



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ, ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΕΡΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ**

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ & ΠΡΟΠΟΝΗΤΙΚΗ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η επίδραση ενός προπονητικού κύκλου και ενός
υπερμαραθώνιου αγώνα στις φυσιολογικές παραμέτρους ενός
υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου**

Δημήτριος Κασίμης [Α.Ε.Μ. 13110]

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Σμήλιος, Καθηγητής Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

Κομοτηνή, 2026



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ, ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΕΡΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ**

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ & ΠΡΟΠΟΝΗΤΙΚΗ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η επίδραση ενός προπονητικού κύκλου και ενός
υπερμαραθώνιου αγώνα στις φυσιολογικές παραμέτρους ενός
υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου**

Δημήτριος Κασίμης [Α.Ε.Μ. 13110]

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία-υποβλήθηκε στο Τμήμα Επιστήμης
Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για την
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος στη «Φυσιολογία της Άσκησης & Προπονητική»
στην Ειδίκευση “Φυσιολογία της Άσκησης”

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηλίας Σμήλιος, Καθηγητής Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

2ο Μέλος: Ανδρέας Ζαφειρίδης, Καθηγητής Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Α.Π.Θ. Σέρρες

3ο Μέλος: Ελένη Δούδα, Καθηγήτρια Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

Κομοτηνή, 2026



DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE

**SCHOOL OF PHYSICAL EDUCATION, SPORTS SCIENCE AND
OCCUPATIONAL THERAPY**

DEPARTMENT OF PHYSICAL EDUCATION AND SPORTS SCIENCE

POSTGRADUATE PROGRAM

“EXERCISE PHYSIOLOGY & SPORTS TRAINING SCIENCE”

MASTER DISSERTATION

**The effect of a training cycle and an ultramarathon race on the
physiological parameters of an elite
ultramarathon runner**

Dimitrios Kasimis [R.N. 13110]

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Master's Degree in
"Exercise Physiology and Sports Training Science" of the Department of Physical Education
and Sport Science, Democritus University of Thrace, specialized in Exercise Physiology

COMMITTEE OF EXAMINERS

Supervisor: Ilias Smilios, Professor D.P.E.S.S. - DUTH

Member 2: Andreas Zafeiridis, Professor D.P.E.S.S. – AUTH Serres

Member 3: Helen Douda, Professor D.P.E.S.S. - DUTH

Komotini, 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δημήτριος Κασίμης: Η επίδραση ενός προπονητικού κύκλου και ενός υπερμαραθώνιου αγώνα στις φυσιολογικές παραμέτρους ενός υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου

(Με την επίβλεψη του Καθηγητή Ηλία Σμήλιου)

Σκοπός της μελέτης ήταν να εξετάσει την επίδραση μιας προπονητικής περιόδου 9 μηνών και ενός υπερμαραθώνιου αγώνα στην αερόβια απόδοση ενός υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου. Συμμετείχε ένας 44χρονος, 2ος παγκόσμιος πρωταθλητής 24ωρου δρόμου, με σωματική μάζα $65,7 \pm 0,3$ kg, ύψος 177 cm, ποσοστό λίπους 9,7% και VO_2max 68,39 ml/kg/min. Δύο μήνες μετά την έναρξη της προπονητικής περιόδου, έναν μήνα πριν τον αγώνα και μία εβδομάδα μετά, ο αθλητής εκτέλεσε δοκιμασία αυξανόμενης επιβάρυνσης σε δαπεδοεργόμετρο για τον προσδιορισμό του μέγιστου ρυθμού οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ) και της ταχύτητας στο ΜΡΟΛ, της ενεργειακής δαπάνης (ΕΔ) σε χαμηλή (14km/h) και υψηλή (18km/h) ταχύτητα καθώς και του 1^{ου} (1ΚΓ) και 2^{ου} (2ΚΓ) κατωφλιών γαλακτικού. Επιπλέον, εκτέλεσε δοκιμασία 1 ώρας συνεχόμενου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km/h για τον προσδιορισμό του μεταβολισμού των ενεργειακών υποστρωμάτων και της δρομικής οικονομίας (ΔΟ). Παράλληλα, αξιολογήθηκαν η συχνότητα διασκελισμού (ΣΔ) και ο χρόνος επαφής (ΧΕ). Τέλος, πριν από κάθε δοκιμασία ο αθλητής εκτέλεσε 3 επαναλήψεις σε κάθε ένα από τα παρακάτω άλματα: άλμα από πτώση (ΑΠ) και κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση (CMJ). Στην 1^η αξιολόγηση ο ΜΡΟΛ ήταν $1,39 \text{ gr} \cdot \text{min}^{-1}$ στα $13,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, στην 2^η $1,03 \text{ gr} \cdot \text{min}^{-1}$ στα $13,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ και στην 3^η $1,06 \text{ gr} \cdot \text{min}^{-1}$ στα $12,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Στην 1^η αξιολόγηση η ΕΔ στα 14 και $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ήταν 1,08 και $1,05 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, στην 2^η 0,98 και 1,01 και στην 3^η 0,98 και 1,16, αντίστοιχα. Η ταχύτητα στο 1^ο ΚΓ παρέμενε σταθερή και στις 3 αξιολογήσεις στα $15,5 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Στο 2^ο ΚΓ η ταχύτητα στην 1^η δοκιμασία ήταν $17,3 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, στην 2^η $17,4 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ και στην 3^η $17,0 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Η κατανάλωση οξυγόνου στο τελευταίο 10-λεπτο των 60' τρέξιμο στην 1^η μέτρηση ήταν 43,03, στην 2^η 43,60 και στην 3^η 44,74 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Στο ίδιο διάστημα, ο ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων στην 1^η μέτρηση ήταν 0,69, στην 2^η 1,02, και στην 3^η $1,27 \text{ gr} \cdot \text{min}^{-1}$ ενώ ο μεταβολισμός των λιπιδίων ήταν, αντίστοιχα, 1,16, 1,05 και $0,97 \text{ gr} \cdot \text{min}^{-1}$. Ο ΧΕ ήταν 0,253 sec στην 1^η

δοκιμασία, 0,256 sec στην 2^η και 0,250 sec στην τελευταία, ενώ η ΣΔ ήταν 255 cm στην 1^η δοκιμασία, 253 cm στην 2^η και 262 cm στην 3^η δοκιμασία. Στην αρχική αξιολόγηση ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης (ΔΑΔ) ήταν 1,5, στην 2^η 1,4 και στην τελευταία 1,2. Τέλος, το ύψος άλματος στο κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση ήταν 22,9 cm στην 1^η αξιολόγηση, 20,2 στην 2^η και 21,6 cm στην 3^η. Τα παραπάνω αναδεικνύουν τη σημασία της προπονητικής περιοδικότητας, της ενεργειακής διαχείρισης και της επαρκούς αποκατάστασης σε αθλητές υπερμαραθώνιου πολύ μεγάλης απόστασης.

Λέξεις κλειδιά: υπερμαραθώνιος, VO_{2max} , μεταβολισμός λιπιδίων, δρομική οικονομία

ABSTRACT

Dimitrios Kasimis: The effect of a training cycle and an ultramarathon race on the physiological parameters of an elite ultramarathon runner

(Under the supervision of Professor Ilias Smilios)

The aim of the present study was to examine the effect of a 9-month training period and an ultramarathon race on the aerobic performance of a high-level ultramarathon athlete. The participant was a 44-year-old male, 2nd World Champion in the 24-hour race, with a body mass of 65.7 ± 0.3 kg, height 177 cm, body fat percentage 9.7%, and VO_2max $68.39 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Two months after the onset of the training period, one month before the race, and one week post-race, the athlete performed an incremental treadmill test to determine maximal fat oxidation rate (MFO) and the speed at MFO, energy cost (EC) at low ($14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) and high ($18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) running speeds, as well as the first (LT1) and second (LT2) lactate thresholds. Additionally, a 1-hour continuous running test at $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ was conducted to assess substrate metabolism and running economy (RE). Stride frequency (SF) and contact time (CT) were also evaluated. Prior to each testing session, the athlete performed three trials of the following jumps: drop jump (DJ) and countermovement jump (CMJ). At the 1st evaluation, MFO was $1.39 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ at $13.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; at the 2nd, $1.03 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ at $13.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; and at the 3rd, $1.06 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ at $12.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. EC at 14 and $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ was 1.08 and $1.05 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ in the 1st evaluation, 0.98 and 1.01 in the 2nd, and 0.98 and 1.16 in the 3rd, respectively. Speed at LT1 remained stable across all three evaluations at $15.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Speed at LT2 was $17.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ in the 1st test, $17.4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ in the 2nd, and $17.0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ in the 3rd. Oxygen uptake during was 43.03, 43.60, and $44.74 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ in the 1st, 2nd, and 3rd measurements, respectively. During the same period, carbohydrate oxidation rate was 0.69, 1.02, and $1.27 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, whereas fat oxidation rate was 1.16, 1.05, and $0.97 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, respectively. CT was 0.253 sec in the 1st trial, 0.256 sec in the 2nd, and 0.250 sec in the 3rd, while stride frequency was 255 cm in the 1st test, 253 cm in the 2nd, and 262 cm in the 3rd. At baseline, the Reactive Strength Index (RSI) was 1.5, decreasing to 1.4 at the 2nd evaluation and 1.2 at the 3rd assessment. CMJ height was 22.9 cm at the 1st evaluation, 20.2 cm at the 2nd, and 21.6 cm at the 3rd. In conclusion, these findings highlight the importance of training

periodization, energy management, and adequate recovery in ultra-long-distance ultramarathon athletes.

Key words: ultramarathon, VO₂max, fat metabolism, running economy

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1. Φυσιολογικές μεταβολές σε υπερμαραθώνιο αγώνα.....	14
1.2. Ικανότητα αντοχής και παράμετροι που την καθορίζουν.....	16
1.3. Φυσιολογικές παράμετροι της απόδοσης σε υπερμαραθώνιες αποστάσεις.....	18
1.4. Σημασία της μελέτης.....	21
1.5. Σκοπός.....	21
1.6. Ερευνητική υπόθεση.....	21
1.7. Οριοθετήσεις και περιορισμοί.....	22
1.8. Ορισμοί και συντομογραφίες.....	23
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	24
2.1. Δείγμα.....	24
2.2. Πειραματικός σχεδιασμός.....	24
2.3. Περιγραφή μετρήσεων και όργανα μέτρησης.....	25
2.3.1. Ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά.....	25
2.3.2. Δοκιμασία προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης έως την εξάντληση.....	26
2.3.3. Κατώφλια γαλακτικού.....	27
2.3.4. Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ) και ταχύτητα στο ΜΡΟΛ.....	27
2.3.5. Προσδιορισμός του μεταβολισμού των ενεργειακών υποστρωμάτων και της δρομικής οικονομίας σε συνεχόμενη προσπάθεια σταθερής έντασης.....	28
2.3.6. Νευρομυϊκή απόδοση – Αλτική ικανότητα.....	29
2.3.7. Μέτρηση μηχανικών παραμέτρων.....	29
2.4. Στατιστική Ανάλυση.....	30

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	32
3.1. Δοκιμασία προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης.....	32
3.1.1. Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων και ταχύτητα επίτευξης του.....	32
3.1.2. Ενεργειακή δαπάνη.....	32
3.1.3. Κατώφλια γαλακτικού.....	33
3.2. Δοκιμασία παρατεταμένης διάρκειας (60 min) σταθερής έντασης.....	36
3.2.1. Δρομική οικονομία.....	36
3.2.2. Χρήση ενεργειακών υποστρωμάτων.....	36
3.2.3. Χρόνος επαφής με το έδαφος.....	38
3.2.4. Συχνότητα διασκελισμού.....	38
3.2.5. Μήκος διασκελισμού.....	39
3.3. Νευρομυϊκή Απόδοση.....	40
3.3.1. Άλμα μετά από πτώση από ύψος 30 cm.....	40
3.3.2. Κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση.....	42
 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	 43
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	48
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Προπονητικό πρόγραμμα προετοιμασίας εννέα μηνών για το Σπάρταθλο 2024.....	25
--	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.** Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων και ταχύτητα επίτευξης του πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση)..... 32
- Σχήμα 2.** Η ενεργειακή δαπάνη σε χαμηλή (14 km/h) και υψηλή (18 km/h) ταχύτητα πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση)..... 33
- Σχήμα 3.** Ταχύτητα (Α) και καρδική συχνότητα (Β) στο 1^ο κατώφλι γαλακτικού πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση) 34
- Σχήμα 4.** Ταχύτητα (Α) και καρδική συχνότητα (Β) στο 2^ο κατώφλι γαλακτικού πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση)..... 35
- Σχήμα 5.** Δρομική οικονομία στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h⁻¹, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση) 36
- Σχήμα 6.** Ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h⁻¹, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση)..... 37
- Σχήμα 7.** Ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h⁻¹, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν

μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	37
Σχήμα 8. Χρόνος επαφής με το έδαφος στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h ⁻¹ , πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	38
Σχήμα 9. Συχνότητα διασκελισμού στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h ⁻¹ , πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	39
Σχήμα 10. Μήκος στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km•h ⁻¹ , πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	39
Σχήμα 11. Δείκτης αντιδραστικής δύναμης πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	40
Σχήμα 12. Ύψος κατακόρυφου άλματος μετά από πτώση από ύψος 30 εκ. πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	41
Σχήμα 13. Χρόνος επαφής με το έδαφος κατά το κατακόρυφο άλμα μετά από πτώση από ύψος 30 εκ. πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	41

Σχήμα 14. Ύψος κατακόρυφου άλματος με ταλάντωση πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1 ^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2 ^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3 ^η αξιολόγηση).....	42
---	----

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται σημαντική αύξηση τόσο στη διοργάνωση αγώνων υπερμαραθωνίου δρόμου όσο και στη συμμετοχή αθλητών σε αυτούς (Knechtle, & Nikolaidis, 2018). Η εντυπωσιακή αυτή αύξηση της δημοτικότητας των αγώνων υπερμαραθωνίου έχει μετατρέψει το άθλημα από μια εξειδικευμένη ενασχόληση σε ένα παγκόσμιο φαινόμενο (Knechtle & Nikolaidis, 2018). Οι αγώνες υπερμαραθωνίου, αγώνες δηλαδή που υπερβαίνουν κατά πολύ την απόσταση του κλασικού μαραθωνίου, αποτελούν ένα μοναδικό «ανθρώπινο εργαστήριο» για την επιστημονική κοινότητα. Η ακραία διάρκεια και οι υψηλές απαιτήσεις τους δοκιμάζουν τα όρια της ανθρώπινης φυσιολογίας, καθιστώντας τους ένα εξαιρετικό μοντέλο για τη μελέτη των προσαρμοστικών μηχανισμών του οργανισμού σε συνθήκες ακραίου στρες (Millet & Millet, 2012; Tiller et al., 2021).

1.1. Φυσιολογικές μεταβολές σε υπερμαραθώνιο αγώνα

Η επιτυχής ολοκλήρωση ενός υπερμαραθωνίου δεν εξαρτάται μόνο από την προπονητική προετοιμασία, αλλά και από έναν περίπλοκο συνδυασμό στρατηγικών που περιλαμβάνουν την τροφοδοσία, την ενυδάτωση και την αποκατάσταση (Tiller et al., 2019). Η παρατεταμένη προσπάθεια προκαλεί μια βαθιά ομοιοστατική διαταραχή η οποία επηρεάζει σχεδόν κάθε σύστημα του οργανισμού: από το καρδιοαναπνευστικό και το μεταβολικό, μέχρι το νευρομυϊκό, το ενδοκρινικό και το ανοσοποιητικό (Hoffman, 2017). Η συμμετοχή σε έναν υπερμαραθώνιο προκαλεί μια σειρά από έντονες φυσιολογικές αποκρίσεις. Μία από τις πιο χαρακτηριστικές είναι η πρόκληση εκτεταμένης μυϊκής βλάβης, η οποία αντικατοπτρίζεται σε δραματική αύξηση των δεικτών κρεατινικής κινάσης (CK) και μυοσφαιρίνης στο αίμα (Millet et al., 2011). Σύμφωνα με τον Waśkiewicz et al. (2025), η συμμετοχή σε υπερμαραθώνιο αγώνα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονης φλεγμονώδους αντίδρασης, με την IL-6, που θεωρείται ένας ισχυρός δείκτης οξείας φλεγμονής, να παρουσιάζει την ταχύτερη και πιο σημαντική αύξηση αμέσως μετά τον αγώνα, ακολουθούμενη από επιστροφή προς τα φυσιολογικά επίπεδα εντός 24–48 ωρών. Επιπλέον, η C-αντιδρώσα πρωτεΐνη, επίσης δείκτης οξείας φλεγμονής, φαίνεται να εμφανίζει καθυστερημένη απόκριση σε σύγκριση με την IL-6, με κορύφωση συνήθως 1–3 ημέρες μετά τον αγώνα και παρατεταμένη παραμονή σε αυξημένα επίπεδα, αντανακλώντας συνεχιζόμενη μυϊκή βλάβη και συστηματικό στρες. Τέλος, οι συγγραφείς

υποστηρίζουν ότι η ήπια απόκριση της TNF-α που φάνηκε στα αποτελέσματα υποδηλώνει ότι αντιφλεγμονώδεις μηχανισμοί συμβάλλουν στον περιορισμό της υπερβολικής ενεργοποίησης του ανοσοποιητικού συστήματος (Waśkiewicz et al., 2025).

