



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

## ΔΙΪΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

### “Κλινική Άσκηση και Εφαρμογές της Τεχνολογίας στην Υγεία”

του Τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού της Σχολής Επιστήμης Φυσικής Αγωγής, Αθλητισμού και Εργοθεραπείας του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης και του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» - Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### Η επίδραση της άσκησης στην οστική υγεία παιδιών εφηβικής ηλικίας: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Χαλκίδου Γεωργία [Α.Ε.Μ.12059]

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Δούδα, Καθηγήτρια Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

Κομοτηνή, 2026



ΔΗΜΟΚΡΕΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

## ΔΙΪΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

### “Κλινική Άσκηση και Εφαρμογές της Τεχνολογίας στην Υγεία”

του Τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού της Σχολής Επιστήμης Φυσικής Αγωγής, Αθλητισμού και Εργοθεραπείας του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης και του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» - Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### Η επίδραση της άσκησης στην οστική υγεία παιδιών εφηβικής ηλικίας: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

**Χαλκίδου Γεωργία [Α.Ε.Μ.12059]**

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε στο Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος στην “Κλινική Άσκηση και Εφαρμογές της Τεχνολογίας στην Υγεία” σε συνεργασία με Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» - Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

## ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Δούδα, Καθηγήτρια Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

2ο Μέλος: Στυλιανή Καρακύριου, Μέλος Ε.Ε.Π. Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

3ο Μέλος: Απόστολος Σπάσης, Μέλος Ε.Ε.Π. Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

Κομοτηνή, 2026



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΡΑΚΗΣ

DEMOCRITUS  
UNIVERSITY  
OF THRACE

DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE

SCHOOL OF PHYSICAL EDUCATION, SPORTS SCIENCE AND OCCUPATIONAL THERAPY

DEPARTMENT OF PHYSICAL EDUCATION AND SPORTS SCIENCE

**INTERINSTITUTIONAL POSTGRADUATE PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES**

**"Clinical Exercise and Applications of Technology in Health"**

of the Department of Physical Education and Sport of the School of Physical Education, Sport Science and Occupational Therapy of Democritus University of Thrace in Collaboration with the National Center for Science Research "DEMOKRITOS" - The Institute of Informatics and Telecommunications (IIT)

**MASTER DISSERTATION**

**The effect of exercise on bone health in adolescents:**

**A Literature Review**

**Chalkidou Georgia [R.N. 12059]**

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Master's Degree in 'Clinical Exercise and Applications of Technology in Health' of the Department of Physical Education and Sport of the School of Physical Education, Sport Science and Occupational Therapy of Democritus University of Thrace in Collaboration with the National Center for Science Research "DEMOKRITOS" - The Institute of Informatics and Telecommunications (IIT)

**COMMITTEE OF EXAMINERS**

Supervisor: Helen Douda, *Professor D.P.E.S.S. –D.U.Th.*

Member 2: Styliani Karakyrriou, *Specialized Teaching Staff, D.P.E.S.S. – D.U.Th.*

Member 3: Apostolos Spassis, *Specialized Teaching Staff, D.P.E.S.S. – D.U.Th.*

Komotini, 2026



**© 2026 Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Κλινική Άσκηση και Εφαρμογές της Τεχνολογίας στην Υγεία»**

του Τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού (Τ.Ε.Φ.Α.Α.) της Σχολής Επιστήμης Φυσικής Αγωγής, Αθλητισμού και Εργοθεραπείας (Σ.Ε.Φ.Α.Α.Ε.) του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης (Δ.Π.Θ.) σε συνεργασία με το Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» (Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ») - Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.



*Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ σε όλους όσους  
με στήριξαν και στάθηκαν δίπλα μου  
σε αυτό το «ταξίδι»*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Γεωργία Χαλκίδου:** Η επίδραση της άσκησης στην οστική υγεία παιδιών εφηβικής ηλικίας: Ανασκόπηση βιβλιογραφίας  
(Με την επίβλεψη της Καθηγήτριας Ελένης Δούδα)

Σκοπός της παρούσας ανασκόπησης ήταν να μελετηθεί η επίδραση που ασκούν τα διάφορα αθλήματα στην οστική πυκνότητα κατά την εφηβική ηλικία και να εξεταστεί ποια αθλήματα επιφέρουν οστεογενετικό αποτέλεσμα καθώς το μηχανικό φορτίο που ασκείται στα οστά θα πρέπει να υπερβαίνει αυτό που συναντάται κατά τη διάρκεια των καθημερινών δραστηριοτήτων. Για την αναζήτηση των μελετών χρησιμοποιήθηκαν οι ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων Pubmed, ScienceDirect, και Google Scholar. Η αναζήτηση των μελετών έγινε με τις λέξεις κλειδιά και συνδυασμό των όρων: *bone mineral density, bone health, bone mass, remodeling, osteogenesis, athletes exercise, adolescents*. Τα κριτήρια ένταξης των άρθρων στη μελέτη ήταν: i) τυχαιοποιημένα και μη τυχαιοποιημένα πρωτόκολλα με τουλάχιστον μία ομάδα άσκησης έναντι μίας ομάδας ελέγχου, ii) συμμετοχή σε αθλητικές δραστηριότητες για τουλάχιστον έναν χρόνο, iii) παιδιά ηλικίας 12 έως 18 ετών, και iv) μελέτες σε ελληνική και αγγλική γλώσσα, οι οποίες δημοσιεύθηκαν μετά το 2015 έως σήμερα. Από το σύνολο των άρθρων που προέκυψε από τις αναζητήσεις στις βάσεις δεδομένων, αφαιρέθηκαν 30 μελέτες που ήταν διπλοεγγραφές, είχαν δημοσιευθεί πριν το 2015 και μελέτες που ήταν γραμμένες σε άλλη γλώσσα εκτός της αγγλικής ή της ελληνικής. Από το σύνολο των 21 μελετών που παρέμειναν, εξαιρέθηκαν 10 μελέτες που απορρίφθηκαν λόγω μη συναφούς περιεχομένου. Τελικά επιλέχθηκαν συνολικά 11 μελέτες που συμπεριελήφθησαν στην παρούσα ανασκόπηση. Από τα αποτελέσματα των ερευνών διαφαίνεται ότι η οστική πυκνότητα επηρεάζεται από το άθλημα, καθώς σε αθλήματα με σημαντικές μηχανικές φορτίσεις, όπως είναι η Καλαθοσφαίριση, το Ποδόσφαιρο, η Ενόργανη και η Ρυθμική Γυμναστική παρατηρείται σημαντική αύξηση στην οστική πυκνότητα των αθλητών και αθλητριών. Αντίθετα, στα αθλήματα, χωρίς έντονη μηχανική φόρτιση, όπως είναι η Κολύμβηση και η Ποδηλασία, δεν παρατηρείται θετική επίδραση στην οστική μάζα και διατηρούν την οστική πυκνότητα σε χαμηλότερες τιμές. Κατά συνέπεια, οι ασκήσεις κρούσης με το βάρος του σώματος,



όπως είναι οι αναπηδήσεις και τα άλματα που εφαρμόζονται στα διάφορα αθλήματα φαίνεται ότι βελτιώνουν την υγεία των οστών από την εφηβική ακόμη ηλικία.

**Λέξεις κλειδιά:** *οστική πυκνότητα, οστική υγεία, αθλήματα, εφηβική ηλικία*



## ABSTRACT

**Georgia Chalkidou:** The effect of exercise on bone health in adolescents:

A Literature Review

(Under the supervision of Professor Dr. Helen Douda)

The purpose of this review was to examine the impact of various sports on bone density during adolescence and to determine which sports induce an osteogenic effect, considering that the mechanical load applied to bones must exceed that encountered during daily activities. The electronic databases PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar were used to retrieve relevant studies. The literature search was conducted using the following keywords and their combinations: *bone mineral density, bone health, bone mass, remodeling, osteogenesis, athletes, sports, adolescents*. The inclusion criteria for the review were: (i) randomized and non-randomized protocols with at least one exercise group compared to a control group; (ii) participation in athletic activities for at least one year; (iii) participants aged 12 to 18 years; and (iv) studies published in Greek or English from 2015 to the present. From the total number of articles retrieved, 30 studies were excluded due to duplication, publication before 2015, or being written in languages other than English or Greek. Of the remaining 21 studies, 10 were excluded due to irrelevant content. Ultimately, 11 studies were included in this review. The findings suggest that bone density is influenced by the type of sport. Specifically, sports involving significant mechanical loading, such as Basketball, Soccer, Artistic Gymnastics, and Rhythmic Gymnastics, were associated with a significant increase in bone density among athletes. In contrast, sports with low mechanical loading, such as Swimming and Cycling, did not exhibit a positive effect on bone mass, maintaining bone density at lower levels. Consequently, weight-bearing and impact exercises, such as jumping and plyometric activities incorporated into various sports, appear to enhance bone health from adolescence onward.

**Keywords:** *bone density, bone health, sports, adolescence*

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

|   |               |
|---|---------------|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>                        | <b>.....</b>  |
| <b>VIII</b>                                 |               |
| <b>ABSTRACT.....</b>                        | <b>IX</b>     |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>                     | <b>.....</b>  |
| <b>ix</b>                                   |               |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>               | <b>xí</b>     |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>              | <b>xii</b>    |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....</b>        | <b>XIIiii</b> |
| <b>I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>                     | <b>15</b>     |
| 1.1. Σκοπός.....                            | 18            |
| 1.2. Σημασία της έρευνα.....                | 18            |
| 1.3. Περιορισμοί της έρευνας.....           | 18            |
| 1.4. Ερευνητική υπόθεση.....                | 19            |
| 1.5. Θεωρητικοί ορισμοί.....                | 19            |
| <b>II. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....</b>    | <b>23</b>     |
| 2.1. Δημιουργία και Λειτουργία Οστού.....   | 23            |
| 2.1.1. Σχηματισμός Οστού (Οστεοποίηση)..... | 23            |
| 2.1.1.1. Ενδοχονδρική Οστεοποίηση.....      | 24            |
| 2.1.1.2. Ενδομεμβρανώδης Οστεοποίηση.....   | 25            |
| 2.2. Δομή και Σύνθεση Οστού.....            | 25            |
| 2.3. Ανάπτυξη και Διαμόρφωση των Οστών..... | 27            |
| 2.3.1. Επιφυσιακές Πλάκες.....              | 28            |
| 2.3.2. Επιφανειακή ανάπτυξη.....            | 29            |
| 2.4. Βιολογικός Ρόλος των Οστών.....        | 30            |
| 2.4.1. Υποστήριξη και Κίνηση.....           | 30            |
| 2.4.2. Προστασία Ζωτικών Οργάνων.....       | 32            |
| 2.4.3. Αποθήκευση Ανόργανων Στοιχείων.....  | 33            |



|  |           |
|--|-----------|
| 2.4.4. Παραγωγή Αιμοσφαιρίων.....  | 34        |
| 2.5. Υγεία και Διατήρηση των Οστών.....  | 34        |
| 2.5.1. Οστική Αναδιαμόρφωση.....   | 35        |
| 2.5.1.1. Διαδικασία Οστικής Απορρόφησης και Σχηματισμού.....                     | 36        |
| 2.5.1.2. Ισορροπία Οστεοβλαστών - Οστεοκλαστών.....                              | 38        |
| 2.5.2. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Υγεία των Οστών.....                        | 39        |
| 2.5.2.1. Διατροφή.....   | 40        |
| 2.5.2.2. Ορμόνες.....  | 42        |
| 2.5.2.3. Κληρονομικότητα.....  | 44        |
| 2.5.2.4. Τρόπος Ζωής.....  | 46        |
| 2.6. Οστική Πυκνότητα και Άσκηση: Μηχανισμοί, Παρεμβάσεις και Αξιολόγηση.....    | 48        |
| 2.6.1. Μηχανισμοί της Φυσικής Δραστηριότητας στην Οστική Υγεία.....              | 49        |
| 2.6.2. Επίδραση Δραστηριοτήτων Φόρτισης στην Ο.Π.(Αθλήματα και Είδη Άσκησης..... | 51        |
| 2.6.3. Μέτρηση Οστικής Πυκνότητας (Bone Densitometry).....                       | 53        |
| 2.7. Υγεία των Οστών σε Παιδιά και Εφήβους.....                                  | 55        |
| 2.7.1. Κρίσιμες Περίοδοι Ανάπτυξης Οστών.....                                    | 56        |
| 2.7.2. Μακροχρόνια Επίδραση της Φυσικής Δραστηριότητας στην Παιδική Ηλικία.....  | 58        |
| 2.7.3. Προληπτικά Μέτρα για τη Διατήρηση Υγιών Οστών στην Εφηβεία.....           | 60        |
| <b>III. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....</b>   | <b>62</b> |
| 3.1. Πηγές δεδομένων και αναζητήσεις.....  | 62        |
| <b>VI. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>   | <b>64</b> |
| <b>V. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>  | <b>69</b> |
| <b>VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>   | <b>77</b> |
| <b>IX. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>   | <b>79</b> |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1.** Κατανομή του δείγματος ανά φύλο και αθλητική συμμετοχή..... **64**
- Πίνακας 2.** Δημογραφικά και προπονητικά χαρακτηριστικά ανά άθλημα..... **65**
- Πίνακας 3.** Επίδραση διαφορετικών αθλημάτων στην οστική πυκνότητα παιδιών & εφήβων..... **67**



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.** Δομή οστικού ιστού. Πηγή: Anatomy & Physiology, Connexions (OpenStax).. **25**
- Σχήμα 2.** Θέση επιφυσιακής πλάκας σε αναπτυσσόμενο μακρύ οστό. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης..... **28**
- Σχήμα 3.** Κύκλος οστικής αναδιαμόρφωσης και ρόλος οστεοκλαστών & οστεοβλαστών. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης..... **37**
- Σχήμα 4.** Παράγοντες που επηρεάζουν την επίτευξη της Κορυφαίας Οστικής Μάζας. Προσαρμογή από Rizzoli et al. (2010)..... **40**
- Σχήμα 5.** Η θεωρία του μηχανοστάτη του Φροστ και η επίδραση του μηχανικού φορτίου στη μάζα του οστού. Πηγή: Chang et al.(2013)..... **50**
- Σχήμα 6.** Μεταβολές της οστικής μάζας σε όλη τη διάρκεια της ζωής αναδεικνύοντας την εφηβεία ως κρίσιμη περίοδος ταχείας συσσώρευσης που καταλήγει στην επίτευξη ΡΒΜ στην ενήλικη ζωή. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης..... **56**
- Σχήμα 7.** Διάγραμμα ροής των μελετών σύμφωνα με τη μέθοδο PRISMA..... **63**



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

**Ο.Π.:** Οστική Πυκνότητα

**BMD:** Bone Mass Density

**BMC:** Bone Mass Content (Οστική μάζα)

**IGF-1:** Insulin-like Growth Factor 1 (Παράγοντας ανάπτυξης τύπου ινσουλίνης 1)

**GH:** Growth Hormone (Αυξητική ορμόνη)

**DEXA:** Dual-energy X-ray Absorptiometry (Απορροφησιμετρία διπλής ενέργειας)

**PBM:** Peak Bone Mass (Κορυφαία οστική μάζα)

**PHV:** Peak High Velocity (Κορύφωση ρυθμού αύξησης ύψους)

**OPG:** Osteoprotegerin (Οστεοπροτεγερίνη)

**RANK:** Receptor Activator of Nuclear Factor κB (Υποδοχέας ενεργοποίησης του πυρηνικού παράγοντα κB)

**RANKL:** Receptor Activator of Nuclear Factor κB Ligand (Λιγάνδης του υποδοχέα ενεργοποίησης του πυρηνικού παράγοντα κB)

**LRP5:** Low –density Lipoprotein Receptor-related Protein (Υποδοχέας που σχετίζεται με τις λιποπρωτεΐνες χαμηλής πυκνότητας 5)

**WNT16:** Wnt Family Member 16 (μέλος της οικογένειας Wnt – πρωτεΐνη σηματοδότησης που ρυθμίζει την οστική μάζα)

**RED-S:** Relative Energy Deficiency in Sport (Σχετική ενεργειακή ανεπάρκεια στον αθλητισμό)

**OPG:** Οστεοπροτεγερίνη



**HSCs:** Αιμοποιητικά βλαστοκύτταρα

**DKK1:** Dickkopf 1 (Αναστολέας οδού WNT)

**SSI:** Strength Strain Index (Δείκτης μηχανικής αντοχής οστού)

**QUS:** Quantitative Ultrasound (Ποσοτικός υπέρηχος)

**QCT/  $\rho$  QCT:** Quantitative Computed Tomography/ Peripheral QCT (Ποσοτική αξονική τομογραφία)

**PPAR- $\gamma$ :** Peroxisome Proliferator-Activated Receptor- $\gamma$  (Πυρηνικός υποδοχέας)

**TGF- $\beta$ :** Transforming Growth Factor- $\beta$  (Αυξητικός παράγοντας που ρυθμίζει την οστεοβλαστική δραστηριότητα)

**ESR1:** Estrogen Receptor1 (Γονίδιο που κωδικοποιεί τον υποδοχέα οιστρογόνων)



## Η επίδραση της άσκησης στην οστική υγεία παιδιών εφηβικής ηλικίας:

### Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

#### I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οστά αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς ιστούς του ανθρώπινου σώματος, με κρίσιμες λειτουργίες πέρα από τον απλό δομικό τους ρόλο. Συμμετέχουν στη στήριξη και την κίνηση του σώματος, στην προστασία ζωτικών οργάνων, στην αιμοποίηση μέσω του μυελού των οστών και στην αποθήκευση και ρύθμιση μεταλλικών στοιχείων, όπως το ασβέστιο και ο φώσφορος. Η ομοιόσταση των οστών εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ της οστικής απορρόφησης και της δημιουργίας νέου οστού. Όταν αυτή η ισορροπία διαταράσσεται, ενδέχεται να οδηγήσει στην εμφάνιση μεταβολικών νοσημάτων, με πιο συχνή την οστεοπόρωση (Marin-Puyalto et al., 2020).

Η οστεοπόρωση είναι μία χρόνια, συστηματική πάθηση που χαρακτηρίζεται από χαμηλή οστική πυκνότητα (Ο.Π., Bone Mineral Density - BMD), μειωμένη οστική μάζα και διαταραχή της μικροαρχιτεκτονικής των οστών. Ως αποτέλεσμα αυτών, η οστική ευθραυστότητα αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων, ακόμα και υπό συνθήκες χαμηλής μηχανικής επιβάρυνσης (Gümüş et al., 2019; Vlachopoulos et al., 2017a). Επιπλέον, η οστεοπόρωση δεν προκαλεί μόνο φυσικές επιπτώσεις, όπως ο χρόνιος πόνος και η απώλεια λειτουργικότητας, αλλά έχει σημαντική επίδραση και στην ποιότητα ζωής, ιδιαίτερα στους ηλικιωμένους πληθυσμούς (Hagman et al., 2021; Tamoliene et al., 2021). Παρότι η οστεοπόρωση συχνά συνδέεται με τις μεγαλύτερες ηλικίες, η εμφάνισή της μπορεί να ξεκινήσει πολύ νωρίτερα και να εξελιχθεί αθόρυβα για πολλά χρόνια.

Η οστεοπόρωση αναγνωρίζεται πλέον ότι μπορεί να εμφανιστεί από νεαρή ηλικία, γεγονός που καθιστά την πρόληψή της απαραίτητη σε όλα τα στάδια της ζωής. Η επίτευξη της μέγιστης οστικής πυκνότητας (Peak Bone Mass, PBM) κατά την παιδική και εφηβική ηλικία αποτελεί τον πιο κρίσιμο παράγοντα για την πρόληψη των μελλοντικών



οστεοπορωτικών καταγμάτων (Gordon, 2000). Οι σκελετικοί μηχανισμοί που αφορούν την οστική μάζα και την οστική πυκνότητα είναι καθοριστικοί για την υγεία των οστών και τη μελλοντική μείωση του κινδύνου κατάγματος (NIH Consensus, 2001). Η αναγνώριση της ανάγκης για μέτρα προστασίας της οστικής υγείας από την παιδική ηλικία είναι θεμελιώδης, καθώς η υγιής ανάπτυξη των οστών και η διατήρηση της πυκνότητας καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής εξαρτώνται από αυτή την πρώιμη φάση.

Η παιδική και κυρίως η εφηβική ηλικία αποτελούν κρίσιμες περιόδους για τη σκελετική ανάπτυξη και την οστική συσσώρευση. Σύμφωνα με μελέτες, περίπου το 90% της μέγιστης οστικής μάζας αποκτάται έως την ηλικία των 18 ετών στα κορίτσια και έως τα 20 στους άνδρες (Wilkinson et al., 2017). Είναι εντυπωσιακό ότι περίπου το 40% της ενήλικης οστικής μάζας αποκτάται κατά την εφηβεία (Marin-Puyalto et al., 2020), γεγονός που ενισχύει τη σημασία των πρώιμων στρατηγικών πρόληψης. Μάλιστα, μια αύξηση της οστικής πυκνότητας κατά 10% στη φάση αυτή μπορεί να μειώσει τον μελλοντικό κίνδυνο καταγμάτων έως και 50%, καθυστερώντας την εμφάνιση οστεοπόρωσης κατά περισσότερα από 10 χρόνια (Vlachopoulos et al., 2017a).

Η ανάπτυξη της οστικής πυκνότητας επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων που μπορούν να ταξινομηθούν σε ενδογενείς (βιολογικούς/γενετικούς) και εξωγενείς (περιβαλλοντικούς/συμπεριφορικούς). Οι ενδογενείς παράγοντες περιλαμβάνουν τη γενετική προδιάθεση, το φύλο, την ηλικία, την εθνικότητα, τη μυϊκή μάζα, καθώς και το ορμονικό προφίλ (Torres-Costoso et al., 2017; Gümüş et al., 2019). Ιδιαίτερα το ενδοκρινικό σύστημα παίζει καθοριστικό ρόλο κατά την εφηβεία, μέσω της δράσης ορμονών όπως τα οιστρογόνα, η αυξητική ορμόνη, η τεστοστερόνη, η λεπτίνη και ο ινσουλινοειδής αυξητικός παράγοντας IGF-1, που διεγείρουν την οστεογένεση (Ubago-Guisado et al., 2019; Hagman et al., 2021).

Οι εξωγενείς παράγοντες, που αφορούν κυρίως τον τρόπο ζωής, μπορούν να επηρεαστούν μέσω παρεμβάσεων και περιλαμβάνουν τη διατροφή, την πρόσληψη βιταμίνης D και ασβεστίου, την αποφυγή τοξικών συνηθειών (όπως το κάπνισμα και η υπερβολική κατανάλωση αλκοόλ), τη φαρμακευτική αγωγή και το επίπεδο φυσικής δραστηριότητας (Lopez-Gonzalez et al., 2021). Οι περισσότεροι παράγοντες κινδύνου της οστεοπόρωσης μπορούν να προληφθούν μέσω αλλαγών στον τρόπο ζωής, με τη διατροφή και την άσκηση να κατέχουν τον κυριότερο ρόλο.



Η άσκηση αναγνωρίζεται ως ο πιο ισχυρός τροποποιησιμος παράγοντας για την ενίσχυση της οστικής υγείας, ιδιαίτερα στην κρίσιμη φάση της ανάπτυξης (Baker et al., 2020; Agostinete et al., 2020a, 2020b). Η μηχανική φόρτιση που προκαλείται από τη σωματική άσκηση διεγείρει το σκελετικό σύστημα και προάγει την ανακατασκευή του οστού μέσω της ενεργοποίησης των οστεοβλαστών και της αναστολής των οστεοκλαστών (Maillane-Vanegas et al., 2018). Ορισμένοι τύποι άσκησης, όπως η άσκηση με αντιστάσεις, η ενόργανη γυμναστική και οι δραστηριότητες υψηλής πρόσκρουσης, έχουν συσχετιστεί με σημαντικά υψηλότερα επίπεδα Ο.Π. σε παιδιά και εφήβους σε σύγκριση με συνομηλίκους τους που δεν ασκούνται (Nasri et al., 2015; Collins et al., 2019). Η ένταση, η συχνότητα και η διάρκεια της άσκησης επηρεάζουν άμεσα το μέγεθος της οστεογενετικής απόκρισης (Tenforde et al., 2015).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σημασία του τύπου άσκησης στην οστική υγεία, καθώς κάθε άθλημα επιφέρει διαφορετικά μηχανικά φορτία στο σκελετικό σύστημα. Τα αθλήματα που περιλαμβάνουν κάθετες επιταχύνσεις, απότομες αλλαγές κατεύθυνσης και υψηλά επίπεδα πρόσκρουσης φαίνεται να έχουν πιο ισχυρή οστεογενετική δράση σε σχέση με δραστηριότητες χαμηλής πρόσκρουσης, όπως η κολύμβηση ή η ποδηλασία (Tenforde & Fredericson, 2011). Η πρώιμη έναρξη τακτικής φυσικής δραστηριότητας, ιδιαίτερα κατά την εφηβεία - η οποία θεωρείται «παράθυρο ευκαιρίας» λόγω των υψηλών αναβολικών ορμονών και της μέγιστης ανταπόκρισης του σκελετικού συστήματος – οδηγεί σε μεγαλύτερη κορυφαία οστική μάζα και μακροχρόνια προστασία από οστεοπορωτικές καταστάσεις (Agostinete et al., 2020a; Vlachopoulos et al., 2017c).

Επιπλέον, η διατροφή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της οστικής μάζας. Η πρόσληψη βιταμινών και μετάλλων όπως το ασβέστιο, η βιταμίνη D και το μαγνήσιο επηρεάζουν άμεσα την οστική υγεία, ενώ η ανεπάρκεια αυτών των θρεπτικών συστατικών μπορεί να επιταχύνει την απώλεια οστικής μάζας και την ανάπτυξη οστεοπορωτικών καταστάσεων (Lopez-Gonzalez et al., 2021). Ανάλογα με τις διατροφικές συνήθειες, η κατανάλωση των κατάλληλων τροφών μπορεί να ενισχύσει τη δυνατότητα του οργανισμού να διατηρήσει ή να αυξήσει την οστική μάζα. Η σύσταση της διατροφής πρέπει να εξατομικεύεται και να προσαρμόζεται στις ανάγκες του κάθε ατόμου.



Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία της άσκησης και των λοιπών παραγόντων τρόπου ζωής στην οστική υγεία, καθίσταται αναγκαία η διερεύνηση της σχέσης τους κατά την εφηβική ηλικία.

### **1.1. Σκοπός**

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να εξετάσει την επίδραση της σωματικής άσκησης στην οστική πυκνότητα των εφήβων, εστιάζοντας συγκριτικά στην επίδραση διαφορετικών τύπων αθλημάτων (π.χ. ποδόσφαιρο, ενόργανη γυμναστική, τρέξιμο), τόσο σε αθλητές όσο και σε μη αθλούμενα άτομα. Επιπλέον, διερευνάται ποια αθλητικά ερεθίσματα σχετίζονται με υψηλότερες τιμές οστικής πυκνότητας σε κρίσιμες ανατομικές περιοχές (όπως η σπονδυλική στήλη, το ισχίο και το αντιβράχιο), συμβάλλοντας στην κατανόηση και την ενίσχυση της πρόληψης της οστεοπόρωσης από την εφηβική ηλικία.

### **1.2. Σημασία της έρευνας**

Η μελέτη της επίδρασης της άσκησης στην οστική πυκνότητα των εφήβων είναι καίριας σημασίας, καθώς η περίοδος αυτή καθορίζει την επίτευξη της μέγιστης οστικής μάζας και, κατ' επέκταση, τον μελλοντικό κίνδυνο εμφάνισης οστεοπόρωσης. Η κατανόηση των επιδράσεων διαφορετικών τύπων άσκησης μπορεί να προσφέρει πολύτιμα δεδομένα για στοχευμένες παρεμβάσεις που ενισχύουν την υγεία των οστών και συμβάλλουν ουσιαστικά στην πρόληψη της νόσου από νεαρή ηλικία.

### **1.3. Περιορισμοί της έρευνας**

Παρά την αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα γύρω από την επίδραση της άσκησης στην οστική πυκνότητα παιδιών και εφήβων, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί που δυσχεραίνουν την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων. Η ετερογένεια στη μεθοδολογία, τη διάρκεια και την ένταση των παρεμβάσεων, καθώς και στις ανατομικές περιοχές μέτρησης της οστικής πυκνότητας, περιορίζει τη συγκρισιμότητα των μελετών. Επιπλέον, τα δεδομένα για προεφηβικούς πληθυσμούς, ιδίως κορίτσια που ενδέχεται να ανταποκρίνονται διαφορετικά λόγω ορμονικών και αναπτυξιακών παραγόντων, παραμένουν ανεπαρκή (Zulfarina et al., 2016). Τέλος, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των διαφορών μεταξύ αθλημάτων και των μακροχρόνιων επιδράσεών τους στην οστική υγεία, ώστε να διαμορφωθούν πιο στοχευμένες παρεμβάσεις.



