρωσης αύξησε σημαντικά τα μέσα επίπεδα 25(OH)D από (μέση τιμή ± SD) 11,62 ± 10,02 ng/mL σε 41,27 ± 10,02 ng/mL. Αυτά τα ευρήματα υποστηρίζουν την προαναφερθείσα υπόθεση ότι τα υψηλότερα επίπεδα 25(OH)D στον ορό (>40 ng/mL) μπορεί να δημιουργήσουν πιο πειστικές βελτιώσεις στην απόδοση. Τα ευρήματα υποδηλώνουν επίσης ότι μια ημερήσια δόση βιταμίνης D (5000 IU/ημέρα) μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική στην αύξηση των επιπέδων 25(OH)D σε σύγκριση με μια εβδομαδιαία δόση 40.000 IU/εβδομάδα. Με βάση αυτές τις δύο προκαταρκτικές μελέτες και τις οδηγίες από κορυφαίους ειδικούς, τα επίπεδα 25(OH)D πάνω από 40 ng/mL είναι πιθανότατα απαραίτητα για να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στην αναερόβια αθλητική απόδοση.

Τα αποτελέσματα για βελτίωση και της αερόβιας απόδοσης παραμένουν αμφιλεγόμενα [25]. Η αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D στον ορό των αθλητών, ύστερα από τη λήψη συμπληρώματος D3, παρατηρήθηκε και στην τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη μελέτη των Jung et al., σε επαγγελματίες αθλητές τσεκβον ντο. Στην ομάδα παρέμβασης, τα επίπεδα βιταμίνης D παρουσίασαν αύξηση (96.0 ± 3.77 nmol/L) έπειτα από 4 εβδομάδες, ενώ δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στην ομάδα εικονικού φαρμάκου. Επίσης, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συμπλήρωση με βιταμίνη D3 μπορεί να είναι αποτελεσματική στη μείωση των συμπτωμάτων λοίμωξης του ανώτερου αναπνευστικού, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο, σε αθλητές με ανεπάρκεια. Ομοίως, οι Fairbairn et al., ανέφεραν σημαντική αύξηση των επιπέδων βιταμίνης D ορού σε επαγγελματίες παίκτες ράγκμπι, με τη διαφορά συγκέντρωσης ανάμεσα στην ομάδα παρέμβασης και την ομάδα ελέγχου να είναι στα 32nmol/L, μετά από 11-12 εβδομάδες. Παρ' ότι λοιπόν η βιβλιογραφία κάνει λόγο για αύξηση της ολικής συγκέντρωσης βιταμίνης D στον ορό των αθλητών με την λήψη συμπληρώματος D3, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποιο βέλτιστο σχήμα χορήγησης για τη διατήρηση της βιταμίνης σε υψηλά επίπεδα [6,9].

Από την άλλη, έχουν αναφερθεί ευεργετικές επιδράσεις υψηλότερων επιπέδων 25-OH βιταμίνης D στην ενίσχυση της μυϊκής μάζας και δύναμης σε ελίτ αθλητές. Οι Zhang και συνεργάτες στην μετα-ανάλυσή τους έδειξαν ότι η συμπλήρωση βιταμίνης D επηρέασε θετικά τη μυϊκή δύναμη των κάτω άκρων σε αθλητές, αλλά όχι τη δύναμη των άνω άκρων ή τη μυϊκή ισχύ. Ο λόγος για αυτή τη διαφορά παραμένει ασαφής [8,22]. Αντίστοιχα, έχει αναφερθεί θετική συσχέτιση μεταξύ των υψηλών συγκεντρώσεων βιταμίνης D στον ορό και της μυϊκής δύναμης, τόσο σε αθλητές τζούντο της Εθνικής Ομάδας της Πολωνίας [2], η πλειοψηφία των οποίων (80%) είχαν αρχικά ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης D (< 30ng/ml), όσο και σε επαγγελματίες ποδοσφαιριστές. Στην περίπτωση των ποδοσφαιριστών, παρατηρήθηκε και μια θετική συσχέτιση με τη VO₂max [22]. Ομοίως, οι Rockwell et al. τόνισαν ότι η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D, είναι μια αποτελεσματική στρατηγική για την διατήρηση επαρκών επιπέδων της βιταμίνης στον ορό, ακόμη και κατά τους χειμερινούς μήνες, για την ενίσχυση της μυϊκής μάζας, δύναμης και ισχύος σε κολυμβητές [22]. Ωστόσο, οι ανασκοπήσεις αυτές παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς: το μέγεθος του δείγματος ήταν μικρό, οι αρχικές συγκεντρώσεις βιταμίνης D ορού των αθλητών παρουσίαζαν μεγάλη ετερογένεια και

οι μέθοδοι αξιολόγησης της μυϊκής δύναμης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαφορετικές, με τις δοκιμές μέγιστης επανάληψης (1RM) να αποτελούν την προτιμώμενη μέθοδο για πολλούς επαγγελματίες προπονητές δύναμης και φυσικής κατάστασης [8]. Η πιθανή συσχέτιση της υψηλής συγκέντρωσης βιταμίνης D στον ορό με την αύξηση της μυϊκής μάζας, έχει ενισχυθεί στο παρελθόν από προηγούμενες μελέτες οι οποίες έκαναν λόγο για άμεση συσχέτιση των επιπέδων της βιταμίνης με αναβολικές ορμόνες, συμπεριλαμβανομένων της αυξητικής ορμόνης (GH), του αυξητικού παράγοντα τύπου 1 (IGF-1) και της τεστοστερόνης [6].

Η επαρκής συγκέντρωση της 25-OH βιταμίνης D (>30 ng/mL) έχει επίσης συσχετιστεί με μειωμένο κίνδυνο μυϊκών και οστικών τραυματισμών και γενικότερα με τα βέλτιστα μυοσκελετικά οφέλη, με ορισμένους ερευνητές να θέτουν το κατώτατο όριο συγκέντρωσης βιταμίνης D στον ορό για βέλτιστη αθλητική απόδοση στα 50ng/mL, καθώς δεν έχουν παρατηρηθεί περαιτέρω οφέλη στην αθλητική υγεία που να θεωρήθηκαν στατιστικά σημαντικά όταν τα επίπεδα ήταν >50ng/mL [9,22]. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η συχνότητα των καταγμάτων μειώθηκε σημαντικά με τη λήψη 800 IU συμπληρώματος βιταμίνης D και 2000mg ασβεστίου. Στους αθλητές υψηλού κινδύνου μάλιστα, η συχνότητα καταγμάτων μειώθηκε από 7.51% σε 1.65% ύστερα από χορήγηση συμπληρώματος βιταμίνης D3. Η συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D φάνηκε επίσης ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην πρόληψη τραυματισμών που προκαλούνται από έκκεντρες συσπάσεις των μυϊκών ινών κατά την άσκηση, σε δρομείς μαραθωνίου. Οι Zebrowksa et al. [57] ανέφεραν πως η λήψη 2000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D για διάστημα 3 εβδομάδων σε υπερμαραθωνοδρόμους αθλητές, οδήγησε σε αύξηση των επιπέδων βιταμίνης D ορού και σε σημαντική μείωση των δεικτών μυϊκής βλάβης μετά την άσκηση (τροπονίνη, μυοσφαιρίνη, κινάση της κρεατίνης και γαλακτική αφυδρογονάση) [9]. Επιπλέον, έχουν προταθεί θετικές επιδράσεις υψηλότερων επιπέδων βιταμίνης D στην αναγέννηση του σκελετικού μυ και στις διαδικασίες αποκατάστασης μετά την άσκηση.

Συνεπώς, η 25-OH βιταμίνη D μπορεί να επηρεάζει τη σωματική απόδοση τόσο μέσω της άμεσης βελτίωσης της μυϊκής λειτουργίας όσο και μέσω των διαδικασιών μυϊκής αναγέννησης. Για τους αθλητές με ανεπαρκείς συγκεντρώσεις βιταμίνης D, η αερόβια ικανότητα φαίνεται πως είναι μικρότερη από εκείνη των αθλητών με επαρκή επίπεδα βιταμίνης. Πιστεύεται ότι οι επαγγελματίες αθλητές, έχουν συνήθως ελάχιστα περιθώρια βελτίωσης εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής προπονητικής τους κατάστασης. Αυτό ίσως εξηγεί το σχετικά μικρό, αν και σημαντικό, ποσοστό μεταβολής της βέλτιστης αθλητικής απόδοσης που αποδίδεται στην ολική συγκέντρωση της βιταμίνης D στον ορό των αθλητών [22].

Στην προσπάθειά τους να εξετάσουν την επίδραση των συμπληρωμάτων βιταμίνης D στη συνολική συγκέντρωση βιταμίνης D ορού καθώς και στην αθλητική απόδοση, σε μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη δοκιμή οι Close et al. παρατήρησαν ότι στην αρχή της μελέτης, το 57% των αθλητών παρουσίασε ανεπάρκεια βιταμίνης D. Η ημερήσια χορήγηση όμως 5.000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D3 για διάστημα 8 εβδομάδων, φάνηκε πως βελτίωσε την μυοσκελετική απόδοση των αθλητών σε δοκιμασία κάθετου άλματος, ενώ παρουσιάστηκε βελτίωση και στο χρόνο σπριντ 10 μέτρων. Παρά την αύξηση στα επίπεδα της συνολικής βιταμίνης D ορού, η γενικότερη επίδραση της βιταμίνης στην βελτίωση της συνολικής απόδοσης παραμένει αμφιλεγόμενη, παρ' ότι βρέθηκε μια αρκετά θετική συσχέτιση μεταξύ της κατάστασης βιταμίνης D των αθλητών και της νευρομυϊκής λειτουργίας και αερόβιας απόδοσης [2,12,21].

2. Υλικά και Μεθοδολογία

2.1 Διαδικασίες Αναζήτησης και Επιλογής Μελετών

Για την αναζήτηση επιστημονικών ερευνών για τη διεκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας, αξιοποιήθηκαν οι βάσεις επιστημονικών δεδομένων: PubMed, Cochrane Library και Google Scholar. Οι αναζητήσεις στις πλατφόρμες αυτές, πραγματοποιήθηκαν έως και τον Ιούλιο του 2025, χωρίς να τεθούν περιορισμοί αναφορικά με την ημερομηνία ή τη γλώσσα δημοσίευσης και τον μεθοδολογικό σχεδιασμό κάθε επιστημονικής δημοσίευσης. Οι λέξεις που χρησιμοποιήθηκαν ως λέξεις κλειδιά ήταν: vitamin D*, vitamin D* supplementation, cyclists, endurance athletes, athletes, athletic performance, cycling performance, cycling, strength training. Τα μέλη των συγγραφέων, μοιράστηκαν μεταξύ τους τα 295 αποτελέσματα που εμφανίστηκαν αθροιστικά ύστερα από την αναζήτηση και στις τρεις βάσεις δεδομένων. Έπειτα από εκτενή ανάλυση κάθε μελέτης ξεχωριστά, η ομάδα των συγγραφέων έκρινε ως κατάλληλες 25 από τις συνολικά 295 δημοσιεύσεις, ακολουθώντας φυσικά τα κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού που είχαν τεθεί πριν την διαδικασία αναζήτησης των δημοσιεύσεων. Τέλος, η ομάδα των συγγραφέων πραγματοποίησε έλεγχο των βιβλιογραφικών αναφορών των επιλεγμένων δημοσιεύσεων, για τον εντοπισμό επιπλέον δημοσιεύσεων που δεν εμφανίστηκαν στην αρχική αναζήτηση και θα μπορούσαν να κριθούν κατάλληλες.

2.2 Κριτήρια Επιλογής και Αποκλεισμού Μελετών

Οι μελέτες οι οποίες κρίθηκαν κατάλληλες προς επιλογή από την συγγραφική ομάδα, αφορούσαν ανθρώπους. Αναφορικά με τον μεθοδολογικό σχεδιασμό, στην έρευνα συμπεριλήφθηκαν συστηματικές ανασκοπήσεις βιβλιογραφίας με και χωρίς μετα – ανάλυση τυχαιοποιημένων ελεγχόμενων μελετών, τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες κλινικές δοκιμές, μετα-αναλύσεις, τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες κλινικές δοκιμές με διπλή τυφλοποίηση, παρεμβατικές μελέτες με ομάδα ελέγχου εικονικού φαρμάκου, ανασκοπήσεις βιβλιογραφίας και άρθρα.

Για να κριθούν κατάλληλες προς επιλογή, οι μελέτες θα έπρεπε να εξετάζουν την επίδραση των επιπέδων βιταμίνης D ορού και της συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D σε παραμέτρους αθλητικής απόδοσης σε επαγγελματίες αθλητές ποδηλασίας. Οι παράμετροι απόδοσης στις οποίες δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση ήταν η υγεία των οστών, ο κίνδυνος φλεγμονής, η δύναμη των κάτω άκρων και η καρδιοαναπνευστική αντοχή. Δεδομένης της αερόβιας φύσης του αγωνίσματος της ποδηλασίας, συμπεριλήφθηκαν επίσης δεδομένα από μελέτες που εξέτασαν την επίδραση της βιταμίνης D στην απόδοση σε αθλήματα που χρησιμοποιούν αρκετά τον αερόβιο μεταβολισμό (ποδόσφαιρο, κωπηλασία, τρέξιμο μεγάλων αποστάσεων). Να σημειωθεί πως οι μόνες μελέτες τέτοιου τύπου που κρίθηκαν κατάλληλες προς επιλογή, ήταν αυτές που περιλάμβαναν είτε δοκιμασίες ποδηλασίας είτε τη χρήση κυκλοεργόμετρου, για την αξιολόγηση της απόδοσης των αθλητών πριν και μετά την παρέμβαση με συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D. Δεν υπήρξε κάποιος περιορισμός όσον αφορά την εθνικότητα, την ηλικία ή το φύλο των συμμετεχόντων. Αποκλείστηκαν οι μελέτες στα ζώα και στον γενικό πληθυσμό, τα πρακτικά συνεδριών, τα πρωτόκολλα μελετών καθώς και οι δημοσιεύσεις της «γκρίζας βιβλιογραφίας».

2.3 Εξαγωγή Δεδομένων

Από τις μελέτες που κρίθηκαν κατάλληλες προς επιλογή, αντλήσαμε δεδομένα ως εξής: (α) επώνυμο του πρώτου συγγραφέα και έτος δημοσίευσης, (β) μεθοδολογικός σχεδιασμός, (γ)

πληθυσμός (άθλημα και αριθμός συμμετεχόντων), (δ) παρέμβαση και (ε) κύριο αποτέλεσμα. Αρχικά, η συγγραφική ομάδα καθόρισε τα δεδομένα που έπρεπε να αντληθούν από κάθε δημοσίευση. Οι 32 μελέτες που κρίθηκαν κατάλληλες προς επιλογή για ανάλυση και συλλογή δεδομένων, μοιράστηκαν στα μέλη της συγγραφικής ομάδας, η οποία προχώρησε στην καταγραφή των ζητούμενων δεδομένων και την παρουσίασή τους στον ακόλουθο πίνακα.

Κύριος Συγγραφέας (έτος)	Μεθοδολογικός Σχεδιασμός	Πληθυσμός	Παρέμβαση	Κύριο Αποτέλεσμα
Wyatt (2024)	Συστηματική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	Μικτά Αθλήματα (n=482)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D	Πιθανή βελτίωση στην αερόβια αντοχή, αναερόβια ισχύ και μυϊκή δύναμη.
Jastrzebska (2018)	Μη Τυχαιοποιημένη Παραμβατική Μελέτη	Ποδόσφαιρο (n=20)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D (8 εβδομάδες)	Στατιστικά σημαντική αύξηση της βιταμίνης D ορού των αθλητών, καθώς και βελτίωση της αερόβιας απόδοσης, μέσω αύξησης της VO2max
Koundourakis (2014)	Research	Ποδόσφαιρο (n=67)	- Συσχέτιση των επιπέδων βιταμίνης D των αθλητών με παραμέτρους που καθορίζουν την απόδοση (μυϊκή δύναμη, VO2max, ταχύτητα).	Θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης βιταμίνης D των αθλητών και παραμέτρων που καθορίζουν την απόδοση (μυϊκή δύναμη, VO2max, ταχύτητα).
Carswell (2018)	Τυχαιοποιημένη Ελεγχόμενη Δοκιμή	Νεοσύλλεκτοι Στρατιώτες (n=137)	Από του στόματος λήψη 1000 IU βιταμίνης D / ημέρα για 4 εβδομάδες και έπειτα 400 IU / ημέρα για 8 εβδομάδες.	Στατιστικά σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D και θετική συσχέτιση με τη βελτίωση της αερόβιας αλλά όχι της αναερόβιας απόδοσης.
Mielgo-Ayuso (2018)	Τυχαιοποιημένη Ελεγχόμενη Δοκιμή	Κωπηλασία (n=36)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D (3000 IU / ημέρα, για 8 εβδομάδες)	Η βιταμίνη D έχει θετική επίδραση σε διάφορους αιματολογικούς δείκτες μέσω των οποίων μπορεί να επέλθει βελτίωση της αερόβιας ικανότητας, αυξάνοντας την VO2max.
Sist (2023)	Συστηματική Ανασκόπηση και Μετα-ανάλυση Τυχαιοποιημένων Ελεγχόμενων Δοκιμών	Μικτά Αθλήματα (n=436)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού των αθλητών και αύξηση της δύναμης των κάτω άκρων.
Todd (2016)	Τυχαιοποιημένη, Διπλά Τυφλή Ελεγχόμενη Κλινική Δοκιμή με Εικονικό Φάρμακο	Ποδόσφαιρο (n= 42)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D3 (3000 IU / ημέρα για 12 εβδομάδες).	Αποκατάσταση ανεπάρκειας βιταμίνης D. Καμία βελτίωση της VO2max και των σκελετικών μυών.
Zhang (2019)	Μετα-Ανάλυση	Μικτά Αθλήματα (n=284)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού και της δύναμης των κάτω άκρων, όχι όμως και βελτίωση της παραγόμενης ισχύος.
Qi Han (2019)	Συστηματική Ανασκόπηση και Μετα-ανάλυση Τυχαιοποιημένων Ελεγχόμενων Δοκιμών	Μικτά Αθλήματα (n= 163)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D3	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού των αθλητών, όχι όμως και της μυϊκής δύναμης.
Qi Han (2024)	Συστηματική Ανασκόπηση και Μετα-ανάλυση Τυχαιοποιημένων Ελεγχόμενων Δοκιμών	Μικτά Αθλήματα (n=354)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού και βελτίωση της μυϊκής δύναμης.
Dahlquist (2015)	Ανασκόπηση	Μικτά Αθλήματα (Ανακριβής Αριθμός)	Λήψη συμπληρώματος / επαρκούς ποσότητας βιταμίνης D3	Πιθανά εργογονικά αποτελέσματα στην απόδοση, που αφορούν την αερόβια ικανότητα, την μυϊκή ανάπτυξη και δύναμη και τον χρόνο αποκατάστασης.
Weiss (2022)	Ανασκόπηση	Μικτά Αθλήματα (Ανακριβής Αριθμός)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D	Η λήψη 4000 – 5000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D αυξάνει την μυϊκή δύναμη και βελτιώνει την απόδοση των αθλητών.