Παράλληλα, παρατηρείται έντονη απόκριση του ενδοκρινικού συστήματος, με αυξημένα επίπεδα ορμονών του στρες όπως η κορτιζόλη και οι κατεχολαμίνες (Hoffman, 2017). Ο Milheiro et al. (2024) διερεύνησαν τις ορμονικές και αντιληπτικές αποκρίσεις δρομέων κατά τη διάρκεια ενός υπερμαραθωνίου 115 km, εστιάζοντας στην κορτιζόλη, την ινσουλίνη και την υποκειμενική αντίληψη της κόπωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα επίπεδα της κορτιζόλης αυξήθηκαν σημαντικά από τα πρώτα στάδια του αγώνα και παρέμειναν υψηλά καθ' όλη τη διάρκειά του, αντανakλώντας έντονο και παρατεταμένο καταβολικό στρες. Η ινσουλίνη αντιθέτως, εμφάνισε απότομη μείωση στην αρχή του αγώνα και διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που υποδηλώνει καταστολή της αναβολικής λειτουργίας και αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Παράλληλα, οι αθλητές ανέφεραν υψηλά επίπεδα υποκειμενικής αντίληψης της κόπωσης καθ' όλη την διάρκεια του αγώνα, τα οποία φαίνεται να σχετίζονται στενά με την αύξηση της κορτιζόλης. Κλείνοντας, οι συγγραφείς υποστήριξαν ότι ο συνδυασμός αυξημένης κορτιζόλης, μειωμένης ινσουλίνης και υψηλής υποκειμενικής κόπωσης αποτελεί χαρακτηριστικό δείκτη της ακραίας φυσιολογικής καταπόνησης σε υπερμαραθώνιες συνθήκες (Milheiro et al., 2024).

Τέλος, στη μελέτη τους ο Kaufmann et al. (2021) εξέτασαν τις επιδράσεις ενός μαραθωνίου (42,2 km) και ενός υπερμαραθωνίου (130 km) στη φλεγμονώδη απόκριση και στην ομοιοστάση του σιδήρου, χρησιμοποιώντας το ίδιο δείγμα, 15 καλά προπονημένους αθλητές, ώστε να επιτευχθεί άμεση σύγκριση. Τα αποτελέσματα της έρευνας υπέδειξαν ότι και οι δύο αγώνες προκάλεσαν σημαντική αύξηση δεικτών φλεγμονής, όπως τα λευκοκύτταρα και ιδιαίτερα η CRP, με τον υπερμαραθώνιο να έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα και μεγαλύτερης διάρκειας φλεγμονώδη αντίδραση. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στον μεταβολισμό του σιδήρου όπου η φερριτίνη αυξήθηκε μετά τον υπερμαραθώνιο. Αντιθέτως, ο ορός σιδήρου και ο κορεσμός τρανσφερρίνης αυξήθηκαν μετά τον μαραθώνιο αλλά φαίνεται να μειώθηκαν μετά τον υπερμαραθώνιο, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη φυσιολογική καταπόνηση και πιθανό κίνδυνο λειτουργικής έλλειψης σιδήρου. Σύμφωνα με τους ερευνητές, οι υπερμαραθώνιοι προκαλούν εντονότερη συστηματική φλεγμονή και πιο έντονες

διαταραχές στην ομοιόσταση του σιδήρου σε σύγκριση με τους μαραθωνίους, οδηγώντας σε σημαντικές επιπτώσεις στην αποκατάσταση και την παρακολούθηση των αθλητών (Kaufmann et al., 2021).

Η κατανόηση επομένως όλων των παραπάνω πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων είναι θεμελιώδης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε υπερμαραθώνιους δρόμους και τη διασφάλιση της υγείας των αθλητών.

1.2. Ικανότητα αντοχής και παράμετροι που την καθορίζουν

Ως αντοχή ορίζεται η ικανότητα διατήρησης μιας δεδομένης ταχύτητας ή ισχύος για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα (Jones & Carter, 2000). Σύμφωνα με τον Jones et al. (2024), η ικανότητα αντοχής καθορίζεται από τρεις παραμέτρους κλειδιά, την μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($\text{VO}_{2\text{max}}$), την οικονομία τρεξίματος και το κατώφλι γαλακτικού (Jones, 2024).

Η μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου «αντανακλά τη μέγιστη ικανότητα του αναπνευστικού, του καρδιαγγειακού και του μυϊκού συστήματος να προσλαμβάνουν, να μεταφέρουν και να χρησιμοποιούν οξυγόνο κατά τη διάρκεια παρατεταμένης άσκησης υψηλής έντασης» (Lee & Zhang, 2021). Οι ίδιοι, υποστηρίζουν ότι το επίπεδο της $\text{VO}_{2\text{max}}$ αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αθλητική απόδοση, ιδιαίτερα στις μεγάλες αποστάσεις (Lee & Zhang, 2021). Οι υψηλές τιμές της $\text{VO}_{2\text{max}}$ φαίνεται να είναι χαρακτηριστικό των αθλητών υψηλού επιπέδου γεγονός που υποστηρίζεται και από την μεγάλη συσχέτιση που έχει με την αθλητική απόδοση αθλητών σε δρόμους αντοχής (Foster, 1983). Τέλος, η $\text{VO}_{2\text{max}}$ εκφράζεται σε απόλυτες τιμές, δηλαδή σε λίτρα ανά λεπτό ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$), καθώς όμως επηρεάζεται άμεσα από το σωματικό βάρος, είναι πιο αντικειμενικό να εκφράζεται σε σχετικές τιμές, δηλαδή σε χιλιοστόλιτρα ανά κιλό σωματικού βάρους ανά λεπτό ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) (Rankovic et al., 2010).

Η δρομική οικονομία αποτελεί μία από τις κρίσιμότερες παραμέτρους που συμβάλλουν στη βελτίωση των επιδόσεων στους αγώνες αντοχής (Knorr et al., 2023). Ορίζεται ως το ενεργειακό κόστος ή η ενεργειακή δαπάνη που απαιτείται για την κάλυψη συγκεκριμένης απόστασης σε σταθερή ταχύτητα κατά τη διάρκεια υπομέγιστης άσκησης. Εκτιμάται ποσοτικά είτε μέσω του ρυθμού πρόσληψης οξυγόνου ανά κιλό σωματικού βάρους και ανά χιλιόμετρο ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Km}^{-1}$) είτε ως η θερμιδική δαπάνη ανά κιλό σωματικού

βάρους ανά χιλιόμετρο ($\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Km}^{-1}$) (Saunders et al., 2004). Φαίνεται επίσης ότι η δρομική οικονομία συνδέεται άμεσα με την αθλητική επίδοση και μάλιστα υπερτερεί ως δείκτης της φυσικής κατάστασης σε σύγκριση με τη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου, διότι όσο μεγαλύτερο ποσοστό της χημικής ενέργειας μετατρέπεται σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια, τόσο υψηλότερη είναι η ενεργειακή οικονομία. Επιπρόσθετα, η βελτίωση της ενεργειακής οικονομίας στη διάρκεια της αγωνιστικής προσπάθειας οδηγεί συνήθως στη μεγιστοποίηση της αθλητικής απόδοσης (Κλεισούρας Β., 1992). Επιπλέον, συναντάται συχνά η αντικατάσταση του όρου «δρομική οικονομία» με όρους που χρησιμοποιούνται ως συνώνυμοι όπως «μεταβολικό κόστος» ή «ενεργειακό κόστος τρεξίματος» (Hauswirth & Lehénaff, 2001).

Καθώς η ένταση της άσκησης αυξάνεται σταδιακά, αυξάνεται και η συσσώρευση του γαλακτικού στο αίμα. Το σημείο στο οποίο η συσσώρευση του γαλακτικού αρχίζει να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα απομάκρυνσης του από το αίμα ως απάντηση σε περαιτέρω αύξηση της έντασης, χαρακτηρίζεται ως κατώφλι γαλακτικού (ΚΓ) (Messonnier et al., 2013). Οι Skinner και McLellan (1980), έκαναν λόγω για δύο κατώφλια γαλακτικού. Το πρώτο το χαρακτήρισαν ως «αερόβιο κατώφλι» ενώ το δεύτερο ως «αναερόβιο κατώφλι» (Skinner & McLellan, 1980). Είναι, επίσης, σύνηθες να βλέπουμε την αντικατάσταση των όρων «αερόβιο κατώφλι» και «αναερόβιο κατώφλι» με τους όρους «αναπνευστικό κατώφλι» και «κατώφλι γαλακτικού» ή «πρώτο κατώφλι γαλακτικού (ΚΓ1)» και «δεύτερο κατώφλι γαλακτικού (ΚΓ2)» (Cheng et al., 1992; Yoshida et al., 1987). Επιπρόσθετα, αρκετοί ερευνητές χρησιμοποιούν τις σταθερές συγκεντρώσεις γαλακτικού στο αίμα των 2 mmol/L και 4 mmol/L, ως αντίστοιχες με το 1^ο και 2^ο γαλακτικό κατώφλι, αντίστοιχα (Sitko et al., 2022). Στο ΚΓ1 η αύξηση της έντασης της δραστηριότητας δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του γαλακτικού στο αίμα. Αν η ένταση αυξηθεί πάνω από το ΚΓ1, ο ρυθμός παραγωγής του γαλακτικού γίνεται μεγαλύτερος από την ικανότητα μεταβολισμού του στο μυϊκό κύτταρο, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της συγκέντρωσης του στο αίμα (Skinner & McLellan, 1980). Όταν η ένταση της άσκησης παραμένει σταθερή η συσσώρευση και η απομάκρυνση του γαλακτικού βρίσκονται σε ισορροπία. Η μέγιστη ένταση που μπορεί να διατηρηθεί για 30 λεπτά χωρίς παράλληλη αύξηση της συγκέντρωσης του γαλακτικού ονομάζεται «μέγιστη σταθερή συγκέντρωση γαλακτικού» και είναι καταλληλότερος τρόπος προσδιορισμού του ΚΓ2 (Aunola & Rusko, 1992; Brooks, 1985). Διάφορες μελέτες υποστηρίζουν ότι τα κατώφλια γαλακτικού αποτελούν

καλύτερους δείκτες της αερόβιας απόδοσης συγκριτικά με την VO_2max σε ομοιογενή δείγματα αθλητών (Coyle et al., 1988, 1991; Farrell et al., 1979).

Όσο αυξάνεται η ένταση της άσκησης τόσο αυξάνεται ο ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων, έως ότου φτάσει σε κορύφωση σε μία συγκεκριμένη ένταση. Έπειτα, θα αρχίσει να μειώνεται όπου και θα αντικατασταθεί από αύξηση στην καύση των υδατανθράκων (Hultman, 1995). Η κορύφωση της καύσης των λιπιδίων σε συγκεκριμένη ένταση χαρακτηρίζεται ως «μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ)» και φαίνεται να λαμβάνει χώρα περίπου στο 63% της VO_2max (Achten & Jeukendrup, 2003). Σύμφωνα με τους Achten και Jeukendrup (2004), η αυξημένη ικανότητα οξείδωσης λιπιδίων επιτρέπει στον οργανισμό της εξοικονόμηση γλυκογόνου οδηγώντας έτσι σε καθυστέρηση στην εξάντληση των αποθεμάτων των υδατανθράκων καθώς και σε μείωση της κόπωσης. Στην πράξη, οι αθλητές έχουν την δυνατότητα να διατηρήσουν τον ρυθμό και την απόδοση για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια με μικρότερο ενεργειακό κόστος (Achten & Jeukendrup, 2004).

1.3. Φυσιολογικές παράμετροι της απόδοσης σε υπερμαραθώνιες αποστάσεις

Οι αγώνες υπερμαραθωνίου ορίζονται είτε από μια σταθερή απόσταση, όπως για παράδειγμα 100 χιλιόμετρα, είτε από ένα χρονικό όριο, για παράδειγμα 24 ώρες (Scheer et al., 2020). Σε αγώνες πολύ μεγάλης απόστασης (≥ 200 km), οι παραδοσιακοί δείκτες αερόβιας ικανότητας, αν και σημαντικοί, υποχωρούν σε σπουδαιότητα έναντι της ικανότητας για αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση και της αντίστασης στην κόπωση (Costa et al., 2019). Παράγοντες όπως η στρατηγική του ρυθμού (pacing), η διατροφή κατά τη διάρκεια του αγώνα και η διαχείριση των περιβαλλοντικών συνθηκών γίνονται καθοριστικοί για την τελική έκβαση (Jeukendrup, 2017; Nikolaidis & Knechtle, 2020). Ενώ η μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_2max) θέτει το «ταβάνι» της αερόβιας απόδοσης ενός αθλητή, η σημασία της μειώνεται σε αγώνες υπερμαραθωνίου, όπου η προσπάθεια διεξάγεται σε πολύ χαμηλότερες, υπομέγιστες εντάσεις (Jones et al., 2021). Σε αυτό το πλαίσιο, η δρομική οικονομία, δηλαδή το ενεργειακό κόστος για τη διατήρηση μιας δεδομένης ταχύτητας, αναδεικνύεται σε πιο καθοριστικό παράγοντα (Barnes & Kilding, 2015). Μια μικρή βελτίωση στην οικονομία κίνησης μπορεί να μεταφραστεί σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός αγώνα 100 χιλιομέτρων ή περισσότερο. Συνεπώς, ένας αθλητής με εξαιρετική δρομική οικονομία μπορεί να υπερισχύσει έναντι

ενός άλλου με υψηλότερη VO_2max , αλλά χαμηλότερη μηχανική και μεταβολική αποδοτικότητα. Τελικά, όμως, η απόδοση συχνά περιορίζεται από τη νευρομυϊκή κόπωση, την προοδευτική, δηλαδή, απώλεια της ικανότητας του μυός να παράγει ισχύ (Saugy et al., 2013; Vitti et al., 2020). Η αξιολόγηση δεικτών, όπως ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης μέσω κατακόρυφων αλμάτων μετά από πτώση, αποτελεί μια έγκυρη μέθοδο για την παρακολούθηση αυτής της κόπωσης (Millet, Tomazin, et al., 2011).

Η συστηματική προπόνηση υπεραντοχής οδηγεί σε σημαντικές προσαρμογές που στοχεύουν στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, όπως η βελτιωμένη θερμορύθμιση, η αυξημένη μιτοχονδριακή πυκνότητα και η ενισχυμένη ικανότητα του οργανισμού να αντιστέκεται στη μυϊκή βλάβη και το οξειδωτικό στρες. Η βασική προσαρμογή που επιδιώκεται μέσω της προπόνησης είναι η ανάπτυξη της «μεταβολικής ευελιξίας», η ικανότητα, δηλαδή του οργανισμού να χρησιμοποιεί το λίπος ως κύρια πηγή ενέργειας, εξοικονομώντας έτσι τα περιορισμένα αποθέματα γλυκογόνου (Maunder et al., 2021). Ένας υψηλός μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (FatMax) συνδέεται άμεσα με καλύτερη απόδοση, καθώς η εξάντληση του γλυκογόνου δεν οδηγεί μόνο σε ενεργειακή κρίση αλλά επιταχύνει και την εμφάνιση της κεντρικής κόπωσης (San-Millán & Brooks, 2018). Κατά συνέπεια, η εξωγενής πρόσληψη υδατανθράκων κατά τη διάρκεια του αγώνα παραμένει απολύτως κρίσιμη για τη διατήρηση της έντασης και την υποστήριξη της λειτουργίας του κεντρικού νευρικού συστήματος (Jeukendrup, 2017; Tiller et al., 2019).

Οι Hoffman & Fogard (2011) διεξήγαγαν έρευνα σε συμμετέχοντες σε δύο από τους μεγαλύτερους υπερμαραθώνιους 161 χιλιομέτρων σε μονοπάτια στη Βόρεια Αμερική, με στόχο τη διερεύνηση δημογραφικών χαρακτηριστικών και ζητημάτων που επηρέασαν την απόδοση στον αγώνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ των 500 ερωτηθέντων, ο χρόνος τερματισμού βρέθηκε να έχει σημαντική αρνητική συσχέτιση με τον όγκο προπόνησης και γενικά συσχετιζόταν άμεσα με τον δείκτη μάζας σώματος. Μεταξύ των συμμετεχόντων που δεν τερμάτισαν, ο κύριος λόγος εγκατάλειψης ήταν η ναυτία ή/και ο έμετος (23,0%). Οι συμμετέχοντες που τερμάτισαν, σε σύγκριση με τους συμμετέχοντες που δεν τερμάτισαν, ήταν πιο πιθανό να αναφέρουν φουσκάλες (40,1% έναντι 17,3%), μυϊκούς πόνους (36,5% έναντι 20,1%) και εξάντληση (23,1% έναντι 13,7%) ως παράγοντες που επηρέασαν αρνητικά την απόδοση στον αγώνα, αλλά η ναυτία ή/και ο έμετος ήταν παρόμοιοι μεταξύ των ομάδων (36,8% έναντι 39,6%). Η ναυτία ή/και ο έμετος δεν ήταν πιο συχνοί μεταξύ εκείνων που χρησιμοποιούσαν μη στεροειδή αντιφλεγμονώδη

φάρμακα (ΜΣΑΦ), εκείνων που συμμετείχαν στον αγώνα με υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, εκείνων με χαμηλότερο όγκο προπόνησης ή εκείνων που είχαν λιγότερη εμπειρία στον τερματισμό αγώνων 161 χλμ. Η συνολική χρήση ΜΣΑΦ ήταν υψηλή και μεγαλύτερη μεταξύ των ατόμων που τερμάτισαν (60,5%) συγκριτικά με εκείνους που δεν τερμάτισαν (46,4%). Από αυτή τη μελέτη, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα κύρια προβλήματα που περιορίζουν την απόδοση σε υπερμαραθώνιους 161 χιλιομέτρων περιλαμβάνουν ναυτία ή/και έμετο, φουσκάλες και μυϊκούς πόνους, και υπάρχει ανησυχητικά υψηλή χρήση ΜΣΑΦ σε αυτά τα αγωνίσματα.