#### 1.4. Ερευνητική υπόθεση

Η βασική ερευνητική υπόθεση της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης ήταν ότι η τακτική σωματική άσκηση κατά την εφηβεία αυξάνει την οστική πυκνότητα και την οστική μάζα σε κρίσιμες ανατομικές περιοχές, όπως η σπονδυλική στήλη, το ισχίο, κ.α., και ότι διαφορετικά είδη αθλημάτων παρέχουν διακριτά οφέλη στην οστική υγεία, με δραστηριότητες υψηλής φόρτισης και αντίστασης να σχετίζονται με μεγαλύτερες βελτιώσεις σε σύγκριση με αθλήματα χαμηλής πρόσκρουσης.

#### 1.5. Θεωρητικοί ορισμοί

*Βασική Πολυκυτταρική Μονάδα (Basic Multicellular Unit – BMU):* Η βασική πολυκυτταρική μονάδα της οστικής αναδιαμόρφωσης. Κάθε BMU κάνει έναν πλήρη κύκλο απορρόφησης και σχηματισμού, διατηρώντας τη μηχανική ακεραιότητα του οστού (Rizzoli et al., 2010).

*Δείκτης οστικής απορρόφησης (C-Terminal Telopeptide of Type I Collagen - CTX):* Δείκτης οστικής απορρόφησης που προκύπτει από τη διάσπαση κολλαγόνου τύπου I και αντικατοπτρίζει την οστεοκλαστική δραστηριότητα (Rizzoli et al., 2010).

*Δείκτης Οστικού Σχηματισμού (Procollagen Type 1 N-terminal Propeptide – P1NP):* Βιοχημικός δείκτης οστικού σχηματισμού που αντανακλά τη σύνθεση κολλαγόνου τύπου I από τους οστεοβλάστες (Rizzoli et al., 2010).

*Δείκτης Μηχανικής Αντοχής (Strength Strain Index – SSI):* Δείκτης μηχανικής αντοχής του οστού που συνδυάζει πληροφορίες για την πυκνότητα και τη γεωμετρία, εκτιμώντας την αντοχή σε κάμψη και στρέψη (Rizzoli et al., 2010).

*Ενεργειακή Διαθεσιμότητα (Energy Availability – EA):* Η διαθέσιμη ενέργεια για τις φυσιολογικές λειτουργίες του σώματος μετά την αφαίρεση της ενέργειας που καταναλώνεται στην άσκηση. Η χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα επηρεάζει αρνητικά την ορμονική λειτουργία και την οστική υγεία (Mountjoy et al., 2014).

*Καλσιτονίνη:* Ορμόνη που εκκρίνεται από τα C-κύτταρα του θυρεοειδούς αδένου και αναστέλλει την οστεοκλαστική δραστηριότητα, συμβάλλοντας στη μείωση των επιπέδων ασβεστίου στο αίμα (Rizzoli et al., 2010).



*Κορυφαία Οστική Μάζα (Peak Bone Mass – PBM):* Το μέγιστο επίπεδο οστικής μάζας που επιτυγχάνεται κατά την εφηβεία και τις αρχές της ενήλικης ζωής, καθοριστικός παράγοντας για τον μελλοντικό κίνδυνο οστεοπόρωσης (Weaver et al., 2016).

*Κορύφωση Ρυθμού Αύξησης Ύψους (Peak Height Velocity – PHV):* Η χρονική στιγμή κατά την οποία ο ρυθμός αύξησης του ύψους είναι μέγιστος, αντιπροσωπεύοντας κρίσιμη περίοδο για οστικές προσαρμογές (Weaver et al., 2016).

*Μακροφαγικός Παράγοντας Αποικιογένεσης (Macrophage Colony-Stimulating Factor – M-CSF):* Κυτταροκίνη απαραίτητη για την επιβίωση, τον πολλαπλασιασμό και τη διαφοροποίηση των προ-οστεοκλαστών, δρώντας συνεργατικά με το RANKL (Rizzoli et al., 2010).

*Μηχανική Φόρτιση (Mechanical Loading):* Η εφαρμογή δυνάμεων στο οστό μέσω άσκησης ή καθημερινών δραστηριοτήτων, η οποία διεγείρει την οστική προσαρμογή και ενισχύει την οστική μάζα (Weaver et al., 2016).

*Μηχανοστάτης (Mechanostat):* Θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει πώς το οστό προσαρμόζεται στα μηχανικά φορτία, αυξάνοντας ή μειώνοντας τη μάζα του ανάλογα με το επίπεδο καταπόνησης (Rizzoli et al., 2010).

*Μικροπεριβάλλοντα Οστικού Μυελού (Niches):* Εξειδικευμένα περιβάλλοντα εντός του οστικού μυελού που ρυθμίζουν τη διατήρηση, αυτοανανέωση και διαφοροποίηση των βλαστοκυττάρων, επηρεάζοντας την οστική αναδιαμόρφωση (Μάρκου, 2005).

*Οστεογενές Ερέθισμα:* Μηχανικό ή λειτουργικό φορτίο που προκαλεί επαρκή παραμόρφωση του οστού ώστε να ενεργοποιηθεί η διαδικασία σχηματισμού νέου οστικού ιστού (Rizzoli et al., 2010).

*Οστεοβλάστες (Osteoblasts):* Κύτταρα υπεύθυνα για τον σχηματισμό νέου οστού μέσω παραγωγής οστεοειδούς και ανοργανοποίησης (Rizzoli et al., 2010).

*Οστεοκλάστες (Osteoclasts):* Πολυπύρρηνα κύτταρα που απορροφούν οστικό ιστό, ρυθμίζοντας την οστική απορρόφηση και την ομοιόσταση του σκελετού (Rizzoli et al., 2010).



*Οστεοκύτταρα (Osteocytes):* Ώριμα οστικά κύτταρα που λειτουργούν ως μηχανοϋποδοχείς, ανιχνεύοντας μηχανικά φορτία και ρυθμίζοντας την οστική αναδιαμόρφωση (Rizzoli et al., 2010).

*Οστεοπροτεγερίνη (Osteoprotegerin):* Πρωτεΐνη-δέκτης δόλωμα που δεσμεύει το RANKL, εμποδίζοντας την ενεργοποίηση των οστεοκλαστών. (Rizzoli et al., 2010)

*Οστική Αναδιαμόρφωση (Bone Remodeling):* Η συνεχής διαδικασία απορρόφησης και σχηματισμού οστού, η οποία επιτρέπει τη διατήρηση της μηχανικής αντοχής και την προσαρμογή του σκελετού στα φορτία (Rizzoli et al., 2010).

*Οστική Μάζα (Bone Mineral Content – BMC):* Η συνολική ποσότητα ανόργανων στοιχείων στο οστό, ανεξάρτητα από το μέγεθός του (Weaver et al., 2016).

*Οστική Πυκνότητα (Bone Mineral Density – BMD):* Η ποσότητα ανόργανου υλικού ανά μονάδα επιφάνειας οστού, δείκτης της αντοχής και της υγείας του σκελετού (Weaver et al., 2016).

*Οστερίνη (Osterix – SP7):* Μεταγραφικός παράγοντας απαραίτητος για τη διαφοροποίηση των προ-οστεοβλαστών σε ώριμους οστεοβλάστες (Rizzoli et al., 2010).

*Παραθορμόνη:* Ορμόνη που εκκρίνεται από τους παραθυρεοειδείς αδένες και ρυθμίζει τα επίπεδα ασβεστίου. Η χρόνια αύξησή της ενισχύει την οστεοκλαστογένεση, ενώ η διαλείπουσα δράση της είναι αναβολική (Μάρκου, 2005).

*Πλειομετρική Άσκηση (Plyometric Exercise):* Μορφή άσκησης που περιλαμβάνει εκρηκτικές κινήσεις και άλματα, δημιουργώντας υψηλά κρουστικά φορτία που ενισχύουν την οστική προσαρμογή.

*Προπονητική Ηλικία:* Η διάρκεια συστηματικής συμμετοχής ενός ατόμου σε οργανωμένη άσκηση ή άθλημα, ανεξάρτητα από τη χρονολογική ηλικία.

*Τριάδα της Αθλήτριας (Female Athlete Triad):* Σύνδρομο που περιλαμβάνει χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα, διαταραχές εμμήνου ρύσεως και μειωμένη οστική πυκνότητα, επηρεάζοντας την υγεία και την απόδοση των αθλητριών (Mountjoy et al., 2014)

*PPAR-γ (Peroxisome Proliferator- Activated Receptor-γ):* Πυρηνικός υποδοχέας που προάγει τη λιπογένεση εις βάρος της οστεοβλαστογένεσης, οδηγώντας σε μειωμένο σχηματισμό οστού (Rizzoli et al., 2010).



*RED-S (Relative Energy Deficiency in Sport – Σχετική Ενεργειακή Ανεπάρκεια στον Αθλητισμό):* Η RED-S είναι μια πολυσυστημική κατάσταση που προκύπτει από χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα, επηρεάζοντας τον μεταβολισμό, την ορμονική λειτουργία, την οστική υγεία, την ανοσολογική απόκριση και την αθλητική απόδοση. Αποτελεί διεύρυνση του μοντέλου της Τριάδας της Αθλήτριας και αφορά και τα δύο φύλα (Mountjoy et al., 2014)



## II. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

### 2.1. Δημιουργία και Λειτουργία Οστού

Η κατανόηση της δομής, της ανάπτυξης και της λειτουργίας του οστού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ερμηνεία της επίδρασης της άσκησης στην οστική υγεία κατά την εφηβεία. Το οστόν είναι ένας δυναμικός και μεταβολικά ενεργός ιστός, ο οποίος ανταποκρίνεται στα μηχανικά ερεθίσματα και αναδιαμορφώνεται διαρκώς μέσω της συντονισμένης δράσης οστεοβλαστών, οστεοκλαστών και οστεοκυττάρων (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017). Η διαδικασία της οστεοποίησης, είτε μέσω ενδοχονδρικών είτε μέσω ενδομεμβρανωδών μηχανισμών, καθορίζει τη σκελετική ανάπτυξη από την εμβρυϊκή ζωή έως την ενηλικίωση (Berendsen & Olsen, 2015). Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τους βασικούς βιολογικούς μηχανισμούς που διέπουν τη δημιουργία, τη δομή και την ανάπτυξη του οστού, θέτοντας το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των οστεογενετικών επιδράσεων της σωματικής άσκησης.

#### 2.1.1. Σχηματισμός Οστού (Οστεοποίηση)

Ο σχηματισμός του οστού αποτελεί μια σύνθετη και δυναμική διαδικασία, που ξεκινά από την παιδική ηλικία και συνεχίζεται έως την εφηβεία και την πρώιμη ενήλικη ζωή. Η επιμήκης ανάπτυξη των οστών επιτυγχάνεται μέσω της ενδοχονδρικής οστεοποίησης στην αυξητική πλάκα των επιφυσσιακών χόνδρων, ενώ η επιφανειακή αύξηση οφείλεται στην περιοστική εναπόθεση νέου ιστού· παράλληλα, η ενδοστική απορρόφηση ρυθμίζει τη διάμετρο και την εσωτερική διαμόρφωση των οστών (Μάρκου, 2005). Κατά την εφηβεία, η σκελετική μάζα σχεδόν διπλασιάζεται, με τα στεροειδή του φύλου να συμβάλλουν καθοριστικά τόσο στην ωρίμανση όσο και στη διαφοροποίηση του σκελετού ανάμεσα στα δύο φύλα. Η επίτευξη της μέγιστης οστικής μάζας έως την τρίτη δεκαετία της ζωής αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μακροπρόθεσμη υγεία του σκελετού (Kindler, Lewis, & Hamrick, 2015).

Η αντοχή και η λειτουργικότητα του σκελετού δεν καθορίζονται μόνο από την ποσότητα του οστού, δηλαδή την Ο.Π. και το οστικό περιεχόμενο (BMC), αλλά και από την



ποιότητα και τη γεωμετρία του, όπως το πάχος του φλοιώδους στρώματος, η μορφολογία του σπογγώδους οστού και ο βαθμός μεταλλοποίησης (Klentrou, 2016; Hart et al., 2020). Το οστό είναι μεταβολικά ενεργός ιστός που ανταποκρίνεται διαρκώς σε μηχανικά ερεθίσματα, γεγονός που αποτυπώνεται στη θεωρία του Frost, σύμφωνα με την οποία η οστική μάζα προσαρμόζεται στις φορτίσεις που δέχεται μέσω της μυϊκής δραστηριότητας (Kindler et al., 2015). Ως υλικό, συνδυάζει ακαμψία και ελαστικότητα, ώστε να αντέχει σε συμπιεστικές, διατμητικές και εφελκυστικές δυνάμεις, ενώ η αλληλεπίδραση φλοιώδους και σπογγώδους οστού προσφέρει ταυτόχρονα χαμηλό βάρος και υψηλή αντοχή (Hart et al., 2020).

Η κατανόηση των αρχών σχηματισμού του οστού είναι απαραίτητη για τη μελέτη των δύο βασικών μηχανισμών οστεοποίησης, της ενδοχονδρικής και της ενδομεμβρανώδους. Οι μηχανισμοί αυτοί διαφοροποιούνται τόσο ως προς την προέλευση των κυττάρων όσο και ως προς τον ρόλο τους στη διαμόρφωση του σκελετού, θέτοντας τα θεμέλια για την εξέλιξη της σκελετικής αρχιτεκτονικής στον άνθρωπο (Berendsen & Olsen, 2015).

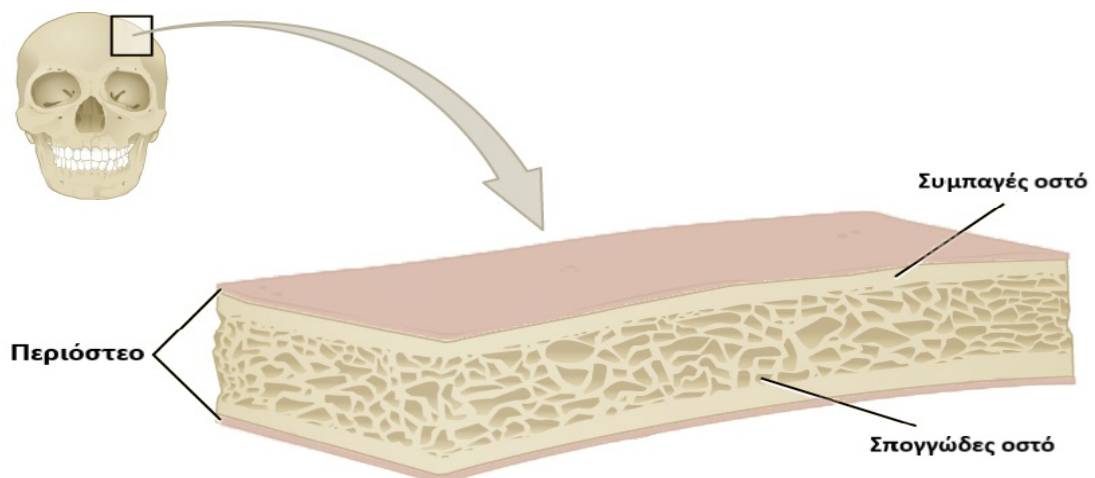
#### **2.1.1.1. Ενδοχονδρική Οστεοποίηση**

Η ενδοχονδρική οστεοποίηση αποτελεί την κύρια διαδικασία σχηματισμού των μακρών οστών, του αξονικού σκελετού και μέρους του κρανίου. Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία χόνδρινων προτύπων από μεσεγχυματικά κύτταρα, τα οποία διαφοροποιούνται σε χονδροκύτταρα. Στη συνέχεια, τα πολλαπλασιαζόμενα χονδροκύτταρα υφίστανται υπερτροφία και σταδιακά αντικαθίστανται από οστικό ιστό. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από εισβολή προδρόμων οστεοβλαστών, οστεοκλαστών και αγγειακών κυττάρων από το περικόνδριο, το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη του πρωτογενούς κέντρου οστεοποίησης στην διάφυση του οστού. Με την ανάπτυξη του εμβρύου, το κέντρο αυτό επεκτείνεται και παράλληλα σχηματίζονται δευτερογενή κέντρα οστεοποίησης στα άκρα των αναπτυσσόμενων οστών, καθιστώντας τις επιφυσιακές πλάκες λειτουργικά ενεργές περιοχές για την επιμήκη ανάπτυξη των οστών κατά την παιδική και εφηβική ηλικία (Berendsen & Olsen, 2015).



### 2.1.1.2. Ενδομεμβρανώδης Οστεοποίηση

Η ενδομεμβρανώδης οστεοποίηση αποτελεί τον μηχανισμό σχηματισμού των επίπεδων οστών του κρανίου, μέρους του προσώπου και της κλείδας. Σε αυτήν τη διαδικασία, τα μεσεγχυματικά κύτταρα μεταναστεύουν στις θέσεις των μελλοντικών οστών και σχηματίζουν συμπυκνώσεις υψηλής κυτταρικής πυκνότητας. Εκεί διαφοροποιούνται απευθείας σε οστεοβλάστες, οι οποίοι αρχίζουν να εκκρίνουν οστεοειδές και στη συνέχεια σχηματίζουν πρωτογενή δοκίδια οστού χωρίς να προηγηθεί στάδιο χόνδρου. Με την πάροδο του χρόνου, οι δομές αυτές ορυκτοποιούνται και συνενώνονται, οδηγώντας στον σχηματισμό ώριμου συμπαγούς και σπογγώδους οστού. Η διαδικασία αυτή καθιστά την ενδομεμβρανώδη οστεοποίηση κρίσιμη για την ανάπτυξη και προστασία των οστών του κρανίου και του προσώπου (Berendsen & Olsen, 2015).



**Σχήμα 1.** Δομή οστικού ιστού. Πηγή: Anatomy & Physiology, Connexions (OpenStax).

### 2.2. Δομή και Σύνθεση Οστού

Το οστούν αποτελεί έναν εξειδικευμένο, βιοφασικό συνδετικό ιστό, ο οποίος συνδυάζει εξωκυττάριο οργανικό υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε ανόργανα στοιχεία, προσδίδοντας στον σκελετό την απαραίτητη ισορροπία μεταξύ μηχανικής αντοχής και ελαστικότητας (Hart et al., 2020). Η ανατομική και μηχανική ακεραιότητα του οστού εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της οργανικής και ανόργανης σύνθεσης, η οποία του επιτρέπει να αντέχει σε διάφορους τύπους μηχανικών φορτίων, όπως θλίψη, διάταση, διάτμηση και στροφή, ενώ παράλληλα προσαρμόζεται σε αλλαγές των



μηχανικών και μεταβολικών συνθηκών (Hart et al., 2020). Η σωστή αναλογία μεταξύ οργανικής και ανόργανης συνιστώσας είναι κρίσιμη για την οστική αντοχή· υπερβολικά μεταλλωμένο οστό μπορεί να γίνει εύθραυστο, ενώ λιγότερο μεταλλωμένο είναι πιο ευέλικτο αλλά λιγότερο σκληρό (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017).

Η σύνθεση, η συντήρηση και η ανακατασκευή του οστού ελέγχονται από τέσσερις βασικούς τύπους κυττάρων: οστεοβλάστες, οστεοκλάστες, οστεοκύτταρα και κύτταρα επικάλυψης (lining cells) (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017).

Οι οστεοβλάστες προέρχονται από πολυδύναμα μεσεγχυματικά βλαστοκύτταρα και είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή της οστικής μήτρας μέσω σύνθεσης και έκκρισης κυρίως κολλαγόνου τύπου I, καθώς και άλλων πρωτεϊνών όπως η οστεοπρωτεΐνη, η οστεοκαλσίνη και η αλκαλική φωσφατάση (Salhotra et al., 2020). Η οστική επασβεστωση επιτυγχάνεται με την εναπόθεση υδροξυαπατίτη πάνω στο οργανικό υπόστρωμα, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά του οστού (Katsimbri, 2017). Η διαφοροποίηση των οστεοβλαστών ρυθμίζεται από πολλαπλά σήματα, καθώς και από παράγοντες όπως η παραθορμόνη (PTH), οι ορμόνες φύλου και ο IGF-1 (Hart et al., 2020; Berendsen & Olsen, 2015). Οι οστεοβλάστες μπορούν επίσης να μετατραπούν σε οστεοκύτταρα ή σε κύτταρα επικάλυψης, συμμετέχοντας στην ανακατασκευή και διατήρηση του οστικού ιστού (Hart et al., 2020).

Οι οστεοκλάστες είναι πολυπύρηννα κύτταρα που προέρχονται από τη μονοκυτταρική/μακροφαγική σειρά και είναι οι μοναδικοί κυτταρικοί παράγοντες που επιτελούν απορρόφηση οστού (Katsimbri, 2017; Salhotra et al., 2020). Η ενεργοποίησή τους εξαρτάται από τη δράση παραγόντων όπως το RANKL και η M-CSF, ενώ η διάρκεια ζωής τους και η ικανότητά τους για οστική απορρόφηση ρυθμίζεται από κυτταρικά και εξωκυτταρικά σήματα, όπως η δράση του OPG και των μικρών GTPases (Hart et al., 2020). Κατά την απορρόφηση, οι οστεοκλάστες πολώνονται, σχηματίζοντας δομές όπως τη ζώνη στεγανότητας και τη σχισμώδη περιοχή, όπου εκκρίνονται ένζυμα όπως η καθεψίνη K για τη διάσπαση της οστικής μήτρας (Katsimbri, 2017).

Τα οστεοκύτταρα προέρχονται από οστεοβλάστες που έχουν εγκλωβιστεί κατά τον οστικό σχηματισμό και αποτελούν το 90–95% όλων των κυττάρων του οστού (Hart et al., 2020). Τα οστεοκύτταρα σχηματίζουν δίκτυο λακούνων και καναλιών (lacuno-canalicular



network), επιτρέποντας την επικοινωνία μεταξύ τους και με οστεοβλάστες και με επιθηλιακά οστεϊκά κύτταρα. Μέσω του μηχανισμού της μηχανομετατροπής ανιχνεύουν μηχανικά φορτία και μικροτραυματισμούς, ρυθμίζοντας την ανακατασκευή του οστού με την παραγωγή παραγόντων όπως σκληροσίνη, προσταγλανδίνες και νιτρικό οξείδιο (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017).

Η εξωκυττάρια μήτρα του οστού αποτελείται κατά περίπου 20% από οργανικό υλικό (κυρίως κολλαγόνο τύπου I), 60% από ανόργανα στοιχεία (υδροξυαπατίτης) και 20% νερό (Katsimbri, 2017). Η οργανική συνιστώσα παρέχει ευκαμψία και ανθεκτικότητα σε διατακτικές και στρεπτικές δυνάμεις, ενώ η ανόργανη εξασφαλίζει σκληρότητα και αντίσταση στη θλίψη (Hart et al., 2020). Η ισορροπία μεταξύ δημιουργίας και απορρόφησης οστού διατηρείται μέσω της συντονισμένης δράσης οστεοβλαστών και οστεοκλαστών, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της οστικής μάζας και της μηχανικής αντοχής του σκελετού σε διάφορες μεταβολικές και μηχανικές συνθήκες (Hart et al., 2020). Η λειτουργική αλληλεπίδραση των κυτταρικών τύπων και της εξωκυττάριας μήτρας καθιστά το οστό ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μηχανικά ερεθίσματα, όπως αυτά που προκαλούνται από τη σωματική άσκηση, γεγονός που θα αναλυθεί σε επόμενες ενότητες.

### **2.3. Ανάπτυξη και Διαμόρφωση των Οστών**

Η ανάπτυξη και διαμόρφωση των οστών συνιστά μια δυναμική, εξελισσόμενη διαδικασία που εκτείνεται από την εμβρυϊκή ζωή έως την ενηλικίωση, με στόχο τη διαμόρφωση ενός λειτουργικού σκελετικού συστήματος που εξασφαλίζει στήριξη, κινητικότητα και προστασία των εσωτερικών οργάνων. Η διαδικασία αυτή καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ οστικής εναπόθεσης και απορρόφησης, αλλά και από τη συνεργασία διαφόρων κυτταρικών τύπων (οστεοβλάστες, οστεοκλάστες, οστεοκύτταρα) και εξωκυττάρια μηχανισμών (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017).

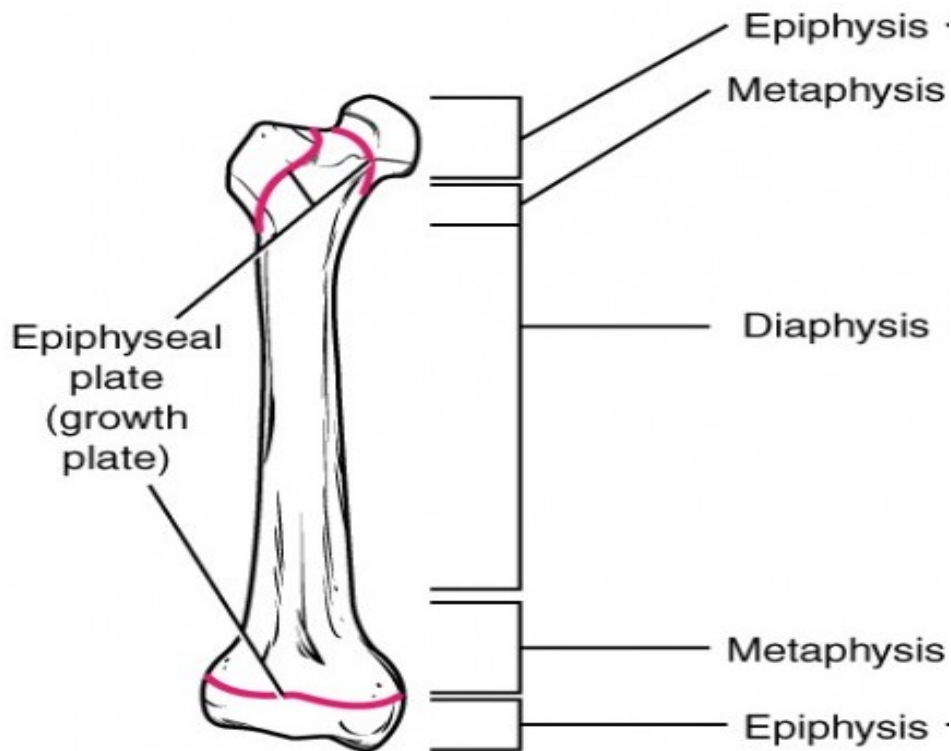
Κατά τη διάρκεια της εμβρυϊκής ανάπτυξης, ο σχηματισμός των οστών ξεκινά με την εμφάνιση του πρωτογενούς κέντρου οστεοποίησης, το οποίο επεκτείνεται και αργότερα συνοδεύεται από τη δημιουργία δευτερογενών κέντρων στα άκρα των οστών (Salhotra et al., 2020; Berendsen & Olsen, 2015). Η οστική ανάπτυξη συνεχίζεται μετά τη γέννηση, με τη συμμετοχή των επιφυσιακών πλακών για τη γραμμική αύξηση του μήκους και με την



επιφανειακή ανάπτυξη που εξασφαλίζει την αύξηση της διαμέτρου και τη μηχανική ενίσχυση των οστών (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017).

### 2.3.1. Επιφυσειακές Πλάκες

Οι επιφυσειακές πλάκες αποτελούν εξειδικευμένα τμήματα υαλώδους χόνδρου που παρεμβάλλονται ανάμεσα στην επίφυση και τη διάφυση και αποτελούν το κύριο κέντρο της επιμήκους ανάπτυξης των μακρών οστών. Παραμένουν λειτουργικές από την εμβρυϊκή ανάπτυξη μέχρι την ολοκλήρωση της σκελετικής ωρίμανσης, καθορίζοντας τον ρυθμό και την κατεύθυνση της αύξησης των οστών (Berendsen & Olsen, 2015; Salhotra et al., 2020; Katsimbri, 2017).



**Σχήμα 2.** Θέση επιφυσειακής πλάκας σε αναπτυσσόμενο μακρύ οστό. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης.

Η μικροσκοπική τους δομή οργανώνεται σε διακριτές ζώνες, καθεμία με εξειδικευμένη λειτουργία: στη ζώνη εφεδρείας εντοπίζονται ανενεργά χονδροκύτταρα, στη ζώνη πολλαπλασιασμού αυτά διαιρούνται και στοιχίζονται σε στήλες, στη ζώνη υπερτροφίας διογκώνονται, ενώ στη ζώνη ασβεστοποίησης υφίστανται απόπτωση και το



υπόστρωμα αβεστοποιείται. Τέλος, στη ζώνη οστεοποίησης διεισδύουν αγγεία και οστικά κύτταρα, αντικαθιστώντας τον χόνδρο με ώριμο οστίτη ιστό (Salhotra et al., 2020).