Alimoradi (2019)	Τυχαιοποιημένη Ελεγχόμενη Κλινική Δοκιμή	Ποδόσφαιρο & Ποδόσφαιρο Σάλας (n=70)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D (50.000 IU / εβδομάδα για 8 εβδομάδες)	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D στους αθλητές, αύξηση της δύναμης των ποδιών και της ταχύτητας.
Ahmadi (2020)	Τυχαιοποιημένη, Διπλά Τυφλή Ελεγχόμενη Κλινική Δοκιμή με Εικονικό Φάρμακο	Αθλητικά Ενεργοί Υγιείς Ενήλικες (n= 54)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D3 (2000 IU / ημέρα για 12 εβδομάδες)	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού, VO2max και παραγωγής ισχύος. Μείωση των επιπέδων PTH και του δείκτη κόπωσης.
Rønnestad (2014)	Άρθρο Επιστημονικού Περιοδικού	Ποδηλασία (n=13)	Προπόνηση δύναμης (25 εβδομάδες)	Βελτίωση της απόδοσης (αυξημένη παραγωγή ισχύος).
Sunde (2010)	Τυχαιοποιημένη Ελεγχόμενη Δοκιμή	Ποδηλασία (n=16)	Προπόνηση δύναμης (8 εβδομάδες)	Καμία αλλαγή στη VO2max και το σωματικό βάρος, καθυστέρηση εμφάνισης κόπωσης.
Vikmoen (2015)	Άρθρο Επιστημονικού Περιοδικού	Ποδηλασία (n=19)	Προπόνηση δύναμης (11 εβδομάδες)	Βελτίωση της απόδοσης (αύξηση VO2max, αύξηση όγκου τετρακέφαλου).
Greer (2022)	Research	Ποδηλασία (n=20)	Ταυτόχρονη λήψη συμπληρώματος ασβεστίου και βιταμίνης D (12 εβδομάδες)	Δεν επηρεάζεται η σύσταση σώματος, η οστική πυκνότητα (BMD) ή βιοδείκτες του μεταβολισμού των οστών σε προπονημένους ποδηλάτες.
Hodgson (2013)	Πανεπιστημιακή Διατριβή	Ποδηλασία/Τρίαθλο (n=36)	Χορήγηση συμπληρώματος βιταμίνης D σε ποσότητες των 1500, 3000 και 6000 IU (28 ημέρες)	Η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D σε ποσότητα > RNI (Recommended Nutritional Intake), βελτιώνει τα επίπεδα βιταμίνης D στους αθλητές, όχι όμως και την απόδοση.
Tomlison (2014)	Συστηματική Ανασκόπηση με Μετα-Ανάλυση	Υγιείς ενήλικες (n=310)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D (4000 – 60.000 IU / εβδομάδα, για 4 εβδομάδες – 6 μήνες).	Αύξηση της δύναμης των κάτω άκρων.
Kawashima (2021)	Research	Χόκει (n=28) Ξιφασκία (n=14)	Χορήγηση 25μg συμπληρώματος βιταμίνης D / ημέρα (3 μήνες)	Αύξηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού και πιθανή συμβολή της βιταμίνης D στη διατήρηση επιθυμητού ποσοστού λίπους, σε περιόδους μειωμένης αγωνιστικής δράσης.
Mieszkowski (2021)	Τυχαιοποιημένη, Διπλά Τυφλή Ελεγχόμενη Μελέτη	Υπερμαραθωνοδρόμοι (n=35)	Λήψη 150.000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D πριν την έναρξη του αγώνα.	Η λήψη βιταμίνης D έδειξε πως έχει αντι-φλεγμονώδη δράση ενάντια στη φλεγμονή που προκαλείται εξαιτίας της άσκησης.
McGuinan (2012)	Πανεπιστημιακή Διατριβή	Μικτά Αθλήματα (Ανακριβής Αριθμός)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D / συσχέτιση επιπέδων βιταμίνης D ορού με αθλητική απόδοση	Μικτά αποτελέσματα (θετική και αρνητική συσχέτιση με διάφορες παραμέτρους απόδοσης).
Chiang (2017)	Συστηματική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	Μικτά Αθλήματα (n=30)	Λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D (D2/D3)	Η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D2 δεν προκάλεσε αύξηση της μυϊκής δύναμης. Η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D3 προκάλεσε αύξηση της μυϊκής δύναμης στους αθλητές.
Most (2021)	Διατηρηματική Μελέτη Κοορτής	Χάντμπολ (n=88) Χόκει (n=24)	Καταγραφή των επιπέδων βιταμίνης D των αθλητών και συσχέτιση με την αερόβια ικανότητα.	Οι αθλητές με επαρκείς συγκεντρώσεις βιταμίνης D είχαν μεγαλύτερη αερόβια ικανότητα από εκείνους με ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης.

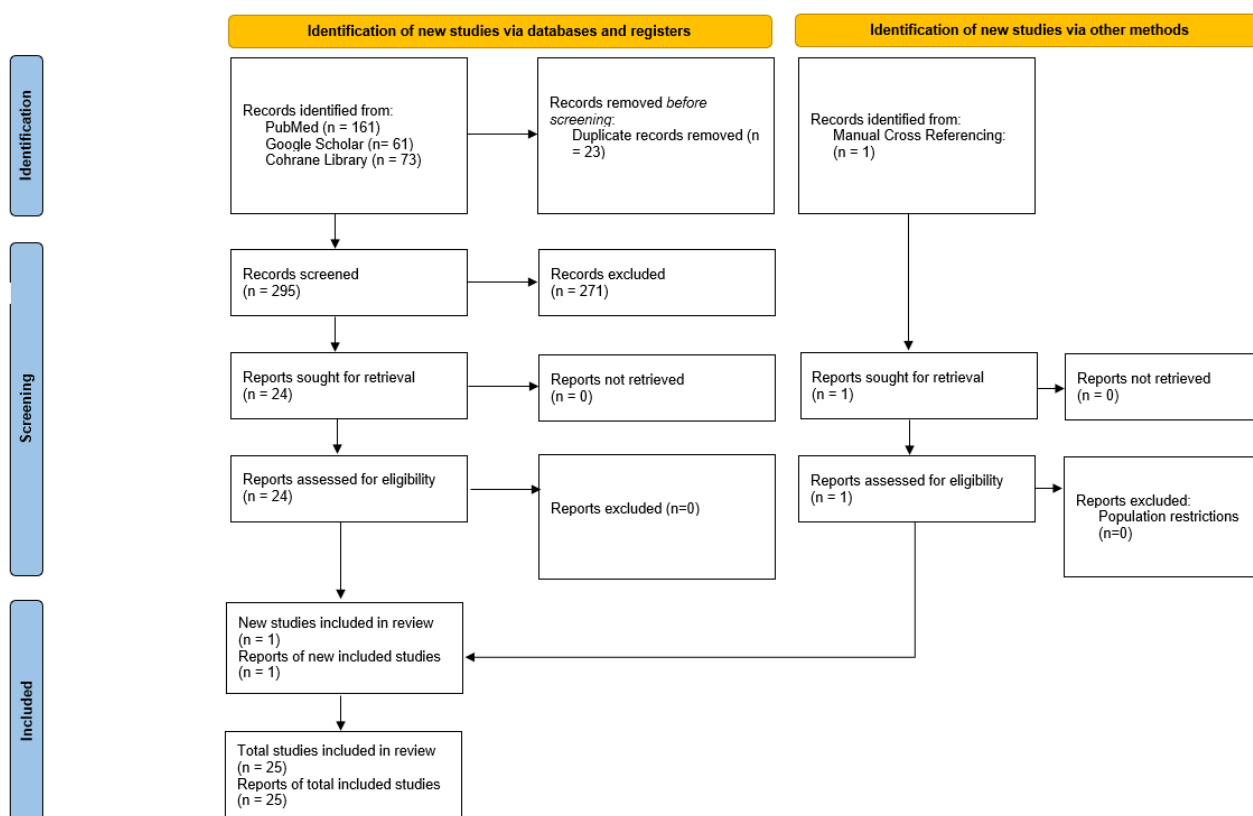
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά επιλεγμένων μελετών

3. Αποτελέσματα

3.1 Αποτελέσματα Αναζήτησης και Επιλογής Μελετών

Η διαδικασία αναζήτησης στις επιστημονικές βάσεις δεδομένων PubMed, Cochrane Library και Google Scholar, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση 295 δημοσιεύσεων συνολικά. Κατά τον έλεγχο επιλογής, αποκλείστηκαν 271 δημοσιεύσεις εκ των οποίων οι 23 ήταν διπλότυπες, ενώ οι υπόλοιπες απορρίφθηκαν είτε λόγω αμφίβολου μεθοδολογικού σχεδιασμού, είτε λόγω δείγματος που δεν αφορούσε τον αθλητικό πληθυσμό, είτε λόγω του ότι δεν απαντούσαν στην ερευνητική μας ερώτηση. Τελικά, κρίθηκαν κατάλληλες 24 δημοσιεύσεις από την αναζήτηση στις 3 αυτές βάσεις δεδομένων. Επίσης, συμπεριλήφθηκε στον έλεγχο επιλογής άλλη μία μελέτη, η οποία προέκυψε από τον έλεγχο βιβλιογραφικών αναφορών των επιλεγμένων μελετών και τελικά κρίθηκε κατάλληλη προς επιλογή για την σύνθεση των αποτελεσμάτων. Έτσι λοιπόν, ο συνολικός αριθμός δημοσιεύσεων που επιλέχθηκαν ήταν 25. Η διαδικασία αναζήτησης και επιλογής των μελετών συνοψίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής PRISMA.

PRISMA 2020 flow diagram for updated systematic reviews which included searches of databases, registers and other sources



3.2 Χαρακτηριστικά Επιλεγμένων Μελετών

Για τη σύνθεση των αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν 2 Συστηματικές Ανασκοπήσεις Βιβλιογραφίας, 3 Συστηματικές Ανασκοπήσεις και Μετα-Αναλύσεις Τυχαιοποιημένων Ελεγχόμενων Δοκιμών, 3 Τυχαιοποιημένες Διπλά Τυφλές Ελεγχόμενες Δοκιμές, 4 Τυχαιοποιημένες Ελεγχόμενες Δοκιμές, 1 Συστηματική Ανασκόπηση με Μετα-Ανάλυση, 1 Μετα-Ανάλυση, 2 Άρθρα Επιστημονικών Περιοδικών, 2 Ανασκοπήσεις, 1 Διατμηματική Μελέτη Κοορτής, 1 Μη Τυχαιοποιημένη Παρεμβατική Μελέτη, 2 Πανεπιστημιακές Διατριβές και 3 Researches. Από αυτές τις μελέτες, οι 5 είχαν ως δείγμα αποκλειστικά και μόνο επαγγελματίες ποδηλάτες, ενώ οι υπόλοιπες αφορούσαν γενικά τον αθλητικό πληθυσμό, με κάποιες από αυτές να έχουν συμπεριλάβει επαγγελματίες ποδηλάτες ως μέρος του δείγματός τους. Τέλος, συμπεριλήφθηκε μόλις μια μελέτη, η οποία αφορούσε τον γενικό πληθυσμό, αλλά επρόκειτο για τακτικά ασκούμενους και όχι επαγγελματίες αθλητές. Συνολικά, οι δημοσιεύσεις που συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα μελέτη αφορούσαν ποδηλάτες, γενικά αθλητές, ή αθλητικά ενεργούς υγιείς ενήλικες από τον γενικό πληθυσμό.

3.3 Σύνθεση Αποτελεσμάτων

Μεταβολισμός των Οστών – Οστική Πυκνότητα

Από όλες τις μελέτες που συλλέξαμε, μόνο μια μονά τυφλοποιημένη μελέτη επιχείρησε μεταξύ άλλων να εξετάσει εάν η χορήγηση συμπληρωμάτων βιταμίνης D και ασβεστίου κατά τη διάρκεια μιας κανονικής περιόδου προπόνησης 12 εβδομάδων, έχει θετική ή αρνητική συσχέτιση με την οστική πυκνότητα επαγγελματιών αθλητών ποδηλασίας. Είκοσι προπονημένοι άνδρες ποδηλάτες (μέγιστη αερόβια ικανότητα $> 50 \text{ mL/kg/min}$, μέσος όγκος προπόνησης: 28 ώρες/εβδομάδα) πραγματοποίησαν δοκιμασία μέγιστης άσκησης και δοκιμές χρονομέτρησης 40 χλμ σε εργομετρικό ποδήλατο με ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενη αντίσταση. Η οστική πυκνότητα (BMD) ολόκληρου του σώματος, της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης (O1-O4) και των δύο ισχίων μετρήθηκε με τη μέθοδο απορροφησιομετρίας διπλής ενέργειας ακτίνων X (DXA). Οι ποδηλάτες χωρίστηκαν σε δύο γκρουπ: α) χορήγηση 6 γραμμαρίων χηλικού κολλαγόνου ασβεστίου με 600mg ασβέστιο και 400 IU βιταμίνης D ανά ημέρα και β) χορήγηση μιας αδρανούς ένωσης με ισοδύναμες συγκεντρώσεις ασβεστίου και βιταμίνης D. Τελικά τα ευρήματα της μελέτης έδειξαν ότι δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην οστική πυκνότητα των αθλητών ή στον μεταβολισμό των οστών, παρά τη συνδυαστική χορήγηση συμπληρωματικής ποσότητας βιταμίνης D και ασβεστίου [44]

Ολική Συγκέντρωση Βιταμίνης D και Τιμές PTH

Σε μια διπλά τυφλοποιημένη μελέτη, συμμετείχαν 40 Καυκάσιοι άνδρες επαγγελματίες ποδηλάτες και τριαθλητές αντοχής (Μέση $\pm$ SD, ηλικία: 39 ± 8 ετών, ύψος: $1,80 \pm 0,66 \text{ m}$, βάρος: $76,3 \pm 6,2 \text{ kg}$, μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($\text{VO}_2 \text{ max. min}^{-1}$), οι οποίοι επιλέχθηκαν για τη μελέτη από τοπικούς συλλόγους ποδηλασίας και τριάθλου. Οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν τυχαία σε 4 ομάδες: 3 ομάδες χορήγησης συμπληρώματος βιταμίνης D σε δόση 1500 IU, 3000 IU και 6000 IU αντίστοιχα ανά ημέρα και 1 ομάδα εικονικού φαρμάκου, για διάστημα 28 ημερών. Πριν από τη λήψη συμπληρωμάτων, το 8% (3/36), το 53% (18/36), το 33%, (11/36) και το 14% (5/36) των αθλητών είχαν σοβαρή έλλειψη βιταμίνης D ($<25 \text{ nmol/L}$), ανεπαρκή πρόσληψη ($>50 \text{ nmol/L}$), ελλιπή πρόσληψη ($50-75 \text{ nmol/L}$) και επαρκή πρόσληψη ($75-100 \text{ nmol/L}$) αντίστοιχα. Οι μέσες συγκεντρώσεις PTH πριν από τη χορήγηση του συμπληρώματος ήταν $32,7 \pm 10,1 \text{ pg/mL}$. Δεν αναφέρθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των ομάδων πριν από τη λήψη συμπληρωμάτων για ολικές

συγκεντρώσεις 25(OH)D, 25(OH)D₂, 25(OH)D₃ και PTH. Μετά τη συμπλήρωση, τα συνολικά επίπεδα 25(OH)D ορού αυξήθηκαν σημαντικά σε όλες τις ομάδες που έλαβαν βιταμίνη D₃ ($p < 0.05$). Η συμπλήρωση με βιταμίνη D₃ προκάλεσε σημαντικές αυξήσεις στη συγκέντρωση 25(OH)D₃ σε σύγκριση με τα αρχικά επίπεδα: 43.9 ± 17.2 nmol/L, 73.2 ± 42.1 nmol/L και 85.3 ± 37.1 nmol/L για τις δόσεις των 1500 IU, 3000 IU και 6000 IU αντίστοιχα ($p < 0.05$). Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στην αλλαγή της συγκέντρωσης 25(OH)D₃ μεταξύ των δόσεων 1500 IU, 3000 IU και 6000 IU. Επιπλέον, ενώ η 25(OH)D₃ αυξήθηκε σημαντικά, δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση της 25(OH)D₂ μετά τη συμπλήρωση με βιταμίνη D₃. Πριν από τη λήψη του συμπληρώματος, τα συνολικά επίπεδα 25(OH)D δεν συσχετίστηκαν με κανένα από τα μέτρα απόδοσης. Μετά τη συμπλήρωση με βιταμίνη D, παρά τη σημαντική αύξηση των συνολικών επιπέδων 25(OH)D στους αθλητές, δεν βρέθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων 25(OH)D και των μέτρων απόδοσης. Επιπλέον, υπολογίστηκε η μεταβολή τόσο στα συνολικά επίπεδα 25(OH)D όσο και στα μέτρα απόδοσης μετά τη συμπλήρωση, ωστόσο και εδώ δεν παρατηρήθηκε καμία συσχέτιση. Δεν υπήρξε επίσης καμία συσχέτιση μεταξύ της τιμής της παραθορμόνης (PTH) και των μέτρων απόδοσης. Παρά την αύξηση λοιπόν των επιπέδων 25(OH)D με στόχο την πρόληψη ανεπάρκειας σε όλους τους συμμετέχοντες των ομάδων παρέμβασης με βιταμίνη D, δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στην αερόβια ή αναερόβια απόδοση. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα επίπεδα 25(OH)D και παραθορμόνης (PTH) πριν και μετά τη συμπλήρωση δεν συσχετίστηκαν με κανένα από τα μέτρα αερόβιας, αναερόβιας ή μυϊκής απόδοσης. Αυτό υποδηλώνει ότι η κατάσταση της βιταμίνης D δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την απόδοση σε αθλητές αντοχής όπως οι ποδηλάτες [54].