Η φυσιολογική απόκριση σε άσκηση αντοχής υψηλού επιπέδου, όπως το τρέξιμο ενός μαραθωνίου, επιφέρει αρκετές ωφέλιμες αλλά και δυνητικά επιβλαβείς μεταβολικές αλλαγές. Στόχος μελέτης των Kaufmann et al. (2021) ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση του μαραθωνίου και του υπερμαραθωνίου στη φλεγμονή και την ομοιόσταση του σιδήρου σε ζευγαρωμένα δείγματα. Δεκαπέντε καλά προπονημένοι, μη επαγγελματίες αθλητές αντοχής (14 άνδρες, 1 γυναίκα) εκτέλεσαν έναν υπερμαραθώνιο 130 χλμ. και έναν παραδοσιακό μαραθώνιο 42,195 χλμ. Προσδιορίστηκαν δείκτες φλεγμονής και ομοιόστασης σιδήρου πριν, αμέσως μετά και εντός 5 ημερών μετά την ολοκλήρωση κάθε διαδρομής, αντίστοιχα. Οι βιοδείκτες φλεγμονής (λευκοκύτταρα, ουδετερόφιλα κοκκιοκύτταρα, μονοκύτταρα και c-αντιδρώσα πρωτεΐνη [CRP]) αυξήθηκαν σημαντικά τόσο μετά τον μαραθώνιο όσο και μετά τον υπερμαραθώνιο, με υψηλότερα επίπεδα CRP μετά τον υπερμαραθώνιο σε σύγκριση με τον μαραθώνιο, τόσο αμέσως μετά τον αγώνα ($18,15 \pm 12,41$ έναντι $5,58 \pm 9,65$ mg/L) όσο και κατά την παρακολούθηση ($15,67 \pm 16,97$ έναντι $7,19 \pm 7,75$ mg/L). Οι συγκεντρώσεις φερριτίνης αυξήθηκαν επίσης σημαντικά μετά και τους δύο αγώνες και παρέμειναν υψηλές κατά την παρακολούθηση. Υψηλότερα επίπεδα φερριτίνης αμέσως μετά τον αγώνα ($111,5 \pm 103,2$ έναντι $84,8 \pm 86,3$) και κατά την παρακολούθηση ($102,7 \pm 79,5$ έναντι $74,6 \pm 65,6$) βρέθηκαν σε αθλητές που τερμάτισαν σε υπερμαραθώνιο. Η παρατηρούμενη αύξηση του σιδήρου ορού και του κορεσμού τρανσφερίνης (TSAT) μετά τον μαραθώνιο και η μείωση του σιδήρου ορού και της TSAT μετά τον υπερμαραθώνιο οδήγησαν σε σημαντική απόλυτη διαφορά μεταξύ των δύο αγώνων. Τα παρόντα δεδομένα υποδηλώνουν υψηλότερο βαθμό φλεγμονής μετά τον υπερμαραθώνιο σε σύγκριση με τον μαραθώνιο. Οι δείκτες ομοιόστασης σιδήρου έδειξαν, επίσης, διαφορετικά πρότυπα απόκρισης όσον αφορά την απόσταση τρεξίματος (Kaufmann et al., 2021).

1.4. Σημασία της μελέτης

Παρά την πληθώρα ερευνών, παραμένει ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία που σχετίζεται με την έλλειψη ολιστικών, διαχρονικών μελετών οι οποίες παρακολουθούν έναν ελίτ αθλητή μέσα από έναν πλήρη προπονητικό κύκλο, τον αγώνα-στόχο και την περίοδο αποκατάστασης (Millet, 2011). Οι περισσότερες μελέτες εξετάζουν μεμονωμένες παραμέτρους, αποτυγχάνοντας να συλλάβουν τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ προπόνησης, απόδοσης και αποκατάστασης. Η παρούσα εργασία, μέσω της μεθοδολογίας της μελέτης περίπτωσης, στοχεύει να συνεισφέρει στην κάλυψη αυτού του κενού. Επιδιώκει να φωτίσει τις φυσιολογικές και μεταβολικές προσαρμογές ενός υπερμαραθωνοδρόμου υψηλού επιπέδου, αναλύοντας έναν ολοκληρωμένο προπονητικό κύκλο εννέα μηνών, την απόκριση σε έναν αγώνα υπερμαραθωνίου πολύ μεγάλης απόστασης, και τη δυναμική της αποκατάστασης.

1.5. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να διερευνήσει την επίδραση ενός ολοκληρωμένου προπονητικού κύκλου εννέα μηνών και της συμμετοχής σε αγώνα υπερμαραθωνίου πολύ μεγάλης απόστασης στις φυσιολογικές παραμέτρους και στον μεταβολισμό ενεργειακών υποστρωμάτων υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η επίδραση του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών και του αγώνα στόχου στον μέγιστο ρυθμό οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ) στην ταχύτητα στο ΜΡΟΛ, στην ενεργειακή δαπάνη (ΕΔ) σε χαμηλή (14km/h) και υψηλή (18km/h) ταχύτητα συνδυαστικά με τη συχνότητα και το μήκος του διασκελισμού, στη δρομική οικονομία, στον ρυθμό οξείδωσης των υδατανθράκων (ΡΟΥ) και λιπιδίων (ΡΟΛ), στα γαλακτικά κατώφλια 1 και 2, καθώς και στη νευρομυϊκή λειτουργία σε δύο τύπους κατακόρυφου άλματος (άλμα από πτώση από κουτί ύψους 30 εκ. και άλμα με ταλάντωση). Οι αξιολογήσεις θα λάβουν χώρα δύο μήνες μετά την έναρξη της προπονητικής περιόδου, έναν μήνα πριν τον αγώνα (Σπάρταθλο 2024, δρόμος 245 km) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα.

1.6. Ερευνητική υπόθεση

Η ερευνητική υπόθεση της παρούσας μελέτης που εξετάστηκε είναι: η συστηματική προπονητική επιβάρυνση και η συμμετοχή στον αγώνα θα επιφέρουν

σημαντικές και μετρήσιμες μεταβολές στην αερόβια απόδοση, τη μεταβολική ευελιξία και τη νευρομυϊκή λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, το προπονητικό πλάνο των εννέα μηνών θα οδηγήσει σε μείωση του ΜΡΟΛ, σε αύξηση στην ταχύτητα στο ΜΡΟΛ καθώς και σε μείωση της ενεργειακής δαπάνης σε όλες τις ταχύτητες. Επιπλέον, θα αυξηθεί ο ΡΟΥ και θα μειωθεί ο ΡΟΛ. Επίσης, τα γαλακτικά κατώφλια 1 και 2 θα βελτιωθούν, θα αυξηθεί η συχνότητα και το μήκος του διασκελισμού και θα βελτιωθούν όλοι οι τύποι άλματος και θα βελτιωθεί και η δρομική οικονομία. Μετά τον αγώνα στόχο και σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες αξιολογήσεις, ο ΜΡΟΛ θα μειωθεί μετά την 1^η αξιολόγηση και θα αυξηθεί μετά την 2^η. Η ΕΔ θα μειωθεί στην χαμηλή ταχύτητα (14km/h) μετά την 1^η μέτρηση και θα παραμείνει σταθερή μετά την 2^η, ενώ η ΕΔ στην υψηλή ταχύτητα (18km/h) θα μειωθεί μετά την 1^η αξιολόγηση και θα αυξηθεί μετά την 2^η. Η δρομική οικονομία θα αυξηθεί σε σχέση με την 1^η και σε σχέση με την 2^η αξιολόγηση. Επιπρόσθετα, ο ΡΟΥ θα αυξηθεί συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες μετρήσεις ενώ ο ΡΟΛ θα μειωθεί σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο αξιολογήσεις. Τέλος, το ύψος του άλματος σε όλους τους τύπους άλματος θα μειωθεί σε σχέση με τις προηγούμενες δύο μετρήσεις ενώ τα γαλακτικά κατώφλια θα αυξηθούν σε σχέση με την 1^η αξιολόγηση αλλά θα παραμείνουν σταθερά μετά την 2^η μέτρηση.

Η υπόθεση αυτή βασίζεται σε προηγούμενα ευρήματα που δείχνουν σημαντικές μεταβολικές και νευρομυϊκές αλλοιώσεις μετά από παρατεταμένη άσκηση (Millet et al., 2011; San-Millán & Brooks, 2018).

1.7. Οριοθετήσεις και περιορισμοί

Οι οριοθετήσεις και οι περιορισμοί της παρούσας έρευνας είναι οι εξής:

- ως προς τον αριθμό του δείγματος: η παρούσα μελέτη περιορίζεται στη διερεύνηση ενός αθλητή υψηλού επιπέδου.
- ως προς την γενίκευση των αποτελεσμάτων: η φύση της μελέτης περίπτωσης (N=1) περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, προσφέρει μια βαθιά, λεπτομερή ανάλυση που είναι αδύνατη σε μελέτες μεγάλης κλίμακας, μια προσέγγιση που συνάδει με τις βέλτιστες πρακτικές έρευνας στην υπεραντοχή (Tiller et al., 2021). Παράγοντες όπως η διατροφική στρατηγική και η ατομική ανταπόκριση στην προπόνηση ενδέχεται να επηρεάσουν τα ευρήματα (Stellingwerff, 2019).

- Αποχή από τραυματισμό τον τελευταίο χρόνο.
- Δεν ελέγχθηκε η διατροφή κατά το πρόγραμμα παρέμβασης.

1.8. Ορισμοί και συντομογραφίες

Υπερμαραθώνιος: Αγώνας δρόμου αντοχής που υπερβαίνει την απόσταση των 42.195 μέτρων.

Υπερμαραθωνοδρόμος: Αθλητής που συμμετέχει συστηματικά σε αγώνες υπερμαραθωνίου.

Μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2max}): Ο μέγιστος ρυθμός πρόσληψης, μεταφοράς και χρήσης οξυγόνου κατά τη διάρκεια μέγιστης άσκησης (Jones et al., 2021). Αποτελεί τον «χρυσό κανόνα» για την αξιολόγηση της αερόβιας ικανότητας (Bassett & Howley, 2000).

Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (MPOΛ): Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων κατά την άσκηση, δείκτης μεταβολικής αποδοτικότητας (Maunder et al., 2021). Εκφράζεται συνήθως σε g/min και σχετίζεται με μεταβολική αποδοτικότητα (Jeukendrup & Wallis, 2005).

Ταχύτητα στον μέγιστο ρυθμό οξείδωσης λιπιδίων: Η ταχύτητα στην οποία επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων.

Ενεργειακή δαπάνη (ΕΔ): Η συνολική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται για βασικές λειτουργίες και σωματική δραστηριότητα (kcal/kg/kM) (Westerterp, 2017).

Δρομική οικονομία: Η ποσότητα οξυγόνου ή ενέργειας που απαιτείται για μια συγκεκριμένη υπομέγιστη ταχύτητα τρεξίματος (Barnes & Kilding, 2015).

Δείκτης αντιδραστικής δύναμης: Δείκτης που αξιολογεί την ικανότητα του νευρομυϊκού συστήματος να χρησιμοποιεί τον κύκλο διάτασης-βράχυνσης. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του ύψους άλματος προς τον χρόνο επαφής (Flanagan et al., 2008).

Δείκτης αντιδραστικής δύναμης = Ύψος άλματος / Χρόνος επαφής

Συχνότητα διασκελισμού: Οι επαναλαμβανόμενες κινήσεις των ποδιών κατά τη διάρκεια του τρεξίματος, ανά λεπτό (steps/min)

Άλμα από πτώση (DJ): Κατακόρυφο άλμα μετά από πτώση

Άλμα άνευ φοράς (SJ): Κατακόρυφο άλμα με προδιάταση

Κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση (CMJ): Κατακόρυφο άλμα με προδιάταση και αιώρηση χεριών.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Δείγμα

Στη μελέτη συμμετείχε εθελοντικά ένας άνδρας υπερμαραθωνοδρόμος, ηλικίας 44 ετών, διεθνούς επιπέδου (2^{ος} παγκόσμιος πρωταθλητής σε αγώνα 24 ωρών). Κατά την έναρξη της μελέτης, τα ανθρωπομετρικά και φυσιολογικά του χαρακτηριστικά ήταν: σωματική μάζα 66 kg, ύψος 177 cm, και μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου ($\text{VO}_{2\text{max}}$) $65,5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Ο αθλητής ενημερώθηκε πλήρως για τους σκοπούς και τις διαδικασίες της έρευνας και παρείχε γραπτή συγκατάθεση για τη συμμετοχή του, σύμφωνα με τις αρχές της Διακήρυξης του Ελσίνκι.

2.2. Πειραματικός σχεδιασμός

Η παρούσα έρευνα υιοθέτησε τον σχεδιασμό της διαχρονικής μελέτης περίπτωσης. Δύο μήνες μετά την έναρξη της προπονητικής περιόδου 29 Ιανουαρίου 2024, έναν μήνα πριν τον αγώνα (Σπάρταθλο 2024, δρόμος 245km) 28 Αυγούστου 2024 και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα, 8 Οκτωβρίου 2024, ο αθλητής εκτέλεσε δοκιμασία αυξανόμενης επιβάρυνσης σε δαπεδοεργόμετρο για τον προσδιορισμό του μέγιστου ρυθμού οξείδωσης λιπιδίων (MPOΛ), της ταχύτητας στο MPOΛ, της ενεργειακής δαπάνης (ΕΔ) σε χαμηλή (14km/h) και υψηλή (18km/h) ταχύτητα, του 1^{ου} και το 2^{ου} κατωφλιού γαλακτικού. Επιπλέον, μετά τη δοκιμασία αυξανόμενης επιβάρυνσης, αφού ο συμμετέχων ξεκουράστηκε παθητικά για διάστημα 30 λεπτών, εκτέλεσε δοκιμασία 1 ώρας συνεχόμενου τρεξίματος με ταχύτητα 14 km/h για τον προσδιορισμό του μεταβολισμού των ενεργειακών υποστρωμάτων σε συνδυασμό με τις μηχανικές παραμέτρους του χρόνου επαφής με το έδαφος και τη συχνότητα διασκελισμού. Πριν από την έναρξη της δοκιμασίας αυξανόμενης επιβάρυνσης, ζητήθηκε από τον εξεταζόμενο να εκτελέσει από τρία άλματα από το άλμα με ταλάντευση και το άλμα από πτώση από ύψος 30 cm.

Η προπονητική παρέμβαση διήρκεσε εννέα μήνες και σχεδιάστηκε με στόχο την κορύφωση της απόδοσης στον αγώνα Σπάρταθλον 2024. Το πρόγραμμα περιλάμβανε κατά μέσο όρο επτά προπονητικές μονάδες ανά εβδομάδα, τρεις από τις οποίες περιλάμβαναν διαλειμματική προπόνηση υψηλής έντασης (HIIT) για τη βελτίωση της $\text{VO}_{2\text{max}}$, προπόνηση σε ανηφόρες για την αύξηση της μυϊκής ισχύος και αντοχής, και εκτενείς προπονήσεις μεγάλης διάρκειας (>3 ώρες) σε χαμηλή ένταση για την ενίσχυση των

μεταβολικών προσαρμογών. Οι υπόλοιπες τέσσερις προπονήσεις είχαν διάρκεια ≈ 2 ωρών στην προπονητική ζώνη έντασης 1 (Πίνακας 1). Η παρακολούθηση του προπονητικού φορτίου γινόταν συστηματικά μέσω προπονητικού ημερολογίου, καταγράφοντας τη διάρκεια, την απόσταση και την υποκειμενική αντίληψη της κόπωσης, μια έγκυρη μέθοδο για την ποσοτικοποίηση του εσωτερικού φορτίου (Bourdon et al., 2017).

Πίνακας 1. Προπονητικό πρόγραμμα προετοιμασίας εννέα μηνών για τον Σπάρταθλο 2024.