Η λειτουργία της επιφυσιακής πλάκας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε ορμονικές, διατροφικές και μηχανικές επιδράσεις, γεγονός που εξηγεί τη σημασία της ορμονικής ισορροπίας, της επαρκούς θρέψης και της σωματικής δραστηριότητας για την υγιή ανάπτυξη και συνδέεται στενά με τον ρυθμό ανάπτυξης κατά την εφηβεία, ιδιαίτερα με τον Μέγιστο Ρυθμό Αύξησης Ύψους (Peak High Velocity, PHV), όπου η οστική προσαρμογή είναι μέγιστη. Με την ολοκλήρωση της εφηβείας, οι επιφυσιακές πλάκες υφίστανται σύγκλιση και οστεοποίηση, σηματοδοτώντας τη λήξη της επιμήκους ανάπτυξης των οστών (Berendsen & Olsen, 2015; Salhotra et al., 2020).

### **2.3.2. Επιφανειακή Ανάπτυξη**

Η επιφανειακή ανάπτυξη αφορά κυρίως την αύξηση της διαμέτρου και της αντοχής του οστού μέσω μεταβολών στο περίοστεο και το ενδόστεο. Νέα οστική ουσία αποτίθεται στην εξωτερική επιφάνεια του περιόστεου, ενώ παράλληλα ενδοστεϊκή απορρόφηση διευρύνει τον μυελό των οστών (Hart et al., 2020; Katsimbri, 2017). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της διαμέτρου και του πάχους του φλοιώδους οστού, ενισχύοντας τη μηχανική αντοχή μέσω αύξησης της διατομής και μετατόπισης της μάζας περιφερειακά του άξονα, βελτιώνοντας τη ροπή αδρανείας, δηλαδή την ικανότητα του οστού να αντιστέκεται σε κάμψη και στρέψη.

Η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι μηχανικές φορτίσεις, οι ορμόνες (π.χ. IGF-I, παραθορμόνη, ορμόνες φύλου), η φυσική δραστηριότητα και η μυϊκή μάζα, οι οποίοι μπορούν να προάγουν την οστική εναπόθεση και να αυξήσουν τη μέγιστη οστική μάζα που επιτυγχάνεται κατά την εφηβεία (Zhu & Zheng, 2021; Kindler et al., 2015). Στην ενήλικη ζωή, η ισορροπία τείνει να μεταβληθεί, με την ενδοστεϊκή απορρόφηση να υπερισχύει, οδηγώντας σε προοδευτική λέπτυνση του φλοιώδους οστού (Katsimbri, 2017).



## 2.4. Βιολογικός Ρόλος των Οστών

Τα οστά δεν συνιστούν απλώς το σκελετικό υπόβαθρο του ανθρωπίνου σώματος, αλλά επιτελούν έναν πολυδιάστατο βιολογικό ρόλο που συνδέεται στενά με τη φυσιολογική λειτουργία και τη διατήρηση της ζωής. Πέρα από τη μηχανική υποστήριξη και τη δυνατότητα κίνησης μέσω της συνεργασίας τους με το μυϊκό σύστημα, συμβάλλουν στην προστασία ζωτικών οργάνων, όπως ο εγκέφαλος, η καρδιά και οι πνεύμονες (Hart et al., 2020; Lartey, 2024).

Παράλληλα, αποτελούν το κύριο αποθετήριο ανόργανων στοιχείων, ιδιαίτερα ασβεστίου και φωσφόρου, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της ομοιόστασης και της φυσιολογικής λειτουργίας πολλών συστημάτων του οργανισμού. Τα ανόργανα συστατικά τους, κυρίως υπό τη μορφή υδροξυαπατίτη, προσδίδουν σκληρότητα και μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα λειτουργούν ως δυναμική δεξαμενή για την εξασφάλιση της μεταβολικής ισορροπίας (Katsimbri, 2017; Vannucci et al., 2018).

Επιπλέον, στο εσωτερικό των οστών βρίσκεται ο μυελός, ένας εξαιρετικά πολύπλοκος ιστός που είναι υπεύθυνος για την αιμοποίηση, δηλαδή την παραγωγή ερυθρών και λευκών αιμοσφαιρίων, καθώς και αιμοπεταλίων. Μέσω αυτής της διαδικασίας εξασφαλίζεται η συνεχής ανανέωση των κυττάρων του αίματος, η μεταφορά οξυγόνου, η άμυνα απέναντι σε παθογόνους μικροοργανισμούς και η πήξη του αίματος (Lucas, 2021; Charman & Zhang, 2023).

Συνολικά, ο σκελετός συνιστά ένα δυναμικό και πολυλειτουργικό όργανο, το οποίο ενσωματώνει μηχανικές, μεταβολικές και αιμοποιητικές λειτουργίες. Η κατανόηση του βιολογικού ρόλου των οστών είναι απαραίτητη όχι μόνο για την ερμηνεία της φυσιολογίας του οργανισμού, αλλά και για την κατανόηση παθολογικών καταστάσεων που επηρεάζουν την υγεία του μυοσκελετικού συστήματος (Sommerfeldt & Rubin, 2001).

### 2.4.1. Υποστήριξη και Κίνηση

Ο σκελετός αποτελεί το βασικό μηχανικό πλαίσιο του ανθρώπινου σώματος, παρέχοντας τη σταθερότητα και την ακαμψία που απαιτούνται για τη διατήρηση της στάσης και την εκτέλεση λειτουργικών κινήσεων. Τα οστά λειτουργούν ως μοχλοί στους οποίους προσφύονται οι μύες, επιτρέποντας την κίνηση μέσω της συνεργασίας με τους



τένοντες και τις αρθρώσεις (Salhotra et al., 2020). Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται όχι μόνο η στήριξη και το σχήμα του σώματος, αλλά και η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων κινητικών δραστηριοτήτων, από βασικές κινήσεις, όπως η βάδιση, έως σύνθετες μορφές κινητικής δραστηριότητας, όπως η αθλητική απόδοση. Η διαμόρφωση των οστών κατά την ανάπτυξη και η διατήρηση της μηχανικής τους αντοχής εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση με το μυϊκό σύστημα, καθώς η ανάπτυξη μυών, τενόντων και συνδέσμων προϋποθέτει ακριβή ρύθμιση και λειτουργική συνέργεια με το σκελετικό σύστημα (Berendsen & Olsen, 2015).

Η στενή σχέση μεταξύ μυϊκής και οστικής μάζας έχει περιγραφεί εκτενώς στη βιβλιογραφία. Κατά την ανάπτυξη, η αύξηση της μυϊκής δύναμης και μάζας αντανακλάται σε αντίστοιχη αύξηση της οστικής μάζας και της γεωμετρίας των οστών (Saggese et al., 2002). Η μυϊκή σύσπαση δημιουργεί τις υψηλότερες μηχανικές φορτίσεις που ασκούνται στα οστά, υπερβαίνοντας τις δυνάμεις του ίδιου του σωματικού βάρους (Schoenau & Fricke, 2008). Αυτή η δυναμική σχέση περιγράφεται από τη θεωρία του μηχανόστατη (mechanostat), η οποία υποστηρίζει ότι τα οστά προσαρμόζουν τη μάζα, το μέγεθος και τη γεωμετρία τους ως απόκριση στις μηχανικές φορτίσεις. Όταν οι δυνάμεις ξεπερνούν ένα ορισμένο κατώφλι (set point), ενεργοποιείται θετική προσαρμογή με αύξηση της οστικής μάζας και αντοχής. Αντίθετα, σε συνθήκες μειωμένης φόρτισης, όπως η ακινητοποίηση ή η έλλειψη φυσικής δραστηριότητας, τόσο οι μύες όσο και τα οστά υφίστανται εξασθένηση, οδηγώντας σε μείωση της λειτουργικότητας και χαμηλότερη οστική μάζα (Schoenau & Fricke, 2008).

Η προσαρμοστικότητα του σκελετού διασφαλίζει ότι το οστό θα αναπτύξει το κατάλληλο σχήμα και μέγεθος για να ανταποκριθεί στις λειτουργικές του απαιτήσεις. Στα παιδιά και τους εφήβους, η αύξηση της μυϊκής μάζας (π.χ. η άλιπη μάζα σώματος) έχει συσχετιστεί με μεγαλύτερη περιφέρεια περιόστεου και αυξημένη γεωμετρία του φλοιώδους οστού, στοιχείο που ενισχύει την οστική αντοχή (Kindler et al., 2015). Εξάλλου, μελέτες δείχνουν ότι η σωματική άσκηση και ιδιαίτερα η δραστηριότητα που περιλαμβάνει μηχανική φόρτιση, ενισχύει σημαντικά την οστική ανάπτυξη και προάγει τη διατήρηση της οστικής μάζας δια βίου (Hart et al., 2020). Η λειτουργία αυτή εντάσσει τον σκελετό όχι μόνο ως παθητικό στήριγμα αλλά και ως δυναμικό, προσαρμοζόμενο ιστό, ο οποίος ανταποκρίνεται στις μηχανικές και μεταβολικές απαιτήσεις του οργανισμού.



#### 2.4.2. Προστασία Ζωτικών Οργάνων

Ένας από τους πιο θεμελιώδεις ρόλους του σκελετού είναι η προστασία των ζωτικών οργάνων από μηχανικές κακώσεις και εξωτερικούς κινδύνους. Η οστική δομή λειτουργεί ως φυσικό περίβλημα, σχηματίζοντας ανθεκτικές δομές γύρω από κρίσιμα όργανα και συστήματα. Το κρανίο περιβάλλει και προστατεύει τον εγκέφαλο, ενώ η σπονδυλική στήλη σχηματίζει έναν οστικό σωλήνα που περιέχει και προφυλάσσει τον νωτιαίο μυελό, ο οποίος αποτελεί κεντρικό άξονα του νευρικού συστήματος (Sommerfeldt & Rubin, 2001). Αντίστοιχα, ο θώρακας, που αποτελείται από το στήθος, τα πλευρά, τους σπονδύλους και τους χόνδρους, δημιουργεί ένα προστατευτικό πλαίσιο γύρω από την καρδιά και τους πνεύμονες, εξασφαλίζοντας τη λειτουργία τους ακόμη και σε συνθήκες αυξημένης μηχανικής καταπόνησης (Hart et al., 2020).

Εξίσου σημαντική είναι η λειτουργία της λεκάνης, η οποία περιβάλλει τα όργανα της πυέλου και συμβάλλει στην προστασία του εμβρύου κατά την κύηση. Η συμβολή που προσφέρει το σκελετικό σύστημα εκτείνεται επίσης στο αγγειακό και νευρικό δίκτυο, καθώς πολλές οστικές δομές λειτουργούν ως ασπίδες για την αποτροπή τραυματισμών σε μεγάλα αγγεία και νευρικές οδούς (Lartey, 2024). Η αποτελεσματικότητα αυτής της λειτουργίας δεν εξαρτάται μόνο από την αρχιτεκτονική του σκελετού, αλλά και από τις ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες του οστικού ιστού, όπως η ελαστικότητα και η ικανότητα απορρόφησης μηχανικής ενέργειας, που μειώνουν τον κίνδυνο άμεσης βλάβης στα ευαίσθητα όργανα.

Σε συστημικό επίπεδο, η προστασία που παρέχει το σκελετικό σύστημα αποδεικνύει ότι το οστό δεν είναι ένα αδρανές υλικό, αλλά ένας δυναμικός ιστός με ικανότητα προσαρμογής στις μηχανικές απαιτήσεις και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η λειτουργία αυτή αναδεικνύει τον σκελετό όχι μόνο ως μηχανικό πλαίσιο, αλλά και ως ενεργό παράγοντα διατήρησης της συνολικής ομοιόστασης και επιβίωσης του οργανισμού (Sommerfeldt & Rubin, 2001; Hart et al., 2020).



### 2.4.3. Αποθήκευση Ανόργανων Στοιχείων

Τα οστά λειτουργούν ως η κύρια δεξαμενή ανόργανων στοιχείων στον ανθρώπινο οργανισμό, αποθηκεύοντας πάνω από το 99% του συνολικού ασβεστίου και περίπου το 85% του φωσφόρου του σώματος (Vannucci et al., 2018; Yu & Sharma, 2023). Η παρουσία τους στον σκελετό δεν είναι μόνο δομική, αλλά και μεταβολική, καθώς τα ανόργανα στοιχεία αποθηκεύονται σε μορφή κρυστάλλων υδροξυαπατίτη, οι οποίοι προσδίδουν στα οστά σκληρότητα και μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα σε δυνάμεις συμπίεσης (Hart et al., 2020). Παράλληλα, το ασβέστιο και ο φώσφορος παραμένουν βιολογικά διαθέσιμα ώστε να καλύπτουν τις μεταβαλλόμενες ανάγκες του οργανισμού, όπως η μυϊκή σύσπαση, η μετάδοση νευρικών ώσεων και η διατήρηση της οξεοβασικής ισορροπίας (Loud & Gordon, 2006; Evans & Lo, 2013).

Η ρύθμιση της συγκέντρωσης αυτών των στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω πολύπλοκων μηχανισμών που περιλαμβάνουν ορμονικούς και κυτταρικούς παράγοντες. Η παραθορμόνη, η βιταμίνη D και η καλσιτονίνη διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ομοιόστασης ασβεστίου – φωσφόρου, προσαρμόζοντας την απορρόφηση από το έντερο, την απέκκριση από τους νεφρούς και την εναπόθεση ή αποδέσμευσή τους από τον οστίτη ιστό (Zhu & Zheng, 2021; Penido & Alon, 2012). Οι διεργασίες αυτές στηρίζονται επίσης στη δράση εξειδικευμένων κυττάρων: οι οστεοβλάστες εναποθέτουν ασβέστιο και φωσφορικά ιόντα στο οστικό υπόστρωμα, ενώ οι οστεοκλάστες τα αποδεσμεύουν στο αίμα, εξασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ αποθήκευσης και κατανάλωσης (Salhotra et al., 2020; Katsimbri, 2017).

Η σημασία αυτής της λειτουργίας είναι θεμελιώδης τόσο για την ανάπτυξη όσο και για τη διατήρηση της υγείας του σκελετού. Επαρκής πρόσληψη και απορρόφηση ασβεστίου και φωσφόρου, σε συνδυασμό με την ορμονική ρύθμιση, εξασφαλίζουν την κανονική οστική μεταλλοποίηση, την επίτευξη μέγιστης οστικής μάζας και την αποφυγή διαταραχών όπως η οστεομαλακία ή η διαταραχή της φωσφορικής ισορροπίας (Μάρκου, 2005; Vannucci et al., 2018). Συνεπώς, η αποθήκευση ανόργανων στοιχείων στα οστά δεν περιορίζεται στη σκελετική σταθερότητα, αλλά αποτελεί βασικό στοιχείο της γενικότερης βιολογικής ισορροπίας του οργανισμού.



#### 2.4.4. Παραγωγή Αιμοσφαιρίων

Ο μυελός των οστών αποτελεί τον βασικό τόπο παραγωγής των αιμοσφαιρίων μέσω της διαδικασίας της αιμοποίησης. Στο εσωτερικό των μακρών και σπογγωδών οστών αναπτύσσεται ένας ιδιαίτερα εξειδικευμένος ιστός, όπου αιμοποιητικά αρχέγονα κύτταρα (hematopoietic stem cells – HSCs) έχουν την ικανότητα είτε να αυτοανανεώνονται είτε να διαφοροποιούνται σε εξειδικευμένους πρόδρομους κυττάρων. Από αυτούς τους προγόνους παράγονται όλες οι κύριες σειρές αίματος: τα ερυθρά αιμοσφαίρια που μεταφέρουν οξυγόνο, τα λευκά αιμοσφαίρια που στηρίζουν το ανοσοποιητικό σύστημα, καθώς και τα αιμοπετάλια που συμμετέχουν στην πήξη του αίματος (Charman & Zhang, 2023; Lucas, 2021).

Η οργάνωση του μυελού σε μικροπεριβάλλοντα (niches) είναι κρίσιμη για τη ρύθμιση αυτής της διαδικασίας. Τα μικροπεριβάλλοντα αυτά σχηματίζονται από αιμοποιητικά κύτταρα σε συνεργασία με στρωματικά κύτταρα, όπως οστεοβλάστες, ενδοθηλιακά κύτταρα και ινοβλάστες, τα οποία παρέχουν σήματα που καθορίζουν τη διατήρηση και διαφοροποίηση των HSCs. Ανάλογα με την ηλικία, η αιμοποίηση μεταβάλλεται χωρικά: στα παιδιά πραγματοποιείται κυρίως στις διάφουσες των μακρών οστών, ενώ στους ενήλικες επικεντρώνεται σε σπογγώδη οστά όπως οι σπόνδυλοι, τα πλευρά, το στέρνο και η λεκάνη (Leukaemia Foundation, 2025).

Υπάρχουν δύο τύποι μυελού: ο ερυθρός μυελός, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των αιμοσφαιρίων, και ο κίτρινος μυελός, που αποτελείται κυρίως από λιπώδη ιστό. Στην παιδική ηλικία, σχεδόν όλος ο μυελός είναι ερυθρός· με την πάροδο του χρόνου, μεγάλο μέρος του μετατρέπεται σε κίτρινο μυελό, αν και σε περιπτώσεις αυξημένης ανάγκης, ο κίτρινος μπορεί να επανενεργοποιηθεί και να συμμετάσχει ξανά στην αιμοποίηση (Bone Marrow, 2023). Η συνεχής παραγωγή δισεκατομμυρίων κυττάρων καθημερινά αποδεικνύει τη ζωτική σημασία του μυελού για τη διατήρηση της ομοιόστασης του αίματος και, κατ' επέκταση, για την ίδια τη ζωή.

#### 2.5. Υγεία και Διατήρηση των Οστών

Η οστική υγεία αποτελεί προϊόν μιας διαρκούς και δυναμικής ισορροπίας μεταξύ σχηματισμού και απορρόφησης οστού, η οποία διασφαλίζει τη μηχανική αντοχή, τη



μεταβολική λειτουργικότητα και τη δομική ακεραιότητα του σκελετού καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής (Katsimbri, 2017; Hart et al., 2020). Η διαδικασία αυτή επιτελείται μέσω της οστικής αναδιαμόρφωσης, ενός αυστηρά ρυθμισμένου κυτταρικού κύκλου που περιλαμβάνει την ενεργοποίηση, απορρόφηση, αντιστροφή, σχηματισμό και τερματισμό, με τη συμμετοχή των οστεοκλαστών, των οστεοβλαστών και των οστεοκυττάρων (Salhotra et al., 2020; Zhu & Zheng, 2021). Η ισορροπία μεταξύ των αναβολικών και καταβολικών αυτών κυττάρων είναι κρίσιμη για την αποφυγή παθολογικών καταστάσεων, όπως η οστεοπόρωση ή η οστεοπέτρωση, οι οποίες προκύπτουν από διαταραχές στη σύζευξη των φάσεων του κύκλου (Katsimbri, 2017).

Η επίτευξη της PBM, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μελλοντική ανθεκτικότητα του σκελετού και τον κίνδυνο εμφάνισης οστεοπορωτικών καταγμάτων, εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων (Loud & Gordon, 2006; Zhu & Zheng, 2021). Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται σε τροποποιήσιμους —όπως η διατροφή, η φυσική δραστηριότητα, η ορμονική ισορροπία και ο τρόπος ζωής— και μη τροποποιήσιμους —όπως η κληρονομικότητα, το φύλο και η φυλετική καταγωγή (Ackerman & Misra, 2011; Μάρκου, 2005). Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραμέτρων καθορίζει όχι μόνο την ποσότητα αλλά και την ποιότητα του οστικού ιστού που αποκτάται κατά την ανάπτυξη και διατηρείται στην ενήλικη ζωή.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα ενότητα εξετάζει τους βασικούς μηχανισμούς της οστικής αναδιαμόρφωσης και της κυτταρικής σύζευξης, καθώς και τους παράγοντες που επηρεάζουν την οστική υγεία, με στόχο την κατανόηση των βιολογικών, γενετικών, ορμονικών και περιβαλλοντικών επιδράσεων στη διαμόρφωση και διατήρηση ενός υγιούς και λειτουργικού σκελετού

### **2.5.1. Οστική Αναδιαμόρφωση**

Η οστική αναδιαμόρφωση (bone remodelling) είναι μια συνεχής, δυναμική διαδικασία μέσω της οποίας το οστό διατηρεί τη δομική ακεραιότητα, τη μηχανική αντοχή και την προσαρμοστική του ικανότητα στις μεταβαλλόμενες βιομηχανικές και μεταβολικές ανάγκες του οργανισμού. Σε αντίθεση με την οστική μοντελοποίηση (bone modelling), που αφορά κυρίως την αύξηση και την αρχική διαμόρφωση του σκελετού, η αναδιαμόρφωση λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής και έχει διπλό σκοπό: την ανανέωση παλαιού ή



μικροκατεστραμμένου ιστού και τη ρύθμιση της ομοιόστασης ασβεστίου και φωσφόρου στο αίμα (Katsimbri, 2017; Salhotra et al., 2020). Ο κύκλος της οστικής αναδιαμόρφωσης διασφαλίζει ότι το οστό παραμένει ανθεκτικό, λειτουργικό και μεταβολικά ενεργό, επιτρέποντας στο σκελετό να ανταποκρίνεται τόσο σε μηχανικά φορτία όσο και σε ορμονικά σήματα (Hart et al., 2020).

Ο κύκλος αυτός είναι ένας πολυδιάστατος και πολύπλοκος μηχανισμός απαραίτητος ώστε να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ υπερβολικής οστικής μάζας και αυξημένης ευθραυστότητας (Hart et al., 2020). Η αναδιαμόρφωση εκδηλώνεται μέσω στοχαστικών και ντετερμινιστικών μηχανισμών. Η στοχαστική αναδιαμόρφωση περιγράφει τυχαία ενεργοποιούμενες, μη εντοπισμένες χωρικά, μορφές αναγέννησης που οδηγούνται από το ενδοκρινικό σύστημα. Αντίθετα, η ντετερμινιστική αναδιαμόρφωση είναι μία στοχευμένη, ειδική ως προς τη θέση διεργασία αποκατάστασης, η οποία ξεκινά ως συνέπεια της μηχανικής καταπόνησης ή για την επιδιόρθωση βλάβης. Το οστό υφίσταται συνεχώς μικροβλάβες ως απόκριση σε μηχανικά φορτία, γεγονός που απαιτεί συντονισμένη κυτταρική δραστηριότητα για την αποτροπή της δομικής αποσταθεροποίησης (Hart et al., 2020).

Η αναδιαμόρφωση λαμβάνει χώρα εντός της Βασικής Πολυκυτταρικής Μονάδας (BMU), μιας προσωρινής δομής που αποτελείται από οστεοκλάστες, οστεοβλάστες, αγγειακή παροχή και συνδετικό ιστό. Οι BMU ακολουθούν την τυπική ακολουθία ενεργοποίηση-απορρόφηση-σχηματισμός-τερματισμός μέσω της ενσωμάτωσης οστεοκυττάρων-οστεοκλαστών-οστεοβλαστών.

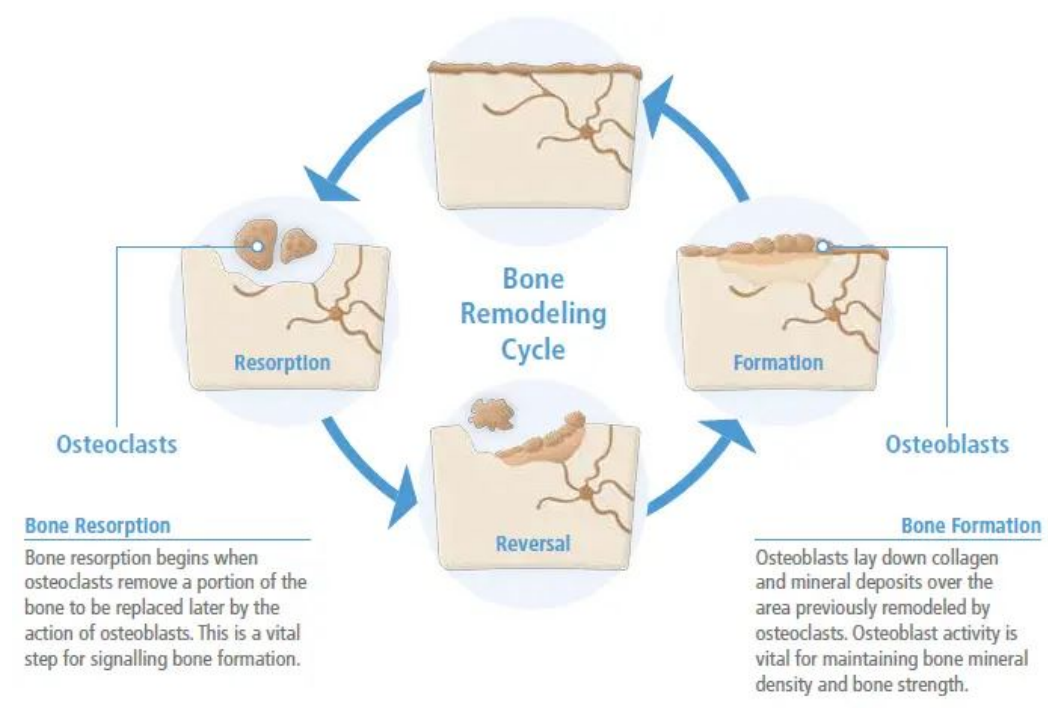
#### **2.5.1.1. Διαδικασία Οστικής Απορρόφησης και Σχηματισμού**

Όπως προαναφέρθηκε, η οστική αναδιαμόρφωση λαμβάνει χώρα εντός της Βασικής Πολυκυτταρικής Μονάδας (Basic Multicellular Unit, BMU). Η BMU εξασφαλίζει τη διαδοχική και συζευγμένη δράση των κυττάρων για την ανανέωση του οστικού ιστού. Ο κύκλος της αναδιαμόρφωσης ακολουθεί μια αυστηρά καθορισμένη, πενταφασική αλληλουχία: ενεργοποίηση – απορρόφηση - αντιστροφή – σχηματισμός - τερματισμός (Katsimbri, 2017).

Ο κύκλος ξεκινά με την Ενεργοποίηση (Activation), όπου τα οστεοκύτταρα (οι κυρίαρχοι μηχανο-αισθητήρες του οστού) ανιχνεύουν μικροβλάβες ή μεταβολικά σήματα.



Ακολουθεί η στρατολόγηση πρόδρομων μονοπύρηνων κυττάρων, η διαφοροποίησή τους σε οστεοκλάστες και η προσκόλλησή τους στην οστική επιφάνεια. Κατά τη φάση της Απορρόφησης (Resorption), οι ώριμοι οστεοκλάστες εκκρίνουν πρωτόνια, δημιουργώντας ένα εξαιρετικά όξινο μικροπεριβάλλον, το οποίο διαλύει την ανόργανη ύλη (υδροξυαπατίτης). Στη συνέχεια, εκκρίνουν ένζυμα (κυρίως την καθεψίνη Κ), διασπώντας την οργανική μήτρα. Η φάση αυτή εκτείνεται χρονικά σε 2 έως 4 εβδομάδες και καταλήγει στον σχηματισμό κοιλοτήτων, γνωστών ως *Howship's lacunae* (Katsimbri, 2017).



**Σχήμα 3.** Κύκλος οστικής αναδιαμόρφωσης και ρόλος οστεοκλαστών & οστεοβλαστών. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης.

Ακολουθεί η κρίσιμη φάση της Αντιστροφής (Reversal), όπου οι οστεοκλάστες υποβάλλονται σε απόπτωση και η κοιλότητα «καθαρίζεται». Το σημαντικότερο είναι ότι αυτή η φάση περιλαμβάνει την απελευθέρωση παραγόντων σύζευξης (coupling factors), όπως ο TGF- $\beta$  και ο IGF-1, οι οποίοι ήταν ενσωματωμένοι στην παλαιά οστική μήτρα. Αυτοί οι παράγοντες σηματοδοτούν την προσέλκυση και ενεργοποίηση των οστεοβλαστών (Salhotra et al., 2020). Στη φάση του Σχηματισμού (Formation), οι οστεοβλάστες συνθέτουν και εκκρίνουν νέα οργανική μήτρα (οστεοειδές), η οποία αργότερα μεταλλοποιείται με την εναπόθεση κρυστάλλων υδροξυαπατίτη. Αυτή η φάση είναι με τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, απαιτώντας 4 έως 6 μήνες (Katsimbri, 2017). Τέλος, η φάση



του Τερματισμού (Termination) ολοκληρώνεται όταν το νέο οστό έχει πλήρως σχηματιστεί και η επιφάνεια καλύπτεται από ανενεργά κύτταρα επένδυσης.