Στην συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας με μετα-ανάλυση των Qi Han et al. [4,5], φάνηκε πως η συμπλήρωση με βιταμίνη D₃ βελτίωσε την κατάσταση βιταμίνης D στους αθλητές εκείνους που στην αρχή της μελέτης παρουσίασαν ανεπαρκή επίπεδα 25(OH)D ορού, τόσο σε αθλήματα αντοχής όσο και σε αθλήματα έκρηξης. Τα ευρήματα της επικαιροποιημένης μετα-ανάλυσης τους [4] υποδεικνύουν ότι η συμπλήρωση με βιταμίνη D₃ για 4 έως 12 εβδομάδες με ημερήσια δόση άνω των 2000 IU κατά τη διάρκεια του χειμώνα μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση των συγκεντρώσεων της 25(OH)D στον ορό των αθλητών από ανεπαρκή σε επαρκή επίπεδα. Συγκεκριμένα, συμπλήρωση για 4 εβδομάδες με 5000 IU βιταμίνης D₃ οδήγησε τα επίπεδα 25(OH)D των συμμετεχόντων από ανεπαρκή σε επαρκή επίπεδα, σε γεωγραφικό πλάτος 33,3° B ιδίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Έτσι λοιπόν, στις περιπτώσεις αθλητών που παρουσιάζουν επίπεδα 25(OH)D ορού μικρότερα από 25ng/ml, η χορήγηση συμπληρώματος βιταμίνης D₃ σε δόσεις που κυμαίνονται από 2000 – 18.750 IU/ημέρα με διάρκεια 1 έως 12 εβδομάδων, αποδείχτηκε ότι βελτιώνει την ολική συγκέντρωση βιταμίνης D ορού στους αθλητές [4]. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι στη μελέτη του Wyon, όπου στους συμμετέχοντες χορηγήθηκε εφάπαξ δόση 150.000 IU βιταμίνης D₃, αν και τα μέσα επίπεδα 25(OH)D στον ορό παρέμειναν κάτω από τα 30 ng/mL μετά και την όγδοη ημέρα από τη χορήγηση της δόσης, υπήρξε τελικά βελτίωση στην κατάσταση της βιταμίνης D ορού [4,5].

Από την άλλη, τα ερευνητικά αποτελέσματα του Faibairn, αναφέρουν πως οι αθλητές με ήδη επαρκή επίπεδα βιταμίνης D ορού, είναι πολύ πιθανό να αυξήσουν τη συγκέντρωση βιταμίνης D στον ορό τους προσλαμβάνοντας μια ημερήσια δόση της τάξης των 3570 IU [5]. Ανάλογη συσχέτιση μεταξύ της χορήγησης συμπληρώματος βιταμίνης D και της βελτίωσης των επιπέδων βιταμίνης D ορού, παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα μιας συστηματικής ανασκόπησης βιβλιογραφίας και μετα-ανάλυσης των οι Sist et al. [8]. Οι τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες δοκιμές (RCTs) που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη, έδειξαν πως η συμπλήρωση τουλάχιστον 600 IU βιταμίνης D₂ ανά ημέρα για διάστημα 6 εβδομάδων ή 30.000 IU για 4 ημέρες, ήταν αποτελεσματική στην αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης 25(OH)D στον ορό, όταν η αρχική συγκέντρωση ήταν < 75 nmol/L, σε αυτές τις ομάδες αθλητών κατά τη διάρκεια

του φθινοπώρου/χειμώνα. Ωστόσο, μεταξύ των μελετών που συμπεριλήφθηκαν, μια ελάχιστη δόση 20.000 IU βιταμίνης D3 την εβδομάδα για 12 εβδομάδες ήταν αναγκαία για να επιτευχθούν επίπεδα συγκέντρωσης 25(OH)D στον ορό ≥ 75 nmol/L.

Μια διπλά τυφλή τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη μελέτη στην οποία έλαβαν μέρος 70 (34 γυναίκες, 36 άντρες) ελίτ ποδοσφαιριστές της Ινδίας [14], έδειξε πως η συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση της κυκλοφορούσας 25(OH)D στην ομάδα που έλαβε συμπλήρωμα (μέση μεταβολή: $17,3 \pm 16,9$ ng/mL, $P < 0,001$). Οι αθλητές χωρίστηκαν τυχαία σε ομάδα ελέγχου και ομάδα παρέμβασης και παρατηρήθηκε πως η εβδομαδιαία συμπλήρωση με 50.000 IU βιταμίνης D (1.250 μg/εβδομάδα ή ~178,6 μg/ημέρα) για διάστημα 8 εβδομάδων, είχε ως αποτέλεσμα σχεδόν 17 ng/mL αύξηση της κυκλοφορούσας καλσιδιόλης, που αντιστοιχεί σε αύξηση 0,1 ng/mL στα επίπεδα 25(OH)D για κάθε 1 μg/ημέρα πρόσληψης βιταμίνης D.

Ανάλογη τυχαιοποιημένη μελέτη σε άντρες και γυναίκες αθλητές του Γαελικού ποδοσφαίρου ($n=42$), εξέτασε την επίδραση της συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D₃ [3000 IU (75 μg) ημερησίως για 12 εβδομάδες, μέσω στοματικού ψεκασμού] στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($VO_2 \max$) [58]. Κατά την έναρξη της μελέτης, το 50% και το 22% των αθλητών παρουσίαζαν ανεπάρκεια βιταμίνης D (31–49 nmol/L) και σημαντική έλλειψη βιταμίνης (<30 nmol/L), αντίστοιχα. Η συγκέντρωση της συνολικής 25-υδροξυβιταμίνης D δεν συσχετίστηκε σημαντικά με κανένα μέτρο σωματικής απόδοσης. Η συμπλήρωση αύξησε σημαντικά τα συνολικά επίπεδα 25-υδροξυβιταμίνης D σε σύγκριση με την ομάδα του εικονικού φαρμάκου (μέση $\pm$ τυπική απόκλιση μεταβολής από την αρχική τιμή: $36,31 \pm 32,34$ έναντι $6,11 \pm 23,93$ nmol/L, αντίστοιχα· $p = 0,006$).

Εξίσου σημαντική βελτίωση στα επίπεδα βιταμίνης D ορού ύστερα από διάστημα χορήγησης συμπληρώματος, παρατηρήθηκε και σε αθλητές αντοχής και πιο συγκεκριμένα σε υπερμαραθωνοδρόμους. Μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη μελέτη με διπλή τυφλοποίηση από τους Mieszkowski et al. [59], χώρισε ένα σύνολο 35 αθλητών σε ομάδα παρέμβασης και ομάδα ελέγχου. Όλοι οι συμμετέχοντες της ομάδας παρέμβασης, έλαβαν μια εφάπαξ υψηλή δόση 150.000 IU βιταμίνης D, 24 ώρες πριν από την έναρξη ενός υπερμαραθωνίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα επίπεδα της 25(OH)D, δείκτης της κατάστασης της βιταμίνης D, αυξήθηκαν σημαντικά μετά τον υπερμαραθώνιο, περισσότερο στην ομάδα που έλαβε συμπλήρωμα σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου.

Τέλος, οι Carswell et al., σε μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη δοκιμή, θέλησαν να προσδιορίσουν τη σχέση μεταξύ της κατάστασης βιταμίνης D ορού και της αθλητικής απόδοσης σε 967 νεοσύλλεκτους στρατιώτες, μέσω της χορήγησης βιταμίνης D είτε σε μορφή προσομοιωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, είτε σε μορφή D3 με από του στόματος λήψη. Στην αρχική φάση, περίπου τα τρία τέταρτα (74%) των εθελοντών παρουσίαζαν ανεπάρκεια βιταμίνης D (ορός 25(OH)D < 50 nmol·L⁻¹) και περίπου το ένα τρίτο (31%) είχαν έλλειψη βιταμίνης D (ορός 25(OH)D < 30 nmol·L⁻¹). Τόσο η συμπλήρωση μέσω προσομοιωμένης ηλιακής ακτινοβολίας (SSR) όσο και η από του στόματος λήψη (ORAL) αποδείχθηκαν επιτυχείς στρατηγικές για την επίτευξη επάρκειας βιταμίνης D και τη διατήρηση των επιπέδων 25(OH)D στον ορό. Συγκεκριμένα, στις εβδομάδες 5 και 12, τα επίπεδα 25(OH)D στον ορό στις ομάδες SSR και ORAL ήταν υψηλότερα από αυτά των αντίστοιχων ομάδων placebo ($P < 0,001$ · Σχήμα 3). Πράγματι, μέχρι την εβδομάδα 5, σχεδόν όλοι οι συμμετέχοντες στις ομάδες SSR και ORAL ήταν επαρκείς σε βιταμίνη D (97%: ορός 25(OH)D ≥ 50 nmol·L⁻¹), ενώ κανένας δεν παρουσίαζε έλλειψη βιταμίνης D (ορός 25(OH)D < 30 nmol·L⁻¹). Δεν παρατηρήθηκε κάποια στατιστικά σημαντική αλλαγή στην αθλητική απόδοση παρά την επίτευξη επαρκών επιπέδων βιταμίνης D ορού. Το εύρημά των Carswell et al. ότι η συμπλήρωση βιταμίνης D — ακόμη και όταν επιτυγχάνει τα προτεινόμενα βέλτιστα επίπεδα 25(OH)D στον ορό ≥ 75 nmol·L⁻¹ — δεν έχει ευεργετική επίδραση στην αθλητική απόδοση,

είναι επίκαιρο και έχει σημαντικές επιπτώσεις για τις μελλοντικές διατροφικές και αθλητικές συστάσεις [32].

Φλεγμονή

Η χορήγηση 150.000 IU βιταμίνης D σε υπερμαραθωνοδρόμους αθλητές 24 ώρες πριν την έναρξη του αγώνα, μετρίασε σημαντικά την φυσιολογική αύξηση των επιπέδων των ιντερλευκινών IL-6 και IL-10, καθώς και της ρεξιστίνης μετά τον υπερμαραθώνιο, ενώ δεν παρατηρήθηκε κάποια άλλη συσχέτιση με τα επίπεδα μιας άλλης προφλεγμονώδους κυτοκίνης, της FSTL1, η οποία αυξήθηκε εξίσου σημαντικά μετά από τον αγώνα. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδηλώνουν ότι η βιταμίνη D ως συμπλήρωμα, είναι ικανή να μετριάσει τη φλεγμονή που προκαλείται από την άσκηση [59].

Καρδιοαναπνευστική Ικανότητα

Πολλές μελέτες ανά τα χρόνια έχουν υποδείξει ότι υπάρχει θετική συσχέτιση της κατάστασης βιταμίνης D ορού των αθλητών με την καρδιοαναπνευστική αντοχή. Οι Al Mheid et al. εξέτασαν τα επίπεδα βιταμίνης D σε 163 υγιή άτομα λευκής φυλής, άνδρες και γυναίκες (μέση ηλικία 44 ± 13 έτη, $\Delta\text{Μ}\Sigma 22 \pm 3 \text{ kg/m}^2$). Η μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($\text{VO}_2 \text{ max}$) και το αναερόβιο κατώφλι μετρήθηκαν με καρδιοπνευμονική παρακολούθηση εν ώρα δοκιμασίας άσκησης. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα άτομα με συγκεντρώσεις βιταμίνης D $> 30 \text{ ng/mL}$ είχαν υψηλότερο $\text{VO}_2 \text{ max}$ ($r = 0.35$, $P < 0.01$) και υψηλότερο αναερόβιο κατώφλι ($r = 0.37$, $P < 0.01$). Αντίστοιχα, οι Mowry et al. (2009) συνέκριναν τα επίπεδα βιταμίνης D και το $\text{VO}_2 \text{ max}$ μεταξύ 59 υπέρβαρων γυναικών (μέση ηλικία 19.86 ± 2.13 έτη, $\Delta\text{Μ}\Sigma 36.16 \pm 8.19 \text{ kg/m}^2$). Η μελέτη ανέφερε σημαντική συσχέτιση μεταξύ $\text{VO}_2 \text{ max}$ και συγκεντρώσεων βιταμίνης D ($r = 0.36$; $P < 0.05$). Πιο πρόσφατα, οι Ardestani et al. εξέτασαν τη σχέση μεταξύ βιταμίνης D και $\text{VO}_2 \text{ max}$ σε 200 υγιείς ενήλικες (μέση ηλικία 40 ± 14.4 έτη, $\Delta\text{Μ}\Sigma 26 \pm 5.1 \text{ kg/m}^2$). Η μελέτη αυτή διαπίστωσε ότι οι συγκεντρώσεις βιταμίνης D συσχετίζονταν επίσης σημαντικά με το $\text{VO}_2 \text{ max}$ ($r = 0.29$, $P < 0.001$). Η μελέτη σύγκρινε επίσης τα επίπεδα $\text{VO}_2 \text{ max}$ μεταξύ ατόμων με επάρκεια βιταμίνης D (συγκέντρωση $25(\text{OH})\text{D} > 30 \text{ ng/mL}$), ανεπαρκή επίπεδα ($20\text{--}30 \text{ ng/mL}$) και έλλειψη βιταμίνης D ($\leq 20 \text{ ng/mL}$). Μετά από προσαρμογή για ηλικία, φύλο, δείκτη μάζας σώματος και χρόνο άσκησης, οι ερευνητές ανέφεραν υψηλότερες τιμές $\text{VO}_2 \text{ max}$ στα άτομα με επάρκεια βιταμίνης D (36.2 ml/kg/min) σε σύγκριση με εκείνα που ήταν ανεπαρκή (33.5 ml/kg/min) ή ελλιπή (29.3 ml/kg/min). Αν και οι μελέτες αυτές είναι συσχετιστικές, υποδηλώνουν ότι οι αθλητές έχουν καλύτερη καρδιοαναπνευστική αντοχή όταν διατηρούν επαρκή επίπεδα βιταμίνης D [18].

Στην τυχαιοποιημένη και διπλά τυφλή μελέτη του Hodgson [54], οι 40 Καυκάσιοι άνδρες επαγγελματίες ποδηλάτες και τριαθλητές αντοχής που έλαβαν μέρος στην μελέτη (Μέση $\pm$ SD, ηλικία: 39 ± 8 ετών, ύψος: $1,80 \pm 0,66 \text{ m}$, βάρος: $76,3 \pm 6,2 \text{ kg}$, μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($\text{VO}_2 \text{ max. min}^{-1}$) δεν βελτίωσαν σημαντικά την μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου τους. Πιο συγκεκριμένα η χορήγηση 1500, 3000 και 6000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D για διάστημα 28 ημερών, φάνηκε πως δεν προκάλεσε κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στη $\text{VO}_2 \text{ max}$ μεταξύ των ομάδων που έλαβαν το συμπλήρωμα, αλλά ούτε και σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου που έλαβε εικονικό φάρμακο. Ωστόσο, φαίνεται ότι παρατηρήθηκε μια τάση για βελτίωση του χρόνου απόδοσης στο κυκλοεργόμετρο, για τις ομάδες αθλητών που έλαβαν 3000 και 6000 IU συμπληρώματος βιταμίνης D αντίστοιχα, χωρίς όμως τα αποτελέσματα να είναι στατιστικά σημαντικά.