Περίοδος	Εβδομαδιαία Χιλιόμετρα	Τρέξιμο μεγάλης διάρκειας	Ειδικές Προπονήσεις	Στόχος Φάσης
Μήνες 1–3	130–170 km	30–40 km	• 1 tempo/εβδομάδα • 1 ανηφόρες/ εβδομάδα • 2 ενδυνάμωση • 1 ποδήλατο • 2 μεγάλα τρεξίματα	Αερόβιας βάσης
Μήνες 4–5	170–180 km	40–45 km	• 1 tempo/ εβδομάδα • 1 ανηφόρες/ εβδομάδα • 2 ενδυνάμωση • 1 ποδήλατο • 2 μεγάλα τρεξίματα	Ανάπτυξη αντοχής & προσαρμογή σε κόπωση
Μήνες 6–7	180–220 km	45–60 km	• 1 tempo/εβδομάδα • 1 ανηφόρες/ εβδομάδα • 2 ενδυνάμωση • 1 ποδήλατο • 2 μεγάλα τρεξίματα	Εξειδίκευση υπεραπόστασης & στρατηγική αγώνα
Μήνας 8	180–200 km	60–70 km	2 tempo/ εβδομάδα • 2 μεγάλα τρεξίματα	Μέγιστη προσαρμογή
Μήνας 9	Σταδιακή μείωση/εβδ.	Έως 45 km	• Διατήρηση έντασης • Έμφαση αποκατάσταση	Φορμάρισμα

2.3. Περιγραφή μετρήσεων και όργανα μέτρησης

2.3.1. Ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά

Η διαδικασία ζύγισης πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονική ζυγαριά (Seca alpha 770, Vogel & Halke Hamburg, Germany). Ο δοκιμαζόμενος, αφού είχε αφαιρέσει τα υποδήματά του, στεκόταν ακίνητος στο κέντρο της ζυγαριάς, κοιτάζοντας μπροστά και χωρίς να στηρίζεται κάπου. Η μάζα του σώματός του μετρήθηκε με ακρίβεια 0,1 kg.

Η αξιολόγηση του ύψους έγινε με τη χρήση φορητού αναστημόμετρου (Seca 213) στον κατακόρυφο άξονα του οποίου ήταν προσαρμοσμένος ένας οριζόντιος χάρακας που ερχόταν σε επαφή με το υψηλότερο σημείο του κεφαλιού του δοκιμαζόμενου. Η καταγραφή του σωματικού ύψους έγινε με ακρίβεια 0,01 m. Για την αξιολόγηση του ύψους, ο εξεταζόμενος στεκόταν σε όρθια θέση με τις φτέρνες ενωμένες χωρίς να φοράει υποδήματα και με το κεφάλι να κοιτάει ευθεία μπροστά.

Η διαδικασία της λιπομέτρησης πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των δερματοπτυχών 7 σημείων με τη χρήση δερματοπτυχομέτρου Harpenden (Harpenden Skinfold Caliper, HSK-BI, British Indicators, England). Οι δερματοπτυχές που μετρήθηκε το πάχος τους ήταν:

1. Θωρακική δερματοπτυχή
2. Μεσομασχαλιαία δερματοπτυχή
3. Δερματοπτυχή τρικεφάλου βραχιονίου
4. Δερματοπτυχή υποπλάτιου
5. Δερματοπτυχή λαγόνιου
6. Κοιλιακή δερματοπτυχή και
7. Δερματοπτυχή τετρακεφάλου μηριαίου.

Ο υπολογισμός της σύστασης σώματος έγινε βάσει των ακόλουθων εξισώσεων:
Πυκνότητα σώματος= $1.112 - (0.00043499 \times \text{άθροισμα των πτυχών}) + (0.00000055 \times \text{άθροισμα των πτυχών εις το τετράγωνο}) - (0.00028826 \times \text{ηλικία})$
(Jackson & Pollock, 1978),

% Σωματικό Λίπος = $(495 / \text{Πυκνότητα σώματος}) - 4.50$ (Siri, 1956)

2.3.2. Δοκιμασία προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης έως την εξάντληση

Πραγματοποιήθηκε δοκιμασία προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης έως την εξάντληση σε δαπεδοεργόμετρο (h/p/ cosmos pulsar 3p, Nussdorf-Traunstin, Germany) για να προσδιοριστεί η $\text{VO}_{2\text{max}}$, ο ΜΡΟΛ, η ταχύτητα στον ΜΡΟΛ, το 1ο και 2ο κατώφλι γαλακτικού και η ενεργειακή δαπάνη σε ταχύτητες τρεξίματος 14 και 18 km/h. Η κλίση του δαπεδοεργομέτρου ήταν σταθερά στο 1% για την εξουδετέρωση της αντίστασης του αέρα σε τρέξιμο εκτός εργαστηριακού περιβάλλοντος (Jones & Doust, 1996). Η αρχική ταχύτητα για τη μέτρηση ορίστηκε στα 13 km/h και η ταχύτητα αυξανόταν κατά 1 km/h κάθε 3 λεπτά έως την εξάντληση του δοκιμαζόμενου. Η ανταλλαγή αερίων καταγράφονταν σε όλη τη διάρκεια της δοκιμασίας προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης έως την εξάντληση. Για την καταγραφή του προσλαμβανόμενου VO_2 και της αποβαλλομένου VCO_2 , ανά αναπνοή, χρησιμοποιήθηκε ανοιχτό κύκλωμα σπироμέτρησης (Quark RMR-CPET, Cosmed, Italy). Οι αναλυτές αερίων βαθμονομούνταν πριν από κάθε μέτρηση με τη χρήση τυποποιημένων αερίων. Μετά το τέλος των μετρήσεων, οι τιμές των αερίων ομαλοποιήθηκαν σε χρονικά διαστήματα 30 δευτερολέπτων και η υψηλότερη τιμή VO_2 θεωρήθηκε ως η $\text{VO}_{2\text{max}}$. Η επίτευξη της $\text{VO}_{2\text{max}}$ θεωρήθηκε επιτυχής όταν επιτεύχθηκαν τουλάχιστον τρία από τα παρακάτω κριτήρια: 1) ορατή εξάντληση του δοκιμαζόμενου, 2) μέγιστη καρδιακή συχνότητα υψηλότερη από το 90% της προβλεπόμενης μέγιστης καρδιακής συχνότητας με βάση την ηλικία ($220 - \text{ηλικία}$), 3) λόγος ανταλλαγής αναπνευστικών αερίων $>1,10$ και 4) αύξηση της πρόσληψης οξυγόνου $<2 \text{ ml}^{-1} \bullet \text{kg}^{-1} \bullet \text{min}^{-1}$ παρά την αύξηση της δρομικής ταχύτητας. Η καρδιακή συχνότητα καταγράφηκε σε όλη τη διάρκεια της δοκιμασίας με φορητό καρδιακό παλμογράφο (Polar H10). Κατά τη δεύτερη και τρίτη αξιολόγηση ο αθλητής δεν κατάφερε να φτάσει στην εξάντληση εξαιτίας ενοχλήσεων και μικροτραυματισμών που εμφανίστηκαν κατά το προηγούμενο διάστημα.

2.3.3. Κατώφλια γαλακτικού

Στο τέλος κάθε σταδίου κατά τη διάρκεια της προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης, συλλέχθηκαν 0,3 mL αίματος από την άκρη του δακτύλου και αναλύθηκαν άμεσα για τη συγκέντρωση γαλακτικού οξέος με φορητή συσκευή (Lactate scout 4 (EKF diagnostics, Germany)), χρησιμοποιώντας ενζυμική-αμπερομετρική μέθοδο. Πριν από κάθε δειγματοληψία αίματος, καθαρίζονταν η περιοχή διάτρησης σχολαστικά με τη χρήση βαμβακιού και καθαρού οινόπνεύματος για τη διασφάλιση της εγκυρότητας και

αξιοπιστίας κάθε μέτρησης. Η σχέση μεταξύ συγκεντρώσεων γαλακτικού οξέος στο αίμα και δρομικών ταχυτήτων καθορίστηκαν με την χρήση εκθετικού μοντέλου: $y = \alpha + \beta \times \exp(x/\gamma)$, όπου y = συγκέντρωση γαλακτικού, x = δρομική ταχύτητα και α , β , γ σταθερές. Το ΚΓ1 και το ΚΓ2 προσδιορίστηκαν ως οι ταχύτητες ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) στις οποίες οι συγκεντρώσεις γαλακτικού στο αίμα αυξήθηκαν κατά 0,3 και 1,5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ από τις τιμές βάσης, αντίστοιχα.

2.3.4. Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ) και ταχύτητα στο ΜΡΟΛ

Τα δεδομένα ανταλλαγής αερίων (VO_2 , VCO_2) που συλλέχθηκαν κατά το τελευταίο 1 λεπτό τρεξίματος σε κάθε ταχύτητα, χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς του θερμιδικού κόστους της άσκησης. Αρχικά εκτιμήθηκε ο ρυθμός οξείδωσης των ενεργειακών υποστρωμάτων ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$) χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις αναπνευστικού πηλίκου μη λαμβάνοντας υπ' όψη τον μεταβολισμό των πρωτεϊνών (Péronnet & Massicotte, 1991):

$$\text{Οξείδωση λίπους } (\text{g} \cdot \text{min}^{-1}) = 1.695 \times \text{VO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) - 1.701 \times \text{VCO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$\text{Οξείδωση υδατανθράκων } (\text{g} \cdot \text{min}^{-1}) = 4.585 \times \text{VCO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) - 3.223 \times \text{VO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$$

Με την εφαρμογή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού ($\alpha x^2 + \beta x + \gamma$) προσδιορίστηκε η μαθηματική σχέση του ρυθμού οξείδωσης των λιπιδίων σε συνάρτηση με τη δρομική ταχύτητα. Βάσει των συντελεστών του πολυωνύμου, η ταχύτητα στο ΜΡΟΛ προσδιορίστηκε με τον τύπο: $-\alpha/2\beta$. Στη συνέχεια, ο ΜΡΟΛ υπολογίστηκε από το πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού όπου ως x χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα στο ΜΡΟΛ.

Για τις ταχύτητες των 14 και 18 km/h υπολογίστηκε η ενέργεια (kcal) που παράγεται από το κάθε υπόστρωμα πολλαπλασιάζοντας τον ρυθμό οξείδωσης του με τα ισοδύναμα ενέργειας για 1 gr λίπους και υδατάνθρακα, 9,75 και 4,07 kcal , αντίστοιχα (Jeukendrup & Wallis, 2005). Το συνολικό θερμιδικό κόστος υπολογίστηκε από το άθροισμα των τιμών ενέργειας των δύο υποστρωμάτων σε $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

2.3.5. Προσδιορισμός του μεταβολισμού των ενεργειακών υποστρωμάτων και της δρομικής οικονομίας σε συνεχόμενη προσπάθεια σταθερής έντασης

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση στο δαπεδοεργόμετρο ($\text{h/p/ cosmos pulsar 3p}$, Nussdorf-Traunstein, Germany) για να προσδιοριστεί ο μεταβολισμός των ενεργειακών

υποστρωμάτων και η δρομική οικονομία σε μεγάλης διάρκειας προσπάθεια 60 λεπτών. Η κλίση του δαπεδοεργομέτρου ήταν σταθερά στο 1% για την εξουδετέρωση της αντίστασης του αέρα σε τρέξιμο εκτός εργαστηριακού περιβάλλοντος (Jones & Doust, 1996). Η ταχύτητα ορίστηκε στα 14 km/h, ταχύτητα η οποία αντιστοιχεί στον ρυθμό του παγκόσμιου ρεκόρ στις 24ώρες συνεχόμενου τρεξίματος, και παρέμενε σταθερή σε όλη τη διάρκεια της δοκιμασίας. Οι τιμές της VO_2 των τελευταίων 10 λεπτών της ώρας συλλέχθηκαν για τον υπολογισμό της δρομικής οικονομίας εκφρασμένη σε σχετικές τιμές ως κατανάλωση οξυγόνου ανά μονάδα απόστασης ($mL \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$). Επιπλέον, για το ίδιο χρονικό διάστημα, οι τιμές των VO_2 και VCO_2 χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ρυθμού οξείδωσης των λιπιδίων και των υδατανθράκων ($g \cdot min^{-1}$) και του θερμιδικού κόστους χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

2.3.6. Νευρομυϊκή απόδοση – Αλτική ικανότητα

Η αλτική ικανότητα αξιολογήθηκε μέσω μιας σειράς κατακόρυφων αλμάτων, χρησιμοποιώντας ένα οπτοηλεκτρικό σύστημα μέτρησης (Optojump, Microgate, Ιταλία). Το σύστημα αποτελείται από δυο μπάρες (μεγέθους 100 x 4 x 3 cm), μιας εκπομπής σήματος και μιας λήψης σήματος, με ενσωματωμένες σε κάθε μπάρα 96 διόδους οπτικού υπέρυθρου φωτός, που βρίσκονται σε επικοινωνία μεταξύ τους. Το σύστημα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό για ηλεκτρονικό υπολογιστή (Optojump Next v. 1.9.7.0) με το οποίο υπολογίζεται το ύψος του άλματος, με βάση τον χρόνο πτήσης:

$$YA = g * \chi\pi^2 / 8$$

όπου YA = ύψος άλματος (cm), g = η δύναμη της βαρύτητας ($9,81 m/sec^2$) και $\chi\pi$ = χρόνος πτήσης (sec).

Οι δοκιμασίες που εκτελέστηκαν ήταν:

Άλμα από πτώση από ύψος 30cm (DJ): Για τον υπολογισμό του δείκτη αντιδραστικής δύναμης, ο οποίος αποτελεί έναν ευαίσθητο δείκτη της νευρομυϊκής ετοιμότητας και κόπωσης (Flanagan & Comyns, 2008), ο ασκούμενος βρισκόταν επάνω σε πλινθίο ύψους 30 εκατοστών με τα χέρια του στην μεσολαβή και το ένα πόδι σε μικρή προβολή. Από αυτή την θέση έπεφτε από το πλινθίο και εκτελούσε άλμα αμέσως μετά την

επαφή του με το έδαφος. Η οδηγία που του δινόταν ήταν να εκτελεί το άλμα όσο το δυνατόν ψηλότερα και γρηγορότερα μπορεί συνδυάζοντας το μέγιστο δυνατό ύψος άλματος με το μικρότερο δυνατό χρόνο επαφής με το έδαφος. Έγκυρα άλματα θεωρούνταν μόνον σε όσα ο χρόνος επαφής με το έδαφος ήταν μικρότερος από 250 ms. Οι συμμετέχων εκτέλεσε τέσσερα έγκυρα άλματα και για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή άλματος μεταξύ των τεσσάρων. Η μηχανική ισχύς του άλματος, που αποτελεί δείκτη αντιδραστικής δύναμης, υπολογίστηκε με βάση τον τύπο:

$$\text{Ισχύς (Watt/kg)} = 9,812 * \text{χρόνος πτήσης} * ((\text{χρόνος πτήσης} + \text{χρόνος επαφής με το έδαφος}) / 4 * \text{χρόνος επαφής με το έδαφος})$$

Κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση: Για την αξιολόγηση της ικανότητας χρήσης του κύκλου διάτασης-βράχυνσης, ο συμμετέχων είχε τα χέρια στη μέση και με το παράγγελα του ερευνητή εκτελούσε κάθοδο μέχρι τη θέση του ημικαθίσματος και έπειτα ένα μέγιστο κατακόρυφο άλμα. Το άλμα θεωρήθηκε έγκυρο όταν ο εξεταζόμενος προσγειώθηκε στην ίδια θέση από την οποία απογειώθηκε. Οι συμμετέχων εκτέλεσε τέσσερα έγκυρα άλματα και για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή άλματος μεταξύ των τεσσάρων.

2.3.7. Μέτρηση μηχανικών παραμέτρων

Για την μέτρηση των μηχανικών παραμέτρων, συχνότητα διασκελισμού και χρόνος επαφής με το έδαφος, κατά το τρέξιμο με ταχύτητα 14 km/h, χρησιμοποιήθηκε σύστημα οπτικής συλλογής δεδομένων (Optojump Next, Microgate It). Το σύστημα αποτελείται από δυο μπάρες (μεγέθους 100 × 4 × 3 cm) με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, η μια με τη μονάδα ελέγχου και λήψης σήματος και η άλλη με τη μονάδα εκπομπής σήματος, οι οποίες τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν στις πλαϊνές επιφάνειες του δαπεδοεργομέτρου. Η καταγραφή των δεδομένων ήταν συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμασίας.

