



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

ΔΡΟΜΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΠΟΥΤΣΙΩΝ ΜΑΡΑΘΩΝΙΟΥ: NIKE ALPHAFLY NEXT% 2 ΚΑΙ ADIDAS ADIZERO ADIOS PRO 3

Θεοδωράκης Ιωάννης, Α.Μ.: 13102

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 “Προπονητική”

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

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

2ο Μέλος: Νικόλαος Αγγελούσης, Καθηγητής Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

3ο Μέλος: Αθανάσιος Χατζηνικολάου, Καθηγητής Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Δ.Π.Θ.

Κομοτηνή, 2025



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

**RUNNING ECONOMY WITH THE USE OF TWO MARATHON
RACING SHOES: NIKE ALPHAFLY NEXT% 2 AND
ADIDAS ADIZERO ADIOS PRO 3**

Theodorakis Ioannis, A.M.: 13102

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 Sports Training Science

COMMITTEE OF EXAMINERS

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

Member 2: Nikolaos Aggelousis, Professor D.P.E.S.S. - DUTH

Member 3: Athanasios Chatzinikolaou, Professor D.P.E.S.S. - DUTH

Komotini, 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θεοδωράκης Ιωάννης: Δρομική οικονομία με τη χρήση δυο αγωνιστικών παπουτσιών μαραθωνίου: Nike Alphafly Next% 2 και Adidas Adizero Adios pro 3

(Με την επίβλεψη του Καθηγητή Ηλία Σμήλιου)

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετήσει ποιο από τα δύο αγωνιστικά υπερ-παπούτσια, Nike Alphafly Next% 2 ή Adizero Adios Pro 3 μειώνει περισσότερο το ενεργειακό κόστος, σε σύγκριση με συμβατικό παπούτσι, κατά τη διάρκεια τρεξίματος σε τρεις δρομικές ταχύτητες. Στη μελέτη συμμετείχαν εθελοντικά δώδεκα υγιείς άνδρες, ερασιτέχνες δρομείς (ηλικία: $39,6 \pm 8,2$ ετών, σωματική μάζα: $74,9 \pm 5,1$ kg, ύψος: $181,2 \pm 4,91$ cm και VO_2max : $55,6 \pm 2,2$ ml/min/kg) με προπονητική ηλικία μεγαλύτερη από 8 έτη. Μετρήθηκαν η καρδιακή συχνότητα, η κατανάλωση οξυγόνου και η παραγωγή CO_2 και υπολογίστηκε το θερμιδικό κόστος της άσκησης, ενώ οι δρομείς έτρεξαν στο δαπεδοεργόμετρο, με τα τρία διαφορετικά υποδήματα, σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες, 11,5, 13,5 και 15,5 km/h. Επίσης, κατά τη διάρκεια του τρεξίματος καταγράφηκε το μήκος διασκελισμού, ο χρόνος επαφής με το έδαφος και η συχνότητα διασκελισμού. Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι στην ταχύτητα 15,5 km/h, η κατανάλωση οξυγόνου ήταν υψηλότερη ($p < 0,05$) με το συμβατικό παπούτσι, συγκριτικά με το Adidas, ενώ στην ίδια ταχύτητα το θερμιδικό κόστος με τα δύο υπέρ-παπούτσια ήταν μικρότερο ($p < 0,05$) συγκριτικά με το συμβατικό. Ο χρόνος επαφής με το έδαφος, τρέχοντας με το συμβατικό παπούτσι, ήταν μεγαλύτερος ($p < 0,05$) συγκριτικά με το Adidas και το Nike και στις τρεις ταχύτητες. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδηλώνουν ότι και τα δύο μοντέλα αγωνιστικού παπουτσιού βελτιώνουν τη δρομική οικονομία σε σύγκριση με τα συμβατικά παπούτσια αλλά μόνο σε υψηλές ταχύτητες. Άρα, απευθύνονται σε δρομείς που μπορούν να τρέχουν για ώρα με υψηλές ταχύτητες, άνω των 15 km/h, και όχι μόνον σε χαμηλότερες.

Λέξεις κλειδιά: VO_2max , ενεργειακό κόστος, δρομική οικονομία, δαπεδοεργόμετρο, υπερ-παπούτσια.

ABSTRACT

Theodorakis Ioannis: Running economy with the use of two marathon racing shoes: Nike Alphafly Next% 2 and Adidas Adizero Adios pro 3

(Under the supervision of Professor Ilias Smilios)

The purpose of this study was to examine which of the two racing super-shoes, Nike Alphafly Next% 2 or Adizero Adios Pro 3, reduces more the energy cost, compared to conventional shoes, while running at three different speeds. Twelve healthy amateur male runners volunteered to participate in the study (age: 39.6 ± 8.2 years, body mass: 74.9 ± 5.1 kg, height: 181.2 ± 4.91 cm and VO_2max : 55.6 ± 2.2 ml/min/kg) with training experience greater than 8 years. Heart rate, oxygen consumption and CO_2 production were measured, and the caloric cost of the exercise was calculated, while the runners ran on an ergometer with the three different shoes, at three different speeds, 11.5, 13.5 and 15.5 km/h. In addition, during the run, stride length, contact time with the ground and stride frequency were recorded. The analysis of the data showed that at the speed of 15.5 km/h, oxygen consumption was a higher ($p < 0.05$) with the conventional shoe compared to Adidas, while at the same speed the caloric cost with the two super-shoes was lower ($p < 0.05$) compared to the conventional shoes. The contact time with the ground, was longer ($p < 0.05$) when running with the conventional compared to Adidas and Nike in all three speeds. The results of this study suggest that both models of racing shoes improve running economy compared to conventional shoes, but only at high speeds. Therefore, they are useful for runners who can run for hours at high speeds, over 15 km/h, and not only at lower speeds.