Ενώ ο κυτταρικός μηχανισμός είναι παρόμοιος, η αρχιτεκτονική της BMU διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του οστικού ιστού. Το φλοιώδες (cortical) οστό αναδιαμορφώνεται με χαμηλό ρυθμό (περίπου 3-5% ετησίως) μέσω σηράγγων, ενώ το δοκιδώδες (trabecular) οστό αναδιαμορφώνεται με ταχύτερο ρυθμό (περίπου 25-28% ετησίως) μέσω επιφανειακών τάφρων (Hart et al., 2020). Ο συνολικός αυτός κύκλος διασφαλίζει τη μηχανική αντοχή του σκελετού, οδηγώντας σε πλήρη αναγέννηση του οστικού ιστού περίπου κάθε 10 χρόνια.

### **2.5.1.2. Ισορροπία Οστεοβλαστών-Οστεοκλαστών**

Η ομοιόσταση του σκελετού εξαρτάται από την στενή, συντονισμένη ισορροπία μεταξύ της δραστηριότητας των οστεοκλαστών (κύτταρα απορρόφησης) και των οστεοβλαστών (κύτταρα σχηματισμού) (Hart et al., 2020). Ενώ οι οστεοβλάστες προέρχονται από μεσεγχυματικά πρόδρομα κύτταρα και είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή της κολλαγονώδους μήτρας και τη μεταλλοποίηση, οι οστεοκλάστες προέρχονται από την αιμοποιητική σειρά και εξειδικεύονται στη διάσπαση του οστικού ιστού (Salhotra et al., 2020).

Η αναδιαμόρφωση απαιτεί έναν συντονισμένο και διαδοχικά ενεργοποιούμενο κυτταρικό μηχανισμό για την αντικατάσταση του κατεστραμμένου οστού χωρίς απώλεια της μηχανικής ακεραιότητας, σε αντίθεση με την οστική μοντελοποίηση (Hart et al., 2020). Η επικοινωνία τους είναι στενά ρυθμισμένη από μοριακούς μεσολαβητές, με το σύστημα RANK/RANKL/OPG να αποτελεί το βασικό μονοπάτι ελέγχου της διαφοροποίησης και ενεργοποίησης των οστεοκλαστών. Συγκεκριμένα, η οστεοπροτεγερίνη (OPG) δρα ως ανασταλτικός παράγοντας, δεσμεύοντας το RANKL και περιορίζοντας τη δράση των οστεοκλαστών (Katsimbri, 2017). Παράλληλα, τα οστεοκύτταρα δρουν ως βασικοί ρυθμιστές, ανταποκρινόμενα σε μηχανικά φορτία με τη μείωση της σκληροστίνης και της DKK1, ενεργοποιώντας έτσι τους οστεοβλάστες για να προωθήσουν τον σχηματισμό οστού (Salhotra et al., 2020).

Η σύζευξη ολοκληρώνεται όταν οι οστεοκλάστες, κατά την απορρόφηση, απελευθερώνουν αυξητικούς παράγοντες (όπως TGF- $\beta$  και IGF-1) από την



αποσυντιθέμενη μήτρα, οι οποίοι λειτουργούν ως τοπικά σήματα για την προσέλκυση και ενεργοποίηση των οστεοβλαστών (Salhotra et al., 2020). Όταν ο σχηματισμός και η απορρόφηση βρίσκονται σε ισορροπία, το οστό διατηρείται υγιές. Αν όμως η απορρόφηση υπερσχύσει του σχηματισμού (αρνητικό ισοζύγιο), το αποτέλεσμα είναι η υποβάθμιση (degradation) της οστικής μάζας, με αποτέλεσμα την έκπτωση της μηχανικής αντοχής του οστού. Αυτή η ανισορροπία είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα της οστεοπόρωσης, όπου η απώλεια οστού αυξάνεται λόγω παραγόντων όπως η γήρανση ή η μείωση των οιστρογόνων (Katsimbri, 2017). Αντίστοιχα, η απουσία ή η υπερφόρτιση μηχανικών φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε καθαρή απορροφητική δραστηριότητα, καθώς η διατήρηση της λεπτής αυτής ισορροπίας είναι ζωτικής σημασίας για την οστική υγεία (Hart et al., 2020).

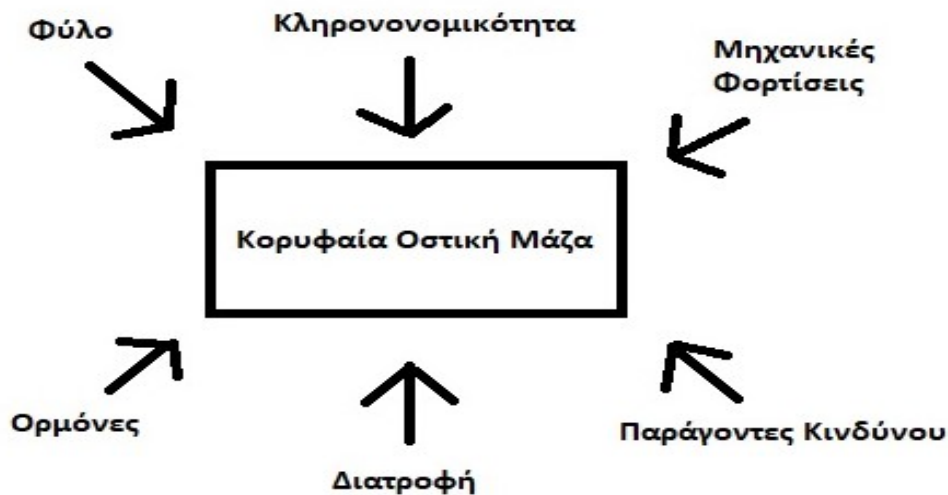
### **2.5.2. Παράγοντες που Επηρεάζουν την Υγεία των Οστών**

Η υγεία και η αντοχή του σκελετού εξαρτώνται από ένα πολυδιάστατο σύστημα παραγόντων, στο οποίο περιλαμβάνονται βιολογικοί, γενετικοί, ορμονικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες, οι οποίοι αλληλεπιδρούν σε όλα τα στάδια της ζωής (Zhu & Zheng, 2021). Ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, η οστική ανάπτυξη παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία, καθώς κατά την περίοδο αυτή επιτυγχάνεται η PBM, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μακροχρόνια σκελετική ανθεκτικότητα και τη μελλοντική προδιάθεση σε οστεοπορωτικές παθήσεις (Hart et al., 2020; Ackerman & Misra, 2011).

Η επίτευξη της PBM επηρεάζεται τόσο από τροποποιήσιμους παράγοντες, όπως η διατροφή, ο τρόπος ζωής και η φυσική δραστηριότητα, όσο και από μη τροποποιήσιμους παράγοντες, όπως η κληρονομικότητα και το ενδοκρινολογικό περιβάλλον. Η διατροφή παρέχει τα απαραίτητα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά συστατικά για τη σύνθεση και μεταλλοποίηση των οστών, ενώ οι ορμόνες ρυθμίζουν την δυναμική ισορροπία μεταξύ σχηματισμού και απορρόφησης οστού, επηρεάζοντας την ταχύτητα ανάπτυξης και τη μακροχρόνια σταθερότητα του σκελετού. Παράλληλα, η γενετική προδιάθεση καθορίζει το μέγιστο δυναμικό οστικής μάζας, ενώ ο τρόπος ζωής μπορεί να ενισχύσει ή να μειώσει την έκφραση αυτών των παραγόντων μέσω τροποποιήσιμων συνήθειων, όπως η



σωματική δραστηριότητα, οι διατροφικές επιλογές, η έκθεση σε επιβλαβείς ουσίες και η κοινωνικοοικονομική κατάσταση (Zhu & Zheng, 2021; Kirk et al., 2020).



**Σχήμα 4.** Παράγοντες που επηρεάζουν την επίτευξη της Κορυφαίας Οστικής Μάζας. Προσαρμογή από Rizzoli et al.(2010).

Η παρούσα ενότητα εξετάζει διεξοδικά τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία των οστών, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η διατροφή, οι ορμόνες, η κληρονομικότητα και οι παράγοντες του τρόπου ζωής συνδυάζονται και διαμορφώνουν τη μέγιστη οστική μάζα, τη σκελετική αντοχή και την ευαισθησία σε οστικά νοσήματα.

#### 2.5.2.1. Διατροφή

Η διατροφή αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την υγεία και την ανάπτυξη των οστών, ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη οστική μάζα. Η επαρκής πρόσληψη μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών καθορίζει όχι μόνο τον ρυθμό ανάπτυξης του σκελετού αλλά και τη μελλοντική ανθεκτικότητα των οστών απέναντι σε καταπονήσεις και παθήσεις, όπως η οστεοπόρωση (Proia et al., 2021).

Οι πρωτεΐνες αποτελούν βασικό δομικό συστατικό της οστικής μήτρας, ενώ συμβάλλουν και στην απορρόφηση ασβεστίου και στη ρύθμιση παραγόντων όπως ο IGF-1. Επαρκής πρόσληψη πρωτεΐνης, υπό την προϋπόθεση επαρκούς ενεργειακής πρόσληψης, έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει την οστική μάζα, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με



φυσική δραστηριότητα. Ωστόσο, η υπερβολική κατανάλωση, ειδικά από ζωικές πηγές σε συνθήκες χαμηλής πρόσληψης ασβεστίου, ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την οστική υγεία, ιδιαίτερα στα κορίτσια (Proia et al., 2021).

Το ασβέστιο και η βιταμίνη D αποτελούν τους πιο σημαντικούς μικροθρεπτικούς παράγοντες για τη σκελετική υγεία. Το ασβέστιο είναι απαραίτητο για την οστική μεταλλοποίηση, ενώ η βιταμίνη D ρυθμίζει την απορρόφηση και την ομοιόστασή του. Οι ανάγκες σε ασβέστιο αυξάνονται κατά την εφηβεία, φτάνοντας τα 1200–1500 mg ημερησίως, ενώ η ανεπάρκεια βιταμίνης D συνδέεται με μειωμένη οστική μάζα και αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων (Ackerman & Misra, 2011; Loud & Gordon, 2006; Zhu & Zheng, 2021). Παρά τη σημασία τους, μελέτες δείχνουν ότι μεγάλος αριθμός εφήβων δεν καλύπτει τις συνιστώμενες ποσότητες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη σωστή διατροφική εκπαίδευση (Gordon, 2000).

Τα λιπαρά και οι υδατάνθρακες έχουν επίσης σημαντικό ρόλο. Διατροφή πλούσια σε κορεσμένα λίπη και ζάχαρη μειώνει την απορρόφηση του ασβεστίου και σχετίζεται με χαμηλότερη οστική πυκνότητα, ενώ η κατανάλωση πολυακόρεστων λιπαρών (π.χ. ωμέγα-3) έχει συσχετιστεί με μειωμένη οστική απορρόφηση και ενίσχυση του σχηματισμού νέου οστού (Proia et al., 2021). Οι υδατάνθρακες από φρούτα και λαχανικά διευκολύνουν την απορρόφηση ασβεστίου μέσω οργανικών οξέων που προκύπτουν από τη βακτηριακή ζύμωση στο παχύ έντερο, συμβάλλοντας στην αύξηση της οστικής μάζας.

Τέλος, η ισορροπημένη και ποιοτική διατροφή έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την εφηβεία. Η έλλειψη θερμίδων ή βασικών θρεπτικών συστατικών – όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις κακής διατροφής, ανορεξίας ή χρόνιων παθήσεων με δυσαπορρόφηση – οδηγεί σε μειωμένη οστική ανάπτυξη και αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων (Μάρκου, 2005; Zhu & Zheng, 2021). Για τον λόγο αυτό, η διατροφή πρέπει να συνδυάζει επαρκείς ποσότητες πρωτεϊνών, ασβεστίου, βιταμίνης D, καθώς και άλλων μικροθρεπτικών συστατικών όπως μαγνήσιο, ψευδάργυρο και βιταμίνες A και C, ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή ανάπτυξη και μακροχρόνια υγεία των οστών.



### 2.5.2.2. Ορμόνες

Οι ορμόνες αποτελούν τον κεντρικό ρυθμιστικό μηχανισμό της ομοιόστασης του οστικού ιστού, διαμορφώνοντας καθοριστικά την οστική πυκνότητα και ακεραιότητα καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής. Το ενδοκρινολογικό σύστημα συντονίζει τη δραστηριότητα των οστεοβλαστών και των οστεοκλαστών, διασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ οστικής απορρόφησης και σχηματισμού, με κύριο στόχο τη διατήρηση της ασβεστοφωσφορικής ισορροπίας (Hart et al., 2020). Η σωστή λειτουργία αυτής της ρύθμισης είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, όπου συντελείται η μέγιστη οστική συσσώρευση, με την ενδοκρινική ρύθμιση να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιοτική και ποσοτική εξέλιξή της.

Ανάμεσα στις σημαντικότερες ορμόνες για την οστική υγεία συγκαταλέγονται τα οιστρογόνα και τα ανδρογόνα, που δρουν ως βασικοί ρυθμιστές της οστικής αναδιαμόρφωσης. Τα οιστρογόνα μειώνουν τη δραστηριότητα των οστεοκλαστών, περιορίζοντας την οστική απορρόφηση, ενώ παράλληλα αυξάνουν την επιβίωση και τη λειτουργικότητα των οστεοβλαστών, ενισχύοντας τη σύνθεση νέου οστού (Hart et al., 2020). Η μείωση των οιστρογόνων, όπως συμβαίνει φυσιολογικά κατά την εμμηνόπαυση ή παθολογικά σε καταστάσεις υποοιστρογονισμού, οδηγεί σε αύξηση της οστικής απώλειας και πτώση της οστικής πυκνότητας, αυξάνοντας τον κίνδυνο οστεοπενίας και οστεοπόρωσης (Saggese et al., 2002). Επιπλέον, νεότερα δεδομένα υποδεικνύουν ότι τα οιστρογόνα είναι απαραίτητα και στους άνδρες, καθώς η έλλειψη υποδοχέων οιστρογόνων μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στη σύγκλιση των επιφύσεων και μείωση της οστικής μάζας, παρά τα φυσιολογικά επίπεδα τεστοστερόνης (Ackerman & Misra, 2011).

Η τεστοστερόνη συμβάλλει στην οστική υγεία τόσο έμμεσα όσο και άμεσα. Έμμεσα, μετατρέπεται σε οιστραδιόλη, η οποία συμμετέχει στη ρύθμιση της οστικής αναδιαμόρφωσης, ενώ άμεσα διεγείρει την περιοστική οστική εναπόθεση (periosteal bone apposition), αυξάνοντας το μέγεθος και τη μηχανική αντοχή του οστού (Ackerman & Misra, 2011). Ο ρόλος των ανδρογόνων είναι ιδιαίτερα σημαντικός κατά την εφηβεία, όπου προάγουν την επιταχυνόμενη σκελετική ανάπτυξη, αλλά και τη διατήρηση της οστικής ανθεκτικότητας στην ενήλικη ζωή.



Η ΡΤΗ και η βιταμίνη D αποτελούν τους κύριους ρυθμιστές της ασβεστοφωσφορικής ομοιόστασης. Η ΡΤΗ δρα αυξάνοντας τα επίπεδα ασβεστίου στο αίμα μέσω ενεργοποίησης των οστεοκλαστών, ενίσχυσης της επαναρρόφησης ασβεστίου από τους νεφρούς και διέγερσης της σύνθεσης της ενεργού μορφής της βιταμίνης D [1,25(OH)<sub>2</sub>D]. Η βιταμίνη D, από την πλευρά της, προάγει την απορρόφηση ασβεστίου και φωσφόρου από το έντερο και υποστηρίζει την οστική ενασβεστίωση, διασφαλίζοντας την ορθή μεταλλοποίηση της θεμέλιας ουσίας (Zhu & Zheng, 2021). Η έλλειψή της μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές όπως η ραχίτιδα στα παιδιά και η οστεομαλακία στους ενήλικες. Αντίθετα, η καλσιτονίνη, που εκκρίνεται από τον θυρεοειδή αδένα, δρα ανασταλτικά στους οστεοκλάστες, συμβάλλοντας στη μείωση της οστικής απορρόφησης και στη σταθεροποίηση των επιπέδων ασβεστίου.

Εξίσου σημαντικό ρόλο στη σκελετική ανάπτυξη κατέχουν η αυξητική ορμόνη (GH) και ο ινσουλινοειδής αυξητικός παράγοντας (IGF-I), που αποτελούν τους βασικούς ρυθμιστές της οστικής αύξησης μετά τη γέννηση. Οι δύο αυτοί παράγοντες ενισχύουν τη σύνθεση κολλαγόνου, προάγουν τη διαφοροποίηση των οστεοβλαστών και εντείνουν την οστική ανάπτυξη (Kindler et al., 2015). Ο IGF-I, ειδικότερα, αυξάνεται σημαντικά κατά την ήβη, καθιστώντας τη μια από τις σημαντικότερες ορμόνες για την ανάπτυξη του φλοιώδους οστού. Η ανεπαρκής έκκριση GH έχει συσχετιστεί με μειωμένο οστικό σχηματισμό και χαμηλή οστική πυκνότητα (Zhu & Zheng, 2021). Παράλληλα, έχει διαπιστωθεί ότι η δράση του IGF-I συνδέεται στενά με τη μυϊκή μάζα, γεγονός που υποδεικνύει έναν αμφίδρομο μηχανισμό αλληλεπίδρασης μεταξύ μυός και οστού (Kindler et al., 2015).

Τέλος, η ορμονική ρύθμιση του ενεργειακού ισοζυγίου ασκεί έμμεση αλλά ουσιαστική επίδραση στην οστική υγεία. Η κορτιζόλη, σε υπερβολικά επίπεδα, είτε λόγω παρατεταμένου στρες είτε χρήσης κορτικοστεροειδών, έχει καταβολική δράση, μειώνοντας τη δραστηριότητα των οστεοβλαστών και αυξάνοντας την αποδόμηση του οστού μέσω ενίσχυσης του συστήματος RANK/RANKL/OPG (Zhu & Zheng, 2021). Αντίθετα, η λεπτίνη και η γκρελίνη, ορμόνες που ρυθμίζουν την όρεξη και τον μεταβολισμό, επηρεάζουν την οστική αναδιαμόρφωση τόσο κεντρικά (μέσω του υποθαλάμου) όσο και τοπικά. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι σε γυναίκες αθλήτριες υψηλής έντασης, οι μηχανικές



φορτίσεις φαίνεται να αντισταθμίζουν τις αρνητικές επιδράσεις των χαμηλών επιπέδων λεπτίνης που σχετίζονται με ενεργειακό έλλειμμα (Jürimäe et al., 2018).

Συνοψίζοντας, η ορμονική ισορροπία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη, τη συντήρηση και την ανανέωση του οστικού ιστού. Οι διαταραχές των ενδοκρινικών αδένων —όπως ο υπογοναδισμός, η υπερκορτιζολαιμία ή ο διαβήτης τύπου 1— επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στη σκελετική ομοιόσταση, μειώνοντας την οστική μάζα και αυξάνοντας τον κίνδυνο οστεοπενίας και οστεοπόρωσης. Η διατήρηση της φυσιολογικής ενδοκρινικής λειτουργίας επομένως αποτελεί προϋπόθεση για τη μέγιστη επίτευξη και διατήρηση της PBM και της συνολικής υγείας του σκελετού (Hart et al., 2020; Ackerman & Misra, 2011; Kindler et al., 2015; Zhu & Zheng, 2021; Jürimäe et al., 2018).

### 2.5.2.3. Κληρονομικότητα

Η κληρονομικότητα αποτελεί τον σημαντικότερο μη τροποποιήσιμο παράγοντα που επηρεάζει τη δομή, την πυκνότητα και τη γεωμετρία του οστού, θέτοντας τα γενετικά όρια εντός των οποίων δρουν οι περιβαλλοντικοί και ορμονικοί ρυθμιστές της οστικής υγείας. Πλήθος μελετών σε δίδυμα και οικογένειες καταδεικνύουν ότι η συντριπτική πλειονότητα της διακύμανσης στην Ο.Π. αποδίδεται σε κληρονομικούς και πολυγονιδιακούς παράγοντες, με τις εκτιμήσεις της κληρονομησιμότητας να κυμαίνονται από 50% έως 85% (Loud & Gordon, 2006; Zhu & Zheng, 2021). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το γενετικό υπόβαθρο κάθε ατόμου προκαθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μέγιστη οστική αντοχή και το μέγιστο δυναμικό επίτευξης της PBM, ενώ οι περιβαλλοντικοί και ορμονικοί παράγοντες επιδρούν κυρίως στη βελτιστοποίηση ή στην αναστολή αυτής της γενετικής προδιάθεσης.

Η διαμόρφωση της Ο.Π. δεν εξαρτάται από ένα μόνο γονίδιο, αλλά από την πολυσύνθετη αλληλεπίδραση πολλών γενετικών παραλλαγών. Πολυμορφισμοί σε γονίδια-κλειδιά, όπως του υποδοχέα της βιταμίνης D (VDR), του υποδοχέα των οιστρογόνων (ESR1), του κολλαγόνου τύπου I, του υποδοχέα PPAR $\gamma$ , καθώς και του αυξητικού παράγοντα IGF-I και του μετασηματιστικού αυξητικού παράγοντα TGF- $\beta$ , έχουν συσχετιστεί με τις διακυμάνσεις της Ο.Π. (Loud & Gordon, 2006; Μάρκου, 2005). Επιπλέον, σύγχρονες γονιδιωματικές μελέτες (GWAS) έχουν επιβεβαιώσει ότι πολυμορφισμοί σε γονίδια των μονοπατιών WNT και RANK/RANKL/OPG —όπως τα LRP5, WNT16 και SP7— σχετίζονται σημαντικά με την Ο.Π. τόσο σε παιδιά όσο και σε ενήλικες,



υποδηλώνοντας ότι οι γενετικοί αυτοί μηχανισμοί επηρεάζουν τη σκελετική ανάπτυξη καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής (Zhu & Zheng, 2021). Η ύπαρξη κοινών γενετικών τόπων μεταξύ παιδικής και ενήλικης ηλικίας ενισχύει την άποψη ότι οι γενετικές επιρροές στην Ο.Π. είναι διαχρονικές, με ενδεχόμενες διαφοροποιήσεις ως προς το φύλο και την ήβη.

Παράλληλα, η κληρονομικότητα εκδηλώνεται και μέσω φυλετικών διαφορών. Μελέτες δείχνουν ότι τα άτομα αφρικανικής καταγωγής παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέγιστη Ο.Π. σε σχέση με τους λευκούς, γεγονός που αποδίδεται κυρίως σε παχύτερες δοκίδες και αυξημένο πάχος του φλοιώδους οστού (Μάρκου, 2005). Οι διαφορές αυτές δεν αφορούν μόνο τη δομή του σκελετού, αλλά και τη δυναμική ανάπτυξης των επιμέρους τμημάτων του — για παράδειγμα, η ανάπτυξη των κάτω άκρων πριν την ήβη εξαρτάται περισσότερο από την αυξητική ορμόνη (GH), ενώ η επιτάχυνση της σπονδυλικής ανάπτυξης κατά την εφηβεία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δράση των οιστρογόνων, ακόμη και στους άνδρες (Μάρκου, 2005). Οι παρατηρούμενες διαφυλετικές διαφορές υπογραμμίζουν ότι η γενετική βάση της οστικής ανάπτυξης αλληλεπιδρά στενά με το ορμονικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο.

Επιπρόσθετα, οι γενετικές μεταλλάξεις αποτελούν τη βάση για τις μεταβολικές οστικές νόσους, οι οποίες μπορεί να προκύπτουν είτε από μονογονιδιακές διαταραχές (όπου μία μετάλλαξη σε γονίδιο με υψηλή διεισδυτικότητα προκαλεί τη νόσο), είτε από πολυγονιδιακές ή ολιγονιδιακές καταστάσεις, στις οποίες εμπλέκονται πολλαπλά γονίδια και περιβαλλοντικοί παράγοντες (Oton-Gonzalez et al., 2022). Αυτές οι μεταβολικές παθήσεις, όπως η οστεοπόρωση, η ραχίτιδα και η οστεομαλακία, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα πολυπαραγοντικών νοσημάτων στα οποία η κληρονομική προδιάθεση συνδυάζεται με εξωγενείς επιδράσεις (π.χ. διατροφικές ελλείψεις, ορμονικές διαταραχές).

Τέλος, η επιγενετική συμβάλλει καθοριστικά στη ρύθμιση του οστικού μεταβολισμού και της έκφρασης των γονιδίων που εμπλέκονται στην αναδιαμόρφωση του οστού. Μηχανισμοί όπως η μεθυλίωση του DNA και τα μη-κωδικοποιητικά RNA (micro-RNAs, lncRNAs, circRNAs) μπορούν να επηρεάσουν τη δραστηριότητα των οστεοβλαστών και οστεοκλαστών χωρίς να αλλάζουν τη γονιδιακή αλληλουχία (Oton-Gonzalez et al., 2022). Οι επιγενετικοί αυτοί μηχανισμοί λειτουργούν ως διαμεσολαβητές μεταξύ γενετικής προδιάθεσης και περιβαλλοντικών παραγόντων, εξηγώντας γιατί άτομα με



παρόμοιο γενετικό υπόβαθρο μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα Ο.Π. ανάλογα με τη διατροφή, την ορμονική κατάσταση ή τη φυσική δραστηριότητα.

Συνολικά, η κληρονομικότητα θέτει τα θεμέλια και τα όρια της οστικής υγείας, αλλά η πλήρης έκφραση των γενετικών αυτών παραγόντων εξαρτάται από την πολυσύνθετη αλληλεπίδραση με ορμονικούς, περιβαλλοντικούς και επιγενετικούς ρυθμιστές, που διαμορφώνουν τελικά την οστική αντοχή και τον κίνδυνο ανάπτυξης οστεοπορωτικών νοσημάτων.

#### **2.5.2.4. Τρόπος ζωής**

Ο τρόπος ζωής αποτελεί καθοριστικό παράγοντα που διαμορφώνει την ανάπτυξη και διατήρηση της οστικής μάζας, καθώς επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία των οστεοβλαστών και των οστεοκλαστών, την μυϊκή δύναμη και τη μηχανική φόρτιση των οστών, αλληλεπιδρώντας παράλληλα με τη γενετική προδιάθεση και τις ορμονικές επιδράσεις (Zhu & Zheng, 2021). Κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, οι τροποποιήσιμοι παράγοντες του τρόπου ζωής, όπως η διατροφή και η φυσική δραστηριότητα, ασκούν καθοριστική επίδραση στην ποιοτική εξέλιξη του σκελετού και στη μελλοντική του ανθεκτικότητα.

Η σύνθεση σώματος αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την οστική ανάπτυξη. Η άλιπη μάζα (lean mass) θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της οστικής αντοχής, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη μυϊκή δύναμη και την μηχανική φόρτιση των οστών (Zhu & Zheng, 2021). Παρόλο που η συνολική οστική αντοχή μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε υπέρβαρα άτομα, η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στη μεταβολή της άλιπης μάζας και όχι στη λιπώδη μάζα (fat mass). Η υπερβολική λιπώδης μάζα μπορεί, αντίθετα, να μειώσει την οστική αντοχή σε σημεία που φέρουν βάρος. Επιπλέον, η χρόνια ενεργειακή περίσσεια προκαλεί συσσώρευση λιπιδίων στον μυελό των οστών, προκαλώντας λιποτοξική επίδραση στα οστικά κύτταρα και χρόνια χαμηλού βαθμού φλεγμονή (low-grade inflammation, LGI), με αποτέλεσμα την περαιτέρω απώλεια οστικής αντοχής (Kirk et al., 2020).

Η ορμόνη λεπτίνη, που εκκρίνεται από τον λιπώδη ιστό, εμφανίζει πολύπλοκη δράση στην οστική βιολογία. Μπορεί να προάγει τη διαφοροποίηση των μεσεγχυματικών κυττάρων μυελού σε οστεοβλάστες, ενισχύοντας τη σχηματοποίηση των οστών, ενώ μέσω



της ενεργοποίησης της συμπαθητικής οδού και του συστήματος RANKL/RANK/OPG μπορεί να ενισχύσει την οστική απορρόφηση (Zhu & Zheng, 2021).