2.4. Στατιστική Ανάλυση

Λόγω της φύσης της μελέτης περίπτωσης (N=1), η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν περιγραφική. Η περιγραφική στατιστική έγινε με τη χρήση του Excel για IOS. Τα δεδομένα παρουσιάζονται ως μέσες τιμές, ποσοστιαίες μεταβολές (Δ%) και γραφήματα για την οπτικοποίηση των αλλαγών στις μετρούμενες παραμέτρους κατά

τη διάρκεια των εννέα μηνών. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια λεπτομερή ανάλυση της ατομικής απόκρισης του αθλητή, η οποία αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της συγκεκριμένης μεθοδολογίας (Halsen, 2014).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

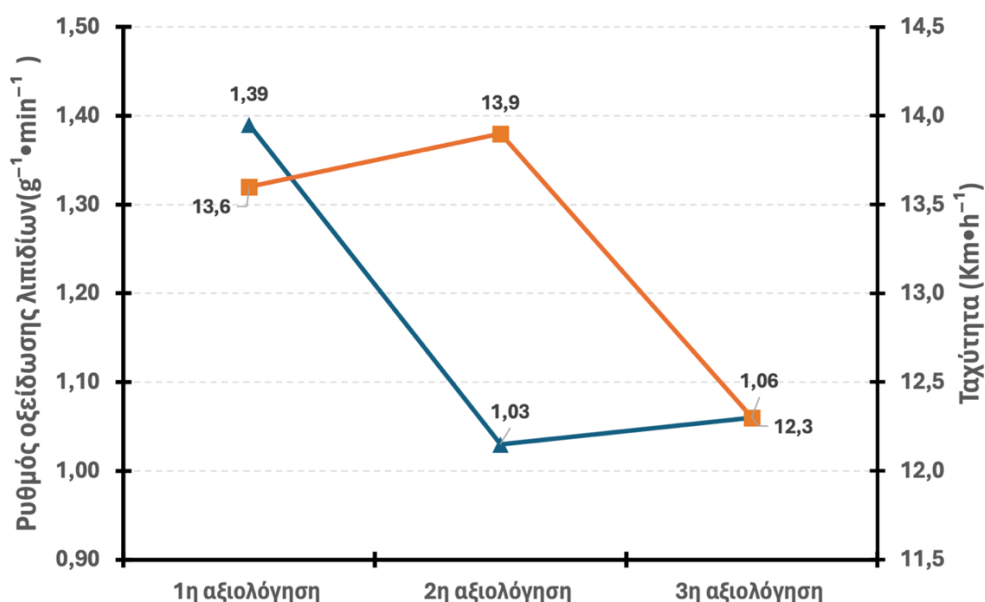
3.1. Δοκιμασία προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης

3.1.1. Μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων και ταχύτητα επίτευξης του

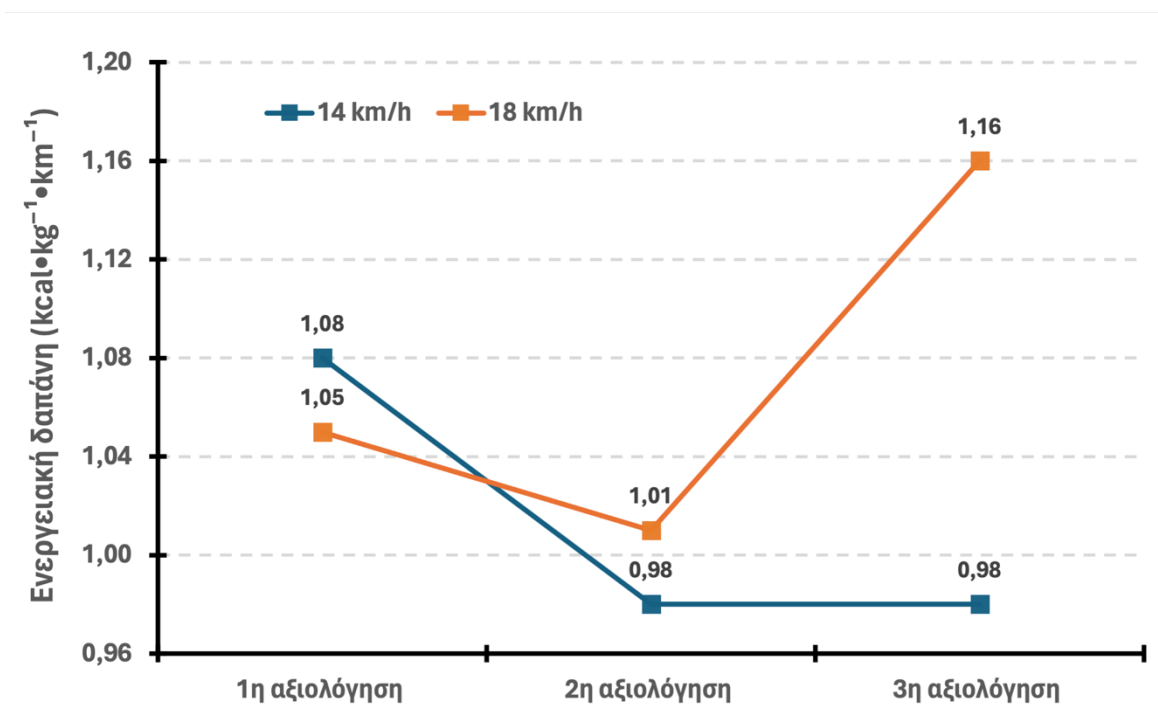
Στην αρχική μέτρηση, ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης λιπιδίων (ΜΡΟΛ) ανήλθε σε $1,39 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ και επιτεύχθηκε σε ταχύτητα $13,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Εννέα μήνες μετά, στη μέτρηση πριν τον αγώνα, ο ΜΡΟΛ μειώθηκε στα $1,03 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, ενώ η ταχύτητα επίτευξης αυξήθηκε στα $13,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Σχήμα 1). Τέλος, στην αξιολόγηση μία εβδομάδα μετά τον αγώνα, παρατηρήθηκε μια ελαφρά ανάκαμψη του ΜΡΟΛ στα $1,06 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, ωστόσο, η ταχύτητα στην οποία επιτεύχθηκε αυτός ο ρυθμός ήταν χαμηλότερη, στα $12,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

3.1.2. Ενεργειακή δαπάνη

Η ΕΔ στη χαμηλή ένταση ($14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) στην 1^η αξιολόγηση ήταν $1,08 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, μειώθηκε σε $0,98 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ στην μέτρηση πριν τον αγώνα και παρέμεινε σταθερή και στην μέτρηση μετά τον αγώνα. Η ΕΔ στην υψηλή ένταση ($18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), 1^η αξιολόγηση ήταν $1,05 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, μειώθηκε στη μέτρηση πριν τον αγώνα σε $1,01 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ και αυξήθηκε στις $1,16 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (Σχήμα 2).



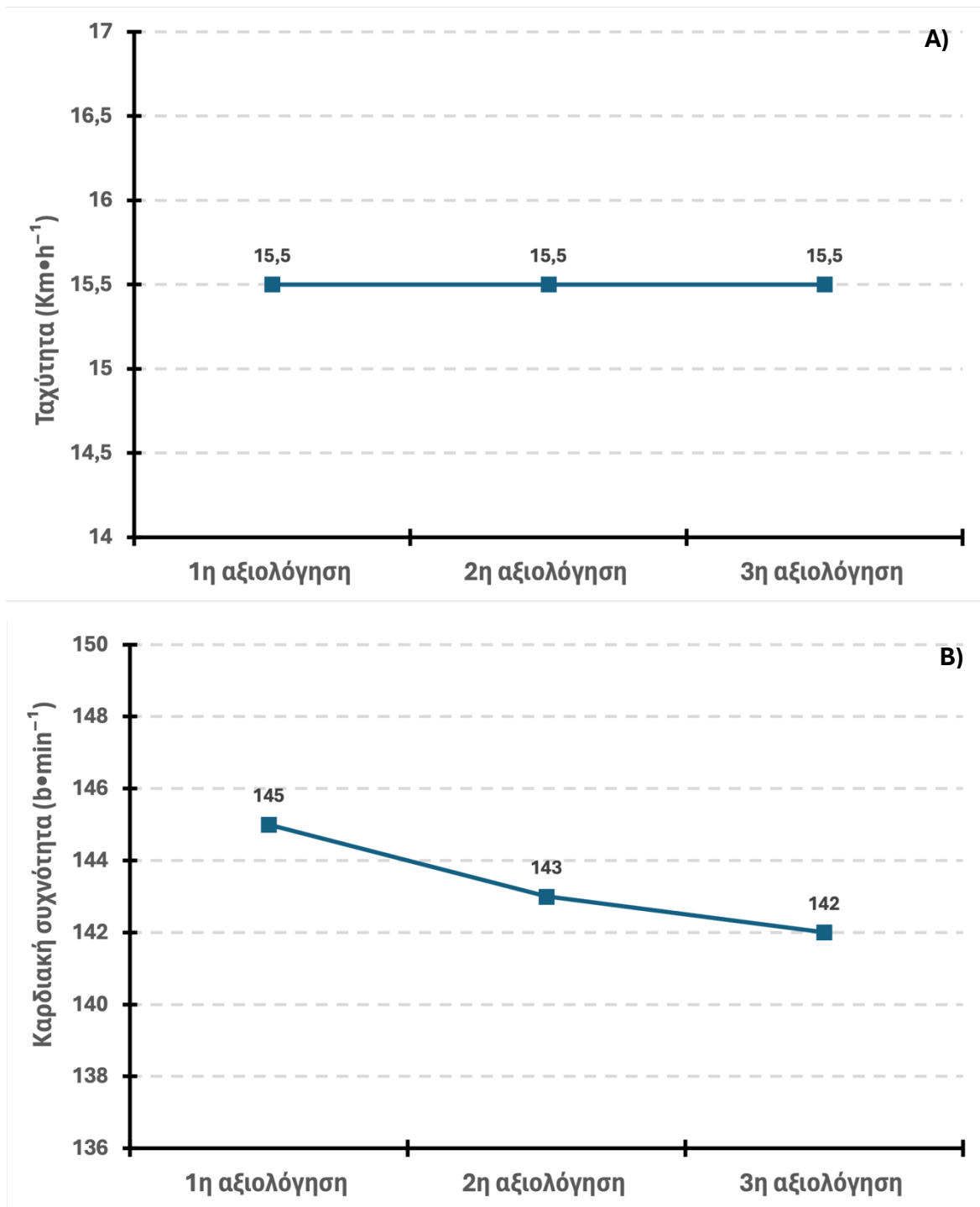
Σχήμα 1. Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων και ταχύτητα επίτευξης του πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).



Σχήμα 2. Η ενεργειακή δαπάνη σε χαμηλή (14 km/h, A) και υψηλή ταχύτητα (18 km/h, B) πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3η αξιολόγηση).

3.1.3. Κατώφλια γαλακτικού

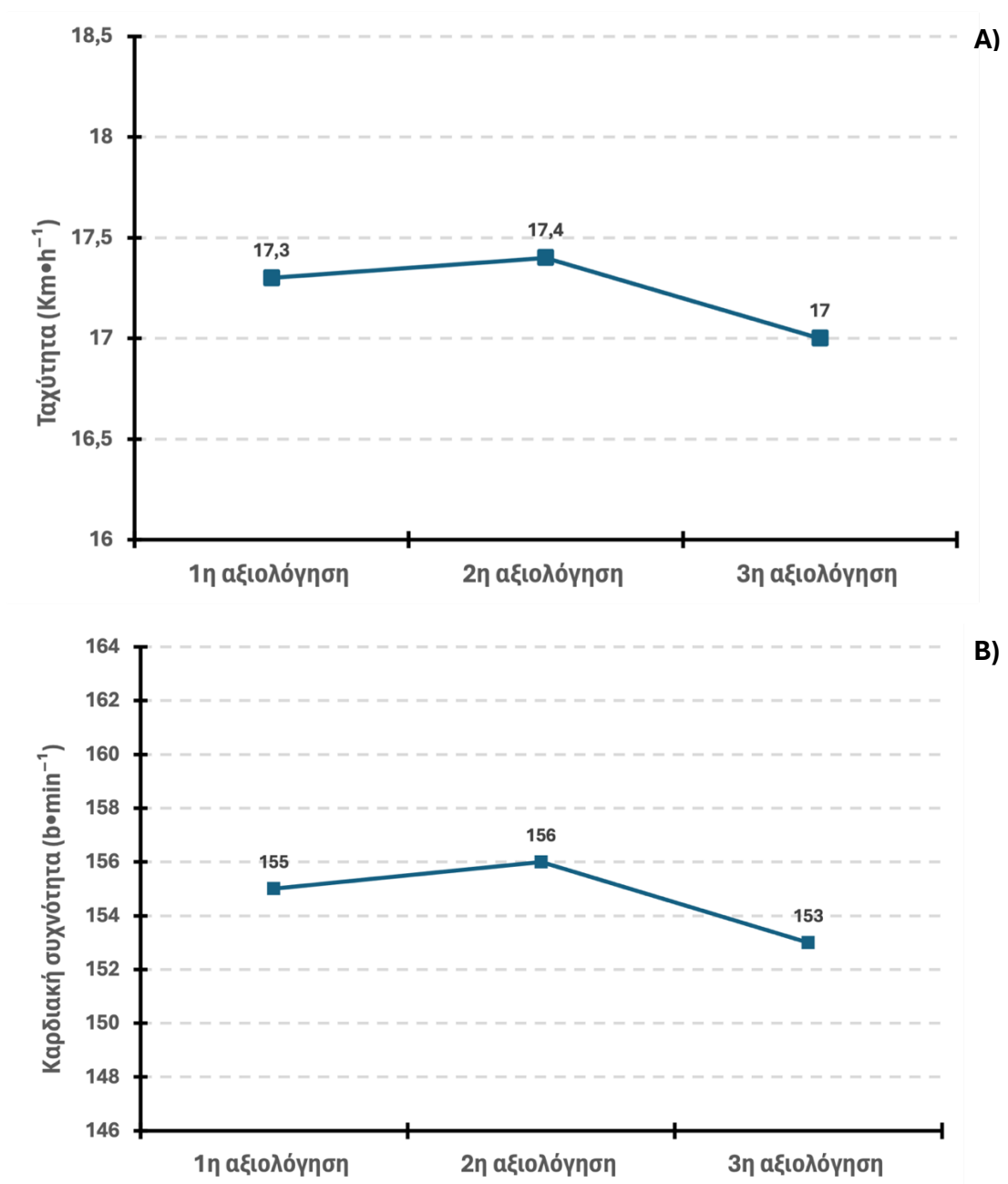
Σε όλες τις αξιολογήσεις, το 1^ο γαλακτικό κατώφλι επιτεύχθηκε σε ταχύτητα 15,5 km·h⁻¹. Στην αρχική αξιολόγηση, η καρδιακή συχνότητα στο 1^ο κατώφλι ήταν στους 145 b·min⁻¹, στην 2^η αξιολόγηση στους 143 b·min⁻¹ και στην 3^η αξιολόγηση στους 142 b·min⁻¹. Η VO₂ στο 1^ο κατώφλι γαλακτικού ήταν στα 54 ml·kg⁻¹·km⁻¹, στην 1^η αξιολόγηση, στα 51,2 ml·kg⁻¹·km⁻¹ στην 2^η αξιολόγηση, και στα 53,1 ml·kg⁻¹·km⁻¹ στην 3^η αξιολόγηση, μετά τον αγώνα (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Ταχύτητα (Α) και καρδιακή συχνότητα (Β) στο 1^ο κατώφλι γαλακτικού πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

Στην έναρξη του προγράμματος (1^η αξιολόγηση), το 2^ο κατώφλι γαλακτικού επετεύχθη σε ταχύτητα 17,3 km•h⁻¹, στην δεύτερη μέτρηση ένα μήνα πριν τον αγώνα στα 17,4 km•h⁻¹ ενώ στην 3^η αξιολόγηση, μετά τον αγώνα, μειώθηκε στα 17,0 km•h⁻¹. Η

καρδιακή συχνότητα στο 2^ο κατώφλι γαλακτικού ήταν στους 155 b•min⁻¹ στην 1^η αξιολόγηση, στους 156 b•min⁻¹ στην 2^η και στους 153 b•min⁻¹ στην 3^η αξιολόγηση μετά τον αγώνα. Η VO₂ ήταν στα 59,2 ml•kg⁻¹•km⁻¹ στην 1^η αξιολόγηση, μειώθηκε στα 57,5 ml•kg⁻¹•km⁻¹ στην 2^η αξιολόγηση και αυξήθηκε στα 60,1 ml•kg⁻¹•km⁻¹ στην 3^η αξιολόγηση μετά τον αγώνα (Σχήμα 4).