Key words: VO_2max , energy costs, running economy, treadmill, super-shoes.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1. Εξέλιξη των αγωνιστικών παπουτσιών.....	11
1.2. Ενεργειακό όφελος και ταχύτητα.....	13
1.3. Σκοπός και σημασία της έρευνας.....	14
1.4. Ερευνητικές υποθέσεις.....	14
1.5. Οριοθετήσεις και Περιορισμοί της έρευνας.....	14
1.6. Ορισμοί και Συντομογραφίες.....	15
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	16
2.1. Δείγμα.....	16
2.2. Πειραματικός σχεδιασμός.....	16
2.3. Μετρήσεις και όργανα μέτρησης.....	17
2.3.1. Μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου.....	17
2.3.2. Ενεργειακό κόστος	17
2.3.3. Μέτρηση μηχανικών παραμέτρων.....	18
2.4. Παπούτσια.....	19
2.5. Στατιστική ανάλυση.....	20
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	21
3.1. Καρδιακή συχνότητα	21
3.2. Κατανάλωση οξυγόνου.....	22
3.3. Ενεργειακή δαπάνη	22

3.4. Μήκος διασκελισμού	23
3.5. Συχνότητα διασκελισμού	24
3.6. Χρόνος επαφής.....	25
 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	26
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	30
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.** Καρδιακή συχνότητα σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 21
- Σχήμα 2.** Κατανάλωση οξυγόνου σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 22
- Σχήμα 3.** Ενεργειακή δαπάνη σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 23
- Σχήμα 4.** Μήκος διασκελισμού στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 24
- Σχήμα 5.** Συχνότητα διασκελισμού στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 24
- Σχήμα 6.** Χρόνος επαφής στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). 25

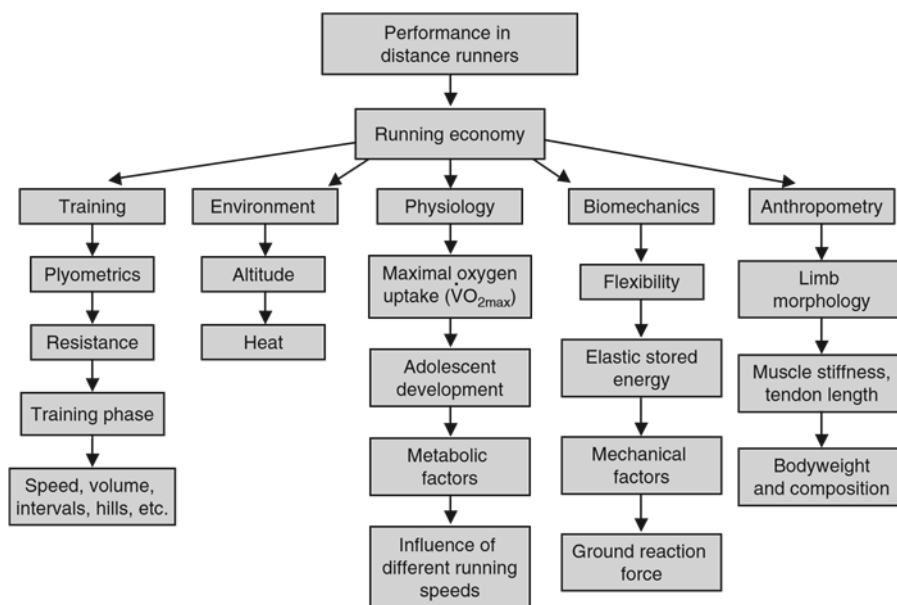
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Παράγοντες που επηρεάζουν την δομική οικονομία.	10
Εικόνα 2. Τοποθέτηση Ortojump Next, Microgate πάνω στο δαπεδοεργόμετρο.....	19
Εικόνα 3. Nike Alphafly Next% 2 και Adidas Adizero Adios Pro 3.	20