Από την άλλη βέβαια, μελέτες σε επαγγελματίες ποδοσφαιριστές έχουν αναφέρει σημαντικές βελτιώσεις της $\text{VO}_2 \text{ max}$, ύστερα από χορήγηση συμπληρώματος βιταμίνης D για ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι πιο χαρακτηριστικές μελέτες που υπέδειξαν θετική συσχέτιση

μεταξύ της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D και της βελτίωσης της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου, ήταν αυτές των Koundourakis et al. [67] και των Jastrzebska et al. Η μελέτη των Koundourakis et al. [1,2,13] εξέτασε την επίδραση της συμπληρωματικής χορήγησης 5000 IU βιταμίνης D ανά ημέρα, κατά τη διάρκεια 8 εβδομάδων εντατικής προπόνησης υψηλής έντασης (HIIT) σε 67 Καυκάσιους άνδρες επαγγελματίες ποδοσφαιριστές (ηλικία $25,6 \pm 6,2$) από 3 ελληνικές ομάδες. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε εξαιρετικά ενδιαφέροντα στοιχεία, όπως το ότι η κατάσταση βιταμίνης D ορού ενός αθλητή μπορεί να έχει θετική επίδραση στον περιορισμό της αγωνιστικής καταπόνησης. Η συγκέντρωση βιταμίνης D στους αθλητές αυξήθηκε σημαντικά ύστερα από την 7^η εβδομάδα χορήγησης του συμπληρώματος (47.24 ± 13.50 ng/mL) σε σύγκριση με την αρχική της τιμή (34.41 ± 7.08 ng/mL). Επιπλέον, η μελέτη έδειξε μια σημαντική θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων 25(OH)D και της μυϊκής δύναμης (μέσω καθισμάτων και αλμάτων), της ικανότητας στο σπριντ (10 και 20 μέτρων) και της αερόβιας ικανότητας (VO_{2max}) στους επαγγελματίες ποδοσφαιριστές. Στην ομάδα που έλαβε το συμπλήρωμα βιταμίνης, παρατηρήθηκε συνολική αύξηση στη συγκέντρωση της βιταμίνης D κατά 119%, ενώ η VO_{2max} αυξήθηκε κατά 13%. Οι συγγραφείς λοιπόν κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το επίπεδο βιταμίνης D στους επαγγελματίες αθλητές, μπορεί να έχει ευεργετική, αν και μέτρια, επίδραση στην αερόβια ικανότητα επαγγελματιών ποδοσφαιριστών και κατ' επέκταση έναν υποστηρικτικό ρόλο στην βελτίωση της αθλητικής απόδοσης.

Η μελέτη των Jastrzebska et al. πραγματοποιήθηκε σε 36 ποδοσφαιριστές (ηλικία: 17.5 ± 0.6 έτη, σωματικό βάρος: 71.3 ± 6.9 kg, ΔΜΣ: 22.2 ± 1.8 kg/m²) από την Πολωνία [60]. Οι παίκτες χωρίστηκαν σε δύο ομάδες: την ομάδα εικονικού φαρμάκου (n = 16) και την ομάδα παρέμβασης (n = 20), η οποία έλαβε συμπλήρωμα βιταμίνης D₃, 5000 IU ημερησίως για 8 εβδομάδες. Στην ομάδα που έλαβε το συμπλήρωμα, τα επίπεδα 25(OH)D στο πλάσμα αυξήθηκαν σημαντικά μετά την παρέμβαση (αρχικά: 48.5 ± 8.6 nmol/L, μετά την παρέμβαση: 106.3 ± 26.6 nmol/L, $p < 0.0001$), ενώ στην ομάδα ελέγχου παρατηρήθηκαν μόνο μη σημαντικές αλλαγές (αρχικά: 47.5 ± 16.2 nmol/L, μετά: 43.5 ± 16.7 nmol/L, $p = 0.228$). Οι μεταβλητές απόδοσης στις οποίες παρουσιάστηκαν σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με την ομάδα ελέγχου ήταν οι ακόλουθες: μέγιστη ταχύτητα τρεξίματος (V_{max} , $p = 0.017$), ταχύτητα στο αναερόβιο κατώφλι (VLT, $p < 0.0001$), VLT/ V_{max} ($p = 0.000006$), μέγιστος καρδιακός ρυθμός ($p = 0.0001$), ικανότητα σωματικής προσπάθειας ($p < 0.0001$) και μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2max} , $p < 0.0001$). Η VO_{2max} αυξήθηκε κατά 8.65 ± 3.57 mL/kg/min στην ομάδα που λάμβανε συμπλήρωμα βιταμίνης D₃, σε σύγκριση με 5.03 ± 2.02 mL/kg/min στην ομάδα ποδοσφαιριστών που λάμβανε το εικονικό φάρμακο ($p = 0.021$). Η μελέτη έδειξε επίσης σημαντική αύξηση στην ικανότητα φυσικής δραστηριότητας στους 170 παλμούς (PWC-170, δείκτης αερόβιας ισχύος) σε σύγκριση με την ομάδα χωρίς συμπλήρωμα (ομάδα με συμπλήρωμα: 5.03 ± 2.02 kGm/kg/min· ομάδα χωρίς συμπλήρωμα: 3.34 ± 2.28 kGm/kg/min· $p = 0.027$). Το εύρημα αυτό έρχεται σε αντιπαράθεση με προηγούμενη μελέτη από την ίδια ερευνητική ομάδα, κατά την οποία δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στο PWC-170 σε παρόμοια ομάδα Πολωνών ποδοσφαιριστών ($p > 0.05$) [2,46,60].

Παρόμοια θετική συσχέτιση παρατηρήθηκε και σε ερευνητικές μελέτες που αφορούσαν επαγγελματίες αθλητές κωπηλασίας [1,2]. Η κωπηλασία είναι ένα άθλημα κατά το οποίο η περισσότερη ενέργεια προέρχεται από τον αερόβιο μεταβολισμό, όπως συμβαίνει και με το άθλημα της ποδηλασίας. Δεδομένης της συσχέτισης της αερόβιας ικανότητας και της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (VO_{2max}), όπου η μεταφορά οξυγόνου παίζει καθοριστικό ρόλο, οι Mielgo-Ayuso et al. έθεσαν ως ερευνητική τους υπόθεση ότι η βελτίωση των αιματολογικών παραμέτρων αποτελεί τρόπο βελτίωσης της αθλητικής απόδοσης στους αθλητές κωπηλασίας. Θέλοντας λοιπόν να ελέγξουν εάν η συμπλήρωση με βιταμίνη D επηρεάζει θετικά το αιματολογικό και το προφίλ μεταβολισμού του σιδήρου χώρισαν τυχαία 36 ελίτ επαγγελματίες αθλητές κωπηλασίας σε ομάδα ελέγχου (CG, n = 18, ύψος $181.05 \pm$

3.39 cm, σωματικό βάρος 77.02 ± 7.55 kg) και σε ομάδα παρέμβασης η οποία έλαβε συμπλήρωμα 3000 IU βιταμίνης D3 ανά ημέρα για διάστημα 8 εβδομάδων (VD3, n = 18, ύψος: 179.70 ± 9.07 cm, βάρος: 76.19 ± 10.07 kg) [68]. Όλοι οι αθλητές είχαν αρχικά (T1) υποβέλτιστα επίπεδα 25(OH)D (26.24 ± 8.18 ng/mL). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τους ανοιξιάτικους μήνες (Απρίλιος–Ιούνιος) στην Ισπανία. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν στατιστικά σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση 25(OH)D στον ορό στην ομάδα παρέμβασης μετά από 8 εβδομάδες (T2) (T1: 26.24 ± 8.18 ng/mL έναντι T2: 48.12 ± 10.88 ng/mL, $p < 0.001$). Στην ομάδα ελέγχου (CG) δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές αλλαγές (T1: 30.76 ± 6.95 ng/mL έναντι T2: 35.14 ± 7.96 ng/mL, $p = 0.056$). Κατά τη διάρκεια της μελέτης, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές όσον αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων με την αιμοσφαιρίνη ($p = 0.009$), τον αιματοκρίτη ($p = 0.019$) και τη τρανσφερίνη ($p = 0.007$). Επιπλέον, στην ομάδα ελέγχου σημειώθηκε σημαντική μείωση ($p < 0.05$) στην αιμοσφαιρίνη (T1: 15.54 ± 0.88 ng/mL έναντι T2: 15.09 ± 0.82 ng/mL), ενώ στην ομάδα VD3 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση ($p < 0.05$) στα επίπεδα τρανσφερίνης μέσα σε 8 εβδομάδες (T1: 254.22 ± 20.69 mg/dL έναντι T2: 270.44 ± 20.08 mg/dL). Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συμπλήρωση με βιταμίνη D επηρεάζει αιματολογικές παραμέτρους και μπορεί να ενισχύσει την αερόβια ικανότητα μέσω της αύξησης του VO_{2max} .

Ανάλογα αποτελέσματα που υποδεικνύουν την βελτίωση της VO_{2max} , ανέφερε και η μονά τυφλοποιημένη μελέτη των Jastrzebski et al. [1,8,13]. Η χορήγηση συμπληρώματος 6000 IU βιταμίνης D3 για διάστημα 8 εβδομάδων σε 14 ελίτ επαγγελματίες κωπηλάτες με επαρκή επίπεδα 25(OH)D (>30 ng/mL), αύξησε σημαντικά τη VO_{2max} κατά 21,1% και τη συγκέντρωση της ολικής 25(OH)D κατά 400 % (~ 120 ng/mL). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός με τον οποίο τα αυξημένα επίπεδα 25(OH)D επηρεάζουν το VO_{2max} παραμένει ασαφής. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι τα ένζυμα CYP που ενεργοποιούν τη βιταμίνη D3 σε 1,25-διυδροξυβιταμίνη D3 περιέχουν πρωτεΐνες με αιμικά συστατικά και ενδέχεται να επηρεάζουν την συγγένεια δέσμευσης του οξυγόνου με την αιμοσφαιρίνη.

Η ανεπάρκεια βιταμίνης D, είναι ένας σημαντικός κίνδυνος για τους αθλητές που ασχολούνται με αγωνίσματα εσωτερικού χώρου, διότι έχουν και περιορισμένη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Με στόχο λοιπόν να ερευνηθεί η επίδραση των επιπέδων βιταμίνης D στην αερόβια απόδοση ελίτ αθλητών που προπονούνται και αγωνίζονται σε εσωτερικό χώρο, οι Most et al. [22] χώρισαν ένα σύνολο 122 ανδρών αθλητών (χάντμπολ και χόκει επί πάγου) σε ομάδες βάσει των συγκεντρώσεων τους σε 25-OH βιταμίνης D (<20 ng/mL, $\geq 20 - <30$ ng/mL, $\geq 30 - <50$ ng/mL και ≥ 50 ng/mL). Η μέγιστη αερόβια ισχύς (maximal aerobic power) αξιολογήθηκε με τυποποιημένο τεστ σε εργόμετρο ποδηλασίας. Το πρωτόκολλο της δοκιμασίας άσκησης ξεκίνησε με φορτίο 100 Watt (W), μετά από προθέρμανση διάρκειας 2 λεπτών στα 50 W. Το φορτίο αυξανόταν κατά 50 W κάθε 2 λεπτά, μέχρι την εξάντληση, η οποία ορίστηκε ως η αδυναμία των συμμετεχόντων να διατηρήσουν το φορτίο για 2 λεπτά. Οι αθλητές με συγκεντρώσεις 25-OH βιταμίνης D ≥ 30 ng/mL ($\geq 30 - <50$ ng/mL και ≥ 50 ng/mL) πέτυχαν σημαντικά ($p < 0.05$) υψηλότερο μέγιστο έργο (maximum workload) και μέγιστη αερόβια ισχύ σε σύγκριση με τους αθλητές που είχαν συγκεντρώσεις <20 ng/mL. Αυτή η σημαντική διαφορά ($p = 0.049$) παρατηρήθηκε επίσης κατά τη σύγκριση της ομάδας με συγκεντρώσεις ≥ 50 ng/mL (406 ± 30 W, 4.24 ± 0.36 W/kg) με την ομάδα των $\geq 20 - <30$ ng/mL (340 ± 74 W, 3.59 ± 0.71 W/kg). Παρ' όλα αυτά, βρέθηκε θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων της 25-OH βιταμίνης D και της μέγιστης αερόβιας ισχύος ($r = 0.555$, $p = 0.03$).

Υπάρχουν επίσης μελέτες που έχουν εξετάσει τη σχέση μεταξύ βιταμίνης D και καρδιοαναπνευστικής αντοχής τόσο σε αθλητές όσο και σε μη αθλητές, παρακολουθώντας εποχικές μεταβολές στην αντοχή [18]. Σε μία μελέτη, οι Erikssen & Rodahl εξέτασαν την εποχική μεταβολή της φυσικής κατάστασης σε 1.835 καθιστικούς, αλλά υγιείς Νορβηγούς άνδρες ηλικίας 40–59 ετών, χρησιμοποιώντας μια δοκιμασία σχεδόν μέγιστης κόπωσης με

στατικό ποδήλατο. Η δοκιμασία πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους: Περίοδος 1 = Ιανουάριος – Απρίλιος, Περίοδος 2 = Μάιος – Αύγουστος, Περίοδος 3 = Σεπτέμβριος – Δεκέμβριος. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η μέγιστη ικανότητα απόδοσης στην άσκηση κορυφώθηκε στα τέλη Αυγούστου και άρχισε να μειώνεται τον Σεπτέμβριο. Η αερόβια ικανότητα, η οποία μετρήθηκε μέσω των καρδιακών παλμών στο τέλος μιας σταθερής έντασης άσκησης, ήταν σημαντικά υψηλότερη κατά τους μήνες Μάιο – Αύγουστο σε σύγκριση με τις άλλες δύο περιόδους ($P < 0.001$). Ανάλογη μελέτη από τους Svedenhag & Sjodin και Kristal-Boneh et al., παρουσιάζει αποτελέσματα τα οποία συμφωνούν με το γεγονός ότι η καρδιοαναπνευστική αντοχή κορυφώνεται κατά τους θερινούς μήνες. Οι Svedenhag & Sjodin μέτρησαν τις εποχιακές μεταβολές σε φυσιολογικά χαρακτηριστικά δέκα μελών της εθνικής ομάδας στίβου της Σουηδίας, οι οποίοι προπονούνταν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η μελέτη περιλάμβανε πέντε αθλητές μεσαίων αποστάσεων (μέση ηλικία 21 ετών) και πέντε αθλητές μεγάλων αποστάσεων (μέση ηλικία 23 ετών). Οι αθλητές υποβλήθηκαν σε τεστ μέγιστης κόπωσης σε κυλιόμενο διάδρομο τέσσερις φορές μέσα σε ένα έτος (Τεστ 1 = Ιανουάριος, Τεστ 2 = Μάιος, Τεστ 3 = καλοκαίρι, Τεστ 4 = ο επόμενος Ιανουάριος). Αν και δεν είναι σαφές αν οι ερευνητές έλαβαν υπόψη το χρόνο εβδομαδιαίας προπόνησης κάθε αθλητή εκτός του τεστ σε κυλιόμενο διάδρομο, η $VO_2 \max$ ήταν σημαντικά υψηλότερη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε σύγκριση με το χειμώνα (77.4 έναντι 74.2 ml/kg/min, $P < 0.01$). Δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις βιταμίνης D τείνουν να κορυφώνονται κατά την καλοκαιρινή περίοδο, οι μελέτες αυτές υποδεικνύουν ότι η κατάσταση της βιταμίνης D ενδέχεται να επηρεάζει την καρδιοαναπνευστική αντοχή.

Οι Cannell et al. στην ανασκόπησή τους, ερμηνεύουν τη βιβλιογραφία και παρέχουν μια σύντομη περιγραφή αυτών των μελετών. Μια από αυτές τις παρεμβατικές μελέτες εξέτασε τις επιδράσεις της συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D στην αθλητική απόδοση, χωρίζοντας τους συμμετέχοντες σε ομάδα παρέμβασης η οποία έλαβε εφάπαξ δόση συμπληρώματος 250.000 IU χωρίς να έχει εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία και σε ομάδα ελέγχου η οποία είχε προηγουμένως εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία. Πριν ξεκινήσει η παρέμβαση, η καρδιοαναπνευστική ικανότητα στην ομάδα ελέγχου ήταν 56% υψηλότερη από αυτή της ομάδας παρέμβασης. Ένα μήνα αργότερα όμως, η καρδιοαναπνευστική ικανότητα και στα δύο γκρουπ ήταν στα ίδια επίπεδα. Αν και δεν είναι σαφές αν οι ερευνητές μέτρησε τα επίπεδα βιταμίνης D στους συμμετέχοντες, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η συμπλήρωση βιταμίνης D μπορεί πράγματι να επηρεάσει θετικά την καρδιοαναπνευστική ικανότητα [18].

Βελτίωση στην $VO_2 \max$ παρατηρήθηκε αντίστοιχα και σε τακτικά ασκούμενους άνδρες (min: 3 φορές/εβδομάδα), στους οποίους χορηγήθηκε συμπλήρωμα βιταμίνης D3 σε ποσότητα 2000 IU, για διάστημα 12 εβδομάδων [6]. Η παρέμβαση πραγματοποιήθηκε στην Ινδία από Ιανουάριο – Μάρτιο, το διάστημα που η ηλιακή έκθεση είναι η χαμηλότερη δυνατή (γεωγραφικό πλάτος 31.31° N και γεωγραφικό μήκος 48.67° E). Οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν σε 2 ομάδες: (1) λήψη 2000 IU/ημέρα βιταμίνης D3 σε μορφή μαλακής κάψουλας (ομάδα VDS), (2) λήψη εικονικού φαρμάκου (1 μαλακή κάψουλα την ημέρα) με ίδια εμφάνιση και γεύση. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση στη $VO_{2\max}$ ($p = 0.016$) και στη μέση ισχύ ($P = 0.044$), καθώς και σημαντική μείωση στον δείκτη κόπωσης ($P < 0.001$) μετά από 12 εβδομάδες παρέμβασης στην ομάδα VDS σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αρχικές τιμές, ενώ δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στην ομάδα του εικονικού φαρμάκου. Δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική αλλαγή στη μέγιστη ισχύ μετά από 12 εβδομάδες ούτε στην ομάδα VDS ούτε στην ομάδα εικονικού φαρμάκου ($p > 0.05$). Η ανάλυση μεταξύ των ομάδων έδειξε ότι τα άτομα της ομάδας VDS παρουσίασαν υψηλότερη $VO_{2\max}$ ($p = 0.049$) και χαμηλότερο δείκτη κόπωσης ($p = 0.001$) την 12η εβδομάδα της μελέτης σε σύγκριση με την ομάδα του εικονικού φαρμάκου.