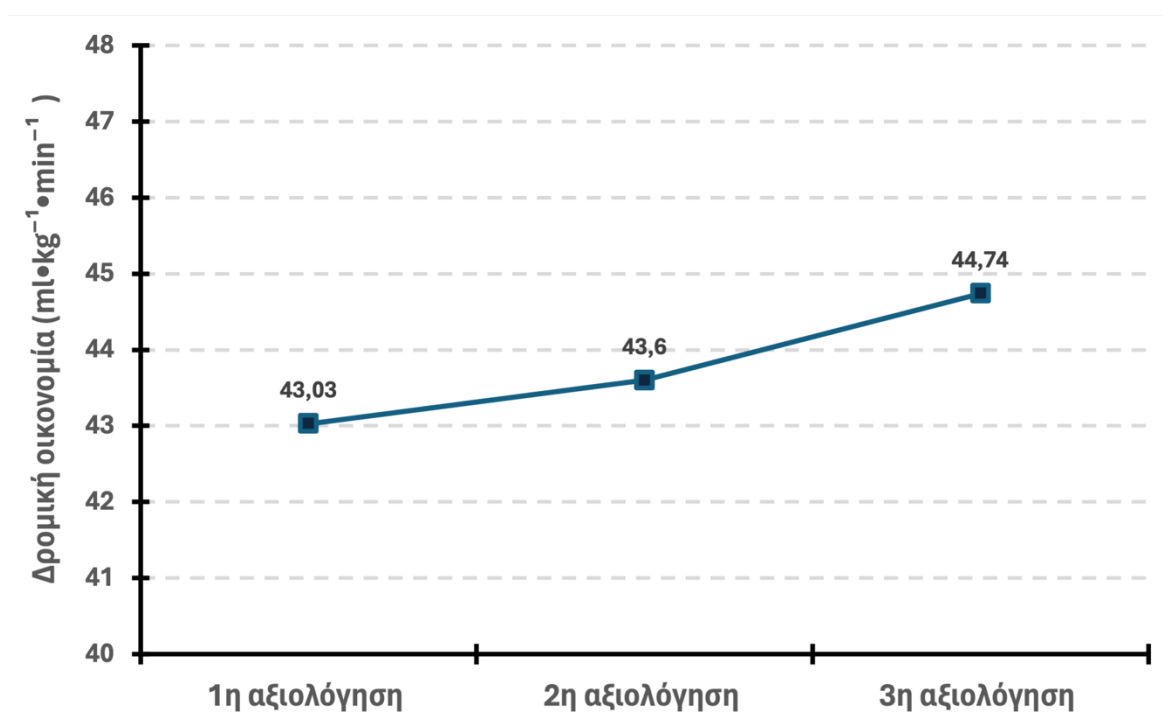


Σχήμα 4. Ταχύτητα (A) και καρδιακή συχνότητα (B) στο 2^ο κατώφλι γαλακτικού πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

3.2. Δοκιμασία παρατεταμένης διάρκειας (60 min) σταθερής έντασης

3.2.1. Δρομική οικονομία

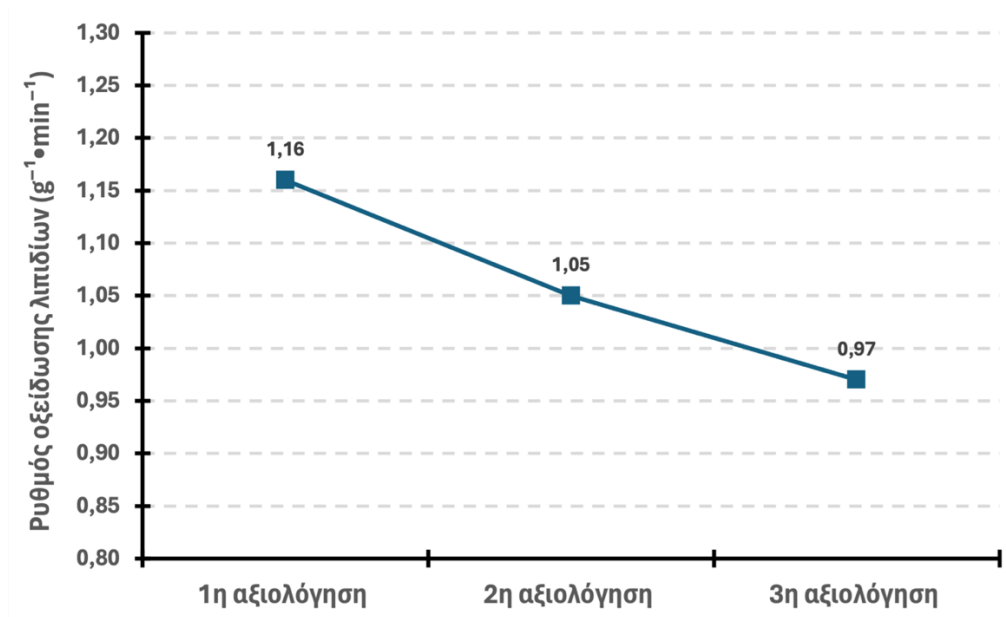
Στο τελευταίο δεκάλεπτο κατά την 1^η αξιολόγηση, η ΔΟ ήταν $43,03 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ και ήταν λίγο υψηλότερη κατά $0,57 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ στη δεύτερη αξιολόγηση ένα μήνα πριν το αγώνα στόχο φτάνοντας στα $43,60 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Τέλος, στην αξιολόγηση μια εβδομάδα μετά τον αγώνα, η ΔΟ αυξήθηκε κατά $1,71 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ και $1,17 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο μετρήσεις, φτάνοντας τα $44,74 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Δρομική οικονομία στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

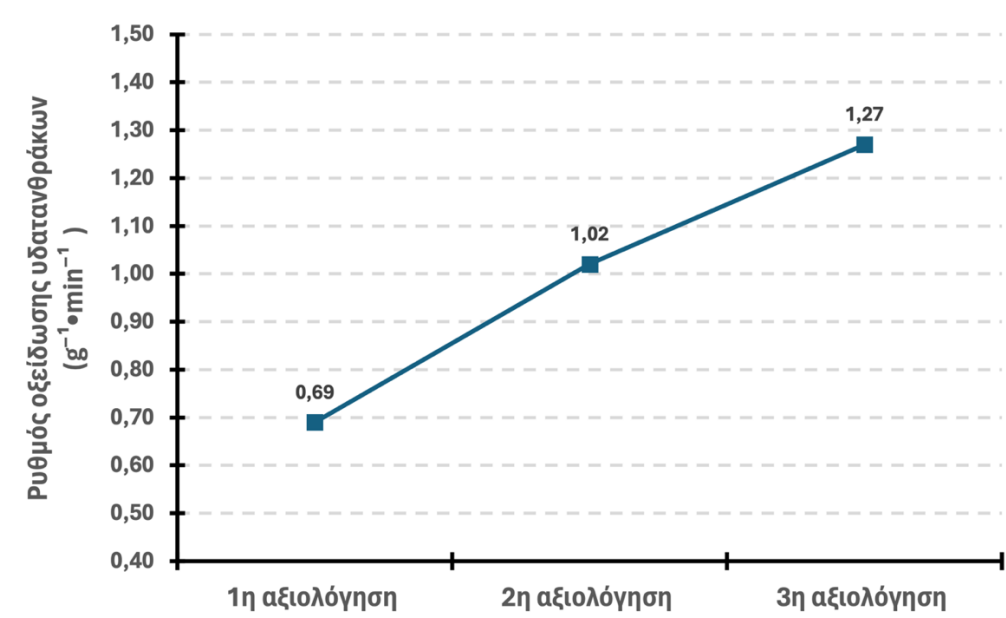
3.2.2. Χρήση ενεργειακών υποστρωμάτων

Στην 1^η αξιολόγηση, ο ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων ήταν $1,16 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ στα τελευταία 10 λεπτά της 60λεπτης δοκιμασίας, μειώθηκε κατά $0,11 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ στην μέτρηση πριν τον αγώνα φτάνοντας τα $1,05 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ και ήταν ακόμη χαμηλότερος στην τελευταία αξιολόγηση μετά τον αγώνα φτάνοντας τα $0,97 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

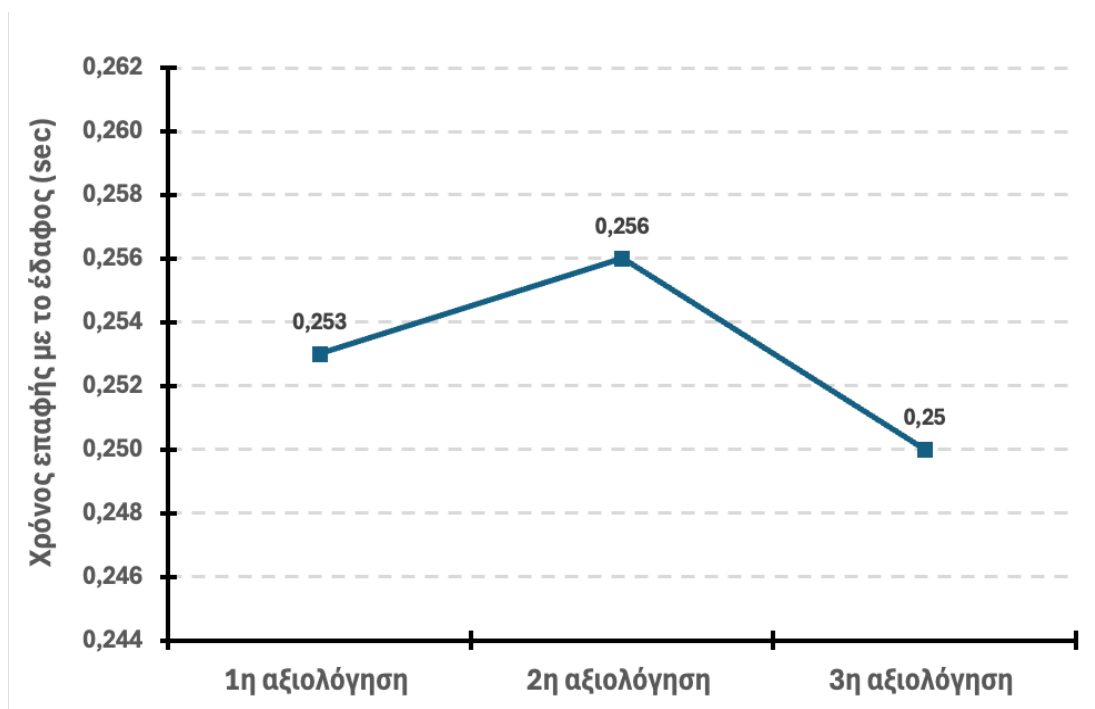
Ο ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων στα τελευταία 10 λεπτά της 60λεπτης δοκιμασίας κατά την 1η αξιολόγηση ήταν $0,69 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, ήταν υψηλότερος κατά $0,33 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ στην μέτρηση πριν τον αγώνα αγγίζοντας τα $1,02 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ και ακόμη υψηλότερος στην τελευταία δοκιμασία μετά τον αγώνα φτάνοντας τα $1,27 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

3.2.3. Χρόνος επαφής με το έδαφος

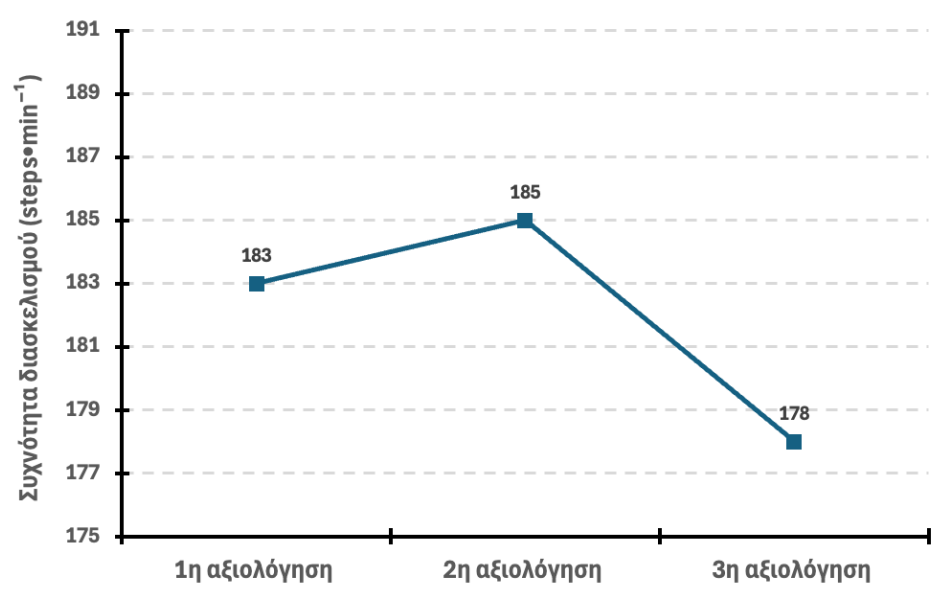
Ο χρόνος επαφής με το έδαφος στα τελευταία 10 λεπτά της 60λεπτης δοκιμασίας κατά την 1η αξιολόγηση ήταν 0,253 sec, στην δεύτερη αξιολόγηση, πριν τον αγώνα, 0,256 sec, και στην 3^η αξιολόγηση μετά τον αγώνα στόχο ήταν 0,252 sec (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Χρόνος επαφής με το έδαφος στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

3.2.4. Συχνότητα διασκελισμού

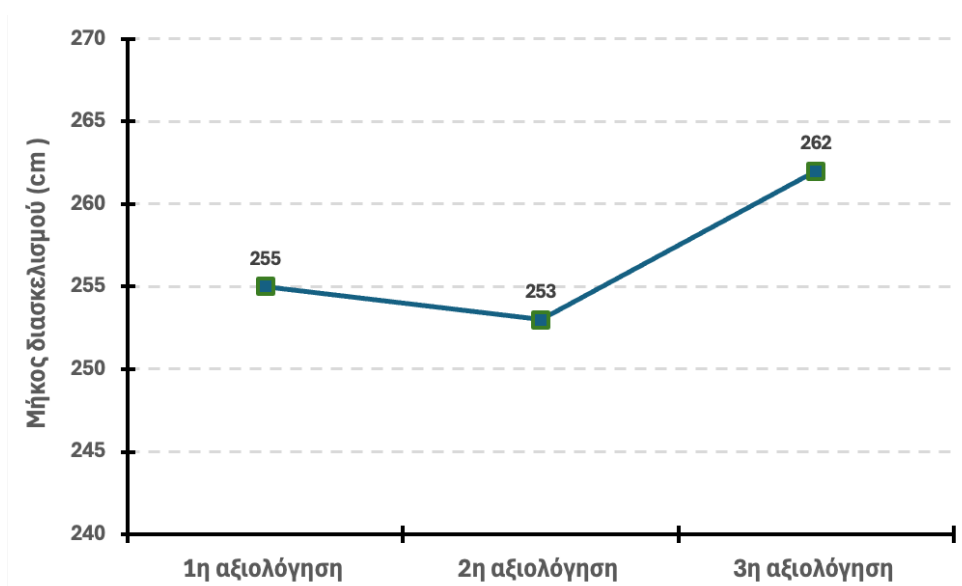
Η συχνότητα του διασκελισμού στα τελευταία 10 λεπτά της 60λεπτης δοκιμασίας κατά την 1η αξιολόγηση ήταν $183 \text{ steps} \cdot \text{min}^{-1}$, μετά από το πρόγραμμα προπόνησης των εννέα μηνών ήταν $185 \text{ steps} \cdot \text{min}^{-1}$ ενώ στην τελευταία αξιολόγηση μετά τον αγώνα στόχο, η συχνότητα του διασκελισμού μειώθηκε στα $178 \text{ steps} \cdot \text{min}^{-1}$, $5 \text{ steps} \cdot \text{min}^{-1}$ λιγότερα από την αρχική μέτρηση (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Συχνότητα διασκελισμού στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

3.2.5. Μήκος διασκελισμού

Το μήκος του διασκελισμού στα τελευταία 10 λεπτά της 60λεπτης δοκιμασίας κατά την 1η αξιολόγηση ήταν 255 cm, μετά από το πρόγραμμα προπόνησης των εννέα μηνών ήταν 253 cm ενώ στην τελευταία αξιολόγηση μετά τον αγώνα στόχο, το μήκος του διασκελισμού ήταν 262 cm (Σχήμα 10).

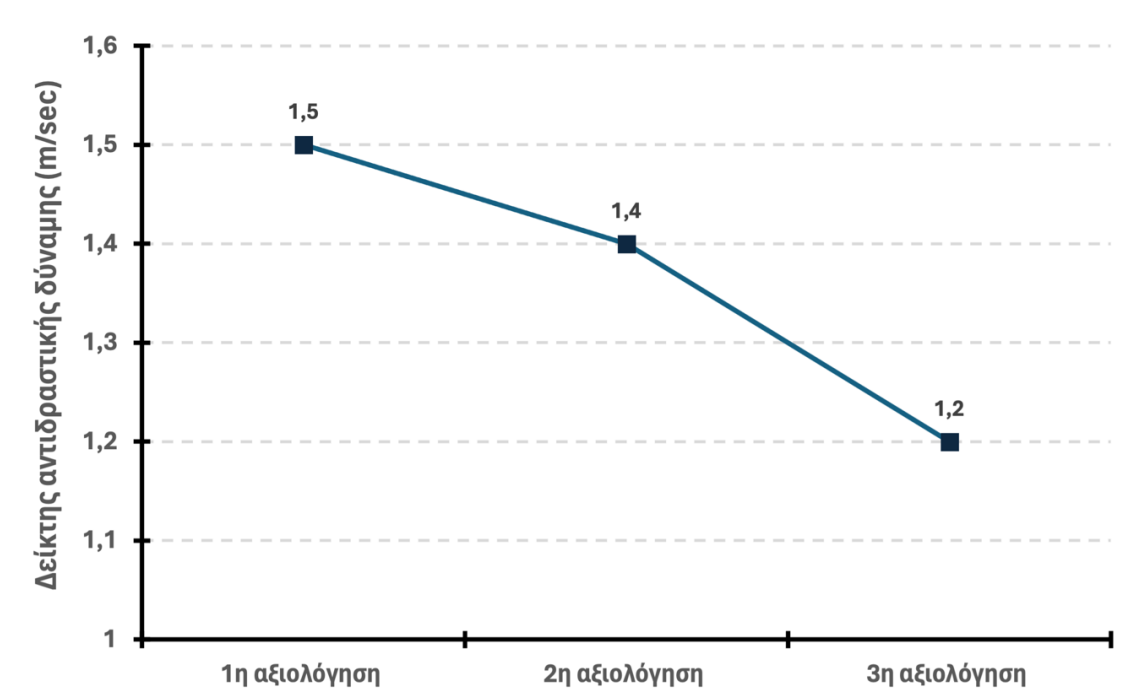


Σχήμα 10. Μήκος στα τελευταία 10 λεπτά 60λεπτου τρεξίματος με ταχύτητα $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