Οι επιβλαβείς συνήθειες, όπως το κάπνισμα και η υπερβολική κατανάλωση αλκοόλ, έχουν τεκμηριωμένη αρνητική επίδραση στην απόκτηση της PBM. Η νικοτίνη και άλλες τοξικές ουσίες στο κάπνισμα μειώνουν την απορρόφηση θρεπτικών ουσιών και αυξάνουν την οξίνιση του αίματος, οδηγώντας σε διάλυση των οστών (Zhu & Zheng, 2021; Sheng et al., 2021). Μελέτες σε εφήβους έχουν δείξει σημαντική συσχέτιση του καπνίσματος με χαμηλότερη οστική πυκνότητα (aBMD) και μειωμένο ρυθμό αύξησής της. Η επίδραση της κατανάλωσης αλκοόλ εξαρτάται από τη διάρκεια και την ποσότητα: η χρόνια και βαριά χρήση καταστέλλει τη διαφοροποίηση των οστεοβλαστών, προκαλεί υποσιτισμό και διαταράσσει την ορμονική ισορροπία, περιλαμβάνοντας μείωση της βιταμίνης D, των οιστρογόνων και της αυξητικής ορμόνης (Sheng et al., 2021). Αντίθετα, η σχέση της μέτριας κατανάλωσης αλκοόλ ή του καφέ με την οστική υγεία παραμένει ασαφής, ενώ η τακτική κατανάλωση τσαγιού φαίνεται να σχετίζεται θετικά με την οστική πυκνότητα, πιθανώς λόγω της περιεκτικότητάς του σε αντιοξειδωτικά φλαβονοειδή (Sheng et al., 2021).

Οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες και η χρήση φαρμάκων αποτελούν επιπρόσθετους παράγοντες που επηρεάζουν την οστική υγεία. Το κοινωνικοοικονομικό πλεονέκτημα κατά την παιδική ηλικία συνδέεται με υψηλότερη οστική αντοχή στην ενήλικη ζωή, ανεξάρτητα από τη μετέπειτα οικονομική κατάσταση (Zhu & Zheng, 2021). Ορισμένα φάρμακα, όπως τα γλυκοκορτικοειδή, οι αναστολείς αντλίας πρωτονίων (PPIs) και η ηπαρίνη, μπορεί να προκαλέσουν δευτερογενή οστεοπόρωση. Οι PPIs μειώνουν την απορρόφηση ασβεστίου, ενώ η ηπαρίνη ενισχύει την οστική απορρόφηση μέσω της αλληλεπίδρασης με την οστεοπροτεγερίνη (Zhu & Zheng, 2021).

Επιπλέον, η φυσική δραστηριότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τροποποιήσιμους παράγοντες για την επίτευξη και διατήρηση της μέγιστης οστικής μάζας. Μέσω της μηχανικής φόρτισης, ενισχύει τη λειτουργία των οστεοκυττάρων και προάγει τον σχηματισμό νέου οστού, ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία. Η επίδραση της άσκησης στην οστική υγεία αναλύεται διεξοδικά στην επόμενη ενότητα.

## **2.6. Οστική Πυκνότητα και Άσκηση: Μηχανισμοί, Παρεμβάσεις και Αξιολόγηση**



Η άσκηση αποτελεί τον ισχυρότερο φυσιολογικό παράγοντα που επηρεάζει την οστική υγεία, καθώς η μηχανική φόρτιση που προκύπτει από τη μυϊκή δραστηριότητα διεγείρει την οστεογένεση και ενισχύει την αντοχή του σκελετού. Σύμφωνα με τη θεωρία του «μηχανοστάτη», το οστό προσαρμόζεται στα μηχανικά φορτία που δέχεται, με αποτέλεσμα η συστηματική εφαρμογή κατάλληλων ερεθισμάτων να οδηγεί σε αύξηση της οστικής μάζας και βελτίωση της μικροαρχιτεκτονικής του (Frost, 2003; Rauch & Schoenau, 2001). Η φύση και η ένταση των ερεθισμάτων καθορίζουν την προσαρμοστική απάντηση: δραστηριότητες υψηλής πρόσκρουσης, πλειομετρικές ασκήσεις και προπόνηση με αντιστάσεις έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην αύξηση της οστικής πυκνότητας, ενώ η αερόβια άσκηση χαμηλής έντασης φαίνεται να έχει περιορισμένη επίδραση (Kohrt et al., 2004; Nikander et al., 2010).

Οι παρεμβάσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της οστικής υγείας μέσω της άσκησης πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τις αρχές της προπονητικής επιβάρυνσης, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση, τη διάρκεια, τη συχνότητα και το είδος της δραστηριότητας. Πολυδιάστατα προγράμματα που συνδυάζουν αντιστάσεις, άλματα και δραστηριότητες με πρόσκρουση έχουν αναδειχθεί ως ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την πρόληψη της οστικής απώλειας και την ενίσχυση της κορυφαίας οστικής μάζας (Weaver et al., 2016). Η εφαρμογή τέτοιων προγραμμάτων είναι κρίσιμη τόσο σε παιδιά και εφήβους, όπου η οστική ανάπτυξη βρίσκεται σε εξέλιξη, όσο και σε ενήλικες και ηλικιωμένους, όπου η άσκηση μπορεί να επιβραδύνει την απώλεια οστικής μάζας και να μειώσει τον κίνδυνο καταγμάτων.

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων απαιτεί τη χρήση σύγχρονων μεθόδων μέτρησης της οστικής πυκνότητας και της ποιότητας του οστού. Η διπλής ενεργειακής ακτινοβολίας απορροφησιομετρία (DXA) παραμένει η μέθοδος αναφοράς, ενώ η ποσοτική υπολογιστική τομογραφία (QCT/ρQCT) και η ποσοτική υπερηχογραφία (QUS) προσφέρουν συμπληρωματικές πληροφορίες για τη γεωμετρία και τη μικροαρχιτεκτονική του σκελετού (Gilsanz, 1998; Briot, 2013; Hart et al., 2020). Παράλληλα, οι βιοχημικοί δείκτες οστικής ανακατασκευής επιτρέπουν την εκτίμηση της δυναμικής του σχηματισμού και της απορρόφησης του οστού, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της σκελετικής προσαρμογής (Hart et al., 2020). Ο συνδυασμός

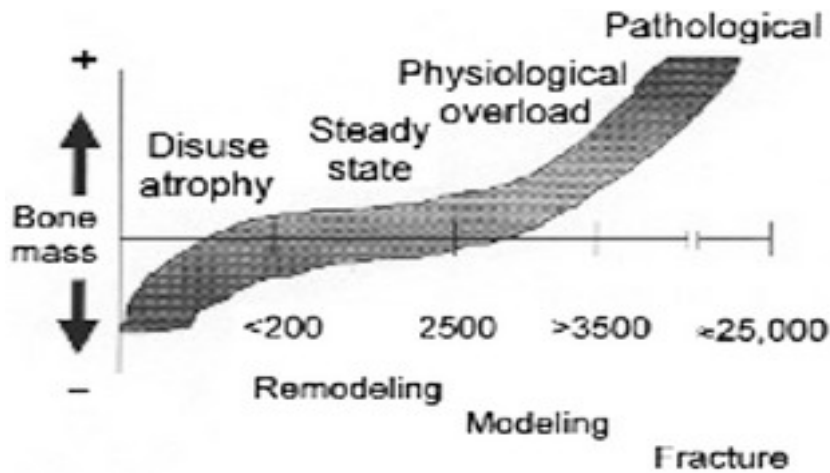


απεικονιστικών και βιοχημικών μεθόδων είναι απαραίτητος για την πλήρη κατανόηση των επιδράσεων της άσκησης στην οστική υγεία.

### **2.6.1. Μηχανισμοί της Φυσικής Δραστηριότητας στην Οστική Υγεία**

Η φυσική δραστηριότητα αποτελεί τον κυρίαρχο τροποποιήσιμο παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη και τη διατήρηση της σκελετικής υγείας. Η οστική απόκτηση, ιδίως κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, αποτελεί τον ισχυρότερο προγνωστικό δείκτη για την ποσοτική ενίσχυση της οστικής μάζας, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τον μελλοντικό κίνδυνο εμφάνισης οστεοπόρωσης (Loud & Gordon, 2006; Proia et al., 2021). Δραστήρια άτομα εμφανίζουν υψηλότερη Ο.Π. και μειωμένο κίνδυνο κατάγματος, γεγονός που καθιστά την άσκηση αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής πρόληψης.

Η σύνδεση μεταξύ μηχανικών φορτίων και οστικής προσαρμογής περιγράφεται από τη θεωρία του Mechanostat και τον Νόμο του Wolff. Το οστό λειτουργεί ως ένα σύστημα αρνητικής ανάδρασης που προσαρμόζει τη μάζα και τη γεωμετρία του ώστε να αντισταθεί στην τάση και την παραμόρφωση που προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις (Schoenau & Fricke, 2008). Οι οστεοκλάστες και οι οστεοβλάστες διεγείρονται από αυτά τα μηχανικά ερεθίσματα ώστε να αναδιαμορφώσουν και να εναποθέσουν νέα οστική μήτρα κατά τρόπο τοπικό και κατευθυνόμενο (Schofield & Hecht, 2012). Είναι κρίσιμο να τονιστεί ότι οι μέγιστες δυνάμεις φόρτισης προέρχονται κυρίως από τις δυναμικές μυϊκές συσπάσεις και όχι από τη βαρύτητα, γεγονός που υπογραμμίζει την εγγενή σχέση μυός-οστού. Αντίστοιχα, η αποφόρτιση (π.χ. ακινητοποίηση ή καθιστικός τρόπος ζωής) οδηγεί σε μειωμένη μυϊκή ανάπτυξη και σε αρνητική επίδραση σε όλους τους οστικούς παραμέτρους (Schoenau & Fricke, 2008).



**Σχήμα 5.** Η θεωρία του μηχανοστάτη του Φροστ και η επίδραση του μηχανικού φορτίου στη μάζα του οστού. Πηγή: Chang et al. (2013).

Για να είναι οστεογονικό το μηχανικό ερέθισμα, πρέπει να υπερβεί το κατώτατο όριο ενεργοποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται όταν το ερέθισμα είναι υψηλής έντασης, γρήγορης εφαρμογής και ασυνήθιστο για τον σκελετό (Zhu & Zheng, 2021). Η ένταση είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, με τις βέλτιστες δυνάμεις αντίδρασης εδάφους να κυμαίνονται από 3.5 έως 8.8 φορές το σωματικό βάρος (Proia et al., 2021). Αντίθετα, η διάρκεια του ερεθίσματος θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας, αρκεί να επιτευχθεί το απαραίτητο κατώτατο όριο κύκλων φόρτισης. Λόγω αυτών των απαιτήσεων, οι πλειομετρικές ασκήσεις, που χαρακτηρίζονται από γρήγορες, δυναμικές κινήσεις και υψηλές δυνάμεις κρούσης, αποτελούν μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μορφή οστεογονικής παρέμβασης (Gómez-Bruton et al., 2017). Τυχαίες ελεγχόμενες δοκιμές έχουν δείξει ότι ακόμη και σύντομες παρεμβάσεις άλματος είναι αποτελεσματικές στην αύξηση της Ο.Π. σε παιδιά και εφήβους (Proia et al., 2021; Zhu & Zheng, 2021).

Ενώ η οστική προσαρμογή είναι κυρίως μηχανική, η λειτουργία του μηχανοστάτη ρυθμίζεται από το ενδοκρινές-μεταβολικό περιβάλλον. Ορμονικοί παράγοντες, όπως τα οιστρογόνα, η τεστοστερόνη και ο IGF-I, καθορίζουν την ευαισθησία του οστού στη μηχανική φόρτιση (Schoenau & Fricke, 2008; Eliakim & Beyth, 2003). Η υπερβολική αθλητική δραστηριότητα, ιδιαίτερα σε αθλητές αντοχής, όταν συνδυάζεται με ανεπαρκή ενεργειακή διαθεσιμότητα, μπορεί να οδηγήσει σε υπογοναδισμό. Αυτή η ορμονική διαταραχή μειώνει την ευαισθησία του οστού, αυξάνοντας το κατώτατο όριο που



απαιτείται για την προσαρμογή, με συνέπεια τη μειωμένη Ο Π και αυξημένο κίνδυνο για κατάγματα κόπωσης (Gordon, 2000; Ackerman & Misra, 2011).

Συνοψίζοντας, η φυσική δραστηριότητα επηρεάζει την οστική υγεία μέσω πολύπλοκων μηχανισμών μηχανικής φόρτισης και ενδοκρινικής ρύθμισης, οι οποίοι αλληλεπιδρούν δυναμικά κατά την ανάπτυξη. Η κατανόηση των παραμέτρων που καθορίζουν την οστεογενή απόκριση του σκελετού είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τύπων άσκησης. Στο πλαίσιο αυτό, η επόμενη υποενότητα εξετάζει την επίδραση συγκεκριμένων δραστηριοτήτων φόρτισης στην οστική πυκνότητα, με έμφαση στα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την οστεογενή δυναμική κάθε αθλητικής μορφής.

### **2.6.2. Επίδραση Δραστηριοτήτων Φόρτισης στην Ο.Π. (Αθλήματα και Είδη Άσκησης)**

Η επίδραση της φυσικής δραστηριότητας στην οστική πυκνότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος και την ένταση της μηχανικής φόρτισης που ασκείται στον σκελετό. Η φύση των δυνάμεων που επιδρούν στα οστά καθορίζει την ικανότητα του οργανισμού να προκαλεί οστεογενή απόκριση, δηλαδή να διεγείρει τη δραστηριότητα των οστεοβλαστών και να αυξάνει τη μάζα και την ανθεκτικότητα του οστού (Nichols et al., 2007). Η μηχανική φόρτιση ενεργοποιεί την οστεογένεση μέσω της μηχανομεταγωγής, κατά την οποία τα οστεοκύτταρα ανιχνεύουν τις δυνάμεις και ρυθμίζουν την έκφραση μορίων όπως η σκληροσίνη και το RANKL, επηρεάζοντας τη δράση των οστεοβλαστών και των οστεοκλαστών (Hart et al., 2020; Salhotra et al., 2020). Κατά συνέπεια, η μηχανική φόρτιση θεωρείται καθοριστικός παράγοντας στη διαμόρφωση και διατήρηση της οστικής υγείας.

Έρευνες έχουν δείξει ότι οι δραστηριότητες υψηλής κρούσης ή μη επαναλαμβανόμενης φόρτισης παρουσιάζουν το μεγαλύτερο οστεογονικό δυναμικό. Τέτοιου είδους αθλήματα, όπως η ενόργανη γυμναστική, το άλμα, τα σπριντ, τα ομαδικά αθλήματα και τα αθλήματα δύναμης, προκαλούν έντονη μηχανική παραμόρφωση στα οστά λόγω των ισχυρών δυνάμεων πρόσκρουσης και των επαναλαμβανόμενων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων (Agostinete et al., 2020a; Bennell et al., 1997). Οι αθλητές ενόργανης γυμναστικής, για παράδειγμα, εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές οστικής πυκνότητας και οστικής περιεκτικότητας σε σύγκριση με συνομηλίκους τους,



ως αποτέλεσμα της συστηματικής συμμετοχής τους σε δραστηριότητες με προσγειώσεις από ύψος, άλματα και στηρίξεις (Courteix et al., 1998; Jürimäe et al., 2018). Η δυναμική αυτή φόρτιση οδηγεί σε αυξημένη ενεργοποίηση των οστεοκυττάρων και σε θετική αναδιαμόρφωση του οστού, ενισχύοντας τη δομή και τη γεωμετρία του (Greene et al., 2012).

Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και σε αθλήματα όπως η πάλη και το τζούντο, όπου οι συχνές επαφές, οι πτώσεις και οι εκρηκτικές κινήσεις προκαλούν υψηλές δυνάμεις διάτμησης και κάμψης, ευνοώντας την οστεογένεση (Nasri et al., 2013; Sagayama et al., 2020). Οι δραστηριότητες αυτές όχι μόνο αυξάνουν την οστική πυκνότητα, αλλά και ενισχύουν τη μυϊκή δύναμη, η οποία δρα υποστηρικτικά στη σταθεροποίηση του σκελετού και στην πρόληψη οστικών τραυματισμών. Παράλληλα, τα ομαδικά αθλήματα, όπως το ποδόσφαιρο, το μπάσκετ και το βόλεϊ, συνδέονται με αυξημένη οστική πυκνότητα, κυρίως λόγω των συχνών αλλαγών κατεύθυνσης, των αλμάτων και των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων σε σκληρές επιφάνειες (Agostinete et al., 2020a; Stojanović et al., 2020). Ιδιαίτερα το μπάσκετ έχει βρεθεί να προκαλεί μεγαλύτερες προσαρμογές στην Ο.Π. σε σχέση με αθλήματα χαμηλότερης φόρτισης. (Stojanović et al., 2020).

Αντίθετα, οι μορφές άσκησης χαμηλής φόρτισης, όπως η κολύμβηση και η ποδηλασία, παρουσιάζουν περιορισμένη επίδραση στην οστική υγεία, λόγω της απουσίας δυνάμεων αντίδρασης εδάφους. Η κολύμβηση, αν και συμβάλλει στη βελτίωση της καρδιοαναπνευστικής λειτουργίας και της μυϊκής αντοχής, δεν παρέχει τα απαραίτητα μηχανικά ερεθίσματα για την ενίσχυση της οστικής μάζας (Scofield & Hecht, 2012). Αντίστοιχα, οι ποδηλάτες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές οστικής πυκνότητας σε σχέση με αθλητές φόρτισης, λόγω της υποστηριζόμενης θέσης του σώματος κατά τη διάρκεια της άσκησης και της περιορισμένης μηχανικής επιβάρυνσης (Greene et al., 2012; Vlachopoulos et al., 2015). Η μειωμένη μηχανική φόρτιση αυξάνει τη δραστηριότητα της σκληροστίνης, μιας πρωτεΐνης που αναστέλλει τη λειτουργία των οστεοβλαστών, οδηγώντας σε αναστολή της οστεογένεσης και σε αυξημένο κίνδυνο οστεοπενίας (Scofield & Hecht, 2012).

Ακόμη και στα αθλήματα αντοχής, όπως το τρέξιμο μεγάλων αποστάσεων, όπου η μηχανική φόρτιση είναι συνεχής, η επαναλαμβανόμενη και μονότονη φύση της



επιβάρυνσης περιορίζει την αποτελεσματικότητά της στην πρόκληση οστεογενών προσαρμογών. Οι δρομείς μεγάλων αποστάσεων εμφανίζουν οστική πυκνότητα συγκρίσιμη ή ελαφρώς υψηλότερη από εκείνη των μη αθλούμενων, αλλά σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη των αθλητών υψηλής κρούσης (Bennell et al., 1997). Αυτό καταδεικνύει ότι η ποικιλία και η ένταση της μηχανικής φόρτισης είναι πιο σημαντικές από τη διάρκεια ή τη συχνότητα της άσκησης για τη βελτίωση της οστικής υγείας.

Συνοψίζοντας, οι δραστηριότητες που περιλαμβάνουν υψηλές και πολυδιάστατες μηχανικές φορτίσεις, όπως τα αθλήματα άλματος, τα ομαδικά αθλήματα και οι ασκήσεις με αντιστάσεις, αποτελούν τον αποτελεσματικότερο τρόπο για την ενίσχυση της οστικής πυκνότητας και τη βελτιστοποίηση της οστικής υγείας. Αντιθέτως, τα αθλήματα χαμηλής φόρτισης, αν και ωφελούν τη γενική φυσική κατάσταση, πρέπει να συνδυάζονται με δραστηριότητες που επιβάλλουν μεγαλύτερα μηχανικά ερεθίσματα, ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης σκελετική προσαρμογή και πρόληψη της οστικής απώλειας.

### **2.6.3. Μέτρηση Οστικής Πυκνότητας (Bone Densitometry)**

Η αξιολόγηση της οστικής πυκνότητας αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διάγνωση, την πρόληψη και την παρακολούθηση της οστεοπόρωσης, ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία, όπου η οστική ανάπτυξη είναι δυναμική και ευμετάβλητη. Η Ο.Π. συσχετίζεται ισχυρά με την αντοχή του οστού *in vitro* και χρησιμοποιείται ως δείκτης κινδύνου για κατάγματα, αν και δεν αποτελεί απόλυτο προβλεπτικό παράγοντα (Hart et al., 2020). Η μέτρηση της Ο.Π. επιτρέπει την εκτίμηση της οστικής μάζας και της μικροαρχιτεκτονικής του οστού, παρέχοντας πληροφορίες για τη σκελετική ανθεκτικότητα και τον κίνδυνο καταγμάτων.

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η διπλής ενεργειακής ακτινοβολίας απορροφησιμετρία (Dual-energy X-ray Absorptiometry – DXA). Η DXA προσφέρει υψηλή ακρίβεια, χαμηλή δόση ακτινοβολίας και δυνατότητα μέτρησης σε πολλαπλά σημεία του σκελετού. Οι βασικές ανατομικές περιοχές μέτρησης περιλαμβάνουν την οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης (L1–L4), τον αυχένα του μηριαίου οστού, την τροchanτήρια περιοχή, το σύνολο του ισχίου, καθώς και την περιφερική περιοχή του αντιβραχίου (33% radius) (Themeli & Triantafyllopoulos, 2021; Sheu & Diamond, 2016). Η μέτρηση στο ισχίο θεωρείται η πιο αξιόπιστη για την πρόβλεψη κατάγματος ισχίου, ενώ η σπονδυλική στήλη



είναι ιδανική για την παρακολούθηση της ανταπόκρισης στη θεραπεία, λόγω της υψηλής μεταβολικής δραστηριότητας του σπογγώδους οστού (Fogelman & Blake, 2000).

Η DXA μετρά την οστική πυκνότητα επιφάνειας (aBMD, σε  $\text{g}/\text{cm}^2$ ), την οστική περιεκτικότητα (BMC, σε g) και την επιφάνεια του οστού (Bone Area). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω του T-score (σε ενήλικες) και του Z-score (σε παιδιά και εφήβους), με βάση πρότυπες βάσεις δεδομένων. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει περιορισμούς, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία ή το βάθος του οστού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της Ο.Π. σε μεγαλύτερα οστά ή σε υποεκτίμηση σε μικρόσωμα άτομα (Gilsanz, 1998; Chun, 2011). Επιπλέον, η παρουσία εκφυλιστικών αλλοιώσεων, σκολίωσης, μεταλλικών εμφυτευμάτων ή ασβεστοποιήσεων μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων, ιδιαίτερα στη σπονδυλική στήλη (Themeli & Triantafyllopoulos, 2021).

Η ποσοτική υπολογιστική τομογραφία (Quantitative Computed Tomography – QCT) και η περιφερική QCT (pQCT) αποτελούν τρισδιάστατες τεχνικές που επιτρέπουν την εκτίμηση της φλοιώδους και σπογγώδους σύστασης, της γεωμετρίας και της μηχανικής αντοχής του οστού. Η QCT εφαρμόζεται κυρίως στη σπονδυλική στήλη, ενώ η pQCT χρησιμοποιείται σε περιφερικά σημεία όπως η κνήμη και η κερκίδα. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την φλοιώδη πάχυνση, την ενδοπεριοστική διάμετρο, τη διατομή του οστού (CSA), την πυκνότητα φλοιώδους και σπογγώδους οστού (σε  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ), καθώς και δείκτες μηχανικής αντοχής όπως το Strength-Strain Index (SSI) (Hart et al., 2020; Gilsanz, 1998). Η pQCT προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της οστικής ποιότητας και της σχέσης οστού-μυός, αλλά η χρήση της περιορίζεται από το κόστος και την περιορισμένη διαθεσιμότητα φυσιολογικών βάσεων δεδομένων (Fogelman & Blake, 2000).

Η ποσοτική υπερηχογραφία (Quantitative Ultrasound – QUS) είναι μια μη επεμβατική, φορητή και οικονομική μέθοδος, που χρησιμοποιείται κυρίως στην πτέρνα (calcaneus), την κερκίδα και την κνήμη. Μετρά την ταχύτητα διάδοσης του ήχου (Speed of Sound – SOS) και την ευρυζωνική εξασθένηση (Broadband Ultrasound Attenuation – BUA), οι οποίες σχετίζονται με την ποιότητα του σπογγώδους οστού. Αν και η QUS δεν παρέχει άμεσες τιμές Ο.Π., έχει συσχετιστεί με τον κίνδυνο κατάγματος σε ενήλικες, αλλά η



ερμηνεία της σε παιδιά παραμένει περιορισμένη λόγω της υψηλής διακύμανσης και της έλλειψης τυποποιημένων παιδιατρικών δεδομένων (Briot, 2013; Chun, 2011).

Εκτός από τις απεικονιστικές τεχνικές, οι βιοχημικοί δείκτες οστικής ανακατασκευής (π.χ. οστεοκαλσίνη, CTX, P1NP) παρέχουν πληροφορίες για τη δυναμική του σχηματισμού και της απορρόφησης του οστού. Αν και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάγνωση, είναι χρήσιμοι για την παρακολούθηση της ανταπόκρισης σε θεραπευτικές παρεμβάσεις και την εκτίμηση της μεταβολικής δραστηριότητας του σκελετού (Hart et al., 2020).

Η αξιολόγηση της οστικής πυκνότητας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης προσέγγισης στην πρόληψη και διαχείριση της οστεοπόρωσης. Παρά τις τεχνικές προκλήσεις και περιορισμούς κάθε μεθόδου, η DXA παραμένει η μέθοδος αναφοράς λόγω της ακρίβειας, της χαμηλής ακτινοβολίας και της ευρείας διαθεσιμότητας. Η συμπληρωματική χρήση τεχνικών όπως η QCT, η pQCT και η QUS μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη δομή, τη γεωμετρία και τη μικροαρχιτεκτονική του οστού, ιδιαίτερα σε ειδικές πληθυσμιακές ομάδες ή σε περιπτώσεις όπου η DXA δεν είναι εφικτή ή αξιόπιστη. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και του σημείου μέτρησης πρέπει να γίνεται με βάση την ηλικία, την κλινική εικόνα και τις ιδιαιτερότητες του εξεταζόμενου, ώστε να εξασφαλίζεται η ακρίβεια της διάγνωσης και η αποτελεσματικότητα της θεραπευτικής παρέμβασης.

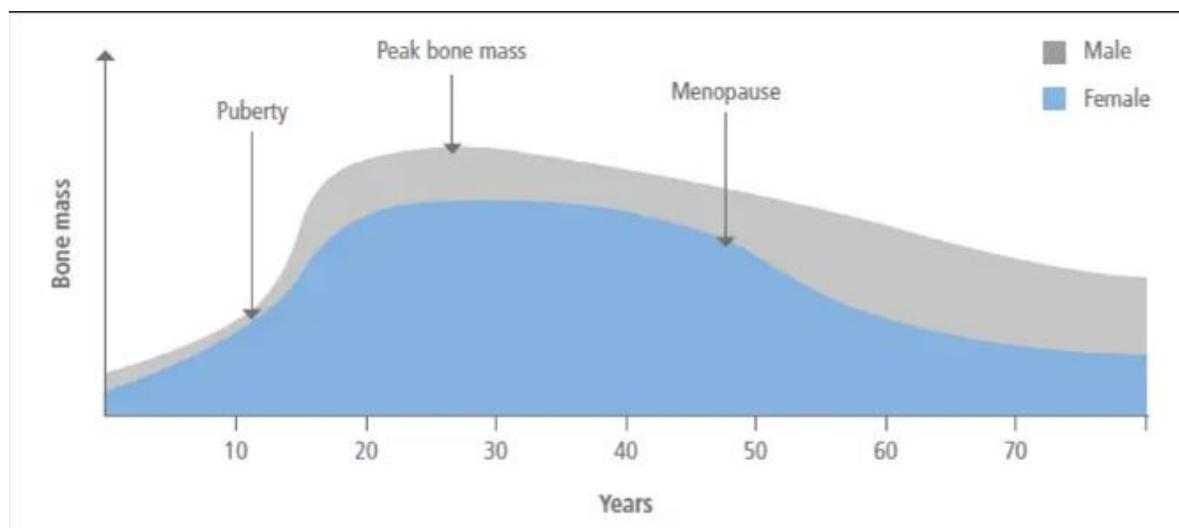
## **2.7. Υγεία των Οστών σε Παιδιά και Εφήβους**

Η υγεία των οστών κατά την παιδική και εφηβική ηλικία αποτελεί θεμέλιο για την ευρωστία του σκελετού σε όλη τη διάρκεια της ζωής. Στις περιόδους αυτές επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη συσσώρευση οστικής μάζας και καθορίζεται η κορυφαία οστική πυκνότητα, η οποία συνδέεται άμεσα με τον μελλοντικό κίνδυνο εμφάνισης οστεοπόρωσης και καταγμάτων. Η σωστή διατροφή, η επαρκής φυσική δραστηριότητα και η ισορροπημένη ορμονική λειτουργία συνιστούν βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη ισχυρών και υγιών οστών. Η κατανόηση των κρίσιμων περιόδων ανάπτυξης, των μακροχρόνιων επιδράσεων της άσκησης και των προληπτικών μέτρων στην εφηβεία είναι απαραίτητη για την προαγωγή της οστικής υγείας και τη διασφάλιση ενός ανθεκτικού σκελετού στην ενήλικη ζωή.