Αναερόβια Ικανότητα – Δύναμη κάτω άκρων

Στους επαγγελματίες ποδηλάτες και τριαθλητές αντοχής, η συμπληρωματική χορήγηση 1500, 3000 και 6000 IU βιταμίνης D παρουσίασε μεικτά αποτελέσματα αναφορικά με τη δύναμη των κάτω άκρων. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να εκτελέσουν 1 μέγιστη επανάληψη με το ένα πόδι κάθε φορά στις ασκήσεις: πιέσεις ποδιών (leg press) και εκτάσεις ποδιών (leg extension). Η μέγιστη επανάληψη με το ένα πόδι (1RM) σε πιέσεις ποδιών (leg press - LP) για το κυρίαρχο και το μη κυρίαρχο πόδι δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική διαφορά στη μεταβολή από την αρχική (PRE) στην τελική (POST) μέτρηση για καμία από τις ομάδες, ούτε όταν η διαφορά συγκρίθηκε με την ομάδα εικονικού φαρμάκου (PLA). Παρομοίως, η άσκηση έκτασης ποδιού (leg extension - LE) δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική διαφορά στη μεταβολή PRE-POST για τις ομάδες PLA, 1500 IU και 3000 IU. Ωστόσο, η δόση των 6000 IU προκάλεσε στατιστικά σημαντική αύξηση στη μέγιστη επανάληψη στην έκταση ποδιού κατά τη σύγκριση των μετρήσεων πριν και μετά τη συμπλήρωση, τόσο στο κυρίαρχο (64 ± 11 kg και 69 ± 9 kg αντίστοιχα, $p < 0.05$) όσο και στο μη κυρίαρχο πόδι (66 ± 11 kg και 71 ± 10 kg αντίστοιχα, $p < 0.02$). Παρ' όλα αυτά, η σημαντική αύξηση στην άσκηση LE από την αρχική στην τελική μέτρηση δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά σε σύγκριση με τις ομάδες PLA, 1500 IU ή 3000 IU [54].

Σε επαγγελματίες ποδοσφαιριστές του Ιρανικού ποδοσφαίρου, η εβδομαδιαία συμπλήρωση με 50.000 IU βιταμίνης D (1.250 μg/εβδομάδα ή ~178,6 μg/ημέρα) δεν επέφερε σημαντικές διαφορές ούτε εντός ούτε μεταξύ των ομάδων στις προσπάθειες στο άλμα σε εργομετρική πλατφόρμα και στο κατακόρυφο επιτόπιο άλμα. Ωστόσο, στις δοκιμασίες δύναμης, και οι δύο ομάδες εμφάνισαν βελτίωση στις πιέσεις ποδιών (leg press), ενώ στην δοκιμασία ταχύτητας, η ομάδα που έλαβε συμπλήρωμα βιταμίνης D παρουσίασε εξίσου σημαντική βελτίωση [14].

Στην αναθεωρημένη συστηματική ανασκόπηση τους με μετα-ανάλυση, οι Qi Han et al. ανέφεραν πως δεν παρατηρήθηκαν ουσιαστικές βελτιώσεις στην προσπάθεια κάθετου άλματος (SMD 0.21, 95% CI: -0.09 έως 0.50, $p = 0.17$) σε ένα δείγμα 318 αθλητών ύστερα από ημερήσια δοσολογία συμπληρώματος βιταμίνης D3, με τιμές που κυμαίνονταν από ελάχιστο 2.000 IU για διάρκεια 12 εβδομάδων (35) έως μέγιστο 18.750 IU εντός 8 ημερών (με τη μορφή εφάπαξ δόσης 150.000 IU). Ωστόσο, καταγράφηκε σημαντική βελτίωση στη μέγιστη σύσπαση του τετρακέφαλου (SMD 0.57, 95% CI: 0.04 έως 1.11, $p = 0.04$). Παρ' όλα αυτά, η συνολική ανάλυση έδειξε ότι τα τεστ δύναμης συνολικά δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντική βελτίωση (SMD 0.18, 95% CI: -0.02 έως 0.37, $p = 0.08$) [5]. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με το εύρημα προηγούμενης μελέτης των ίδιων ερευνητών [4], κατά την οποία, ύστερα από ανάλυση επιλεγμένων τυχαιοποιημένων μελετών, παρατηρήθηκε ότι η χορήγηση συμπληρώματος βιταμίνης D δεν έχει σημαντική επίδραση στην αύξηση της μυϊκής δύναμης των αθλητών (SMD -0.75, 95% CI: -1.82 έως 0.32, $p = 0.17$). Ωστόσο, στην προηγούμενη μελέτη οι Qi Han et al. είχαν υποδείξει πως η χορήγηση βιταμίνης D δεν συμβάλλει στη μέγιστη σύσπαση του τετρακέφαλου [SMD -2.14, 95% CI: -4.87 έως 0.59, $p = 0.12$], εύρημα το οποίο κατέρριψαν στην αναθεωρημένη τους μετα-ανάλυση. Επίσης το δείγμα την προηγούμενης μελέτης ήταν μικρότερο ($n=149$) από αυτό της αναθεωρημένης.

Παρόμοια αποτελέσματα διατυπώθηκαν και στην μετα-ανάλυση των Zhang et al. [61] με δείγμα 284 αθλητές από 8 τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες μελέτες (RCTs). Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της μυϊκής δύναμης των αθλητών παρουσίαζαν ασυνέπεια μεταξύ των μελετών, και η εκρηκτική δύναμη των μυών αξιολογήθηκε μέσω δοκιμών κάθετου άλματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συμπλήρωση βιταμίνης D δεν είχε καμία επίδραση στη συνολική μυϊκή δύναμη (SMD 0.05, 95% CI: -0.39 έως 0.48, $p = 0.84$). Στην υποομαδική ανάλυση, η συμπλήρωση βιταμίνης D είχε επίδραση στη μυϊκή δύναμη των κάτω άκρων (SMD 0.55, 95% CI: 0.12 έως 0.98, $p = 0.01$), αλλά όχι στη μυϊκή δύναμη των

άνω άκρων (SMD -0.19, 95% CI: -0.73 έως 0.36, $p = 0.50$) ή στην εκρηκτική δύναμη των μυών (SMD 0.05, 95% CI: -0.24 έως 0.34, $p = 0.73$).

Η συστηματική ανασκόπηση και μετα-ανάλυση των Tomlinson et al. [7] ωστόσο, βρήκε στατιστικά σημαντική επίδραση της συμπλήρωσης βιταμίνης D (4000 – 60.000 IU ανά εβδομάδα για διάστημα 4 εβδομάδων έως και 6 μηνών) στην δύναμη των κάτω άκρων, υπέρ της ομάδας παρέμβασης ($P = 0.04$, MD = 0.32, 95% CI 0.01–0.63). Για την αξιολόγηση της μυϊκής δύναμη των κάτω άκρων, δύο από τις μελέτες μέτρησαν τη μέγιστη δύναμη επανάληψης (1RM) στο leg press· η μία χρησιμοποιώντας μηχανήμα με καλώδιο στο γυμναστήριο (LP GM) και η άλλη ισοκινητικό δυναμόμετρο (LP ID). Τρεις μελέτες ανέφεραν την εκτέλεση καθισμάτων με ελεύθερα βάρη, leg press σε μηχανήμα γυμναστηρίου (LP GM) και δύναμη γαστροκνημίου-γαστροσόλου μέσω ισοκινητικού δυναμόμετρου (GSIK), ενώ δύο μελέτες μέτρησαν τη μυϊκή δύναμη μέσω ισομετρικής σύσπασης του τετρακέφαλου (IMQ). Τα αποτελέσματα αυτά αφορούσαν απολύτως υγιή άτομα, ασκούμενους και μη, ηλικίας 18-40 ετών. Συνεπώς απαιτούνται περαιτέρω έρευνες οι οποίες θα επικεντρώνονται αποκλειστικά σε αθλητές για την εξαγωγή πιο έγκυρων συμπερασμάτων.

Δεδομένης της πιθανότητας ότι η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D μπορεί να συμβάλει στην μυϊκή ανάπτυξη και ενδυνάμωση των κάτω άκρων, τα αποτελέσματα της μελέτης των Vikmoen et al. [62] και Ronnestad et al. [63] παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον. Στη πρώτη μελέτη, εξετάστηκε εάν η ένταξη προπόνησης με αντιστάσεις παράλληλα με τις τυπικές προπονήσεις αντοχής επηρεάζει την απόδοση στην ποδηλασία. 19 γυναίκες επαγγελματίες ποδηλάτες χωρίστηκαν τυχαία σε ομάδα με προπόνηση ενδυνάμωσης και αντοχής (S+E) και σε ομάδα μόνο με προπόνηση αντοχής (E). Ύστερα από 11 εβδομάδες παρατηρήθηκε ότι ο τετρακέφαλος μηριαίος είχε αυξηθεί κατά $7,4 \pm 5,3\%$ ($P = 0,0004$) στην ομάδα E+S, ενώ στην ομάδα E δεν σημειώθηκε κάποια σημαντική αλλαγή ($0,6 \pm 3,5\%$, $P = 0.98$). Η αύξηση της εγκάρσιας διατομής του τετρακέφαλου – δείκτης μυϊκής δύναμης - στο γκρουπ που συνδύασε προπόνηση δύναμης και αντοχής ήταν φανερά μεγαλύτερη από εκείνη στο γκρουπ που εκτελούσαν μόνο προπόνηση αντοχής ($P = 0,006$). Οι αθλήτριες πραγματοποίησαν το Wingate Test (ή Wingate Anaerobic Test), ένα εργομετρικό τεστ υψηλής έντασης σχεδιασμένο για τη μέτρηση αναερόβιας ισχύος και ικανότητας. Για το τεστ αυτό χρησιμοποιήθηκε εργόμετρο ποδηλάτου και οι αθλητές κλήθηκαν να κάνουν πεντάλ όσο το δυνατόν γρηγορότερα με μέγιστη ένταση για 30 δευτερόλεπτα. Η οικονομία ποδηλασίας κατά την προσπάθεια, προσδιορίστηκε από τη μέση τιμή $\dot{V}O_2$ στην ένταση των 150W. Η ομάδα E+S (αντοχή + ενδυνάμωση) παρουσίασε μείωση της $\dot{V}O_2$ στην ένταση των 150 W κατά $3.5 \pm 3.1\%$ ($P = 0.004$), ενώ δεν υπήρξε καμία αλλαγή στην ομάδα E (μόνο αντοχή) ($0.7 \pm 4.8\%$, $P = 0.85$). Η $\dot{V}O_2$ στα 150 W για την ομάδα E+S αντιστοιχούσε σε $71 \pm 5\%$ και $70 \pm 5\%$ του $\dot{V}O_{2\max}$ πριν και μετά αντίστοιχα, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για την ομάδα E ήταν $66 \pm 7\%$ και $68 \pm 8\%$. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές από την αρχική στη τελική μέτρηση, ούτε διαφορές μεταξύ των δύο ομάδων. Η μεταβολή της $\dot{V}O_{2\max}$ στα 150 W εμφάνισε αρνητική συσχέτιση με τη μεταβολή στην εγκάρσια διατομή (CSA) του τετρακέφαλου ($r = -0.54$, $P = 0.02$), γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση της CSA στους τετρακέφαλους σχετίζεται με βελτιωμένη αποδοτικότητα στην ποδηλασία [62].

Ανάλογη ήταν και η μελέτη των Ronnestad et al. [63], στην οποία διερευνήθηκε εάν η ένταξη προπόνησης ενδυνάμωσης σε ελίτ ποδηλάτες έχει επίδραση στην γενική απόδοση αλλά και στην απόδοση εκτέλεσης πεντάλ. Όπως και στην μελέτη των Vikmoen et al., οι ποδηλάτες κατανεμήθηκαν τυχαία είτε στην ομάδα που πρόσθεσε προπόνηση μέγιστης δύναμης στο υφιστάμενο πρόγραμμα αντοχής (ES, $n = 9$, ηλικία: $19,1 \pm 1,7$ έτη, σωματικό βάρος: $66,0 \pm 8,0$ kg, ύψος: 178 ± 7 cm, $\dot{V}O_{2\max}$: 78 ± 6 mL·kg⁻¹·min⁻¹) είτε στην ομάδα που εκτελούσε μόνο προπόνηση αντοχής (E, $n = 7$, ηλικία: $20,1 \pm 1,6$ έτη, σωματικό βάρος: $74,3 \pm 7,5$ kg, ύψος: 183 ± 9 cm, $\dot{V}O_{2\max}$: 73 ± 5 mL·kg⁻¹·min⁻¹). Η ομάδα ES (αντοχή + δύναμη) παρουσίασε αύξηση της μέγιστης δύναμης στην εκτέλεση ισομετρικού ημικαθίσματος κατά

20 ± 12% κατά τη διάρκεια 10 εβδομάδων προπόνησης δύναμης ($P < 0.01$). Η αυξημένη δύναμη διατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της επόμενης περιόδου διατήρησης της δύναμης για 15 εβδομάδες. Η μέγιστη δύναμη στην ομάδα E (μόνο αντοχή) δεν άλλαξε από την αρχική στην τελική μέτρηση. Η αλλαγή στη μέγιστη δύναμη κατά την περίοδο ανάπτυξης δύναμης και συνολικά κατά τη διάρκεια των 25 εβδομάδων ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στην ES από ό,τι στην E ($P < 0.01$). Η ανάλυση του μεγέθους επίδρασης (effect size) αποκάλυψε πολύ μεγάλη πρακτική επίδραση της ES σε σύγκριση με την E (effect size = 2.12). Η άλιπη μυϊκή μάζα κάτω άκρων αυξήθηκε από την αρχική έως την τελική μέτρηση κατά $2 \pm 1\%$ στην ES (από $19,782 \pm 2,944$ g σε $20,131 \pm 3,066$ g, $P < 0.05$), ενώ δεν υπήρξε αλλαγή στην E ($21,599 \pm 3,008$ g $\rightarrow$ $21,728 \pm 2,822$ g, $P > 0.05$). Δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στην αλλαγή της άλιπης μάζας κάτω άκρων μεταξύ των ομάδων. Ωστόσο, η ανάλυση effect size έδειξε μικρή πρακτική επίδραση της ES σε σύγκριση με την E (effect size = 0.43). Η μέγιστη ισχύς στο τεστ των 30 δευτερολέπτων Wingate παρουσίασε τάση προς αύξηση κατά $2 \pm 3\%$ στην ES από την αρχή ως το τέλος ($P = 0.07$), ενώ δεν υπήρξε αλλαγή στην E. Η ανάλυση effect size έδειξε μέτρια επίδραση της ES στην μέγιστη ισχύ σε σύγκριση με την E (effect size = 0.76). Καμία από τις δύο ομάδες δεν παρουσίασε σημαντικές αλλαγές στη μέση ισχύ στο τεστ Wingate των 30 δευτερολέπτων. Η σχετική μεταβολή της W_{max} ήταν μεγαλύτερη στην ES από ό,τι στην E ($P < 0.05$) και η ανάλυση του μεγέθους επίδρασης (effect size) για τη σχετική βελτίωση στη W_{max} έδειξε μέτρια επίδραση της προπόνησης ES σε σχέση με την E (effect size = 0.89). Λόγω του υψηλού αγωνιστικού επιπέδου των ποδηλατών της παρούσας μελέτης, δεν αναμενόταν αλλαγή στη $VO_2 \max$ κατά την περίοδο παρέμβασης. Παρά την έλλειψη μεταβολής στη $VO_2 \max$, η ομάδα ES παρουσίασε αύξηση στη μέγιστη ισχύ (W_{max}), ενώ δεν υπήρξαν αλλαγές στην ομάδα E. Η ανάλυση του effect size έδειξε μέτρια πρακτική επίδραση της προπόνησης ES στην ανάπτυξη του W_{max} . Αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον, καθώς η W_{max} θεωρείται σημαντικός δείκτης για τη διάκριση της απόδοσης αντοχής σε αθλητές υψηλού επιπέδου [63].

Σε μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη δοκιμή, οι Sunde et al. [64] παρατήρησαν πως η ένταξη προπόνησης μέγιστης δύναμης για διάστημα 8 εβδομάδων, μπορεί να επιφέρει βελτιώσεις στο ημικάθισμα μιας μέγιστης επανάληψης, στον ρυθμό ανάπτυξης δύναμης στο ημικάθισμα, στην οικονομία ποδηλασίας, στον χρόνο έως την εξάντληση σε μέγιστη αερόβια ισχύ και στην αποδοτικότητα. Η ομάδα παρέμβασης (7 άνδρες και 1 γυναίκα) εκτέλεσε ασκήσεις ημικάθισμάτων (half-squats), 4 σετ των 4 επαναλήψεων στο μέγιστο φορτίο (4RM), τρεις φορές την εβδομάδα για 8 εβδομάδες, ως συμπλήρωμα στην κανονική προπόνηση αντοχής τους. Η ομάδα ελέγχου συνέχισε μόνο την κανονική προπόνηση αντοχής κατά την ίδια χρονική περίοδο. Η παρέμβαση οδήγησε σε σημαντικές βελτιώσεις ($p < 0.05$) στους εξής δείκτες:

- 1RM (μέγιστη δύναμη επανάληψης): +14.2%
- RFD (ρυθμός ανάπτυξης δύναμης): +16.7%
- Οικονομία ενέργειας κατά την ποδηλασία (CE): +4.8%
- Απόδοση (work efficiency): +4.7%
- Χρόνος μέχρι εξάντλησης στην προ-παρέμβασης μέγιστη αερόβια ισχύ: +17.2%

Η οικονομία ενέργειας ποδηλασίας (Cycling Economy) είναι ένας δείκτης απόδοσης που μετρά πόσο οξυγόνο καταναλώθηκε (VO_2 , σε $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) για την παραγωγή μιας δεδομένης τιμής μηχανικής ισχύος (μετρούμενη σε watt). Ένας ποδηλάτης με καλύτερη οικονομία ενέργειας μπορεί να παράγει περισσότερη ισχύ με λιγότερη προσπάθεια, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα σε αγώνες μεγαλύτερης διάρκειας, επειδή χρησιμοποιεί την ενέργειά του πιο αποδοτικά. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν βελτίωση στην οικονομία ενέργειας ποδηλασίας χωρίς καμία μείωση στις μέγιστες καταναλώσεις οξυγόνου. Αυτό σημαίνει ότι η προπόνηση μέγιστης δύναμης βελτιώνει την

απόδοση στην ποδηλασία αυξάνοντας τον χρόνο που απαιτείται μέχρι την εξάντληση κατά την παραγωγή μέγιστης αερόβιας ισχύος. Μια βελτίωση 5% της οικονομίας ενέργειας ποδηλασίας θα πρέπει στην πραγματικότητα να αντιπροσωπεύει μια βελτίωση 5% στη χρονική απόδοση σε μια δεδομένη απόσταση.