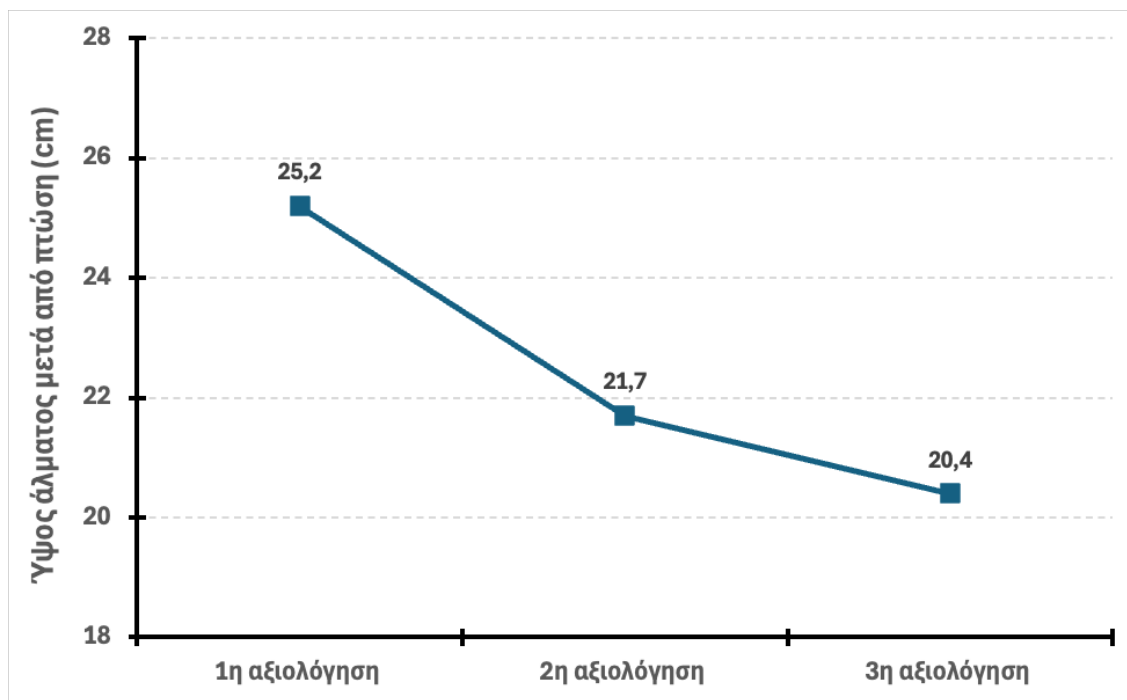
3.3. Νευρομυϊκή Απόδοση

3.3.1. Άλμα μετά από πτώση από ύψος 30 cm

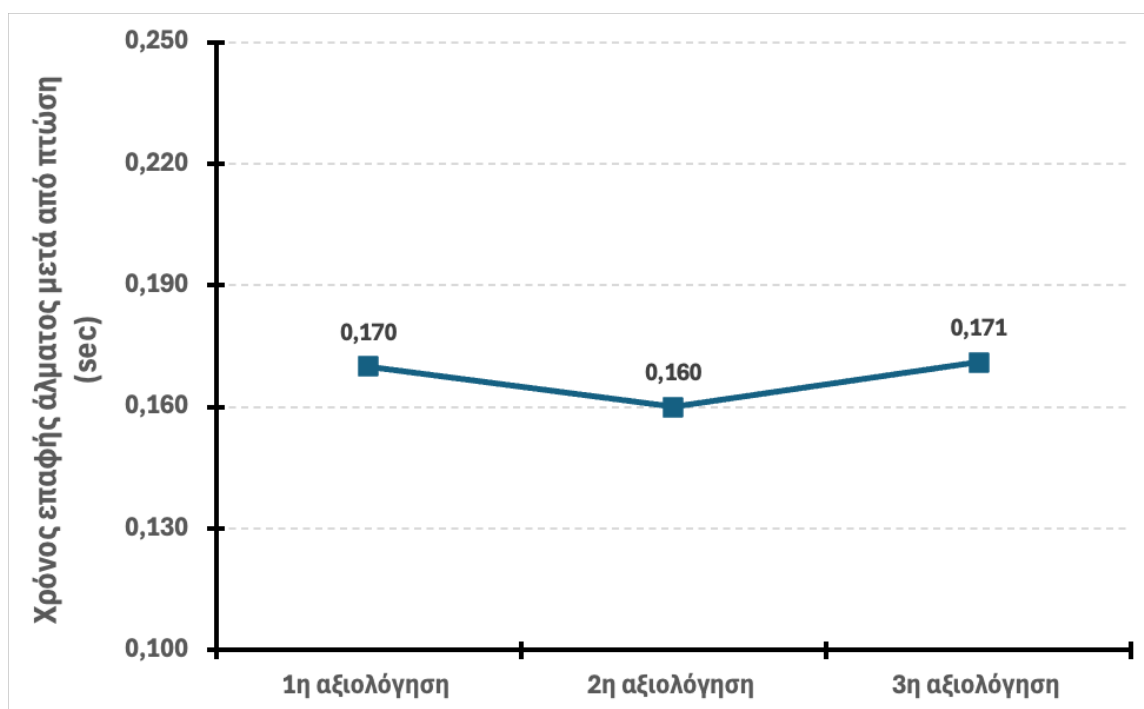
Στην 1^η αξιολόγηση, στην έναρξη της προπονητικής περιόδου, ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης ήταν 1,5, το ύψος άλματος 25,2 cm και ο χρόνος επαφής στα 0,170 sec. Εννέα μήνες μετά, στη 2^η αξιολόγηση, ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης μειώθηκε ελαφρώς στο 1,4, το ύψος άλματος μειώθηκε στα 21,7 cm ενώ ο χρόνος επαφής μειώθηκε ελαφρώς στα 0,160 sec. Στην 3^η αξιολόγηση μετά τον αγώνα στόχο, ο δείκτης συνέχισε την πτωτική του πορεία αγγίζοντας το 1,2, καθώς το ύψος άλματος μειώθηκε στα 20,0 cm ενώ ο χρόνος επαφής ήταν 0,171 sec (Σχήματα 11, 12 και 13).



Σχήμα 11. Δείκτης αντιδραστικής δύναμης πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3η αξιολόγηση).



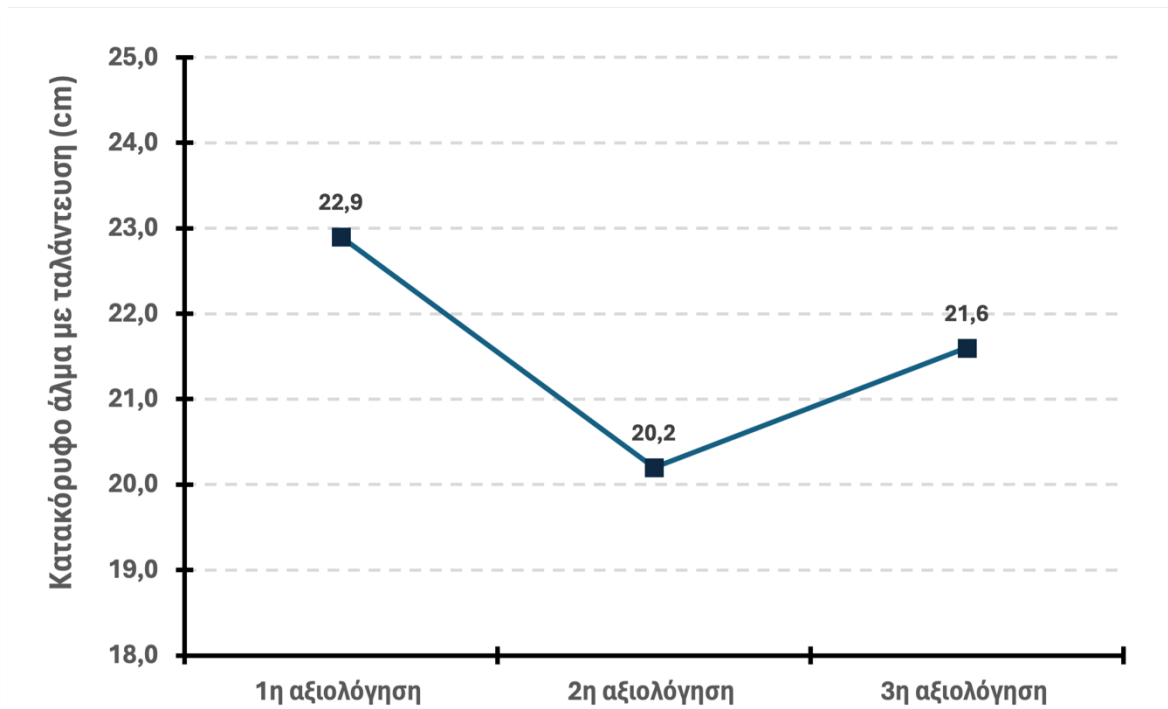
Σχήμα 12. Ύψος κατακόρυφου άλματος μετά από πτώση από ύψος 30 εκ. πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).



Σχήμα 13. Χρόνος επαφής με το έδαφος κατά το κατακόρυφο άλμα μετά από πτώση από ύψος 30 εκ. πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

3.3.2. Κατακόρυφο άλμα με ταλάντωση

Το ύψος του κατακόρυφου άλματος με ταλάντευση στην 1^η αξιολόγηση ήταν 22,9 cm. Στην 2^η αξιολόγηση ένα πριν τον αγώνα μειώθηκε στα 20,2 cm και στην 3^η αξιολόγηση μετά τον αγώνα ήταν 21,6 cm (Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Ύψος κατακόρυφου άλματος με ταλάντωση πριν την έναρξη του προπονητικού προγράμματος εννέα μηνών (1^η αξιολόγηση), έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο (2^η αξιολόγηση) και μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο (3^η αξιολόγηση).

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης εξετάστηκε αρχικά η επίδραση ενός ολοκληρωμένου προπονητικού κύκλου εννέα μηνών και έπειτα η συμμετοχή σε αγώνα υπερμαραθωνίου πολύ μεγάλης απόστασης, στις φυσιολογικές παραμέτρους, στον μεταβολισμό ενεργειακών υποστρωμάτων, σε μηχανικά στοιχεία του τρεξίματος και στην νευρομυϊκή λειτουργία ενός υπερμαραθωνοδρόμου αθλητή υψηλού επιπέδου. Τα βασικά ευρήματα της μελέτης έδειξαν ότι το προπονητικό πρόγραμμα των εννέα μηνών καθώς και η συμμετοχή σε υπερμαραθώνιο αγώνα μεγάλης διάρκειας οδήγησαν σε μεταβολές στις παραμέτρους που αξιολογήθηκαν.

Ο μέγιστος ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων παίζει σημαντικό ρόλο στην διατήρηση της απόδοσης σε δοκιμασίες μεγάλης διάρκειας. Η αυξημένη ικανότητα οξείδωσης λιπιδίων του οργανισμού έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση των πηγών γλυκογόνου, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εξάντληση των αποθεμάτων τους και ως εκ τούτου την εμφάνιση κόπωσης (Achten & Jeukendrup, 2003). Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έδειξαν μείωση της τάξης του 25,9% από την αρχική αξιολόγηση έως την αξιολόγηση πριν τον αγώνα ενώ παρουσιάστηκε ελαφρά αύξηση περί του 2,91% στην αξιολόγηση μετά τον αγώνα στόχο, σε σύγκριση με την 2^η μέτρηση. Αντιθέτως, η ταχύτητα επίτευξης του ΜΡΟΛ παρουσίασε μικρή αύξηση της τάξης του 2,21% από τη βασική αξιολόγηση σε αυτή πριν τον αγώνα στόχο, και πτώση που άγγιξε το 11,51% στην τρίτη αξιολόγηση, συγκριτικά με αυτή πριν τον αγώνα, υποδηλώνοντας μια μετατόπιση της μέγιστης ικανότητας οξείδωσης λίπους προς χαμηλότερες εντάσεις άσκησης. Η πτώση του ΜΡΟΛ από την πρώτη στη δεύτερη αξιολόγηση είναι αποτέλεσμα του προπονητικού περιοδισμού, σύμφωνα με τις αρχές της προπονητικής θεωρίας (Bompa, 2018). Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε 2 μήνες μετά την έναρξη της προετοιμασίας. Ο αθλητής ξεκίνησε την προετοιμασία του προερχόμενος από περίοδο αποκατάστασης ενός μηνός, κατά τον οποίο λειτουργούσε κυρίως στην προπονητική ζώνη 1, ένταση η οποία διατηρήθηκε και κατά τον πρώτο μήνα της προετοιμασίας του. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της χρήσης των λιπιδίων ως κύρια πηγή ενέργειας η οποία αντανακλάται στην πρώτη αξιολόγηση. Κατά τη δεύτερη δοκιμασία, έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο, η μείωση στον ΜΡΟΛ είναι αποτέλεσμα του προπονητικού σχεδιασμού, καθώς αυξήθηκαν οι εντάσεις στις διαλειμματικές προπονήσεις.

Είναι ευρέως γνωστό, ότι όσο αυξάνεται η ένταση της άσκησης σταδιακά, αυξάνεται και η συσσώρευση γαλακτικού στο αίμα. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, τα κατώφλια γαλακτικού αποτελούν καλύτερους και πιο αξιόπιστους δείκτες για την εκτίμηση της αερόβιας απόδοσης συγκριτικά με την VO_{2max} (Coyle et al., 1988, 1991). Στην παρούσα μελέτη, ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι στο 1ο κατώφλι γαλακτικού δεν υπήρξε καμία μεταβολή στην ταχύτητα μεταξύ των τριών αξιολογήσεων αλλά υπήρξε μεταβολή της καρδιακής συχνότητας. Αντιθέτως, στο 2^ο κατώφλι γαλακτικού υπήρξαν μεταβολές και στις τρεις δοκιμασίες που πραγματοποιήθηκαν, τόσο στην ταχύτητα όσο και στην καρδιακή συχνότητα. Ενώ από την πρώτη στη δεύτερη αξιολόγηση η μεταβολή και των δύο μεταβλητών ήταν πολύ μικρή συγκριτικά με την αρχική μέτρηση, φαίνεται ότι η επίδραση του υπερμαραθώνιου ήταν εντονότερη. Η ποσοστιαία μεταβολή στην δοκιμασία μετά τον αγώνα συγκριτικά με την αξιολόγηση έναν μήνα πριν τον αγώνα, άγγιξαν το 2,30% και 1,92%, αντίστοιχα. Η μεταβολή αυτή ενδέχεται να οφείλεται στην νευρομυϊκή κόπωση καθώς και στις φλεγμονές που προέκυψαν από την υπερμαραθώνια προσπάθεια.

Η πιο σημαντική ίσως παράμετρος για την βελτίωση της επίδοσης σε δρόμου αντοχής είναι η δρομική οικονομία (Knorr et al., 2023). Παίζει σπουδαίο ρόλο καθώς φαίνεται να επηρεάζει άμεσα τον τρόπο με τον οποίο ένας αθλητής χρησιμοποιεί την ενέργειά του για την διατήρηση ενός συγκεκριμένου ρυθμού. Στην πράξη, η βελτίωση της δρομικής οικονομίας αντικατοπτρίζει την ικανότητα ενός δρομέα να καταναλώνει λιγότερο οξυγόνο για να καλύψει την ίδια απόσταση, οδηγώντας έτσι σε ταχύτερους χρόνους σε αγώνες μεγάλων αποστάσεων (Saunders et al., 2004). Πρέπει να σημειωθεί, ότι προηγούμενες μελέτες υποστήριξαν ότι η δρομική οικονομία αποτελεί ακριβέστερο δείκτη για την πρόβλεψη της απόδοσης συγκριτικά με την VO_{2max} , όταν αξιολόγησαν προπονημένους δρομείς που είχαν ίδιες τιμές μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (Kipp et al., 2019). Όσον αφορά τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, η κατανάλωση του οξυγόνου παρουσίασε ανοδική πορεία και στις τρεις αξιολογήσεις, της τάξης του 3,82% συνολικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι για την ίδια εξωτερική επιβάρυνση απαιτείται λίγο περισσότερη ενέργεια οδηγώντας σε μειωμένη αποδοτικότητα.

Η αιτία αυτής της μειωμένης αποδοτικότητας ενισχύεται και από την ανάλυση των ενεργειακών υποστρωμάτων. Παρατηρήθηκε μια σαφής μετατόπιση από τον μεταβολισμό των λιπιδίων προς την αυξημένη εξάρτηση από τους υδατάνθρακες. Ο

ρυθμός οξείδωσης των λιπιδίων παρουσίασε σταδιακή πτωτική πορεία σε όλες τις μετρήσεις και μειώθηκε κατά 16,38% στην τελική αξιολόγηση συγκριτικά με την αρχική αξιολόγηση. Αντιστρόφως, ο ρυθμός οξείδωσης των υδατανθράκων αυξήθηκε σταδιακά μεταξύ των αξιολογήσεων, παρουσιάζοντας σημαντική αύξηση από την αρχική στην τελική αξιολόγηση, της τάξης του 84%. Τα ευρήματα αυτά, υποδεικνύουν ότι η παρατεταμένη άσκηση και ο αγώνας οδήγησαν σε μια προοδευτική αύξηση της εξάρτησης από τους υδατάνθρακες, ιδιαίτερα μετά την καταπόνηση του αγώνα.