### 2.7.1. Κρίσιμες Περίοδοι Ανάπτυξης Οστών

Η εφηβεία αποτελεί την πιο καθοριστική περίοδο για την ανάπτυξη του σκελετού, καθώς σε αυτήν επιτυγχάνεται η PBM, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον μελλοντικό κίνδυνο οστεοπόρωσης και καταγμάτων. Περίπου το ένα τέταρτο της συνολικής οστικής μάζας αποκτάται στα δύο χρόνια γύρω από την κορύφωση του ρυθμού αύξησης ύψους (Peak Height Velocity, PHV), ενώ έως και το 90% της PBM έχει ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος της δεύτερης δεκαετίας της ζωής (Ackerman & Misra, 2011; Zhu & Zheng, 2021). Η περίοδος αυτή είναι καθοριστική για την οστική συσσώρευση, καθώς η ταχεία αύξηση του σκελετού συνοδεύεται από έντονες ορμονικές μεταβολές που καθορίζουν την Ο.Π., τη γεωμετρία και τη μακροπρόθεσμη αντοχή των οστών. Ωστόσο, η ταχεία αύξηση του μήκους των οστών προηγείται της οστικής συσσώρευσης, δημιουργώντας μια παροδική ευαλωτότητα του σκελετού και αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων, ιδιαίτερα στο αντιβράχιο (Loud & Gordon, 2006; Kindler et al., 2015).



**Σχήμα 6.** Μεταβολές της οστικής μάζας σε όλη τη διάρκεια της ζωής, αναδεικνύοντας την εφηβεία ως κρίσιμη περίοδο ταχείας οστικής συσσώρευσης που καταλήγει στην επίτευξη PBM στην ενήλικη ζωή. Προσαρμογή από εκπαιδευτικό υλικό ανοιχτής πρόσβασης.

Η ανάπτυξη του σκελετού διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ αγοριών και κοριτσιών, τόσο ως προς τον ρυθμό όσο και ως προς τους μηχανισμούς που την καθορίζουν (Σχήμα 6). Στα κορίτσια, η εμμηναρχή αποτελεί ορόσημο για την οστική συσσώρευση. Η αύξηση των οιστρογόνων ενισχύει την οστική μάζα μέσω αντι-



οστεοκλαστικής δράσης και συνεργίας με τον άξονα GH-IGF-I (Misra, 2008). Η πρώιμη εμμηναρχή συνδέεται με υψηλότερη Ο.Π., ενώ η καθυστερημένη εμμηναρχή έχει συσχετιστεί με χαμηλότερη Ο.Π. και αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων (Zhu & Zheng, 2021). Στα αγόρια, η καθυστέρηση της κορύφωσης του ρυθμού αύξησης ύψους σε σχέση με τα κορίτσια οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια οστικής συσσώρευσης. Η τεστοστερόνη προάγει την περίσσεια εναπόθεση, αυξάνοντας το μέγεθος και την αντοχή των οστών, ενώ μέσω αρωματοποίησης σε οιστραδιόλη συμβάλλει στην επιφυσιακή σύγκλιση (Ackerman & Misra, 2011). Οι διαφορές φύλου αποτυπώνονται στη γεωμετρία: τα αγόρια αποκτούν μεγαλύτερα και παχύτερα οστά, ενώ τα κορίτσια εμφανίζουν υψηλότερη πυκνότητα και μικρότερη πορώδη φλοιώδη δομή (Kindler et al., 2015). Η ορμονική ισορροπία είναι καθοριστική, καθώς ο GH και ο IGF-I προάγουν την οστική συσσώρευση, ενώ η λεπτίνη και η γκρελίνη επηρεάζουν τον άξονα υποθαλάμου – υπόφυσης – γονάδων, ρυθμίζοντας έμμεσα την οστική ανάπτυξη. Η κορτιζόλη, σε συνθήκες ενεργειακής ανεπάρκειας ή υπερβολικής καταπόνησης, μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στην οστική μάζα (Ackerman & Misra, 2011).

Σε αυτό το πλαίσιο, η Τριάδα της Αθλήτριας (Female Athlete Triad) αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα για την οστική υγεία των αθλητριών στην εφηβεία. Περιγράφει την αλληλεπίδραση τριών παραγόντων: χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα, διαταραχές εμμήνου ρύσεως και χαμηλή οστική πυκνότητα. Η αρνητική ενεργειακή ισορροπία οδηγεί σε καταστολή του άξονα υποθαλάμου – υπόφυσης – γονάδων, με αποτέλεσμα τον υπογοναδισμό και τη μειωμένη παραγωγή οιστρογόνων (Misra, 2008; Ackerman & Misra, 2011). Αυτό ακυρώνει τα θετικά αποτελέσματα της φυσιολογικής μηχανικής φόρτισης στην εφηβεία, οδηγώντας σε χαμηλότερη Ο.Π. στη σπονδυλική στήλη και στο ισχίο, σε αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων και σε μειωμένη επίτευξη PBM (Scofield & Hecht, 2012). Σε περιπτώσεις αμηνόρροιας οι αθλήτριες εμφανίζουν χαμηλότερη Ο.Π. σε σχέση με εμμηνορροϊκές συνομήλικες (Jurimae et al., 2018). Επομένως, η ισορροπία μεταξύ ενεργειακής πρόσληψης και ορμονικής λειτουργίας είναι καθοριστική για την οστική υγεία.

Πέρα από τις ορμονικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις, η γενετική βάση της οστικής ανάπτυξης είναι ισχυρή. Η κληρονομικότητα εξηγεί το 50–85% της διακύμανσης στην Ο.Π., με γονίδια όπως LRP5, WNT16, RANK και OPG να παίζουν σημαντικό ρόλο στη



ρύθμιση της οστικής μάζας (Zhu & Zheng, 2021). Η κατανόηση αυτών των γενετικών παραγόντων υπογραμμίζει ότι η επίτευξη υψηλής PBM είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης μεταξύ βιολογικής προδιάθεσης και περιβαλλοντικών παραγόντων.

Η διατροφή και η μυο-οστική αλληλεπίδραση συνδέονται άμεσα με τις κρίσιμες περιόδους ανάπτυξης. Η επαρκής πρόσληψη ασβεστίου και βιταμίνης D είναι θεμελιώδης για την επίτευξη PBM, με τα οφέλη να είναι πιο έντονα όταν συνδυάζονται με την ορμονική και μεταβολική φόρτιση της εφηβείας (Vatanparast & Whiting, 2006; Loud & Gordon, 2006). Παράλληλα, η μυϊκή μάζα και η δύναμη αποτελούν ισχυρούς προβλεπτικούς δείκτες της γεωμετρίας και αντοχής του φλοιώδους οστού, ενώ ο IGF-I συνδέει μυϊκή και οστική ανάπτυξη. Η μυϊκή μάζα προηγείται χρονικά της οστικής συσσώρευσης στην εφηβεία, γεγονός που δείχνει τη στενή αλληλεξάρτηση των δύο ιστών. Η διήθηση λίπους στους μύες σχετίζεται με μειωμένη λειτουργικότητα και αρνητικές επιδράσεις στην οστική ανάπτυξη, ενώ η επίδραση των οιστρογόνων φαίνεται να ενισχύει τη σχέση μύς – οστού στα κορίτσια (Kindler et al., 2015).

Συνολικά, η εφηβεία είναι η πιο κρίσιμη περίοδος για την οστική ανάπτυξη, με τις ορμονικές μεταβολές, τις διαφοροποιήσεις μεταξύ φύλων και τους γενετικούς παράγοντες να καθορίζουν την επίτευξη PBM. Η Τριάδα της Αθλήτριας αναδεικνύει τον κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι αθλήτριες όταν η ενεργειακή διαθεσιμότητα είναι ανεπαρκής, ακυρώνοντας τα οστεογενετικά οφέλη της φυσιολογικής ανάπτυξης. Η διατροφή και η μυο-οστική αλληλεπίδραση λειτουργούν υποστηρικτικά, αλλά η ισορροπία μεταξύ ορμονικής λειτουργίας, ενεργειακής πρόσληψης και γενετικής προδιάθεσης είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την υγιή οστική ανάπτυξη και την πρόληψη μελλοντικών προβλημάτων.

### **2.7.2. Μακροχρόνια Επίδραση της Φυσικής Δραστηριότητας στην Παιδική Ηλικία**

Η φυσική δραστηριότητα κατά την παιδική ηλικία έχει αποδειχθεί ότι ασκεί μακροχρόνια επίδραση στην οστική υγεία, καθώς οι προσαρμογές που επέρχονται στο σκελετό κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης μπορούν να διατηρηθούν και στην ενήλικη ζωή. Η παιδική ηλικία και ιδιαίτερα η εφηβεία χαρακτηρίζονται από υψηλή πλαστικότητα του σκελετού, γεγονός που καθιστά την άσκηση καθοριστικό παράγοντα για την PBM. Μελέτες έχουν δείξει ότι παιδιά που συμμετέχουν σε δραστηριότητες υψηλής πρόσκρουσης ή σε



αθλήματα με ποικιλία κινήσεων αποκτούν μεγαλύτερη οστική πυκνότητα και βελτιωμένη γεωμετρία των οστών σε σχέση με συνομηλίκους τους που δεν είναι δραστήριοι. Οι προσαρμογές αυτές δεν περιορίζονται μόνο στη διάρκεια της εφηβείας, αλλά μπορούν να παραμείνουν για χρόνια μετά τη διακοπή της συστηματικής άσκησης, προσφέροντας προστασία έναντι της οστεοπόρωσης και των καταγμάτων στην ενήλικη ζωή (Loud & Gordon, 2006; Kindler et al., 2015).

Η μακροχρόνια επίδραση της άσκησης εξηγείται από το γεγονός ότι η μηχανική φόρτιση κατά την ανάπτυξη οδηγεί σε αυξημένη εναπόθεση οστικού ιστού στην περιφέρεια των οστών, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάμετρο και αντοχή. Ακόμη και όταν η άσκηση μειώνεται ή διακόπτεται, η αυξημένη γεωμετρία και η βελτιωμένη αρχιτεκτονική των οστών παραμένουν σε σημαντικό βαθμό. Έρευνες σε πρώην αθλητές έχουν δείξει ότι τα οφέλη της άσκησης στην παιδική ηλικία διατηρούνται στην ενήλικη ζωή, με υψηλότερη οστική πυκνότητα και μειωμένο κίνδυνο καταγμάτων σε σχέση με άτομα που δεν είχαν αθλητική δραστηριότητα στην ανάπτυξη (Gómez-Bruton et al., 2017). Παράλληλα, η συμμετοχή σε δραστηριότητες που ενισχύουν τη μυϊκή μάζα και δύναμη φαίνεται να έχει διπλό όφελος, καθώς η μυο-οστική αλληλεπίδραση ενισχύει περαιτέρω την οστική προσαρμογή και συμβάλλει στη διατήρηση της υγείας του σκελετού (Kindler et al., 2015).

Η σημασία της φυσικής δραστηριότητας στην παιδική ηλικία δεν περιορίζεται μόνο στην πρόληψη της οστεοπόρωσης, αλλά επεκτείνεται και στη μείωση του κινδύνου καταγμάτων κατά την εφηβεία, περίοδο κατά την οποία ο σκελετός είναι πιο ευάλωτος λόγω της ταχείας αύξησης του ύψους. Η συμμετοχή σε δραστηριότητες που ενισχύουν την οστική αντοχή μπορεί να αντισταθμίσει αυτήν την ευαλωτότητα και να προσφέρει μακροπρόθεσμη προστασία. Επιπλέον, η διατροφή φαίνεται να παίζει συμπληρωματικό ρόλο στη μακροχρόνια επίδραση της άσκησης. Η επαρκής πρόσληψη πρωτεϊνών, ασβεστίου και βιταμίνης D ενισχύει την οστική προσαρμογή στην άσκηση, ενώ η υπερβολική κατανάλωση κορεσμένων λιπαρών και σακχάρων μπορεί να μειώσει την απορρόφηση του ασβεστίου και να επηρεάσει αρνητικά την οστική υγεία (Proia et al., 2021). Η συνδυαστική επίδραση άσκησης και ισορροπημένης διατροφής κατά την παιδική ηλικία δημιουργεί ένα ισχυρό «απόθεμα» οστικής μάζας που συνοδεύει το άτομο σε όλη του τη ζωή.



Συμπερασματικά, η παιδική ηλικία αποτελεί μια κρίσιμη επένδυση για την οστική υγεία, καθώς οι προσαρμογές που επιτυγχάνονται μέσω της άσκησης και της σωστής διατροφής σε αυτήν την περίοδο δημιουργούν ένα ισχυρό υπόβαθρο που μειώνει τον κίνδυνο οστεοπόρωσης και καταγμάτων στην ενήλικη ζωή.

### **2.7.3. Προληπτικά Μέτρα για τη Διατήρηση Υγιών Οστών στην Εφηβεία**

Η διατήρηση υγιών οστών στην εφηβεία απαιτεί στοχευμένα προληπτικά μέτρα, καθώς οι επιλογές τρόπου ζωής σε αυτήν την ηλικία έχουν καθοριστικό αντίκτυπο στη μελλοντική οστική υγεία. Η έγκαιρη υιοθέτηση σωστής διατροφής, ισορροπημένης φυσικής δραστηριότητας και παρακολούθησης ορμονικών παραγόντων μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο οστεοπενίας και οστεοπόρωσης.

Η επαρκής πρόσληψη ασβεστίου και βιταμίνης D αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την οστική ανάπτυξη. Η κατανάλωση γαλακτοκομικών προϊόντων, εμπλουτισμένων τροφών ή εναλλακτικών πηγών ασβεστίου, σε συνδυασμό με την έκθεση στον ήλιο για τη σύνθεση βιταμίνης D, συμβάλλει στη βέλτιστη οστική συσσώρευση. Σε περιπτώσεις χαμηλής πρόσληψης, η συμπληρωματική χορήγηση μπορεί να είναι χρήσιμη, ιδιαίτερα σε εφήβους με αυξημένες ανάγκες ή περιορισμένη πρόσβαση σε πηγές ασβεστίου και βιταμίνης D (Proia et al., 2021; Loud & Gordon, 2006; Gordon, 2000).

Η ισορροπημένη διατροφή με επαρκή πρόσληψη πρωτεϊνών, υγιών λιπαρών και υδατανθράκων είναι επίσης σημαντική. Οι πρωτεΐνες αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο της οστικής μήτρας και επηρεάζουν τα επίπεδα του IGF-1, που συνδέεται με την ανάπτυξη τόσο του μυϊκού όσο και του οστικού ιστού. Ωστόσο, η υπερβολική κατανάλωση κορεσμένων λιπαρών και σακχάρων μπορεί να μειώσει την απορρόφηση ασβεστίου και να επηρεάσει αρνητικά την οστική υγεία, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προώθηση υγιεινών διατροφικών συνηθειών στην εφηβεία (Proia et al., 2021).

Η φυσική δραστηριότητα παραμένει καθοριστικός παράγοντας για την οστική υγεία. Η συμμετοχή σε δραστηριότητες που περιλαμβάνουν μηχανική φόρτιση, όπως τρέξιμο, άλματα και αθλήματα με ποικιλία κινήσεων, ενισχύει την οστική πυκνότητα και τη γεωμετρία των οστών. Σύμφωνα με τη θεωρία του μηχανοστάτη, η οστική αντοχή προσαρμόζεται στη μυϊκή δύναμη, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της λειτουργικής



μονάδας μύς – οστού (functional muscle - bone unit) για την πρόληψη της οστικής ευαλωτότητας (Schoenau & Fricke, 2008).

Εξίσου σημαντική είναι η πρόληψη καταστάσεων που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την οστική υγεία, όπως η χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα, οι διαταραχές εμμήνου ρύσεως και οι διατροφικές διαταραχές, που αποτελούν στοιχεία της Τριάδας της Αθλήτριας. Η έγκαιρη αναγνώριση και αντιμετώπιση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη για την αποφυγή μακροχρόνιων επιπτώσεων στην οστική πυκνότητα (Misra, 2008; Scofield & Hecht, 2012; Gordon, 2000). Επιπλέον, πρέπει να αποφεύγεται η υπερβολική άσκηση που οδηγεί σε αμηνόρροια, καθώς ακυρώνει τα οστεογενετικά οφέλη της φυσικής δραστηριότητας.

Άλλα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν την αποφυγή καπνίσματος και υπερβολικής κατανάλωσης αλκοόλ, καθώς και τον περιορισμό της κατανάλωσης αναψυκτικών, τα οποία λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε φωσφόρο και καφεΐνη μπορεί να αυξήσουν την απέκκριση ασβεστίου και να αυξήσουν τον κίνδυνο καταγμάτων (Gordon, 2000). Η εκπαίδευση των εφήβων και των οικογενειών τους σχετικά με τη σημασία της οστικής υγείας, της σωστής διατροφής και της άσκησης αποτελεί ουσιαστικό προληπτικό μέτρο, καθώς η υιοθέτηση υγιεινών συνηθειών σε αυτήν την ηλικία δημιουργεί ένα ισχυρό υπόβαθρο για την προστασία του σκελετού σε όλη τη διάρκεια της ζωής.



### III. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

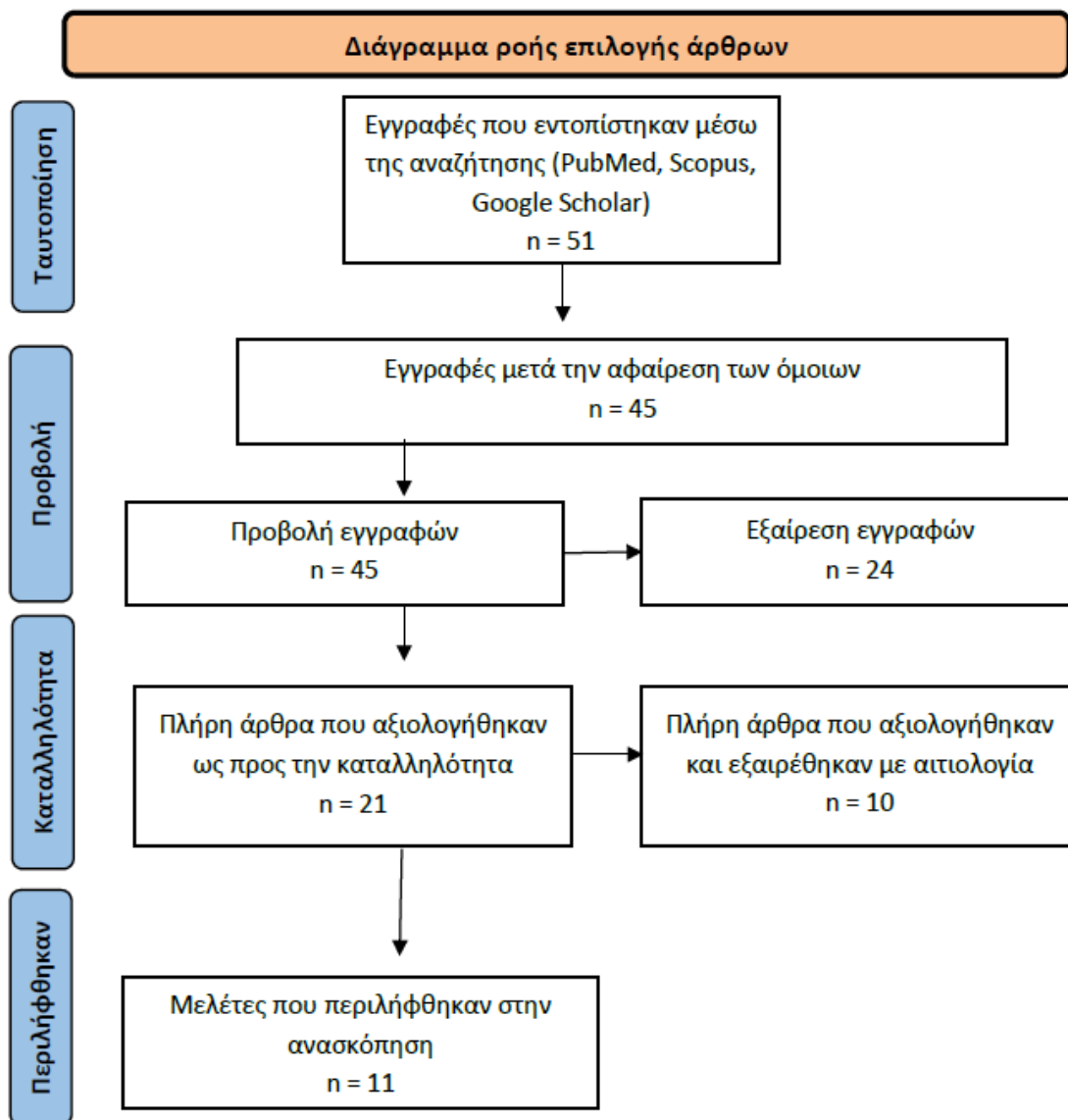
#### 3.1. Πηγές Δεδομένων και Αναζητήσεις

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε, μέσω συστηματικής ανασκόπησης ελεγχόμενων μελετών που δημοσιεύτηκαν από το 2015 έως σήμερα, η επίδραση των διάφορων αθλημάτων στην οστική πυκνότητα κατά την εφηβική ηλικία. Η αναζήτηση της διεθνούς βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε μέσω των ηλεκτρονικών βάσεων δεδομένων PubMed, Scopus και Google Scholar χρησιμοποιώντας τις λέξεις-κλειδιά: bone density, bone health, bone mass, osteogenesis, bone remodeling, sports, adolescence.

*Κριτήρια επιλεξιμότητας:* Στην ανασκόπηση εντάχθηκαν μελέτες που πληρούσαν τα εξής κριτήρια: i) τυχαιοποιημένα ή μη τυχαιοποιημένα πρωτόκολλα με τουλάχιστον μία ομάδα άσκησης έναντι μίας ομάδας ελέγχου, ii) συμμετοχή σε αθλητικές δραστηριότητες διάρκειας τουλάχιστον ενός έτους, iii) συμμετοχή εφήβων ηλικίας 12–18 ετών, και iv) δημοσίευση στην ελληνική ή αγγλική γλώσσα μετά το 2015.

*Κριτήρια αποκλεισμού μελετών:* Αποκλείστηκαν μελέτες που δεν πληρούσαν τα παραπάνω κριτήρια, όπως μελέτες δημοσιευμένες πριν το 2015, χωρίς ομάδα ελέγχου, με συμμετέχοντες εκτός της ηλικιακής ομάδας 12–18 ετών, ή γραμμένες σε άλλη γλώσσα εκτός ελληνικής και αγγλικής.

*Εξαγωγή δεδομένων:* Αρχικά εντοπίστηκαν 51 μελέτες. Μετά την αφαίρεση διπλοεγγραφών, μελετών εκτός χρονικού ή γλωσσικού πλαισίου, απορρίφθηκαν 30. Από τις υπόλοιπες 21, αποκλείστηκαν 10 λόγω μη συναφούς περιεχομένου ή μη έγκυρων δεδομένων. Τελικά, 11 μελέτες πληρούσαν τα κριτήρια επιλεξιμότητας και συμπεριλήφθηκαν στην ανασκόπηση (Σχήμα 7). Από κάθε μελέτη καταγράφηκαν στοιχεία σχετικά με το μέγεθος του δείγματος, την ηλικία και το φύλο των συμμετεχόντων, τον τύπο και τη διάρκεια της άσκησης, καθώς και τυχόν συμπληρωματικές παρεμβάσεις.



**Σχήμα 7.** Διάγραμμα ροής των μελετών σύμφωνα με τη μέθοδο PRISMA.



## VI. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία επιλογής των άρθρων για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολούθησε τα στάδια της συστηματικής προσέγγισης (ταυτοποίηση, προβολή, καταλληλότητα, συμπερίληψη). Συνολικά εντοπίστηκαν 51 άρθρα μέσω αναζήτησης σε βάσεις δεδομένων (PubMed, Google Scholar, Scopus). Μετά την απομάκρυνση των διπλότυπων, παρέμειναν 45 μοναδικές μελέτες, οι οποίες προβλήθηκαν ως προς τον τίτλο και την περίληψη. Από αυτές αποκλείστηκαν 24 λόγω μη σχετικότητας με τα κριτήρια της παρούσας μελέτης. Τα υπόλοιπα 21 πλήρη άρθρα αξιολογήθηκαν ως προς την καταλληλότητά τους, εκ των οποίων 10 αποκλείστηκαν με τεκμηριωμένη αιτιολόγηση. Τελικά, συμπεριλήφθηκαν 11 άρθρα, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για την παρούσα διερεύνηση της σχέσης μεταξύ αθλητικής δραστηριότητας και οστικής υγείας σε παιδιά και εφήβους.

**Πίνακας 1.** Κατανομή του δείγματος ανά φύλο και αθλητική συμμετοχή.

| Αριθμός συμμετεχόντων | Άτομα ανά φύλο |          | Αθλητές (n=1.385) |          | Μη αθλητές (n=717) |          |
|-----------------------|----------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|
|                       | Αγόρια         | Κορίτσια | Αγόρια            | Κορίτσια | Αγόρια             | Κορίτσια |
| n=2.102               | n=1.003        | n=1.096  | n=769             | n= 616   | n=234              | n=483    |

Στο συνολικό δείγμα των 2.102 παιδιών και εφήβων, το 66% (n=1.385) συμμετείχε σε αθλητικές δραστηριότητες, ενώ το 34% (n=717) δεν είχε αθλητική ενασχόληση. Η κατανομή φύλου ήταν σχετικά ισορροπημένη, με τα κορίτσια να αποτελούν το 52,3% και τα αγόρια το 47,7% του δείγματος (Πίνακας 1). Από τους αθλητές, περισσότεροι από τους μισούς (52%) συμμετείχαν σε οστεογόννα αθλήματα, όπως το ποδόσφαιρο, η καλαθοσφαίριση, το βόλεϊ, ο στίβος και οι πολεμικές τέχνες. Η συμμετοχή σε μη οστεογόννα αθλήματα, όπως η κολύμβηση και η ποδηλασία, αντιπροσώπευε το 17% του δείγματος, ενώ τα αισθητικά αθλήματα, όπως το μπαλέτο και η ρυθμική γυμναστική, συγκέντρωσαν το 23,5%, κυρίως από κορίτσια. Ένα μικρότερο ποσοστό (7,5%) συμμετείχε σε ειδικές κατηγορίες, όπως η πυγμαχία και το karate kyokushinkai. Στους αθλητές, το ποδόσφαιρο συγκέντρωσε το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής (17,5%), ακολουθούμενο από την κολύμβηση (14,7%) και την καλαθοσφαίριση (7,1%) (Πίνακας 2).



Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι τα οστεογόνα αθλήματα, στα οποία συμμετείχε η πλειοψηφία των αγοριών, συνδέονται με αυξημένη οστική πυκνότητα και περιεκτικότητα, ιδιαίτερα στα κάτω άκρα και στη σπονδυλική στήλη (Agostinete et al., 2020a, 2020b; Maillane-Vanegas et al., 2018). Στο δείγμα, η υψηλή συμμετοχή σε ποδόσφαιρο και καλαθοσφαίριση ενισχύει την παρατήρηση ότι τα πιο δημοφιλή αθλήματα είναι και τα πιο ευεργετικά για την οστική υγεία. Αντίθετα, η κολύμβηση και η ποδηλασία, αν και συγκεντρώνουν σημαντικά ποσοστά συμμετοχής (περίπου 15% συνολικά), δεν φαίνεται να προσφέρουν οστικό πλεονέκτημα, κάτι που συμφωνεί με τα ευρήματα μελετών που τις χαρακτηρίζουν μη οστεογόνες δραστηριότητες (Vlachopoulos et al., 2017a, 2017b, 2017c; Ubago-Guisado et al., 2019).