Στην συστηματική ανασκόπηση με μετα-ανάλυση των Sist et al. [8] συμπεριλήφθηκαν 11 τυχαιοποιημένες μελέτες οι οποίες διερεύνησαν την επίδραση της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D3 στη μέγιστη δύναμη των αθλητών. Στην ανάλυση της επίδρασης της συμπλήρωσης βιταμίνης D στη μέγιστη δύναμη του κάτω μέρους του σώματος έκαναν αναφορά τέσσερις μελέτες, χωρίς να εντοπιστεί ετερογένεια μεταξύ τους ($I^2 = 0\%$, $p = 0.91$). Δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές της δοκιμής 1RM (μέγιστη επανάληψη) για το κάτω μέρος του σώματος μεταξύ των ομάδων παρέμβασης και εικονικού φαρμάκου στην αρχική μέτρηση [SMD -0.09 , (95% CI: -0.44 , 0.26), $p = 0.62$], τόσο συνολικά όσο και όταν έγινε κατάταξη βάσει των αρχικών επιπέδων 25(OH)D ορού. Όταν συγκρίθηκε η μεταβολή από τις αρχικές τιμές στις τιμές της δοκιμής 1RM κάτω σώματος μεταξύ των ομάδων βιταμίνης D και εικονικού φαρμάκου, η διαφορά δεν ήταν στατιστικά σημαντική [SMD 0.26 , 95% CI: $(-0.13, 0.65)$, $p = 0.19$] για την υποομάδα με επίπεδα <75 nmol/L, ούτε και για την υποομάδα με επίπεδα ≥ 75 nmol/L [SMD 0.14 , 95% CI: $(-0.76, 1.04)$, $p = 0.76$], αλλά ούτε και συνολικά ($p = 0.18$). Ανάμεσα στις μελέτες που συμπεριλήφθηκαν, ο Alimoradi [13] ανέφερε μέση αύξηση 25 ± 30 κιλά στη δοκιμή 1RM leg press (πιέσεις ποδιών) για την ομάδα παρέμβασης και 16 ± 30 κιλά για την ομάδα εικονικού φαρμάκου – πρόκειται για τη μοναδική μελέτη που έδειξε στατιστικά σημαντική αύξηση και στις δύο ομάδες. Ο Close et al. ανέφερε μέση αύξηση 10 ± 26 κιλά στη δοκιμή 1RM squat (κάθισμα) για την ομάδα βιταμίνης D και 2 ± 19 κιλά για την ομάδα placebo. Σε άλλη μελέτη του Close et al., μετά από περίοδο 12 εβδομάδων συμπλήρωσης με 20.000 IU/εβδομάδα ή 40.000 IU/εβδομάδα βιταμίνης D3, αναφέρθηκε μέση αύξηση 3 ± 27 κιλά στη δοκιμή 1RM leg press για την ομάδα των 20.000 IU/εβδομάδα και μέση μείωση 6 ± 65 κιλά για την ομάδα των 40.000 IU/εβδομάδα. Η ομάδα εικονικού φαρμάκου έδειξε μέση μείωση 6 ± 42 κιλά στη δοκιμή 1RM leg press [8,65].

Σύσταση Σώματος

Σε μια προοπτική μελέτη κοορτής, οι Kawashima et al. θέλησαν να αξιολογήσουν την επίδραση συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D στα επίπεδα βιταμίνης D στον ορό ελίτ φοιτητών αθλητών, καθώς επίσης και την επίδρασή της στο ποσοστό σωματικού λίπους. Συμμετείχαν συνολικά 42 ελίτ άνδρες φοιτητές αθλητές, οι οποίοι χωρίστηκαν σε ομάδα ελέγχου ($n=15$) και ομάδα παρέμβασης ($n=27$, συμπλήρωμα 25μg βιταμίνης D3 / ημέρα). Στην ομάδα παρέμβασης χορηγήθηκαν δισκία συμπληρώματος βιταμίνης D3 υπό τη μορφή χοληκαλσιφερόλης (25 μg/ημέρα) και το παρασκεύασμα Vitamin D Super 1000 IU της εταιρείας Otsuka Pharmaceutical Co. (Τόκιο, Ιαπωνία), για διάστημα 3 μηνών. Παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα επίπεδα της 25(OH)D στον ορό μεταξύ της προ και μετά τη συμπληρωματική χορήγηση φάσης στην ομάδα που έλαβε το συμπλήρωμα ($18,5 \pm 4,9$ και $25,8 \pm 5,6$ αντίστοιχα, $P < 0,001$). Ωστόσο, δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στον δείκτη μάζας σώματος (BMI) και στο ποσοστό σωματικού λίπους πριν και μετά τη χορήγηση του συμπληρώματος [66].

4. Συζήτηση

4.1 Σύνοψη των κυριότερων ευρημάτων

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν να εξεταστούν οι επιπτώσεις της χορήγησης συμπληρώματος βιταμίνης D στην απόδοση των αθλητών ποδηλασίας. Σύμφωνα λοιπόν με τη βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε, φάνηκε πως υπάρχει μια θετική συσχέτιση μεταξύ της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D και της αύξησης της ολικής συγκέντρωσης της βιταμίνης στον ορό, καθώς επίσης και της αποκατάστασης επαρκών επιπέδων βιταμίνης D σε περιπτώσεις αθλητών με σοβαρή έλλειψη ή ανεπάρκεια. Παρατηρήθηκε επίσης πως η λήψη βιταμίνης D μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (VO_{2max}) και στην καθυστέρηση εμφάνισης της κόπωσης, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την αερόβια ικανότητα και απόδοση των αθλητών. Δεν παρατηρήθηκε κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση με αλλαγές στη σύσταση σώματος ή το σωματικό βάρος/λίπος, ή με τη βελτίωση της οστικής πυκνότητας (BMD) σε καλά προπονημένους αθλητές ποδηλασίας. Η βιβλιογραφία υπέδειξε επίσης ότι η βιταμίνη D μπορεί να έχει αντιφλεγμονώδη δράση, καθώς η συμπληρωματική λήψη βιταμίνης D φάνηκε ότι μειώνει τη φλεγμονή που προκαλείται εξαιτίας της άσκησης (exercise-induced inflammation). Τέλος, η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D, έχει συνδεθεί με τη μυϊκή ανάπτυξη των αθλητών τόσο στο άνω όσο και στο κάτω μέρος (κυρίως των τετρακέφαλων), εξαιτίας του εντοπισμού υποδοχέων βιταμίνης D στα μυϊκά κύτταρα. Επίσης, η βιβλιογραφία υπέδειξε πως η ένταξη προπόνησης δύναμης σε επαγγελματίες ποδηλάτες, μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος όταν αυτοί κάνουν πεντάλ, στη βελτίωση της VO_{2max} , καθώς και στην αύξηση τη όγκου του τετρακέφαλου. Συνεπώς, ο συνδυασμός λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D και προπόνησης δύναμης, φαίνεται πως είναι ικανός να οδηγήσει στην μεγιστοποίηση της απόδοσης των αθλητών ποδηλασίας.

4.2 Δυνατά Σημεία και Πιθανή Μεροληψία στη Διαδικασία Ανασκόπησης

Η παρούσα πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει ορισμένα πλεονεκτήματα. Κατά την διαδικασία αναζήτησης, χρησιμοποιήσαμε τους κατάλληλους αλγόριθμους με τυποποιημένους όρους και λέξεις κλειδιά, γεγονός που μας βοήθησε στο να ανασύρουμε δημοσιεύσεις οι οποίες απαντούν στοχευμένα στην ερευνητική μας ερώτηση. Η διαδικασία αναζήτησης και επιλογής των δημοσιεύσεων που ανασύραμε από τις επιστημονικές βάσεις δεδομένων, ήταν ιδιαίτερα ισχυρή, καθώς περιορίσαμε την αναζήτησή μας μόνο σε μελέτες που αφορούσαν τον αθλητικό πληθυσμό, είτε πρόκειται αποκλειστικά για ποδηλάτες, είτε για αθλητές άλλων αθλημάτων που όμως αξιοποιούν το ίδιο ενεργειακό σύστημα με την ποδηλασία. Με εξαίρεση μια δημοσίευση η οποία ανασύρθηκε στην πορεία, δεν λάβαμε υπόψη μας δημοσιεύσεις οι οποίες αφορούσαν τον γενικό πληθυσμό, καθώς αυτό θα μπορούσε να προσδώσει μεγαλύτερη ετερογένεια στα αποτελέσματα. Επίσης, δεν αποκλείστηκαν μελέτες με βάση τη γλώσσα ή το έτος δημοσίευσής τους.

Ωστόσο, η εργασία μας παρουσιάζει επίσης ορισμένους περιορισμούς. Το μέγεθος του δείγματος που αφορούσε αποκλειστικά και μόνο επαγγελματίες ποδηλάτες και όχι αθλητές άλλων αγωνισμάτων, ήταν σχετικά μικρό για να απαντήσει επαρκώς στο ερευνητικό μας ερώτημα, εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού ανάλογων δημοσιεύσεων. Παρ' ότι λοιπόν το δείγμα μας αφορούσε αποκλειστικά και μόνο τον αθλητικό και όχι τον γενικό πληθυσμό, υπήρξε μεγάλη ετερογένεια σχετικά με τον τύπο του αθλήματος, στον τρόπο αξιολόγησης της επίδρασης της συμπληρωματικής λήψης βιταμίνης D στην αθλητική απόδοση και στα επίπεδα βιταμίνης D ορού κάθε αθλητή. Η εργασία μας ανέδειξε κενά στη διαθέσιμη γνώση γύρω από την επίδραση της λήψης συμπληρωμάτων βιταμίνης D στην απόδοση των αθλητών

ποδηλασίας και μπορεί να ευαισθητοποιήσει την επιστημονική κοινότητα να προχωρήσει σε περαιτέρω έρευνα επί του θέματος.

4.3 Συστάσεις Συμπληρωματικής Λήψης Βιταμίνης D για Βελτιστοποίηση της Αθλητικής Απόδοσης

Η ανεπάρκεια βιταμίνης D θα πρέπει να αντιμετωπίζεται από τους αθλητές διορθώνοντας τον τρόπο ζωής τους, έτσι ώστε να μπορέσουν να εξασφαλίσουν επαρκή επίπεδα βιταμίνης D, που θα τους επιτρέψουν να διατηρήσουν ή να αποκαταστήσουν τη μυοσκελετική τους υγεία και την καλή φυσική τους απόδοση. Επομένως, οι αθλητικοί διατροφολόγοι και οι αθλητίατροι οφείλουν να αξιολογούν τακτικά τα επίπεδα βιταμίνης D στον ορό των αθλητών με συνιστώμενα επίπεδα 25(OH)D άνω των 32 ng/mL και κατά προτίμηση άνω των 40 ng/mL [1-8,94]. Για να διατηρηθούν τα επίπεδα 25(OH)D στα 40 ng/mL, απαιτείται η λήψη συμπληρωμάτων βιταμίνης D, ειδικά κατά τους χειμερινούς μήνες. Ο στόχος 25(OH)D των 40 ng/mL συνιστάται για τους αθλητές επειδή, σε αυτό το επίπεδο, η βιταμίνη D αρχίζει να αποθηκεύεται στους μύες και το λίπος για μελλοντική χρήση. Επιπλέον, σε επίπεδα κάτω των 32 ng/mL, η βιταμίνη D δεν είναι πιθανό να είναι άμεσα διαθέσιμη για τις προηγμένες διαδικασίες που εμπλέκονται στα αυτοκρινή μονοπάτια, καθώς η αυτοκρινής οδός φαίνεται να είναι το πιο πιθανό μονοπάτι, μέσω του οποίου μπορεί να παρουσιαστεί βελτίωση της αθλητικής απόδοσης [2,12]. Για την επίτευξη των 40 ng/mL, χρειάζονται κατά μέσο όρο 5.000 IU βιταμίνης D / ημέρα για 8 εβδομάδες και έπειτα 1.000 – 2.000 IU ημερησίως για συντήρηση [2,7], όμως η προσπάθεια που απαιτείται για την αποκατάσταση φυσιολογικών επιπέδων βιταμίνης D ενδέχεται να διαφέρει από αθλητή σε αθλητή, ανάλογα με τα τρέχοντα επίπεδα 25(OH)D ορού που διαθέτουν [1-8]. Εναλλακτικά, ένας αθλητής με επίπεδα βιταμίνης D <30ng/ml, χρειάζεται 50.000 IU βιταμίνης D3 την εβδομάδα για διάστημα 8 εβδομάδων. Σταθερά επίπεδα βιταμίνης D επιτυγχάνονται μετά από περίπου 90 ημέρες από τη λήψη συμπληρώματος. Μόλις ολοκληρωθεί η συμπλήρωση δηλαδή, πραγματοποιείται έλεγχος των επιπέδων έπειτα από 3 μήνες. Εάν τα επίπεδα της βιταμίνης παραμένουν < 30ng/ml, τότε το πρωτόκολλο επαναλαμβάνεται για άλλες 8 εβδομάδες και ύστερα πραγματοποιείται επανέλεγχος. Μόλις η επάρκεια τεκμηριωθεί, θα πρέπει να συνεχιστεί συμπλήρωση σύμφωνα με την Εθνική Ακαδημία Επιστημών, της τάξης των 4.000 – 5.000 IU βιταμίνης D3 ημερησίως [7].

Γενικά, συνίσταται η ασφαλής έκθεση στον ήλιο για περίπου 30 λεπτά την ημέρα ή η κατανάλωση τροφίμων πλούσιων σε βιταμίνη D. Ωστόσο, η έκθεση στον ήλιο και η διαιτητική πρόσληψη μπορεί να μην είναι επαρκείς για την εξασφάλιση των αναγκών σε βιταμίνη D, συνεπώς σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η λήψη συμπληρώματος. Προτείνεται η λήψη 2.000 – 6.000 IU βιταμίνης D καθημερινά για τους αθλητές, ενώ πρόσφατες μελέτες έχουν υποδείξει ότι τα υψηλά επίπεδα σωματικής δραστηριότητας των αθλητών ενδέχεται να οδηγήσουν σε αυξημένες φυσιολογικές απαιτήσεις της βιταμίνης. Δεδομένου ότι η βιταμίνη D χρησιμοποιείται ενεργά σε πολλές μεταβολικές οδούς, είναι πιθανό οι αθλητές να χρειαστούν συμπληρωματική χορήγηση βιταμίνης D >10.000 IU ημερησίως, για να εξασφαλίσουν επαρκή διαθεσιμότητα της βιταμίνης και βέλτιστη απόδοση [1,2,6,7,10,110]. Μελέτες κατά τις οποίες ακολουθήθηκε παρατεταμένη από του στόματος χορήγηση βιταμίνης D, έχουν ορίσει ως το ανώτατο ανεκτό όριο ημερήσιας πρόσληψης χωρίς τοξικές επιδράσεις τις 10.000 IU. Ακόμα και με ένα πρωτόκολλο συμπλήρωσης διάρκειας 5 μηνών με 10.000 IU την ημέρα, δεν αναφέρθηκαν ανεπιθύμητες επιπτώσεις, εφόσον τα επίπεδα της βιταμίνης D στον ορό παρέμειναν κάτω από τα 200ng/mL. Η καθημερινή λήψη 10.000 IU δεν συνίσταται, καθώς οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της βιταμίνης στον ορό πάνω από τα 70ng/mL – πολύ πάνω δηλαδή από τα 50ng/mL που θεωρούνται επαρκή για βέλτιστη υγεία και απόδοση στον αθλητισμό [7]. Παρ' όλα αυτά, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την αξιολόγηση του

κινδύνου τοξικότητας εξαιτίας της υπερβολικής χορήγησης βιταμίνης D. Επίσης, έχει φανεί ότι η λήψη 2.000 – 5.000 IU βιταμίνης D ημερησίως κρίνεται απαραίτητη για την διατήρηση επαρκών επιπέδων βιταμίνης D ορού σε επαγγελματίες ποδηλάτες στα 75-80nmol/L, καθώς και για την διατήρηση και τη βελτιστοποίηση της υγείας των οστών, ιδιαίτερα σε περιόδους έντονης προπόνησης και κατά τους χειμερινούς μήνες [6,9,11]. Μεταξύ των διαφορετικών τύπων συμπληρωμάτων, συστήνεται η βιταμίνη D3. Και οι δύο μορφές βιταμίνης D2 και D3 μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα 25(OH)D στον ορό, αλλά η βιταμίνη D3 είναι πιο αποτελεσματική από τη βιταμίνη D2. Η βιταμίνη D2 έχει χαμηλότερη σταθερότητα με την αύξηση της ηλικίας, χαμηλότερη βιοδιαθεσιμότητα και μικρότερη απορρόφηση από τη βιταμίνη D3. Επιπλέον, η βιταμίνη D2 φαίνεται πως έχει χαμηλότερη συγγένεια με τους υποδοχείς βιταμίνης D (VDRs) και απενεργοποιείται μόλις υδροξυλιωθεί στο νεφρό [1-8, 6,9,10]. Οι Chiang et al. μάλιστα, απέδειξαν ότι η συμπλήρωση με βιταμίνη D2 δεν είχε επίδραση στη μυϊκή δύναμη, ενώ η βιταμίνη D3 βελτίωσε τη μυϊκή δύναμη [1-8].