Η αντιδραστική δύναμη αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός ατόμου να αξιοποιεί αποτελεσματικά τον κύκλο διάτασης-βράχυνσης, την ικανότητα της μυοτενόντιας μονάδας να παράγει μια γρήγορη και ισχυρή μειομετρική συστολή, αμέσως μετά από μια γρήγορη πλειομετρική δράση (Jarvis et al., 2022). Ένας από τους πιο αξιόπιστους δείκτες αξιολόγησης του κύκλου διάτασης-βράχυνσης είναι ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης και παραδοσιακά μετριέται κατά τη διάρκεια εργασιών που υποδηλώνουν γρήγορο κύκλο διάτασης βράχυνσης, όπως το άλμα μετά από πτώση (McMahon et al., 2021). Στην παρούσα μελέτη, ο δείκτης αντιδραστικής δύναμης παρουσίασε σταδιακή μείωση από την αρχική αξιολόγηση στην αξιολόγηση έναν μήνα πριν τον αγώνα και την αξιολόγηση μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο, με την συνολική ποσοστιαία μείωση να αγγίζει το 20%. Φαίνεται ότι το προπονητικό πρόγραμμα των εννέα μηνών και ιδιαίτερα ο αγώνας στόχος οδήγησαν σε νευρομυϊκή κόπωση η οποία είχε ως αποτέλεσμα την μείωση στην αποτελεσματικότητα του κύκλου διάτασης-βράχυνσης. Προηγούμενες μελέτες, έχουν δείξει ότι υπάρχει μέτρια θετική συσχέτιση μεταξύ του δείκτη αντιδραστικής δύναμης και της δρομικής οικονομίας σε δρομείς μεγάλων αποστάσεων (Li et al., 2021), γεγονός που ενισχύει τα ευρήματα της παρούσας έρευνας.

Ο χρόνος επαφής με το έδαφος στην αρχική μέτρηση ήταν 0,253 sec ενώ έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο αυξήθηκε κατά 1,19%. Μία εβδομάδα μετά τον αγώνα στόχο ο χρόνος επαφής μειώθηκε κατά 1,19% από την αρχική μέτρηση και 2,34% από την μέτρηση πριν τον αγώνα. Αν και μεταβολές ήταν μικρές, η αύξηση που παρατηρήθηκε έναν μήνα πριν τον αγώνα ενδεχομένως να οφείλεται στην στοχευμένη προπόνηση των εννέα μηνών που προηγήθηκαν. Αντιθέτως, η πτώση που παρατηρήθηκε την εβδομάδα μετά τον αγώνα πιθανόν να είναι αποτέλεσμα της μυϊκής βλάβης και της σχετιζόμενης κόπωσης κύριο εμπόδιο στην απόδοση των αθλητών υπερμαραθωνίων (Tiller et al., 2024). Παρόμοια εικόνα φαίνεται να παρουσίασε και η συχνότητα διασκελισμού η οποία αυξήθηκε

ελαφρώς από την πρώτη στη δεύτερη αξιολόγηση και έπειτα να ακολουθήσε πτωτική πορεία της τάξης του 2,73% και 3,78% συγκριτικά με την βασική αξιολόγηση και έναν μήνα πριν τον αγώνα αξιολόγηση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αύξηση του χρόνου επαφής και η μείωση του διασκελισμού από την πρώτη στη δεύτερη δοκιμασία πιθανόν να οφείλονται στην αύξηση του προπονητικού φορτίου, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη νευρομυϊκή κόπωση. Η βελτίωση που παρατηρείται στην τρίτη δοκιμασία συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο, τόσο στον χρόνο επαφής όσο και στη συχνότητα διασκελισμού, είναι αποτέλεσμα του προπονητικού περιοδισμού αλλά και πιθανόν της επιτυχούς έκβασης του αγώνα. Σχετικά με τον προπονητικό σχεδιασμό, έναν μήνα πριν τον αγώνα στόχο μειώθηκε ο όγκος της προπόνησης με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης την ημέρα του αγώνα. Επίσης, μετά τον αγώνα, ακολούθησε μία εβδομάδα αποθεραπείας-αποκατάστασης κατά την οποία ο αθλητής έκανε δρομικές προπονήσεις μικρής διάρκειας στην προπονητική στην ζώνη 1. Επιπλέον, καθώς η έκβαση του αγώνα ήταν απόλυτα επιτυχής, εφόσον ο υπερμαραθωνοδρόμος κατέκτησε την πρώτη θέση κάνοντας τη δεύτερη καλύτερη επίδοση όλων των εποχών στον συγκεκριμένο αγώνα, φαίνεται να συνέβαλλε και στα τελικά αποτελέσματα της δοκιμασίας.

Η παρούσα μελέτη περιορίζεται από τη φύση της μελέτης περίπτωσης, γεγονός που δεν επιτρέπει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, η βαθιά, πολυεπίπεδη ανάλυση σε έναν ελίτ αθλητή προσφέρει μια σπάνια και πολύτιμη εικόνα για την αλληλεπίδραση των φυσιολογικών συστημάτων, κάτι που συχνά χάνεται σε μελέτες με μεγαλύτερα δείγματα (Halson, 2014). Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εφαρμόσουν παρόμοιες ολιστικές μεθοδολογίες σε μικρές ομάδες αθλητών. Η ενσωμάτωση δεικτών όπως η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού θα μπορούσε να προσφέρει επιπλέον πληροφορίες για την κατάσταση του αυτόνομου νευρικού συστήματος και την πορεία της αποκατάστασης (Bellenger et al., 2020).

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης έχουν άμεσες πρακτικές εφαρμογές για προπονητές και αθλητές.

- Προπόνηση με χαμηλά αποθέματα γλυκογόνου: Η σημαντική μείωση του ΜΡΟΛ (25,9%) υποδεικνύει επιδείνωση της ικανότητας οξείδωσης λίπους υπό συνθήκες κόπωσης. Η περιοδική μείωση της διαθεσιμότητας υδατανθράκων μπορεί να ενισχύσει τις μιτοχονδριακές προσαρμογές και την ικανότητα οξείδωσης λιπιδίων, διατηρώντας τα αποθέματα γλυκογόνου για τα κρίσιμα αγωνιστικά στάδια (Impey et

al., 2018).

- Προπόνηση σε κατηφόρες: Η μείωση του δείκτη αντιδραστικής δύναμης κατά 20% καταδεικνύει έντονη νευρομυϊκή επιβάρυνση από έκκεντρες συστολές. Η προοδευτική ενσωμάτωση τρεξίματος σε κατηφόρα (κλίση 6–8%) ενισχύει τη ανθεκτικότητα των μυϊκών ινών περιορίζοντας την μείωση της δρομικής οικονομίας υπό κόπωση (Bontemps et al., 2020).
- Προπόνηση της συχνότητας διασκελισμού: Η μείωση της συχνότητας διασκελισμού συνδέεται με αυξημένη μυϊκή επιβάρυνση. Η εκπαίδευση των αθλητών στη διατήρηση υψηλής συχνότητας, κατά τις ευθείες και ιδιαίτερα κατά την κατάβαση, μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση της νευρομυϊκής λειτουργίας και της δρομικής οικονομίας σε βάθος χρόνου (Hunter et al., 2021).
- Προπόνηση με αντιστάσεις: Η αύξηση του χρόνου επαφής με το έδαφος υπό συνθήκες κόπωσης συνδέεται με μείωση της νευρομυϊκής ισχύος και της δυσκαμψίας. Η συστηματική ενσωμάτωση προπόνησης με αντιστάσεις, με έμφαση στη μέγιστη δύναμη (ημικάθισμα με υψηλά φορτία), μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της νευρομυϊκής ενεργοποίησης και στη μείωση του χρόνου επαφής με το έδαφος. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ανάπτυξη μέγιστης δύναμης βελτιώνει τη δρομική οικονομία και μειώνει τον χρόνο επαφής κατά τη φάση στήριξης (Rønnestad & Mujika, 2014).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τις φυσιολογικές και μεταβολικές προσαρμογές που προκύπτουν από έναν ολοκληρωμένο προπονητικό κύκλο εννέα μηνών και τη συμμετοχή σε αγώνα υπερμαραθώνιου πολύ μεγάλης απόστασης σε έναν υπερμαραθωνοδρόμο αθλητή υψηλού επιπέδου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αυξημένος προπονητικός όγκος και η αγωνιστική επιβάρυνση επηρέασαν σημαντικά τον μεταβολισμό των ενεργειακών υποστρωμάτων, με αύξηση της εξάρτησης από τους υδατάνθρακες και μείωση της οξείδωσης των λιπιδίων σε υπομέγιστες εντάσεις, ιδιαίτερα μετά τον αγώνα γεγονός που μειώνει την ικανότητα εκτέλεσης παρατεταμένης άσκησης καθώς αυξάνει την εξάρτηση από τους υδατάνθρακες των οποίων τα αποθέματα είναι περιορισμένα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση της ενεργειακής δαπάνης σε υψηλές ταχύτητες και μείωση της ταχύτητας εμφάνισης του μέγιστου ρυθμού οξείδωσης λιπιδίων, γεγονός που, επίσης, υποδηλώνει μεταβολή της μεταβολικής λειτουργίας μετά από αγώνα υπεραντοχής πολύ μεγάλης διάρκειας.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν τη σημασία της προπονητικής περιοδικότητας, της ενεργειακής διαχείρισης και της επαρκούς αποκατάστασης σε αθλητές υπερμαραθώνιου πολύ μεγάλης απόστασης. Παρά τους περιορισμούς που απορρέουν από τη φύση της μελέτης περίπτωσης, τα αποτελέσματα συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση των απαιτήσεων και των προσαρμογών των αγώνων υπεραντοχής και μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο σε ερευνητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Achten, J., & Jeukendrup, A. E. (2003). Maximal fat oxidation during exercise in trained men. *International Journal of Sports Medicine*, 24(8), 603–608. <https://doi.org/10.1055/s-2003-43265>
2. Achten, J., & Jeukendrup, A. E. (2004). Optimizing fat oxidation through exercise and diet. *Nutrition*, 20(7), 716–727. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2004.04.005>
3. Aunola, S., & Rusko, H. (1992). Does anaerobic threshold correlate with maximal lactate steady-state? *Journal of Sports Sciences*, 10(4), 309–323. <https://doi.org/10.1080/02640419208729931>
4. Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Strategies to improve running economy. *Sports Medicine*, 45(1), 37–56. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0246-y>
5. Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70–84. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>
6. Bellenger, C. R., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2020). The Impact of Functional Overreaching on Post-exercise Parasympathetic Reactivation in Runners. *Frontiers in Physiology*, 11, 614765. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.614765>
7. Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. (2018). *Periodization: Theory and methodology of training* (6th ed.). Human Kinetics.
8. Brooks, G. A. (1985). Anaerobic threshold: Review of the concept and directions for future research. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17(1), 22–34.
9. Cheng, B., Kuipers, H., Snyder, A. C., Keizer, H. A., Jeukendrup, A., & Hesselink, M. (1992). A New Approach for the Determination of Ventilatory and Lactate Thresholds. *International Journal of Sports Medicine*, 13(7), 518–522. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021309>
10. Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hopper, M. K., & Walters, T. J. (1988). Determinants of endurance in well-trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 64(6), 2622–2630. <https://doi.org/10.1152/jappl.1988.64.6.2622>
11. Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D., & Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(1), 93–107.

12. Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., & Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Medicine and Science in Sports*, 11(4), 338–344.
13. Flanagan, E. P., Ebben, W. P., & Jensen, R. L. (2008). Reliability of the reactive strength index and time to stabilization during depth jumps. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1677–1682. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318182034b>
14. Foster, C. (1983). V O₂ max and training indices as determinants of competitive running performance. *Journal of Sports Sciences*, 1(1), 13–22. <https://doi.org/10.1080/02640418308729657>
15. Halson, S. L. (2014). Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, 44(Suppl 2), 139–147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
16. Hausswirth, C., & Lehénaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Medicine*, 31(9), 679–689. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131090-00004>
17. Hultman, E. (1995). Fuel selection, muscle fibre. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 54(1), 107–121. <https://doi.org/10.1079/pns19950041>
18. Jackson, A. S., & Pollock, M. L. (1978). Generalized equations for predicting body density of men. *The British Journal of Nutrition*, 40(3), 497–504. <https://doi.org/10.1079/bjn19780152>
19. Jarvis, P., Turner, A., Read, P., & Bishop, C. (2022). Reactive Strength Index and its Associations with Measures of Physical and Sports Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 52(2), 301–330. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01566-y>
20. Jeukendrup, A. E., & Wallis, G. A. (2005). Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *International Journal of Sports Medicine*, 26 Suppl 1, S28–37. <https://doi.org/10.1055/s-2004-830512>
21. Jones, A. M. (2024). The fourth dimension: Physiological resilience as an independent determinant of endurance exercise performance. *The Journal of Physiology*, 602(17), 4113–4128. <https://doi.org/10.1113/JP284205>
22. Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness: *Sports Medicine*, 29(6), 373–386. <https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001>
23. Jones, A. M., Kirby, B. S., Clark, I. E., Rice, H. M., Fulkerson, E., Wylie, L. J., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A., & Wilkins, B. W. (2021). Physiological demands of running at 2-hour

marathon race pace. *Journal of Applied Physiology*, 130(2), 369–379.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00647.2020>

24. Kaufmann, C. C., Wegberger, C., Tscharre, M., Haller, P. M., Piackova, E., Vujasin, I., Kassem, M., Tentzeris, I., Freynhofer, M. K., Jäger, B., Wojta, J., & Huber, K. (2021). Effect of marathon and ultra-marathon on inflammation and iron homeostasis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 31(3), 542–552.
<https://doi.org/10.1111/sms.13869>
25. Kipp, S., Kram, R., & Hoogkamer, W. (2019). Extrapolating Metabolic Savings in Running: Implications for Performance Predictions. *Frontiers in Physiology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00079>
26. Knopp, M., Muñoz-Pardos, B., Wackerhage, H., Schönfelder, M., Guppy, F., Pitsiladis, Y., & Ruiz, D. (2023). Variability in Running Economy of Kenyan World-Class and European Amateur Male Runners with Advanced Footwear Running Technology: Experimental and Meta-analysis Results. *Sports Medicine*, 53(6), 1255–1271.
<https://doi.org/10.1007/s40279-023-01816-1>
27. Lee, J., & Zhang, X. L. (2021). Physiological determinants of VO₂max and the methods to evaluate it: A critical review. *Science & Sports*, 36(4), 259–271.
<https://doi.org/10.1016/j.scispo.2020.11.006>
28. Li, F., Newton, R. U., Shi, Y., Sutton, D., & Ding, H. (2021). Correlation of Eccentric Strength, Reactive Strength, and Leg Stiffness With Running Economy in Well-Trained Distance Runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(6), 1491.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003446>
29. McMahon, J. J., Suchomel, T. J., Lake, J. P., & Comfort, P. (2021). Relationship Between Reactive Strength Index Variants in Rugby League Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(1), 280–285.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002462>
30. Messonnier, L. A., Emhoff, C.-A. W., Fattor, J. A., Horning, M. A., Carlson, T. J., & Brooks, G. A. (2013). Lactate kinetics at the lactate threshold in trained and untrained men. *Journal of Applied Physiology*, 114(11), 1593–1602.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00043.2013>
31. Milheiro, J., Carvalho, D. D., Pires, P., Sousa, A., Goethel, M. F., Moreira, A., & Soares, J. (2024). Cortisol and insulin behaviors during an ultramarathon event: Are they real markers of extreme exertion? *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 64(12). <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.24.15930-0>
32. Rankovic, G., Mutavdzic, V., Toskic, D., Preljevic, A., Kocic, M., Nedin Rankovic, G., & Damjanovic, N. (2010). Aerobic capacity as an indicator in different kinds of sports. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 10(1), 44–48.
<https://doi.org/10.17305/bjbms.2010.2734>

33. Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7), 465–485. <https://doi.org/10.2165/00007256-200434070-00005>
34. Sitko, S., Cirer-Sastre, R., Corbi, F., & López-Laval, I. (2022). Functional Threshold Power as an Alternative to Lactate Thresholds in Road Cycling. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(11), 3179–3183. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000004070>
35. Siri, W.E. (1956). Gross composition of the body In J.H. Lawrence & C.A.Tabias (Eds.) *Advances in biological and medical physics*, New York Academic, IV: pp. 239-280.
36. Skinner, J. S., & Mclellan, T. H. (1980). The Transition from Aerobic to Anaerobic Metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234–248. <https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>
37. Waśkiewicz, Z., Mukhambet, Z., Azerbayev, D., & Bondarev, S. (2025). Inflammatory Response to Ultramarathon Running: A Review of IL-6, CRP, and TNF- α . *International Journal of Molecular Sciences*, 26(13), 6317. <https://doi.org/10.3390/ijms26136317>
38. Westerterp, K. R. (2017). Control of energy expenditure in humans. *European Journal of Clinical Nutrition*, 71(3), 340–344. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.237>
39. Yoshida, T., Chida, M., Ichioka, M., & Suda, Y. (1987). Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56(1), 7–11. <https://doi.org/10.1007/BF00696368>
40. Κλεισούρας Β. (1992). *Εργοφυσιολογία*. Συμμετρία ε.