**Πίνακας 2.** Δημογραφικά και προπονητικά χαρακτηριστικά ανά άθλημα

| <b>Αθλήματα</b>     | <b>Ηλικία (Μ.Ο.)</b> | <b>Αγόρια</b> | <b>Κορίτσια</b> | <b>Ώρες προπόνησης/εβδ.</b> |
|---------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|
| Μπαλέτο             | 16,9±0,9             | -             | 293             | 18-32                       |
| Ρυθμική Γυμναστική  | 14-18                | -             | 33              | 17,6±5,3                    |
| Ενόργανη Γυμναστική | 13,9-14,2            | -             | 16              | 10±1                        |
| Στίβος*             | 11-18                | 27            | 17              | 13±1                        |
| Καλαθοσφαίριση      | 12,7-15,0            | 98            | -               | 14±0,5                      |
| Κολύμβηση           | 12,3-18              | 122           | 82              | 16,1±6,9                    |
| Karate              | 12,7-17,3            | 48            | 49              | 9,2±0,8                     |
| Kung Fu             | 13,3-17,3            | 71            | 27              | 4,5-10,0                    |
| Ποδόσφαιρο          | 12,3-14,6            | 243           | -               | 13,5                        |
| Πετοσφαίριση        | 13,9-17,4            | 2             | 56              | 6±0,5                       |
| Ποδηλασία           | 12,3-14,6            | 30            | -               | ≥3                          |
| Baseball            | 13,9-14,2            | 21            | 1               | 11±1                        |
| Judo                | 12,7-17,3            | 87            | 42              | 5,5-10,0                    |
| Πυγμαχία            | 17,1±0,2             | 10            | -               | 8-10                        |
| Karate Kyokushinkai | 17,1±0,2             | 10            | -               | 8-10                        |

\*Ταχυδυναμικά αγωνίσματα: 100μ-400μ, άλμα εις ύψος, άλμα εις μήκος, άλμα επί κοντώ, δρόμος μετ' εμποδίων, δέκαθλο, ρίψεις



Τα αισθητικά αθλήματα παρουσιάζουν πιο σύνθετη εικόνα. Στα κορίτσια, που αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των συμμετεχόντων, παρατηρούνται αυξημένες τιμές οστικής πυκνότητας σε περιοχές όπως ο μηριαίος αυχένας, αλλά μειωμένες στην κερκίδα, γεγονός που υποδηλώνει τοπικές επιδράσεις (Wewege & Ward, 2018). Η βιβλιογραφία τονίζει επίσης τον κίνδυνο ενεργειακής ανεπάρκειας και καθυστερημένης εμμηναρχής, που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την οστική υγεία (Tamolienè et al., 2021). Οι πολεμικές τέχνες, με ισορροπημένη συμμετοχή αγοριών και κοριτσιών, αποτελούν ισχυρό οστεογόνο ερέθισμα. Η ποικιλία κινήσεων, οι πτώσεις και οι επαφές δημιουργούν πολυδιάστατη μηχανική καταπόνηση, η οποία έχει συνδεθεί με αυξημένη οστική πυκνότητα σε όλο το σώμα (Nasri et al., 2015).

Συνολικά, η κατανομή του δείγματος ενισχύει τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας ότι η επιλογή αθλήματος και το φύλο αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την οστική υγεία κατά την εφηβεία. Η περίοδος γύρω από το PHV αναδεικνύεται ως καθοριστική για την οστική προσαρμογή, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της έγκαιρης συμμετοχής σε δραστηριότητες με υψηλό μηχανικό φορτίο. Η ανάλυση δείχνει ότι περισσότεροι από τους μισούς συμμετέχοντες σε οστεογόνα αθλήματα εμφάνισαν αυξημένη Ο.Π., ενώ η συμμετοχή σε μη οστεογόνα αθλήματα δεν συνδέθηκε με αντίστοιχα πλεονεκτήματα (Πίνακας 3). Οι διαφορές φύλου και οι ιδιαίτερες απαιτήσεις των αισθητικών αθλημάτων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, καθώς επηρεάζουν τόσο την οστική πυκνότητα όσο και τους κινδύνους για την υγεία.

**Πίνακας 3.** Επίδραση διαφορετικών αθλημάτων στην οστική πυκνότητα παιδιών & εφήβων.

| Συγγραφείς   | Δείγμα (n) | Ηλικία   | Φύλο | Αθλητές | Μη Αθλητές | Άθλημα   | Είδος άσκησης/παρέμβασης          | Ώρες προπόνησης/εβδομάδα  | Επίδραση άσκησης στην Ο.Π.  |
|--|------------|----------|------|---------|------------|--|-----------------------------------|---|---|
| Michael A. Wewege & Rachel E. Ward(2018)             | 626        | 16,9±0,9 | K    | 293     | 333        | Μπαλέτο  | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | >18 ώρες  | ↑BMD μηριαίου αυχένα, μηριαίου τροχαντήρα, τριγώνου του Ward<br>↓BMD κερκίδας   |
| Ricardo Ribeiro Agostinete et al.(2020b)             | 71         | 12,7±1,7 | A-K  | 51      | 20         | Καλ. *, karate, judo(NIS)*, κολύμβηση (IS)*  | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | NIS: 16,8ω.<br>IS: 11ω.   | ↑aBMD άνω & κάτω άκρων και ΣΣ*, ↑WBLH   |
| Santiago Maillane-Vanegas et al.(2018)               | 429        | 13,3±1,7 | A-K  | 318     | 111        | Judo, Karate, Kung Fu, κολύμβηση, καλ., ποδ.*  | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | N/A   | ↑ ολ. BMD(αγόρια) καλ. & ποδ., BMD άνω άκρων ποδ., karate & judo, BMD κάτω άκρων ποδ., καλ. & karate, ↑ ολ. BMD (κορίτσια) Kung fu, BMD κάτω άκρων karate |
| Ricardo Ribeiro Agostinete et al.(2020a)             | 625        | 13,9±0,3 | A-K  | 453     | 172        | Judo,karate,kung fu,κολύμβηση, καλ., ποδ., βόλεϊ, στίβος,baseball, ενόργανη γυμναστική | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | Καλ: 14ω., Ποδ: 13ω, Κολ: 15,7ω., Βολ: 6ω., Kar: 9 ω., J: 5,5ω., K-f: 4ω., BB: 12ω., Εν.Γυμ:10ω., Στίβος:15ω. | ↑ ολ. aBMD & aBMD κάτω άκρων ποδ., aBMD ΣΣ judo, aBMD άνω άκρων & whole-body BMAD ενόργανη  |
| Yuri da Silva Ventura Faustino-da-Silva et al.(2018) | 34         | 11±7     | A-K  | 17      | 17         | Στίβος   | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | N/A   | ↑ ολ. BMD & κάτω άκρων, ↑ BMC κάτω άκρων  |
| Dimitris Vlachopoulos et al.(2018)                   | 116        | 12,3±2,3 | A    | 102     | 14         | Κολύμβηση, ποδηλασία, ποδ.   | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | K:8,9±0,5,Ποδ/ρο: 9,4±0,6, Πο/ια: 5,2±0,4   | ↑ BMC & οστικής ακαμψίας στο ποδ.   |
| Raouf Nasri et al.(2015)                             | 80         | 17,1±0,2 | A    | 50      | 30         | Judo, Karate, Karate Kyokushinkai, Kung fu, box  | Διατήρηση ίδιας αθλητικής πορείας | 8-10ω. / εβδ.   | ↑ ολ. BMD   |



|                                      |     |          |   |     |    |                                  |                                       |                                |  |
|--------------------------------------|-----|----------|---|-----|----|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| Esther Ubago-Guisado et al.(2019)    | 104 | 12,3±2,3 | A | 104 | -  | Κολύμβηση, ποδηλασία(NOS), ποδ.* | Διατήρηση της ίδιας αθλητικής πορείας | NOS: 6,4 OS: 9,4               | ↑ BMC, TBS, εκτιμήσεις HSA & δείκτης δυσκαμψίας στα OS                                   |
| João Valente-dos-Santos et al.(2018) | 46  | 14,5±2,9 | K | 46  | -  | βόλει, κολύμβηση                 | Διατήρηση της ίδιας αθλητικής πορείας | K: 4-12ώρες B:4-6ώρες          | ↑ BMC & total BMD βόλει  |
| Vita Tamolienė et al.(2021)          | 73  | 14-18    | K | 53  | 20 | Ρυθμική γυμναστική, κολύμβηση    | Διατήρηση της ίδιας αθλητικής πορείας | P.Γ.: 17,6±5,3 , Κολ: 16,1±6,9 | ↑ aBMD & BMC ρυθμική γυμναστική  |
| Dimitris Vlachopoulos et al.(2017c)  | 116 | 12,3±2,3 | A | 102 | 14 | Κολύμβηση, ποδ., ποδηλασία       | Διατήρηση της ίδιας αθλητικής πορείας | N/A                            | ↑ BMC ΣΣ & μηριαίου αυχένα ποδ., ↑ TBS, CSMI & CSA ποδ., ↑ PINP (σχηματισμός οστών) ποδ. |

Καλ: Καλαθοσφαίριση, Ποδ: Ποδόσφαιρο, ΣΣ: Σπονδυλική Στήλη, IS: Impact Sports, NIS: Non-impact Sports, NOS: Non-osteogenic Sports, OS: Osteogenic Sports, BMD: Bone Mineral Density, BMC: Bone Mineral Content, aBMD: areal BMD, WBLH: Whole Body Less Head, TBS: Trabecular Bone Score, HSA: Hip Structural Analysis, CSMI: Cross-Sectional Moment of Inertia, CSA: Cross-Sectional Area, PINP: Procollagen Type I N-terminal Peptide, BMAD: Bone Mineral Apparent Density



## V. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα ανασκόπηση ανέδειξε ότι η εφηβεία αποτελεί μια κρίσιμη περίοδο για την οστική υγεία, καθώς η μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης συνοδεύεται από αυξημένη ευαισθησία του σκελετού σε μηχανικά ερεθίσματα. Στο δείγμα της μελέτης, η πλειοψηφία των εφήβων στράφηκε σε αθλήματα υψηλής φόρτισης, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι νεαροί αθλητές εκτίθενται σε ερεθίσματα ικανά να ενισχύσουν τη συσσώρευση οστικής μάζας. Η τάση αυτή ευθυγραμμίζεται με διεθνείς μελέτες που τεκμηριώνουν ότι η συμμετοχή σε δραστηριότητες με έντονα κρουστικά φορτία και πολυκατευθυντικές επιταχύνσεις οδηγεί σε υψηλότερη οστική πυκνότητα και περιεκτικότητα, ιδίως στα κάτω άκρα και τη σπονδυλική στήλη (Baxter-Jones et al., 2011; Gunter et al., 2012). Αντίθετα, η παρουσία ενός μικρότερου ποσοστού εφήβων σε αθλήματα χαμηλού μηχανικού φορτίου, όπως η κολύμβηση και η ποδηλασία, αντανακλά την περιορισμένη οστεογόνο επίδραση τέτοιων δραστηριοτήτων, όπως έχει καταγραφεί σε συγκριτικές μελέτες (Vlachopoulos et al., 2017a, 2017b, 2017c). Συνεπώς, η κατανομή των αθλητικών επιλογών στο δείγμα δεν αποτελεί απλώς περιγραφικό εύρημα, αλλά αναδεικνύει τη σημασία της στρατηγικής επιλογής αθλημάτων στην εφηβεία για τη μακροπρόθεσμη πρόληψη της οστεοπόρωσης και των καταγμάτων.

Η κυριαρχία των οστεογόνων αθλημάτων στο δείγμα δείχνει ότι οι έφηβοι εκτίθενται σε ερεθίσματα που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την οστική προσαρμογή. Δραστηριότητες όπως το ποδόσφαιρο, η καλαθοσφαίριση, το βόλεϊ και η ενόργανη γυμναστική χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενα άλματα, επιβραδύνσεις και αλλαγές κατεύθυνσης, στοιχεία που δημιουργούν ισχυρά μηχανικά φορτία στον σκελετό. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι τέτοιου είδους ερεθίσματα οδηγούν σε αυξημένη οστική πυκνότητα και περιεκτικότητα σε περιοχές όπως ο μηριαίος αυχέννας και η οσφυϊκή μοίρα (Agostinete et al., 2020a, 2020b; Maillane-Vanegas et al., 2018). Παρόμοια ευρήματα καταγράφονται και στην έρευνα PRO-BONE, όπου οι έφηβοι που συμμετείχαν σε αθλήματα υψηλής φόρτισης εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερες τιμές Ο.Π. σε σχέση με συνομηλίκους τους που ασχολούνταν με μη οστεογόνα αθλήματα (Vlachopoulos et al., 2017b, 2017c).



Αντίθετα, η παρουσία εφήβων σε αθλήματα χαμηλού μηχανικού φορτίου, όπως η κολύμβηση και η ποδηλασία, αντανακλά την περιορισμένη οστεογόνο επίδραση τέτοιων δραστηριοτήτων. Παρά τα καρδιοαναπνευστικά τους οφέλη, οι δραστηριότητες αυτές δεν παρέχουν συγκρίσιμα μηχανικά ερεθίσματα, καθώς στερούνται κάθετων φορτίσεων και κρουστικών επιβαρύνσεων. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι κολυμβητές και οι ποδηλάτες εμφανίζουν χαμηλότερες ή παρόμοιες τιμές Ο.Π. σε σύγκριση με αθλητές υψηλής φόρτισης, γεγονός που αποδίδεται στην απουσία μηχανικής καταπόνησης του σκελετού (Ubago-Guisado et al., 2019). Η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η ενσωμάτωση προγραμμάτων αντίστασης ή πλειομετρικών ασκήσεων μπορεί να βελτιώσει την οστική υγεία των αθλητών αυτών, αλλά τα αποτελέσματα παραμένουν περιορισμένα σε σχέση με τα οστεογόνα αθλήματα (Tenforde et al., 2015).

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι πολεμικές τέχνες, καθώς συνδυάζουν ποικιλία κινήσεων με υψηλή μηχανική καταπόνηση. Αθλήματα όπως το karate, το τζούντο και το taekwondo περιλαμβάνουν ρίψεις, πτώσεις, μονοποδικές προσγειώσεις και επαφές, στοιχεία που οδηγούν σε σημαντική αύξηση της οστικής πυκνότητας τόσο στα άκρα όσο και στον κορμό (Nasri et al., 2015). Μελέτες παρακολούθησης σε εφήβους έχουν καταδείξει ότι η συστηματική ενασχόληση με πολεμικές τέχνες για διάστημα μηνών μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτες αυξήσεις της Ο.Π. σε περιοχές όπως η σπονδυλική στήλη και το ισχίο. Αυτό καθιστά τις πολεμικές τέχνες μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την ενίσχυση της οστικής υγείας, καθώς προσφέρουν πολυδιάστατα ερεθίσματα που δεν συναντώνται σε άλλα αθλήματα.

Τα αισθητικά αθλήματα, όπως η ρυθμική, η ενόργανη γυμναστική, το μπαλέτο και άλλες μορφές καλλιτεχνικής κίνησης, αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία με διττές επιδράσεις στην οστική υγεία. Από τη μία πλευρά, οι επαναλαμβανόμενες κινήσεις και οι μονοποδικές προσγειώσεις δημιουργούν τοπικές προσαρμογές, με αυξημένη οστική πυκνότητα σε περιοχές όπως ο μηριαίος αυχέννας. Από την άλλη, η βιβλιογραφία καταγράφει μειωμένες τιμές σε περιφερικές περιοχές, όπως η κερκίδα, γεγονός που δείχνει ότι τα ερεθίσματα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στον σκελετό (Weweg & Ward, 2018). Η εικόνα αυτή συμφωνεί με τα δεδομένα της παρούσας μελέτης, όπου οι συμμετέχοντες σε αισθητικά αθλήματα εμφάνισαν εντοπισμένες οστικές προσαρμογές, χωρίς όμως το συνολικό πλεονέκτημα που παρατηρείται στα οστεογόνα αθλήματα.



Πέρα από τις μηχανικές επιδράσεις, τα αισθητικά αθλήματα συνδέονται στενά με ζητήματα ενεργειακής διαθεσιμότητας. Η υψηλή προπονητική επιβάρυνση σε συνδυασμό με τον αυστηρό έλεγχο του σωματικού βάρους αυξάνει τον κίνδυνο ενεργειακής ανεπάρκειας, διαταραχών του έμμηνου κύκλου και καθυστερημένης εμμηναρχής. Οι καταστάσεις αυτές έχουν αποδειχθεί ότι επηρεάζουν αρνητικά τον οστικό μεταβολισμό, οδηγώντας σε χαμηλότερη οστική μάζα και αυξημένο κίνδυνο καταγμάτων (Tamolienė et al., 2021). Η διεθνής βιβλιογραφία για την Τριάδα της Αθλήτριας και πιο πρόσφατα για τη Σχετική Ενεργειακή Ανεπάρκεια στον Αθλητισμό (ΣΕΑΑ ή Relative Energy Deficiency in Sport, RED-S) επιβεβαιώνει ότι η ανεπαρκής ενεργειακή πρόσληψη αποτελεί κρίσιμο παράγοντα κινδύνου για την οστική υγεία σε αθλήτριες αισθητικών αθλημάτων (Mountjoy et al., 2018).

Η διαφοροποίηση των αθλητικών επιλογών και των οστικών προσαρμογών ανά φύλο αποτελεί ένα από τα πιο σταθερά ευρήματα στη βιβλιογραφία. Τα αγόρια τείνουν να συμμετέχουν συχνότερα σε ομαδικά αθλήματα υψηλής φόρτισης, γεγονός που συνδέεται με αυξημένα οστικά οφέλη σε περιοχές που δέχονται έντονα μηχανικά ερεθίσματα, όπως ο μηριαίος αυχέννας και η σπονδυλική στήλη. Η μεγαλύτερη οστική μάζα που παρατηρείται στα αγόρια αποδίδεται όχι μόνο στα πρότυπα συμμετοχής, αλλά και σε ορμονικούς παράγοντες, όπως η αυξημένη παραγωγή τεστοστερόνης και IGF-1 κατά την εφηβεία, οι οποίοι ενισχύουν την οστική συσσώρευση. Αντίθετα, τα κορίτσια εμφανίζουν μεγαλύτερη συμμετοχή σε αισθητικά αθλήματα, όπου οι οστικές προσαρμογές είναι περισσότερο εντοπισμένες και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επάρκεια ενεργειακής πρόσληψης και την ορμονική ισορροπία. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι η χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα σε αθλήτριες αισθητικών αθλημάτων μπορεί να περιορίσει την οστική συσσώρευση, αυξάνοντας τον κίνδυνο μελλοντικών καταγμάτων (Mountjoy et al., 2018; Tamolienė et al., 2021).

Εξίσου καθοριστικός είναι ο χρονισμός της ωρίμανσης, και ειδικότερα η περίοδος γύρω από τη PHV. Μελέτες έχουν δείξει ότι η συμμετοχή σε δραστηριότητες υψηλής φόρτισης κατά την περίοδο του PHV οδηγεί σε μεγαλύτερα και πιο μόνιμα οστικά οφέλη, τα οποία διατηρούνται και μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης (Baxter-Jones et al., 2011; Gunter et al., 2012). Η έγκαιρη ένταξη τέτοιων ερεθισμάτων στο προπονητικό πρόγραμμα



μπορεί επομένως να καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την οστική υγεία στην ενήλικη ζωή, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης οστεοπόρωσης.

Η σύνδεση φύλου και χρονισμού ωρίμανσης αναδεικνύει την ανάγκη για εξατομικευμένες παρεμβάσεις. Στα αγόρια, η αξιοποίηση της περιόδου της PHV με αθλήματα υψηλής φόρτισης μπορεί να μεγιστοποιήσει τα οστικά οφέλη. Στα κορίτσια, η παρακολούθηση της ενεργειακής διαθεσιμότητας και η ενσωμάτωση οστεογόνων ερεθισμάτων σε συνδυασμό με αισθητικές δραστηριότητες είναι κρίσιμη για την αποφυγή αρνητικών εκβάσεων. Έτσι, η διαφοροποίηση ανά φύλο δεν αποτελεί απλώς περιγραφικό εύρημα, αλλά καθοδηγεί πρακτικές στρατηγικές για την ενίσχυση της οστικής υγείας στην εφηβεία.

Η αποτελεσματικότητα των αθλητικών ερεθισμάτων στην οστική υγεία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δοσολογία και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της προπόνησης. Δεν αρκεί η απλή συμμετοχή σε ένα άθλημα· η ένταση, η συχνότητα και η ποικιλία των ερεθισμάτων καθορίζουν το μέγεθος και τη διάρκεια των οστικών προσαρμογών. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι έντονα ερεθίσματα – όπως άλματα, αλλαγές κατεύθυνσης και άλλα – όταν εφαρμόζονται 3 έως 4 φορές την εβδομάδα, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την ενίσχυση της οστικής μάζας (Gunter et al., 2012). Η ποικιλία των ερεθισμάτων φαίνεται επίσης να παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η έκθεση σε πολλαπλά αθλήματα (multi-sport exposure) ενισχύει τις τοπικές προσαρμογές και μειώνει τον κίνδυνο υπερφόρτισης ή μονοτονίας.

Η προπονητική ηλικία αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο παράγοντα. Η συστηματική έκθεση σε οστεογόνα ερεθίσματα από την προεφηβική και πρώιμη εφηβική ηλικία οδηγεί σε καλύτερα αθροιστικά αποτελέσματα σε σχέση με την καθυστερημένη έναρξη, καθώς ο σκελετός είναι πιο δεκτικός σε μηχανικά ερεθίσματα πριν και γύρω από τη PHV (Baxter-Jones et al., 2011). Παράλληλα, η ένταση και η συχνότητα των ερεθισμάτων φαίνεται να έχουν δοσοεξαρτώμενη σχέση με την οστική προσαρμογή, με υψηλότερα επίπεδα συμμετοχής να συνδέονται με μεγαλύτερες αυξήσεις στην Ο.Π. και BMC (Maillane-Vanegas et al., 2018). Ωστόσο, η υπερβολική επιβάρυνση χωρίς επαρκή αποκατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμούς ή σε αρνητικές επιδράσεις στον οστικό μεταβολισμό, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της ισορροπίας μεταξύ έντασης και ανάπαυσης.



Επιπλέον, η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι η ποικιλία των ερεθισμάτων είναι εξίσου σημαντική με τη συχνότητα. Η συμμετοχή σε διαφορετικά αθλήματα ή η ενσωμάτωση πλειομετρικών ασκήσεων και δραστηριοτήτων ισορροπίας στο προπονητικό πρόγραμμα φαίνεται να ενισχύει τις οστικές προσαρμογές σε πολλαπλές περιοχές του σκελετού (Tenforde et al., 2015). Η πολυαθλητική έκθεση όχι μόνο ενισχύει την οστική υγεία αλλά και μειώνει τον κίνδυνο υπερφόρτισης συγκεκριμένων αρθρώσεων, προσφέροντας πιο ολοκληρωμένη προστασία.

Συνολικά, η δοσολογία και η ποικιλία των ερεθισμάτων δεν αποτελούν απλώς τεχνικές λεπτομέρειες, αλλά κρίσιμους παράγοντες για τη μακροπρόθεσμη οστική υγεία. Η ενσωμάτωση σύντομων, έντονων και πολυκατευθυντικών προπονητικών μονάδων σε τακτική βάση, σε συνδυασμό με την πολυαθλητική έκθεση και την προσεκτική διαχείριση της έντασης, μπορεί να μεγιστοποιήσει τα οστικά οφέλη και να προσφέρει προστασία έναντι μελλοντικών κινδύνων όπως η οστεοπόρωση.

Η πρακτική αξιοποίηση των ευρημάτων έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η εφηβεία αποτελεί κρίσιμη περίοδο για την ενίσχυση της οστικής υγείας. Στο σχολικό πλαίσιο, η ενσωμάτωση μικρών συνεδριών ασκήσεων με άλματα, σπριντ και αλλαγές κατεύθυνσης, διάρκειας 8–12 λεπτών, 2 έως 4 φορές την εβδομάδα, μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά οστεογόνα ερεθίσματα χωρίς να απαιτείται εκτεταμένος χρόνος από το μάθημα φυσικής αγωγής. Παράλληλα, η χρήση παιχνιδιών μικρού χώρου, όπως στο ποδόσφαιρο ή την καλαθοσφαίριση, αυξάνει τον αριθμό των αλλαγών ταχύτητας και κατεύθυνσης, ενισχύοντας την οστική προσαρμογή με τρόπο ευχάριστο και παιδαγωγικά αποδεκτό. Η παρακολούθηση της πορείας ωρίμανσης των μαθητών είναι κρίσιμη, ώστε τα φορτία να προσαρμόζονται στην ατομική φάση ανάπτυξης.

Στο επίπεδο των συλλόγων και των προπονητών, η πολυαθλητική έκθεση φαίνεται να προσφέρει τα μεγαλύτερα οφέλη. Ο συνδυασμός ομαδικών αθλημάτων υψηλής φόρτισης με προγράμματα ενδυνάμωσης, πλειομετρικές ασκήσεις και ασκήσεις ισορροπίας μπορεί να ενισχύσει τις τοπικές προσαρμογές και να μειώσει τον κίνδυνο τραυματισμών. Στα αισθητικά αθλήματα, η προσεκτική διαχείριση της ενεργειακής διαθεσιμότητας είναι απαραίτητη. Η συνεργασία προπονητών, διατροφολόγων και ιατρών μπορεί να διασφαλίσει ότι οι αθλήτριες λαμβάνουν επαρκή ενέργεια και μικροθρεπτικά συστατικά, ώστε να υποστηρίζεται η οστική τους υγεία χωρίς να θυσιάζεται



η αθλητική τους απόδοση. Η τακτική παρακολούθηση του έμμηνου κύκλου και των βιοδεικτών οστικού μεταβολισμού αποτελεί πρακτική που μπορεί να προλάβει αρνητικές εκβάσεις.

Σε επίπεδο πολιτικών υγείας, τα ευρήματα στηρίζουν την ανάγκη για εθνικά προγράμματα που προωθούν αθλήματα υψηλής φόρτισης στα σχολεία, με παράλληλη επιμόρφωση εκπαιδευτικών και προπονητών για τη σημασία των οστεογόνων ερεθισμάτων στην εφηβεία. Δημόσιες δράσεις που τονίζουν τη μέγιστη συσσώρευση οστικής μάζας κατά την εφηβεία μπορούν να συμβάλουν στην πρόληψη της οστεοπόρωσης σε πληθυσμιακό επίπεδο. Τέλος, οι οικογένειες έχουν καθοριστικό ρόλο, καθώς η ενημέρωση για τα οστικά οφέλη των διαφορετικών αθλημάτων και η υποστήριξη με επαρκή διατροφή (ενέργεια, ασβέστιο, βιταμίνη D) αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την υγιή ανάπτυξη των παιδιών και εφήβων.

Η παρούσα μελέτη διαθέτει ορισμένα σημαντικά δυνατά σημεία που ενισχύουν την αξιοπιστία των ευρημάτων. Το μεγάλο συνολικό δείγμα και η σαφής κατηγοριοποίηση των αθλημάτων σε οστεογόνα, μη οστεογόνα και αισθητικά παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της σχέσης μεταξύ αθλητικής συμμετοχής και οστικής υγείας. Επιπλέον, η ποσοτικοποίηση της συμμετοχής και η σύνδεση με τη PHV προσδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς λαμβάνεται υπόψη η σημασία της εφηβείας για την οστική προσαρμογή. Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων καθιστά τη μελέτη συγκρίσιμη με διεθνή έργα, όπως το PRO-BONE project, που έχουν καταδείξει την καθοριστική σημασία της εφηβείας για τη συσσώρευση οστικής μάζας (Vlachopoulos et al., 2017b, 2017c).

Ωστόσο, υπάρχουν και περιορισμοί που πρέπει να αναγνωριστούν. Η ετερογένεια των πρωτογενών μελετών, οι διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης της οστικής πυκνότητας (DXA έναντι περιφερικών τεχνικών) και η πιθανή επίδραση συγχυτικών παραγόντων, όπως η διατροφή, οι γενετικές διαφοροποιήσεις και οι προπονητικές πρακτικές, περιορίζουν τη δυνατότητα εξαγωγής αιτιολογικών συμπερασμάτων. Επιπλέον, η πλειονότητα των διαθέσιμων δεδομένων προέρχεται από μη πειραματικά σχέδια, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για προοπτικές μελέτες με ακριβή καταγραφή της δοσολογίας και του τύπου των ερεθισμάτων. Παρόμοιοι περιορισμοί έχουν αναφερθεί και σε άλλες ανασκοπήσεις, όπου



η πολυπλοκότητα των παραγόντων που επηρεάζουν την οστική υγεία καθιστά δύσκολη την απομόνωση της επίδρασης του αθλητισμού (Tenforde et al., 2015).

Οι επιπτώσεις των ευρημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την πράξη. Η σαφής υπεροχή των οστεογόνων ερεθισμάτων στην εφηβεία στηρίζει την προτεραιοποίηση τέτοιων δραστηριοτήτων σε σχολικά και προπονητικά προγράμματα, με στόχο τη μακροπρόθεσμη πρόληψη της οστεοπόρωσης. Παράλληλα, η προσεκτική διαχείριση των αισθητικών αθλημάτων είναι κρίσιμη για την αποφυγή αρνητικών εκβάσεων. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν περιορίζονται σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά προσφέρουν σαφείς κατευθύνσεις για την εκπαιδευτική πράξη, την προπονητική πρακτική και τις πολιτικές υγείας.