Δεδομένου ότι η βιταμίνη D3 αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική, η βέλτιστη δόση εξαρτάται πρωτίστως από τις ανάγκες του αθλητή (διάρκεια, ένταση και τύπος προπόνησης, σύσταση σώματος). Πιθανόν αυτό εξηγεί γιατί μέχρι σήμερα οι οδηγίες που έχουν δημοσιευθεί είναι ετερογενείς και εν μέρει αντιφατικές, καθώς διάφορα ινστιτούτα και δημόσιες αρχές έχουν προτείνει διαφορετικές ημερήσιες δόσεις συμπληρωμάτων βιταμίνης D [4,6,10].

Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν συγκεκριμένες οδηγίες αναφορικά με τη δοσολογία συμπληρωματικής χορήγησης βιταμίνης D σε επαγγελματίες αθλητές. Ωστόσο, η Διεθνής Ολυμπιακή Επιτροπή (ΔΟΕ) και οι ερευνητές στον τομέα της βιταμίνης D και του αθλητισμού, συμφωνούν ότι η τακτική παρακολούθηση της κατάστασης της βιταμίνης D είναι επιτακτική για την υγεία των αθλητών. Επιπλέον, η ΔΟΕ προτείνει ότι η βιταμίνη D θα πρέπει να συμπληρώνεται σύμφωνα με τις γενικές κατευθυντήριες γραμμές πληθυσμού των ΗΠΑ, (15–20 μg/ημέρα) ανάλογα με τον τύπο δέρματος του αθλητή και το επίπεδο έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία [3].

Αναφορικά με τους επαγγελματίες αθλητές, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο συμπλήρωσης βιταμίνης D, καθώς δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ότι οι απαιτήσεις τους είναι διαφορετικές από αυτές του γενικού πληθυσμού (600 IU για παιδιά και ενήλικες κάτω των 70 ετών και 800 IU για άτομα άνω των 70 ετών). Ανάλογες είναι και οι συστάσεις του Ινστιτούτου Ιατρικής (ΙΟΜ), που συνιστά 400-800 IU βιταμίνης D την ημέρα για παιδιά, ενήλικες και ηλικιωμένους άνω των 70 ετών, για τη διατήρηση της συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού πάνω από τα 50nmol/L. Από την άλλη, η Ενδοκρινολογική Εταιρεία εκτιμά πως το εύρος των 600-800 IU είναι ανεπαρκές για τη διασφάλιση επαρκών επιπέδων βιταμίνης D, γι' αυτό και έχει αυξήσει τη συνιστώμενη πρόσληψη σε 1.500 – 2.200 IU ημερησίως και 2.000 – 4.000/5.000 IU κατά τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα, με στόχο την επίτευξη συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού >75nmol/L [3,4,6,7,9,10,109,111]. Οι συστάσεις αυτές στηρίχθηκαν σε μια ανασκόπηση του 2004, σύμφωνα με την οποία η τιμή συγκέντρωσης βιταμίνης D ορού των 70nmol/L είναι η χαμηλότερη αποδεκτή συγκέντρωση της βιταμίνης για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία [6.9]. Σε μια τυχαιοποιημένη ελεγχόμενη κλινική δοκιμή, 70 αθλητές χωρίστηκαν τυχαία σε δύο ομάδες, ομάδα παρέμβασης με συμπλήρωμα VITD και ομάδα ελέγχου. Διαπιστώθηκε ότι η εβδομαδιαία πρόσληψη 50.000 IU VITD βελτίωσε μόνο ορισμένα τεστ απόδοσης αθλητών και προέκυψε το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη δόση για τους αθλητές χρειάζεται περαιτέρω μελέτη [4]. Έτσι λοιπόν, διάφοροι αθλητές και αθλητικές ομάδες εφαρμόζουν τις δικές τους οδηγίες συμπληρωμάτων ή ακολουθούν τις διατροφικές συστάσεις για τον γενικό πληθυσμό, σύμφωνα με τις τρέχουσες κυβερνητικές συστάσεις.

Η τυχαιοποιημένη κλινική παρέμβαση των Tuma et al. [94], είχε ως σκοπό να καθορίσει εάν ένας ατομικός τύπος φόρτωσης για τη συμπλήρωση βιταμίνης D είναι πιο αποτελεσματικός από τη σταθερή δόση και επαρκής ώστε να βοηθήσει τους αθλητές να

φτάσουν την επιθυμητή τιμή βιταμίνης D ορού των 40 ng/mL. Έτσι λοιπόν, σε 90 αθλητές με ανεπαρκή επίπεδα βιταμίνης ($25(\text{OH})\text{D} < 30 \text{ ng/mL}$) χορηγήθηκε τυχαία είτε μια καθολική δόση 2.000 IU/ημέρα είτε μια αρχική δόση φόρτωσης 4.000 IU/ ημέρα, ακολουθούμενη από δόση συντήρησης 1.000 IU/ημέρα. Στην αρχική αξιολόγηση, 67 αθλητές (74%) παρουσίαζαν ανεπαρκή κατάσταση βιταμίνης D (επίπεδα $25(\text{OH})\text{D} < 30 \text{ ng/mL}$), ενώ 23 (26%) είχαν επαρκή επίπεδα βιταμίνης D ($\geq 30 \text{ ng/mL}$). Ύστερα από 10 εβδομάδες, η μέση τιμή της $25(\text{OH})\text{D}$ αυξήθηκε σημαντικά κατά 20,4 ng/mL στην ομάδα INDV ($p < 0.001$, $\eta^2 = 0.73$) και κατά 21,1 ng/mL στην ομάδα STAD ($p < 0.001$, $\eta^2 = 0.78$). Στην ομάδα STAD, η συγκέντρωση $25(\text{OH})\text{D}$ αυξήθηκε σταδιακά από τη βασική μέτρηση μέχρι την τελική: μετά από 5 εβδομάδες, η συγκέντρωση αυξήθηκε σημαντικά από τα αρχικά επίπεδα (+15,5 ng/mL, $p < 0.001$). Κατά τη δεύτερη περίοδο των 5 εβδομάδων, η συγκέντρωση αυξήθηκε περαιτέρω από $32,5 \pm 6,4$ σε $38,1 \pm 6,8 \text{ ng/mL}$ ($p < 0.01$) [94].

Τέλος, μελέτες που έχουν δείξει βελτίωση στην αθλητική απόδοση χρησιμοποιούν δόσεις άνω των 3000 IU/ημέρα, χωρίς όμως να επιτυγχάνουν επίπεδα $>100 \text{ nmol/L}$ [9]. Η μελέτη των Owens et al. [95] έδειξε ότι ελίτ αθλητές στους οποίους χορηγήθηκαν υψηλές δόσεις βιταμίνης D (35.000 ή 70.000 IU/εβδομάδα για 12 εβδομάδες) παρουσίασαν αύξηση των επιπέδων 25-υδροξυβιταμίνης D στον ορό, αλλά και μείωση της παραθορμόνης (PTH), υποδεικνύοντας αντισταθμιστικές προσαρμογές του οργανισμού [110]. Και οι δύο ομάδες παρουσίασαν σημαντική αύξηση στις συγκεντρώσεις της $25(\text{OH})\text{D}$ στις 6 εβδομάδες (μέτρια = $108 \pm 22 \text{ nmol/L}$, υψηλή = $122 \pm 25 \text{ nmol/L}$) και στις 12 εβδομάδες (μέτρια = $163 \pm 47 \text{ nmol/L}$, υψηλή = $188 \pm 66 \text{ nmol/L}$). Ωστόσο, μετά τη διακοπή της συμπλήρωσης, η ομάδα μέτριας δόσης επέστρεψε σε επίπεδα συγκεντρώσεων συγκρίσιμα με τα βασικά μέχρι την 18η εβδομάδα ($P = 0,178$), ενώ η ομάδα υψηλής δόσης όχι ($P = 0,007$). Στην ομάδα μέτριας δόσης, η μέγιστη συγκέντρωση του βιοδραστικού μεταβολίτη $1\alpha,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ παρατηρήθηκε στην 6η εβδομάδα ($141 \pm 58 \text{ pmol/L}$), ενώ στην ομάδα υψηλής δόσης υπήρξε καθυστερημένη απόκριση, με μέγιστο στην 12η εβδομάδα ($112 \pm 66 \text{ pmol/L}$). Μετά τη διακοπή της συμπλήρωσης, η συγκέντρωση του $1\alpha,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ μειώθηκε σημαντικά και στις δύο ομάδες στην 18η εβδομάδα (μέτρια = $107 \pm 32 \text{ pmol/L}$, υψηλή = $104 \pm 42 \text{ pmol/L}$, $P = 0,042$), και ήταν συγκρίσιμη με τα βασικά επίπεδα σε εκείνο το χρονικό σημείο ($P = 0,332$). Η συγκέντρωση της παραθυρεοειδούς ορμόνης (PTH) καταστάλθηκε σημαντικά και στις δύο ομάδες μέχρι την 6η εβδομάδα (μέτρια = $2,3 \pm 0,8 \text{ pmol/L}$ και υψηλή = $1,9 \pm 0,4 \text{ pmol/L}$ έναντι των αρχικών τιμών μέτριας = $3,2 \pm 2,3 \text{ pmol/L}$ και υψηλής = $2,8 \pm 1 \text{ pmol/L}$) και παρέμεινε κατασταλμένη καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και μετά τη διακοπή της συμπλήρωσης (μέτρια = $2,1 \pm 0,8 \text{ pmol/L}$ και υψηλή = $2 \pm 0,6 \text{ pmol/L}$) [95].

Παρ' ότι έχει προταθεί ότι συγκεντρώσεις βιταμίνης D ορού $> 100 \text{ nmol/L}$ είναι οι βέλτιστες για τη λειτουργικότητα των σκελετικών μυών και των κάτω άκρων, επί του παρόντος, δεν υπάρχουν τεκμηριωμένες εργογονικές επιδράσεις της αυξημένης πρόσληψης βιταμίνης D στη λειτουργία των σκελετικών μυών και την μείωση του κινδύνου καταγμάτων λόγω στρες ή κόπωσης, όταν ο αθλητής είναι ήδη επαρκής σε $25(\text{OH})\text{D}$ ορού (>75 , >100 , ακόμη και $>50 \text{ nmol/L}$). Επομένως, οι επαγγελματίες υγείας θα πρέπει να επικεντρωθούν στη διόρθωση της ανεπάρκειας $25(\text{OH})\text{D}$ ($<25 \text{ nmol/L}$), καθώς αυτό συνδέεται στενά με κατάγματα λόγω στρες, αυξημένη συχνότητα ασθενειών, μειωμένη BMD, ακόμη και μειωμένη μυϊκή δύναμη [3,6,7,9].

Η χορήγηση συμπληρωμάτων όταν τα επίπεδα δεν είναι εξαντλημένα μπορεί να έχει περιορισμένη αξία και να αυξήσει τον κίνδυνο τοξικότητας. Για να καθοριστεί ο κατάλληλος χρόνος και η δόση, η κατάσταση ανεπάρκειας βιταμίνης D πρέπει να αξιολογείται μετά από προπονήσεις διαφόρων εντάσεων, για τον εντοπισμό του «παραθύρου ανεπάρκειας» μετά την άσκηση. Αν και η έντονη άσκηση μπορεί να οδηγήσει σε παροδική ανεπάρκεια βιταμίνης D, παραμένει σημαντική για τη διατήρηση των επιπέδων στον ορό. Οι μεταβολίτες της βιταμίνης D αποθηκεύονται κυρίως στο λίπος και η μακροχρόνια συμπλήρωση οδηγεί σε σημαντική

συσσώρευση στον λιπώδη ιστό. Η άσκηση κινητοποιεί τα λιπίδια από τον λιπώδη ιστό, απελευθερώνοντας έτσι βιταμίνη D που είναι «παγιδευμένη» στα λιποκύτταρα. Αυτό εξηγεί γιατί τα υψηλότερα επίπεδα φυσικής δραστηριότητας σχετίζονται με υψηλότερα επίπεδα βιταμίνης D στον ορό [10].

Η δραστηριότητα της βιταμίνης D, εξαρτάται και από την επαρκή παρουσία άλλων θρεπτικών συστατικών, όπως το μαγνήσιο και το ασβέστιο. Νέα ερευνητικά δεδομένα μάλιστα, υποδεικνύουν πως το μαγνήσιο μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της δραστηριότητας της βιταμίνης D. Η επαρκής πρόσληψη μαγνησίου και ασβεστίου παίζει σημαντικό ρόλο στην ανοργανοποίηση των οστών, καθώς επηρεάζουν τη σύνθεση της ενεργούς μορφής της βιταμίνης D. Δεδομένου του ότι οι επαγγελματίες ποδηλάτες δρόμου διατρέχουν υψηλό κίνδυνο χαμηλής οστικής πυκνότητας, η οποία εκφράζεται κατά κύριο λόγο με την εμφάνιση καταγμάτων, θα πρέπει να στοχεύουν τουλάχιστον την ημερήσια πρόσληψη ασβεστίου (700-1000mg). Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε συστήνεται η συμπληρωματική χορήγηση 400-600mg ασβεστίου, παράλληλα με συμπληρωματική χορήγηση 400 IU βιταμίνης D ημερησίως [5].

5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Ολοκληρώνοντας λοιπόν την εργασία μας, συμπεραίνουμε πως υπάρχει ανάγκη για μελλοντική πιο στοχευμένη διερεύνηση σχετικά με το αν η λήψη συμπληρώματος βιταμίνης D έχει ευεργετική επίδραση στην αθλητική απόδοση και ειδικότερα στην απόδοση αθλητών ποδηλασίας, καθώς υπάρχουν αρκετά ερωτήματα που παραμένουν αναπάντητα. Πρέπει επίσης να διευκρινιστεί εάν η βελτιστοποίηση της αθλητικής απόδοσης με τη χρήση συμπληρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αύξησης των επιπέδων βιταμίνης D ορού σε επίπεδα υψηλότερα των φυσιολογικών, είτε απλώς μέσω της διατήρησης επαρκών επιπέδων και αποκατάστασης σοβαρής έλλειψης ή ανεπάρκειας της βιταμίνης. Με βάση τα αποτελέσματα της δικής μας μελέτης, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της λήψης συμπληρώματος βιταμίνης D στην απόδοση αθλητών ποδηλασίας. Τα αποτελέσματα που διατυπώθηκαν στην παρούσα εργασία, αποδεικνύουν την χαμηλή ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων στο συγκεκριμένο ερευνητικό τομέα και μπορούν να αποτελέσουν πηγή βάσιμων υποθέσεων και όχι αξιόπιστων ευρημάτων. Θεωρούμε ότι η έλλειψη τεκμηρίωσης οφείλεται στο ότι η έρευνα ανά τα χρόνια έχει εξετάσει την επίδραση της βιταμίνης D γενικότερα στον αθλητικό πληθυσμό και όχι στοχευμένα σε κάθε άθλημα, όπως και αυτό της ποδηλασίας στην προκειμένη περίπτωση. Μελλοντικά απαιτούνται σίγουρα περισσότερες τυχαιοποιημένες ελεγχόμενες δοκιμές (RCTs) για την διερεύνηση των επιδράσεων των συμπληρωμάτων βιταμίνης D στην απόδοση των αθλητών ποδηλασίας, καθώς και για τον καθορισμό της ιδανικής δοσολογίας για την απόκτηση του μέγιστου οφέλους στην αθλητική απόδοση.

Βιβλιογραφία

- [1] Dahlquist, D.T., Dieter, B.P. & Koehle, M.S. Plausible ergogenic effects of vitamin D on athletic performance and recovery. *J Int Soc Sports Nutr* **12**, 33 (2015). <https://doi.org/10.1186/s12970-015-0093-8>
- [2] Wiciński, M., Adamkiewicz, D., Adamkiewicz, M., Śniegocki, M., Podhorecka, M., Szycha, P., & Malinowski, B. (2019). Impact of Vitamin D on Physical Efficiency and Exercise Performance—A Review. *Nutrients*, *11*(11), 2826. <https://doi.org/10.3390/nu11112826>
- [3] Marley, A., Grant, M. C., & Babraj, J. (2021). Weekly Vitamin D₃ supplementation improves aerobic performance in combat sport athletes. *European journal of sport science*, *21*(3), 379–387. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1744736>
- [4] Han, Q., Xiang, M., An, N., Tan, Q., Shao, J., & Wang, Q. (2024). Effects of vitamin D3 supplementation on strength of lower and upper extremities in athletes: an updated systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in nutrition*, *11*, 1381301. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1381301>
- [5] Han, Q., Li, X., Tan, Q. *et al.* Effects of vitamin D3 supplementation on serum 25(OH)D concentration and strength in athletes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Int Soc Sports Nutr* **16**, 55 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0323-6>
- [6] Ramezani Ahmadi, A., Mohammadshahi, M., Alizadeh, A., Ahmadi Angali, K., & Jahanshahi, A. (2020). Effects of vitamin D3 supplementation for 12 weeks on serum levels of anabolic hormones, anaerobic power, and aerobic performance in active male subjects: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *European journal of sport science*, *20*(10), 1355–1367. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1713218>
- [7] Tomlinson, P. B., Joseph, C., & Angioi, M. (2015). Effects of vitamin D supplementation on upper and lower body muscle strength levels in healthy individuals. A systematic review with meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*, *18*(5), 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.022>
- [8] Sist, M., Zou, L., Galloway, S. D. R., & Rodriguez-Sanchez, N. (2023). Effects of vitamin D supplementation on maximal strength and power in athletes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers in nutrition*, *10*, 1163313. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1163313>
- [9] Tina Shuk-Tin Ip, Sai-Chuen Fu, Michael Tim-Yun Ong, Patrick Shu-Hang Yung, Vitamin D deficiency in athletes: Laboratory, clinical and field integration, *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, Volume 29, 2022, Pages 22-29, ISSN 2214-6873, <https://doi.org/10.1016/j.asmart.2022.06.001>.
- [10] Yoon, S., Kwon, O., & Kim, J. (2021). Vitamin D in athletes: focus on physical performance and musculoskeletal injuries. *Physical activity and nutrition*, *25*(2), 20–25. <https://doi.org/10.20463/pan.2021.0011>

- [11] Shuler, F. D., Wingate, M. K., Moore, G. H., & Giangarra, C. (2012). Sports health benefits of vitamin d. *Sports health*, 4(6), 496–501.
<https://doi.org/10.1177/1941738112461621>
- [12] de la Puente Yagüe, M., Collado Yurrita, L., Ciudad Cabañas, M. J., & Cuadrado Cenxual, M. A. (2020). Role of Vitamin D in Athletes and Their Performance: Current Concepts and New Trends. *Nutrients*, 12(2), 579. <https://doi.org/10.3390/nu12020579>
- [13] Weiss, K., Devrim-Lanpir, A., Jastrzębski, Z., Nikolaidis, P. T., Hill, L., & Knechtle, B. (2022). Performance improvement in sport through vitamin D - a narrative review. *European review for medical and pharmacological sciences*, 26(21), 7756–7770.
https://doi.org/10.26355/eurev_202211_30124
- [14] Alimoradi, K., Nikooyeh, B., Ravasi, A. A., Zahedirad, M., Shariatzadeh, N., Kalayi, A., & Neyestani, T. R. (2019). Efficacy of Vitamin D Supplementation in Physical Performance of Iranian Elite Athletes. *International journal of preventive medicine*, 10, 100.
https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_227_18
- [15] Hamilton B. (2010). Vitamin D and human skeletal muscle. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 20(2), 182–190. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.01016.x>
- [16] Owens, D. J., Tang, J. C., Bradley, W. J., Sparks, A. S., Fraser, W. D., Morton, J. P., & Close, G. L. (2017). Efficacy of High-Dose Vitamin D Supplements for Elite Athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 49(2), 349–356.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001105>
- [17] Feng, C., Song, X., Chalamaiah, M., Ren, X., Wang, M., & Xu, B. (2023). Vitamin D Fortification and Its Effect on Athletes' Physical Improvement: A Mini Review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(2), 256. <https://doi.org/10.3390/foods12020256>
- [18] McGuigan, Lauren, "Vitamin D and Athletic Performance: A Critical Assessment for Coaches and Athletes" (2012). Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers. 1171. <https://scholarworks.umt.edu/etd/1171>
- [19] Wei, R. J., Orbeta, L., Hatamiya, N. S., & Chang, C. J. (2023). Nutritional Strategies for Endurance Cyclists - Periodized Nutrition, Ketogenic Diets, and Other Considerations. *Current sports medicine reports*, 22(7), 248–254.
<https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000001085>
- [20] Lechner, Katharina & Lechner, Benjamin & Halle, Martin & Worm, Nicolai & Scherr, Johannes. (2020). Vitamin D and Athletic Performance: Perspectives and Pitfalls. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 71. 35-42. DOI:[10.5960/dzsm.2019.404](https://doi.org/10.5960/dzsm.2019.404)
- [21] Owens, D. J., Fraser, W. D., & Close, G. L. (2015). Vitamin D and the athlete: emerging insights. *European journal of sport science*, 15(1), 73–84.
<https://doi.org/10.1080/17461391.2014.944223>

- [22] Most, A., Dörr, O., Nef, H. *et al.* Influence of 25-Hydroxy-Vitamin D Insufficiency on Maximal Aerobic Power in Elite Indoor Athletes: A Cross-Sectional Study. *Sports Med - Open* 7, 74 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00363-1>
- [23] Wilson-Barnes, Saskia & Hunt, Julie & Lanham-New, Susan & Manders, Ralph. (2020). Effects of vitamin D on health outcomes and sporting performance: Implications for elite and recreational athletes: Vitamin D status and health in athletes. *Nutrition Bulletin*. 45. <https://doi.org/10.1111/nbu.12413>
- [24] Rawson, E. S., Miles, M. P., & Larson-Meyer, D. E. (2018). Dietary Supplements for Health, Adaptation, and Recovery in Athletes. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 28(2), 188–199. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2017-0340>
- [25] Ogan, D., & Pritchett, K. (2013). Vitamin D and the athlete: risks, recommendations, and benefits. *Nutrients*, 5(6), 1856–1868. <https://doi.org/10.3390/nu5061856>
- [26] Goolsby, M. A., & Boniquit, N. (2017). Bone Health in Athletes. *Sports health*, 9(2), 108–117. <https://doi.org/10.1177/1941738116677732>
- [27] Sale, C., & Elliott-Sale, K. J. (2019). Nutrition and Athlete Bone Health. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(Suppl 2), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01161-2>
- [28] Cannell, J. J., Hollis, B. W., Sorenson, M. B., Taft, T. N., & Anderson, J. J. (2009). Athletic performance and vitamin D. *Medicine and science in sports and exercise*, 41(5), 1102–1110. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181930c2b>
- [29] Hamilton B. (2011). Vitamin D and athletic performance: the potential role of muscle. *Asian journal of sports medicine*, 2(4), 211–219. <https://doi.org/10.5812/asjism.34736>
- [30] Enette Larson-Meyer, (2015). “The Importance of Vitamin D for Athletes”. <https://www.gssiweb.org/sports-science-exchange/article/sse-148-the-importance-of-vitamin-d-for-athletes>
- [31] Williams, K., Askew, C., Hughes, D., Guy, J. A., Jackson Iii, J. B., & Gauthier, C. (2025). Supplemental Vitamin D3 for the Prevention of Bone Stress Injuries in Collegiate Athletes. *Cureus*, 17(5), e83320. <https://doi.org/10.7759/cureus.83320>
- [32] Carswell, A. T., Oliver, S. J., Wentz, L. M., Kashi, D. S., Roberts, R., Tang, J. C. Y., Izard, R. M., Jackson, S., Allan, D., Rhodes, L. E., Fraser, W. D., Greeves, J. P., & Walsh, N. P. (2018). Influence of Vitamin D Supplementation by Sunlight or Oral D3 on Exercise Performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 50(12), 2555–2564. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001721>
- [33] Maai, N., Frank, F. A., Meuris, A., & Ferreira, N. (2025). Association Between Vitamin D and Musculoskeletal Injuries: A Systematic Review. *Cureus*, 17(4), e82495. <https://doi.org/10.7759/cureus.82495>

- [34] Peeling, P., Sim, M., & McKay, A. K. A. (2023). Considerations for the Consumption of Vitamin and Mineral Supplements in Athlete Populations. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 53(Suppl 1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01875-4>
- [35] He, C. S., Handzlik, M., Fraser, W. D., Muhamad, A., Preston, H., Richardson, A., & Gleeson, M. (2013). Influence of vitamin D status on respiratory infection incidence and immune function during 4 months of winter training in endurance sport athletes. *Exercise immunology review*, 19, 86–101. <http://eir-isei.de/2013/eir-2013-086-article.pdf>
- [36] Brzezianski, M., Pastuszak-Lewandoska, D., Migdalska-Sek, M., Jastrzebski, Z., Radziminski, L., Jastrzebska, J., Brzezianska-Lasota, E., Kiszalkiewicz, J. M., & Sewerynek, E. (2022). Effect of Vitamin D3 Supplementation on Interleukin 6 and C-Reactive Protein Profile in Athletes. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 68(5), 359–367. <https://doi.org/10.3177/jnsv.68.359>
- [37] Saedmocheshi, S., Amiri, E., Mehdipour, A., & Stefani, G. P. (2024). The Effect of Vitamin D Consumption on Pro-Inflammatory Cytokines in Athletes: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Sports (Basel, Switzerland)*, 12(1), 32. <https://doi.org/10.3390/sports12010032>
- [38] Iolascon, G., Moretti, A., Paoletta, M., Liguori, S., & Di Munno, O. (2021). Muscle Regeneration and Function in Sports: A Focus on Vitamin D. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 57(10), 1015. <https://doi.org/10.3390/medicina57101015>
- [39] Güneş, Ö., & Altın, H. (2025). Evaluation of the Relationship between Serum 25(OH) Vitamin D Levels and Cardiac Functions in Adolescent Athletes. *Nigerian journal of clinical practice*, 28(4), 471–479. https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_732_24
- [40] Gómez-Bruton, A., González-Agüero, A., Olmedillas, H., Gómez-Cabello, A., Matute-Llorente, A., Julián-Almárcegui, C., Casajús, J. A., & Vicente-Rodríguez, G. (2013). Do calcium and vitamin D intake influence the effect of cycling on bone mass through adolescence? *Nutricion hospitalaria*, 28(4), 1136–1139. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.4.6490>
- [41] Short, M., Heron, N., & Matthews, M. (2022). Road cycling and bone health: a scoping review. *Journal of Science and Cycling*, 11(3), 3–22. <https://doi.org/10.28985/1322.jsc.09>
- [42] Martínez-Noguera, F. J., Alcaraz, P. E., Ortolano-Ríos, R., & Marín-Pagán, C. (2023). One Season in Professional Cycling Is Enough to Negatively Affect Bone Health. *Nutrients*, 15(16), 3632. <https://doi.org/10.3390/nu15163632>
- [43] Hilkens, L., Knuiman, P., Heijboer, M., Kempers, R., Jeukendrup, A. E., Loon, L. J. C. V., & Dijk, J. V. (2021). Fragile bones of elite cyclists: to treat or not to treat? *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 131(1), 26–28. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01034.2020>
- [44] Greer, Beau & Mojock, Christopher & Arjmandi, Bahram & Kim, Jeong-Su & Ormsbee, Michael & Panton, Lynn. (2022). Twelve Week Calcium Collagen Chelate or Calcium plus Vitamin D Supplementation Does Not Affect Bone Metabolism in Trained Cyclists. *Journal of Science and Cycling*. 11. 49-58. DOI:[10.28985/1322.jsc.05](https://doi.org/10.28985/1322.jsc.05)

- [45] Keay, N., Francis, G., & Hind, K. (2018). Low energy availability assessed by a sport-specific questionnaire and clinical interview indicative of bone health, endocrine profile and cycling performance in competitive male cyclists. *BMJ open sport & exercise medicine*, 4(1), e000424. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2018-000424>
- [46] Wyatt, P. B., Reiter, C. R., Satalich, J. R., O'Neill, C. N., Edge, C., Cyrus, J. W., O'Connell, R. S., & Vap, A. R. (2024). Effects of Vitamin D Supplementation in Elite Athletes: A Systematic Review. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 12(1), 23259671231220371. <https://doi.org/10.1177/23259671231220371>
- [47] Ghazzawi, H. A., Hussain, M. A., Raziq, K. M., Alsendi, K. K., Alaamer, R. O., Jaradat, M., Alobaidi, S., Al Aqili, R., Trabelsi, K., & Jahrami, H. (2023). Exploring the Relationship between Micronutrients and Athletic Performance: A Comprehensive Scientific Systematic Review of the Literature in Sports Medicine. *Sports (Basel, Switzerland)*, 11(6), 109. <https://doi.org/10.3390/sports11060109>
- [48] Abulafia, O., Ashkenazi, E., Epstein, Y., Eliakim, A., & Nemet, D. (2024). Characteristics of Vitamin D Concentration in Elite Israeli Olympic Athletes. *Nutrients*, 16(16), 2627. <https://doi.org/10.3390/nu16162627>
- [49] Neidel, P., Wolfram, P., Hotfiel, T., Engelhardt, M., Koch, R., Lee, G., & Zwungenberger, S. (2019). Cross-Sectional Investigation of Stress Fractures in German Elite Triathletes. *Sports (Basel, Switzerland)*, 7(4), 88. <https://doi.org/10.3390/sports7040088>
- [50] Muros, J. J., Knox, E., Hinojosa-Nogueira, D., Rufián-Henares, J. Á., & Zabala, M. (2021). Profiles for identifying problematic dietary habits in a sample of recreational Spanish cyclists and triathletes. *Scientific reports*, 11(1), 15193. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94660-0>
- [51] Amorim, S., Quintas, F., Mendes, G., Araújo, J., & Loureiro, N. (2015). Assessment of Serum 25 (OH) Vitamin D Status in Elite Portuguese Cycling Athletes. *Journal of Science and Cycling*, 4(2). Retrieved from <https://www.jsc-journal.com/index.php/JSC/article/view/220>
- [52] Muros, J. J., Sánchez-Muñoz, C., Hoyos, J., & Zabala, M. (2019). Nutritional intake and body composition changes in a UCI World Tour cycling team during the Tour of Spain. *European journal of sport science*, 19(1), 86–94. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1497088>
- [53] Muros, J. J., Sánchez-Muñoz, C., Campos, D., Hinojosa-Nogueira, D., Rufián-Henares, J. Á., Mateo-March, M., & Zabala, M. (2022). Nutritional Habits of Professional Cyclists during Pre-Season. *Nutrients*, 14(18), 3695. <https://doi.org/10.3390/nu14183695>
- [54] Hodgson, A. B., Ingham, A. J., Martin, J., Roberts, T., & Jeukendrup, A. E. (2012). The effects of 4 weeks vitamin D3 supplementation on athletic performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(Suppl.2), 950. Article 3557.

- [55] Blume, K., & Wolfarth, B. (2019). Identification of Potential Performance-Related Predictors in Young Competitive Athletes. *Frontiers in physiology*, 10, 1394. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01394>
- [56] Heaton, L. E., Davis, J. K., Rawson, E. S., Nuccio, R. P., Witard, O. C., Stein, K. W., Baar, K., Carter, J. M., & Baker, L. B. (2017). Selected In-Season Nutritional Strategies to Enhance Recovery for Team Sport Athletes: A Practical Overview. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(11), 2201–2218. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0759-2>
- [57] Żebrowska, A., Sadowska-Krępa, E., Stanula, A., Waśkiewicz, Z., Łakomy, O., Bezuglov, E., Nikolaidis, P. T., Rosemann, T., & Knechtle, B. (2020). The effect of vitamin D supplementation on serum total 25(OH) levels and biochemical markers of skeletal muscles in runners. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 17(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00347-8>
- [58] Todd, J. J., McSorley, E. M., Pourshahidi, L. K., Madigan, S. M., Laird, E., Healy, M., & Magee, P. J. (2017). Vitamin D₃ supplementation using an oral spray solution resolves deficiency but has no effect on VO₂ max in Gaelic footballers: results from a randomised, double-blind, placebo-controlled trial. *European journal of nutrition*, 56(4), 1577–1587. <https://doi.org/10.1007/s00394-016-1202-4>
- [59] Mieszkowski, J., Borkowska, A., Stankiewicz, B., Kochanowicz, A., Niespodziński, B., Surmiak, M., Waldziński, T., Rola, R., Petr, M., & Antosiewicz, J. (2021). Single High-Dose Vitamin D Supplementation as an Approach for Reducing Ultramarathon-Induced Inflammation: A Double-Blind Randomized Controlled Trial. *Nutrients*, 13(4), 1280. <https://doi.org/10.3390/nu13041280>
- [60] Jastrzębska, M., Kaczmarczyk, M., Michalczyk, M., Radzimiński, Ł., Stępień, P., Jastrzębska, J., Wakuluk, D., Suárez, A. D., López Sánchez, G. F., Ciężczyk, P., Godlewski, P., Król, P., & Jastrzębski, Z. (2018). Can Supplementation of Vitamin D Improve Aerobic Capacity in Well Trained Youth Soccer Players?. *Journal of human kinetics*, 61, 63–72. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0033>
- [61] Zhang, L., Quan, M., & Cao, Z. B. (2019). Effect of vitamin D supplementation on upper and lower limb muscle strength and muscle power in athletes: A meta-analysis. *PloS one*, 14(4), e0215826. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215826>
- [62] Vikmoen, O., Ellefsen, S., Trøen, Ø., Hollan, I., Hanestadhaugen, M., Raastad, T., & Rønnestad, B. R. (2016). Strength training improves cycling performance, fractional utilization of VO₂max and cycling economy in female cyclists. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(4), 384–396. <https://doi.org/10.1111/sms.12468>
- [63] Rønnestad, B. R., Hansen, J., Hollan, I., & Ellefsen, S. (2015). Strength training improves performance and pedaling characteristics in elite cyclists. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25(1), e89–e98. <https://doi.org/10.1111/sms.12257>
- [64] Sunde, A., Støren, O., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., & Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *Journal of strength and conditioning research*, 24(8), 2157–2165. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181aeb16a>

- [65] Chiang, C. M., Ismaeel, A., Griffis, R. B., & Weems, S. (2017). Effects of Vitamin D Supplementation on Muscle Strength in Athletes: A Systematic Review. *Journal of strength and conditioning research*, 31(2), 566–574. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001518>
- [66] Kawashima, I., Tsukahara, T., Kawai, R., Mizuno, T., Ishizuka, S., Hiraiwa, H., & Imagama, S. (2021). The impact of vitamin D supplementation on body fat mass in elite male collegiate athletes. *Nutrition & metabolism*, 18(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s12986-021-00578-9>
- [67] Koundourakis, N. E., Androulakis, N. E., Malliaraki, N., & Margioris, A. N. (2014). Vitamin D and exercise performance in professional soccer players. *PloS one*, 9(7), e101659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101659>
- [68] Mielgo-Ayuso, J., Calleja-González, J., Urdampilleta, A., León-Guereño, P., Córdova, A., Caballero-García, A., & Fernandez-Lázaro, D. (2018). Effects of Vitamin D Supplementation on Haematological Values and Muscle Recovery in Elite Male Traditional Rowers. *Nutrients*, 10(12), 1968. <https://doi.org/10.3390/nu10121968>