Οι κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα κρίσιμες, δεδομένων των περιορισμών που καταγράφηκαν. Η ανάγκη για προοπτικές μελέτες με ακριβή παρακολούθηση της PHV είναι εμφανής. Η λεπτομερής καταγραφή της δοσολογίας και του τύπου των ερεθισμάτων θα επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ έντασης, συχνότητας και οστικής προσαρμογής. Παράλληλα, η ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων πλειομετρικής άσκησης στο σχολικό περιβάλλον θα μπορούσε να αξιολογηθεί ως προς την αποτελεσματικότητά της σε διαφορετικές ηλικιακές φάσεις, προσφέροντας πρακτικά εργαλεία για την εκπαιδευτική πράξη.

Επιπλέον, η διερεύνηση των διαφορών φύλου σε συνδυασμό με την ενεργειακή διαθεσιμότητα και τους ορμονικούς δείκτες αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης. Οι αισθητικές δραστηριότητες, όπου οι αθλήτριες συχνά εκτίθενται σε αυξημένο κίνδυνο ενεργειακής ανεπάρκειας, απαιτούν ερευνητικά σχέδια που θα ενσωματώνουν παραμέτρους όπως η διατροφική πρόσληψη, οι βιοδείκτες οστικού μεταβολισμού και η εμμηνορρυσιακή λειτουργία. Τέτοιες μελέτες θα μπορούσαν να προσφέρουν πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικών και μεταβολικών παραγόντων στην οστική υγεία.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση συνδυαστικών προγραμμάτων που ενσωματώνουν πολλαπλά αθλήματα και η μεταφορά των οστικών προσαρμογών από το ένα άθλημα στο άλλο. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η πολυαθλητική εμπειρία επηρεάζει τη συνολική οστική μάζα θα μπορούσε να οδηγήσει σε



πιο ευέλικτες και αποτελεσματικές στρατηγικές παρέμβασης. Συνολικά, οι μελλοντικές έρευνες καλούνται να γεφυρώσουν τα κενά που αφήνουν οι υφιστάμενες μελέτες, προσφέροντας σαφέστερες κατευθύνσεις για την προαγωγή της οστικής υγείας στην εφηβεία.



## VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα ανέδειξε με σαφήνεια ότι η συμμετοχή των εφήβων σε αθλήματα υψηλής μηχανικής φόρτισης συνδέεται με σημαντικά οφέλη για την οστική υγεία, επιβεβαιώνοντας τη διεθνή βιβλιογραφία που υποστηρίζει τον καθοριστικό ρόλο των οστεογόνων ερεθισμάτων κατά την περίοδο της ανάπτυξης. Από τα ευρήματα φάνηκε ότι οι έφηβοι που συμμετέχουν συστηματικά σε οστεογόνα αθλήματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές οστικής πυκνότητας και μάζας σε σύγκριση με όσους ασχολούνται με μη οστεογόνα ή αισθητικά αθλήματα, υπογραμμίζοντας τη σημασία της φύσης των μηχανικών φορτίων για τη σκελετική προσαρμογή.

Παράλληλα, η μελέτη ανέδειξε τη σημασία του φύλου και του χρονισμού της ωρίμανσης, καθώς οι διαφοροποιήσεις στις αθλητικές επιλογές, στους ορμονικούς παράγοντες και στην ενεργειακή διαθεσιμότητα επηρεάζουν ουσιαστικά την οστική συσσώρευση. Η περίοδος γύρω από τη PHV επιβεβαιώθηκε ως κρίσιμη, όπου η κατάλληλη προπονητική επιβάρυνση μπορεί να μεγιστοποιήσει τα οστικά οφέλη. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν την ανάγκη για στοχευμένες παρεμβάσεις που λαμβάνουν υπόψη την ατομική πορεία ανάπτυξης και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε αθλήματος.

Συνολικά, η διατριβή καταδεικνύει ότι η εφηβεία αποτελεί μια μοναδική και ανεπανάληπτη περίοδο για την ενίσχυση της οστικής υγείας, όπου οι σωστές επιλογές άσκησης μπορούν να έχουν μακροχρόνια οφέλη. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την οστική προσαρμογή και η εφαρμογή τεκμηριωμένων πρακτικών μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη διαμόρφωση υγιών σκελετικών δομών και στη μείωση του μελλοντικού κινδύνου οστεοπόρωσης.

Παρά τα παραπάνω ευρήματα, η υπάρχουσα βιβλιογραφία εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικά κενά ως προς τη μακροχρόνια παρακολούθηση των εφήβων και την επίδραση των διαφορετικών μορφών άσκησης στην κορυφαία οστική μάζα. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάζουν του τρόπους με τους οποίους οι συνήθειες άσκησης και η ενεργειακή διαθεσιμότητα κατά την περίοδο της ταχείας ανάπτυξης επηρεάζουν τη σκελετική υγεία στην ενήλικη ζωή. Επιπλέον, απαιτείται συστηματική αξιολόγηση παρεμβάσεων Φυσικής Αγωγής στο σχολικό περιβάλλον, καθώς



η διεθνής βιβλιογραφία παραμένει περιορισμένη ως προς την αποτελεσματικότητα διαφορετικών τύπων οστεογόνων ερεθισμάτων στην ενίσχυση της οστικής πυκνότητας των παιδιών και των εφήβων. Η διερεύνηση αυτών των πεδίων θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτιστοποίηση των εκπαιδευτικών πρακτικών και στην ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών πρόληψης από νεαρή ηλικία.



## IX. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ackerman, K. E., & Misra, M. (2013). Bone health in adolescent athletes with a focus on female athlete triad. *The Physician and Sportsmedicine*, 39(1), 131–141. <https://doi.org/10.3810/psm.2011.02.1871>
- Agostinete, R.R., Fernandes, R.A., Narciso, P.H., Maillane-Vanegas, S., Werneck, A.O., & Vlachopoulos, D. (2020a). Categorizing 10 sports according to bone and soft tissue profiles in adolescents. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 52(12), 2673–2681. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000002420>.
- Agostinete, R.R., Vlachopoulos, D., Werneck, A.O., Maillane-Vanegas, S., Lynch, K.R., Naughton, G., & Fernandes, R.A. (2020b). Bone accrual over 18 months of participation in different loading sports during adolescence. *Archives of Osteoporosis*, 15(64). <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00727-2>.
- Baker, B.S., Chen, Z., Larson, R.D., Bembem, M.G., & Bembem, D.A. (2020). Sex differences in bone density, geometry, and bone strength of competitive soccer players. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, 20(1), 62–76. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32131370/>.
- Baxter-Jones, A.D.G., Faulkner, R.A., Forwood, M.R., Mirwald, R.L., & Bailey, D.A. (2011). Bone mineral accrual from 8 to 30 years of age: An estimation of Peak Bone Mass. *Journal of Bone and Mineral Research*, 26(8), 1729–1739. <https://doi.org/10.1002/jbmr.412>.
- Bennell, K.L., Malcolm, S.A., Khan, K.M., Thomas, S.A., Reid, S.J., Brukner, P.D., Ebeling, P.R., & Wark J.D.(1997). Bone mass and bone turnover in power athletes, endurance athletes, and controls: A 12-month longitudinal study. *Bone*, 20(5), 477–484. [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(97\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(97)00026-4).
- Berendsen, A.D., & Olsen, B.R. (2015). Bone Development. *Bone*, 80, 14–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bone.2015.04.035>.
- Bone Marrow (2023). Research Starters. EBSCOhost. <https://www.ebsco.com/research-starters>.
- Briot, K. (2013). DXA Parameters: Beyond Bone Mineral Density. *Joint Bone Spine*, 80, 265–269. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2012.09.025>.
- Chang, M., Chronopoulos, V., & Mattheos, N. (2013). Impact of excessive occlusal load on successfully – osseointegrated dental implants: A literature review. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry*, 4, 142–150. <https://doi.org/10.1111/jicd.12036>.
- Chun, K.J. (2011). Bone Densitometry. *Seminars in Nuclear Medicine*, 41, 220–228. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2010.12.002>.
- Collins, A.C., Ward, K.D., McClanahan, B.S., Slawson, D.L., Vukadinovich, C., Mays, K.E., Wilson, N., & Relyea, G. (2019). Bone accrual in children and adolescent non-elite swimmers: A 2-year longitudinal study. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 29(1), 43–48. <https://doi.org/10.1097/jsm.0000000000000484>.



- Courteix, D., Lespessailles, E., Loiseau Peres, S., Obert, P., Germain, P., & Benhamou, C.L. (1998). Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: A comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports. *Osteoporosis International*, 8, 152-158. <https://doi.org/10.1007/bf02672512>.
- Eliakim, A., & Beyth, Y. (2003). Exercise Training, Menstrual Irregularities and Bone Development in Children and Adolescents. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 16(4), 201-206. [https://doi.org/10.1016/s1083-3188\(03\)00122-0](https://doi.org/10.1016/s1083-3188(03)00122-0).
- Evans, E.W., & Lo, C. (2013). Adolescents: Nutritional problems of adolescents. In B. Caballero, *Encyclopedia of Human Nutrition*, 3rd edition (pp. 14-22), Academic Press, ISBN: 978-0-12-384885-7. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00002-7>.
- Faustino-da-Silva, Y.S.V., Agostinete, R.R., Werneck, A.O., Maillane-Vanegas, S., Lynch, K.R., Exupério, I.N., Ito, I.H., & Fernandes, R.A. (2018). Track and Field practice and bone outcomes among adolescents: A pilot study (ABCD-Growth Study). *Journal of Bone Metabolism*, 25, 35-42. <https://doi.org/10.11005/jbm.2018.25.1.35>.
- Fogelman, I., & Blake, G.M. (2000). Different approaches to Bone Densitometry. *The Journal of Nuclear Medicine*, 41(12), 2015-2025. <https://jnm.snmjournals.org/content/41/12/2015.long>.
- Frost, H.M. (2003). Bone's Mechanostat: A 2003 Update. *The Anatomical Record. Part A, Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 275(2), 1081-1101. <https://doi.org/10.1002/ar.a.10119>.
- Gilsanz, V. (1998). Bone Density in children: A review of the available techniques and indications. *European Journal of Radiology*, 26, 177-182. [https://doi.org/10.1016/S0720-048X\(97\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0720-048X(97)00093-4).
- Gómez-Bruton, A., Matute-Llorente, Á., González-Agüero, A., Casajús, J.A., & Vicente-Rodríguez, G. (2017). Plyometric exercise and bone health in children and adolescents: A systematic review. *World Journal of Pediatrics*, 13(2), 112-121. <https://doi.org/10.1007/s12519-016-0076-0>.
- Gordon, C.M. (2000). Bone Density issues in the adolescent gynecology patient. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 13(4), 157-161. [https://doi.org/10.1016/s1083-3188\(00\)00059-0](https://doi.org/10.1016/s1083-3188(00)00059-0).
- Greene, D.A., Naughton, G.A., Bradshaw, E., Moresi, M., & Ducher, G. (2012). Mechanical loading with or without weight-bearing activity: Influence on bone strength index in elite female adolescent athletes engaged in water polo, gymnastics, and tack-and-field. *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, 30(5), 580-7. <https://doi.org/10.1007/s00774-012-0360-6>.
- Gümüş, E., Akgül, S., Kanbur, N., & Derman, O. (2019). A comparison of Bone Mineral Density in adolescent swimmers, pentathletes and figure skaters. *The Turkish Journal of Pediatrics*, 61(6), 831-8. <https://doi.org/10.24953/turkjpmed.2019.06.002>.



- Gunter, K.B., Almstedt, H.C., & Janz, K.F. (2012). Physical activity in childhood may be the key to optimizing lifespan skeletal health. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 40(1), 13-21. <https://doi.org/10.1097/jes.0b013e318236e5ee>.
- Hagman, M., Wulff Helge, E., Frstrup, B., Jørgensen, N.R., Wulff Helge, J., & Krstrup, P. (2021). High Bone Mineral Density in lifelong trained female team handball players and young elite football players. *European Journal of Applied Physiology*, 121, 2825-2836. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04755-9>.
- Hart, N.H., Newton, R.U., Tan, J., Rantalainen, T., Chivers, P., Siafarikas, A., & Nimphius, S. (2020). Biological basis of bone strength: Anatomy, physiology and measurement. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, 20(3), 347-371. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7493450/>.
- Jürimäe, J., Gruodyte-Racienė, R., & Baxter-Jones, A.D.G. (2018). Effects of gymnastics activities on bone accrual during growth: A systematic review. *Journal of Sports Science and Medicine*, 17, 245-258. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5950742/>.
- Katsimbri, P. (2017). The biology of normal bone remodelling. *European Journal of Cancer Care*, 26. <https://doi.org/10.1111/ecc.12740>.
- Kindler, J.M., Lewis, R.D., & Hamrick, M.W. (2015). Skeletal muscle and pediatric bone development. *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes and Obesity*, 22(6), 467-474. <https://doi.org/10.1097/med.000000000000201>.
- Kirk, B., Feehan, J., Lombardi, G., & Duque, G. (2020). Muscle, bone, and fat crosstalk: The biological role of myokines, osteokines, and adipokines. *Current Osteoporosis Reports*, 18, 388-400. <https://doi.org/10.1007/s11914-020-00599-y>.
- Klentrou, P. (2016). Influence of exercise and training during critical stages of bone growth and development. *Pediatric Exercise Science*, 28, 178-186. <http://dx.doi.org/10.1123/pes.2015-0265>.
- Kohrt, W.M., Bloomfield, S.A., Little, K.D., Nelson, M.E., & Yingling, V.R. (2004). Physical activity and bone health. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(11), 1985-96. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000142662.21767.58>.
- Lartey, S. (2024). The significance of the skeleton in human anatomy and its role in the overall functioning of the body. (Unpublished Manuscript). ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/383878584\\_The\\_Significance\\_of\\_the\\_Skeleton\\_in\\_Human\\_Anatomy\\_and\\_Its\\_Role\\_in\\_the\\_Overall\\_Functioning\\_of\\_the\\_Body](https://www.researchgate.net/publication/383878584_The_Significance_of_the_Skeleton_in_Human_Anatomy_and_Its_Role_in_the_Overall_Functioning_of_the_Body).
- Leukaemia Foundation (2025). The Bone Marrow and Blood Formation. <https://www.leukaemia.org.au/education/the-bone-marrow-and-blood-formation/>.
- Lopez-Gonzalez, D., Wells, J.C., Cortina-Borja, M., Fewtrell, M., Partida-Gaytán, A., & Clark, P. (2021). Reference values for Bone Mineral Density in healthy Mexican children and adolescents. *Bone*, 142, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2020.115734>.



- Loud, K.J., & Gordon, K.M. (2006). Adolescent bone health. *Archives of Pediatrics and Adolescents Medicine*, 160(10), 1026-1032. <https://doi.org/10.1001/archpedi.160.10.1026>.
- Lucas, D. (2022). Structural organization of the bone marrow and its role in hematopoiesis. *Current Opinion in Hematology*, 28(1), 36-42. <https://doi.org/10.1097/moh.0000000000000621>.
- Maillane-Vanegas, S., Agostinete, R.R., Lynch, K.R., Ito, I.H., Luiz-de-Marco, R., Rodrigues-Junior, M.A., Turi-Lynch, B.C., & Fernandes, R.A. (2018). Bone Mineral Density and sports participation. *Journal of Clinical Densitometry: Assessment & Management of Musculoskeletal Health*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2018.05.041>.
- Marin-Puyalto, J., Gomez-Cabello, A., Gonzalez-Aguero, A., Matute-Llorente, A., Gomez-Bruton, A., Jürimäe, J., Casajus, J.A., & Vicente-Rodriguez, G. (2020). Effects of whole-body vibration training on Bone Density and turnover markers in adolescent swimmers. *Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism*, 33(5), 623-630. <https://doi.org/10.1515/jpem-2019-0400>.
- Μάρκου, Κ.Β. (2005). Οστική Ανάπτυξη στα Παιδιά και τους Εφήβους. Στο Εντατική Εκπαίδευση στην Ενδοκρινολογία: 8<sup>ος</sup> κύκλος - Διαταραχές Μεταβολισμού Ασβεστίου και Νοσημάτων Οστών. Ελληνική Ενδοκρινολογική Εταιρία – Πανελλήνια Ένωση Ενδοκρινολόγων. <https://e-endocrinology.gr/wp-content/uploads/2014/05/08-02.pdf>.
- Misra, M. (2008). Bone Density in the adolescent athlete. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 9(2), 139-144. <https://doi.org/10.1007/s11154-008-9077-1>.
- Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J.K., Burke, L.M., Ackerman, K.E., Blauwet, C., Constantini, N., Lebrun, C., Lundy, B., Melin, A.K., Meyer, N.L., Sherman, R.T., Tenforde, A.S., Torstveit, M.K., & Budgett, R. (2018). IOC Consensus Statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): 2018 Update. *British Journal of Sports Medicine*, 52, 687-697. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099193>.
- Mountjoy M., Sundgot-Borgen, J.K., Burke L., Carter, S., Constantini, N., Lebrun, C., Meyer, N., Sherman, R., Steffen, K., Budgett, R., & Ljungqvist, A. (2014). The IOC Consensus Statement: Beyond the female athlete triad- relative energy deficiency in sport (RED-S). *British Journal of Sports*, 48(7), 491-497. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093502>.
- Nasri, R., Zrour, S.H., Rebai, H., Neffeti, F., Najjar, M.F., Bergaoui, N., Mejdoub, H., & Tabka, Z. (2015). Combat sports practice favors Bone Mineral Density among adolescent male athletes. *Journal of Clinical Densitometry: Assessment & Management of Musculoskeletal Health*, 18(1), 54-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jocd.2013.09.012>.
- Nasri, R., Zrour, S.H., Rebai, H., Najjar, M.F., Neffeti, F., Bergaoui, N., Mejdoub, H., & Tabka, Z. (2013). Grip strength is a predictor of Bone Mineral Density among adolescent combat sport athletes. *Journal of Clinical Densitometry: Assessment & Management of Musculoskeletal Health*, 16(1), 92-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jocd.2012.07.011>.



- NIH Consensus Development Panel. (2001). Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy. *JAMA*, 285(6), 785-795. <https://doi.org/10.1001/jama.285.6.785>.
- Nichols, J.F., Rauh, M.J., Barrack, M.T., & Barkai, H.S. (2007). Bone Mineral Density in female high school athletes: Interactions of menstrual function and type of mechanical loading. *Bone*, 41(3), 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.05.003>.
- Nikander, R., Sievänen, H., Heinonen, A., Daly, R.M., Uusi-Rasi, K., & Kannus, P. (2010). Targeted exercise against osteoporosis: A systematic review and meta-analysis for Optimising Bone Strength throughout Life. *BMC Medicine*, 8(47). <https://doi.org/10.1186/1741-7015-8-47>.
- OpenStax (2013). Anatomy & Physiology. Connexions. <https://cnx.org/content/col11496/1.6/>.
- Oton-Gonzalez, L., Mazziotta, C., Iaquina, M.R., Mazzoni, E., Nocini, R., Trevisiol, L., D'Agostino, A., Tognon, M., Rotondo, J.C., & Martini, F. (2022). Genetics and epigenetics of bone remodeling and metabolic bone diseases. *International Journal of Molecular Science*, 23(3), 1500. <https://doi.org/10.3390/ijms23031500>.
- Penido, M.G., & Alon, U.S. (2012). Phosphate homeostasis and its role in bone health. *Pediatric Nephrology*, 27(11), 2039-2048. <https://doi.org/10.1007/s00467-012-2175-z>.
- Proia, P., Amato, A., Drid, P., Korovljević, D., Vasto, S., & Baldassano, S. (2021). The impact of diet and physical activity on bone health in children and adolescents. *Frontiers in Endocrinology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.704647>.
- Rauch, F., & Schoenau, E. (2001). The developing bone: Slave or master of its cells and molecules? *Pediatric Research*, 50, 309-314. <https://doi.org/10.1203/00006450-200109000-00003>.
- Rizzoli, R., Bianchi, M.L., Garabédian, M., McKay, H.A., & Moreno, L.A. (2010). Maximizing Bone Mineral Mass gain during growth for the prevention of fractures in the adolescents and the elderly. *Bone*, 46(2), 294-305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bone.2009.10.005>.
- Sagayama, H., Kondo, E., Tanabe, Y., Ohnishi, T., Yamada, Y., & Takahashi, H. (2020). Bone Mineral Density in male weight-classified athletes is higher than that in male endurance-athletes and non-athletes. *Clinical Nutrition ESPN*, 36, 106-110. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.01.008>.
- Saggese, G., Barconcelli, G.I., & Bertelloni, S. (2002). Puberty and bone development. *Best Practice and Research. Clinical Endocrinology and Metabolism*, 16(1), 53-64. <https://doi.org/10.1053/beem.2001.0180>.
- Salhotra, A., Shah, H.N., Levi, B., & Longaker, M.T. (2020). Mechanisms of bone development and repair. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 21(11), 696-711. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00279-w>.
- Schoenau, E., & Fricke, O. (2008). Mechanical influences on bone development in children. *European Journal of Endocrinology*, 159, 27-31. <https://doi.org/10.1530/EJE-08-0312>.



- Scofield, K.L., & Hecht, S. (2012). Bone health in endurance athletes: Runners, cyclists, and swimmers. *Current Sports Medicine Reports*, 11(6), 328-334. <https://doi.org/10.1249/jsr.0b013e3182779193>.
- Sheng, B., Li, X., Nussler, A.K., & Zhu, S. (2021). The relationship between healthy lifestyles and bone health. *Medicine*, 100(8). <http://dx.doi.org/10.1097/MD.00000000000024684>.
- Sheu, A., & Diamond, T. (2016). Bone Mineral Density: Testing for osteoporosis. *Australian Prescriber*, 39(2), 35-39. <http://dx.doi.org/10.18773/austprescr.2016.020>.
- Sommerfeldt, D.W., & Rubin, C.T. (2001). Biology of bone and how it orchestrates the form and function of the skeleton. *European Spine Journal*, 10, 86-95. <https://doi.org/10.1007/s005860100283>.
- Stojanović, E., Radovanović, D., Dalbo, V.J., Jacovljević, V., Ponorac, N., Agostinete, R.R., Svoboda, Z., & Scanlan, A.T. (2020). Basketball players possess a higher Bone Mineral Density than matched non-athletes, swimming, soccer, and volleyball athletes: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Osteoporosis*, 15. <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00803-7>.
- Tamolienė, V., Rimmel, L., Gruodyte-Raciene, R., & Jürimäe, J. (2021). Relationships of bone mineral variables with body composition, blood hormones and training volume in adolescent female athletes with different loading patterns. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph18126571>.
- Tenforde, A.S., Fredericson, M., Sayres, L.C., Cutti, P., & Sainani, K.L. (2015). Identifying sex-specific risk factors for low bone mineral density in adolescent runners. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(6), 1494-1504. <https://doi.org/10.1177/0363546515572142>.
- Tenforde, A.S., & Fredericson, M. (2011). Influence of sports participation on bone health in the young athlete: A review of the literature. *PM & R: the Journal of Injury, Function and Rehabilitation*, 3(9), 861-867. <https://doi.org/10.1016/j.pmri.2011.05.019>.
- Themeli, T., & Triantafyllopoulos, I.K. (2021). Choosing the site to estimate Bone Mineral Density with DXA method. *Journal of Research and Practice of Musculoskeletal System*, 5(2), 79-87. <https://doi.org/10.22540/JRPMS-05-079>.
- Torres-Costoso, A., Vlachopoulos, D., Ubago-Guisado, E., Ferri-Morales, A., Caverro-Redondo, I., Martínez-Vizcaino, V., & Gracia-Marco, L. (2017). Agreement between Dual-Energy X-Ray Absorptiometry and Quantitative Ultrasound to evaluate bone health in adolescents: The PRO-BONE study. *Pediatric Exercise Science*, 30(4), 466-473. <https://doi.org/10.1123/pes.2017-0217>.
- Ubago-Guisado, E., Vlachopoulos, D., Barker, A.R., Christoffersen, T., Metcalf, B., & Gracia-Marco, L. (2019). Effects of maturational timing on bone health in male adolescent athletes engaged in different sports: The PRO-BONE study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22(3), 253-258. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.08.009>.



- Valente-dos-Santos, J., Tavares, Ó. M., Duarte, J.P., Sousa-e-Silva, P.M., Rama, L.M., Cassanova, J.M., Fontes-Ribeiro, C.A., Marques, E.A., Courteix, D., Ronque, E.R.V., Cyrino, E.S., Conde, J., & Coelho-e-Silva, M.J. (2018). Total and regional bone mineral and tissue composition in female adolescent athletes: Comparison between volleyball players and swimmers. *BMC Pediatrics*, 18. <https://doi.org/10.1186/s12887-018-1182-z>.
- Vannucci, L., Fossi, C., Quattrini, S., Guasti, L., Pampaloni, B., Gronchi, G., Giusti, F., Romagnoli, C., Cianferotti, L., Marcucci, G., & Brandi, M.L. (2018). Calcium intake in bone health: A focus on calcium-rich mineral waters. *Nutrients*, 10(12). <http://dx.doi.org/10.3390/nu10121930>.
- Vatanparast, H., & Whiting, S.J. (2006). Calcium supplementation trials and bone mass development in children, adolescents, and young adults. *Nutrition Reviews*, 64(4), 204-209. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2006.tb00203.x>.
- Vlachopoulos, D., Barker, A.R., Ubago-Guisado, E., Ortega, F.B., Krstrup, P., Metcalf, B., Pinero, J.C., Ruiz, J.R., Knapp, K.M., Williams, C.A., Moreno, L.A., & Gracia-Marco, L. (2018). The effect of 12-month participation in osteogenic and non-osteogenic sports on bone development in adolescent male athletes. The PRO-BONE study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(4), 404-409. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.08.018>.
- Vlachopoulos, D., Barker, A.R., Williams, C.A., Arngrímsson, S.A., Knapp, K.M., Metcalf, B.S., Fatouros, I.G., Moreno, L.A., & Gracia-Marco, L.(2017a). The impact of sport participation on bone mass and geometry in male adolescents. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(2), 317-326. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001091>.
- Vlachopoulos, D., Ubago-Guisado, E., Barker, A.R., Metcalf, B.S., Fatouros, I.G., Avloniti, A., Knapp, K.M., Moreno, L.M., Williams, C.A., & Gracia-Marco, L. (2017b). Determinants of bone outcomes in adolescent athletes at baseline: The PRO-BONE study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(7), 1389-1396. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001233>.
- Vlachopoulos, D., Barker, A.R., Ubago-Guisado, E., Fatouros, I.G., Knapp, K.M., Williams, C.A., & Gracia-Marco, L. (2017c). Longitudinal adaptations of bone mass, geometry, and metabolism in adolescent male athletes: The PRO-BONE study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 32(11), 2269-2277. <https://doi.org/10.1002/jbmr.3206>.
- Vlachopoulos, D., Barker, A.R., Williams, C.A., Knapp, K.M., Metcalf, B.S., & Gracia-Marco, L. (2015). Effect of a program of short bouts of exercise on bone health in adolescents involved in different sports: The PRO-BONE study protocol. *BMC Public Health*, 15. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1633-5>.
- Weaver, C.M., Gordon, C.M., Janz, K.F., Kalkwarf, H.J., Lappe, J.M., Lewis, R., O’Karma, M., Wallace, T.C., & Zemel, B.S. (2016). The National Osteoporosis Foundation’s position statement on Peak Bone Mass development and lifestyle factors: A systematic review and implementation recommendations. *Osteoporosis International*, 27(4), 1281-1386. <https://doi.org/10.1007/s00198-015-3440-3>.



- Wewege, M.A., & Ward, R.E. (2018). Bone Mineral Density in pre-professional female ballet dancers: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(8), 783-788. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.02.006>.
- Wilkinson, K., Vlachopoulos, D., Klentrou, P., Ubago-Guisado, E., Ferreira De Moraes, A.C., Barker, A.R., Williams, C.A., Luis, M.A., & Gracia-Marco, L. (2017). Soft tissues, areal Bone Mineral Density and hip geometry estimates in active young boys: The PRO-BONE study. *European Journal of Applied Physiology*, 117(4), 833-842. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3568-2>.
- Yu, E., & Sharma, S. (2023). Physiology, calcium. In StatPearls. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482128/>.
- Zhu, X. & Zheng, H. (2021). Factors influencing Peak Bone Mass gain. *Frontiers of Medicine*, 15(1), 53-69. <https://doi.org/10.1007/s11684-020-0748-y>.
- Zulfarina, M.S., Sharkawi, A.M., Aqilah-S, N Z.S., Mokhtar, S.A., Nazrun, S.A., & Naina-Mohamed, I. (2016). Influence of adolescents' physical activity on Bone Mineral Acquisition: A systematic review. *Iranian Journal of Public Health*, 45(12), 1545-1557. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28053920/>.