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δρομική οικονομία θεωρείται μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που είναι υπεύθυνη για τη βελτίωση των επιδόσεων όχι μόνο στον μαραθώνιο αλλά και γενικά στους δρόμους αντοχής (Knorr et al., 2023). Ως οικονομία τρεξίματος ή δρομική οικονομία ορίζεται η ενεργειακή απαίτηση ή το ενεργειακό κόστος, για μια ορισμένη δρομική ταχύτητα, μιας δεδομένης απόστασης, σε υπομέγιστη προσπάθεια. Μετριέται ως ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου ανά κιλό σωματικής μάζας ανά χιλιόμετρο απόστασης ($\text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) ή ως το θερμιδικό κόστος ανά κιλό σωματικής μάζας ανά χιλιόμετρο απόστασης ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) (Saunders et al., 2004). Η μέτρηση της δρομικής οικονομίας με όρους θερμιδικού κόστους είναι πιο ευαίσθητη στις αλλαγές της ταχύτητας από την κατανάλωση οξυγόνου, γιατί συμπεριλαμβάνει ή δεν επηρεάζεται από το μείγμα υδατανθράκων και λιπιδίων που καταβολίζονται (Fletcher, Esau & MacIntosh, 2009). Αν και τυπικά με τον όρο δρομική οικονομία νοείται η ενεργειακή απαίτηση μιας υπομέγιστης προσπάθειας στο τρέξιμο σε μια δεδομένη ταχύτητα (Saunders et al., 2004), χρησιμοποιούνται και άλλοι όροι ως συνώνυμοι της «δρομικής οικονομίας», όπως «κατανάλωση οξυγόνου», «κόστος οξυγόνου», «μεταβολικό κόστος» και «ενεργειακό κόστος τρεξίματος» (Hauswirth & Lehenaff, 2001).

Η δρομική οικονομία είναι βασικός καθοριστικός παράγοντας της απόδοσης αντοχής, καθώς επιτρέπει σε έναν αθλητή (δρομέα) να τρέχει με υψηλότερες ταχύτητες, με το ίδιο μεταβολικό κόστος (Barnes & Kilding, 2015; Joyner & Coyle, 2008). Λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα σώματος, αθλητές με καλή δρομική οικονομία είναι αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούν λιγότερο οξυγόνο και συνεπώς λιγότερη ενέργεια για να τρέξουν στην ίδια ταχύτητα (Saunders et al., 2004). Η δρομική οικονομία έχει άμεση σχέση με την αθλητική απόδοση και μάλιστα αποτελεί καλύτερο δείκτη καθορισμού της φυσικής κατάστασης από την μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου καθώς όση περισσότερη από την δαπανώμενη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια, τόσο και η ενεργειακή οικονομία είναι μεγαλύτερη. Επιπλέον, βελτιστοποίηση της ενεργειακής οικονομίας κατά την αγωνιστική προσπάθεια σημαίνει κατά κανόνα, μεγιστοποίηση της αθλητικής απόδοσης (Κλεισούρας, 1992). Τέλος, σε αθλητές υψηλού επιπέδου με παρόμοιες τιμές στην $\text{VO}_{2\text{max}}$, η δρομική οικονομία είναι καλύτερος δείκτης αθλητικής απόδοσης από την $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Saunders et al., 2004).



Εικόνα 1. Παράγοντες που επηρεάζουν την δρομική οικονομία (Saunders et al. 2004).

Έρευνες έχουν δείξει πως υπάρχουν αρκετοί φυσιολογικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με τη δρομική οικονομία και τη μηχανική αποδοτικότητα. Συγκεκριμένα, τέτοιοι παράγοντες είναι η ηλικία, το φύλο, το ύψος, η θερμοκρασία σώματος, η σωματική μάζα, η μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου, η κατανομή των μυϊκών ινών, ο χρόνος επαφής με το έδαφος και το μήκος διασκελισμού. Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η αντίσταση του αέρα, η επιφάνεια τρεξίματος, τα παπούτσια και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, παίζουν και αυτοί καταλυτικό ρόλο στην απόδοση αντοχής (Kyrolainen et al., 2001; Saunders et al., 2004).

Ένα στοιχείο που έχει κερδίσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, είναι η απόδοση ενός αθλητή που επηρεάζεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των νέων αγωνιστικών υποδημάτων μεγάλων αποστάσεων. Το βάρος τους είναι αρκετά μειωμένο, προσφέρουν μεγαλύτερη απορρόφηση κραδασμών και επιστροφή ενέργειας, λόγω των νέων αφρών σόλας, που αποθηκεύουν και επαναφέρουν μεγαλύτερα ποσοστά ελαστικής ενέργειας, η διαμήκης ακαμψία κάμψης, λόγω της πλάκας από ανθρακονήματα, μειώνει το φόρτο εργασίας στον αστράγαλο και η επιθετική τους σχεδίαση με τη μικρή διαφορά ύψους μεταξύ φτέρνας και μπροστινών δακτύλων, ελαχιστοποιεί τις δυνάμεις πέδησης.

1.1. Εξέλιξη των αγωνιστικών παπουτσιών

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των παπουτσιών έχουν σκοπό να μεγιστοποιούν την οικονομία στο τρέξιμο, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την απώλεια ενέργειας. Η νέα γενιά παπουτσιών χρησιμοποιεί ένα καμπύλο άκαμπτο στοιχείο (πλάκα από ανθρακόνημα) και ένα μεγάλο ύψος ενδιάμεσης σόλας, κατασκευασμένο από συμβατό, ανθεκτικό και ελαφρύ αφρό. Το καμπύλο άκαμπτο στοιχείο αυξάνει τη διαμήκη ακαμψία κάμψης του παπουτσιού και έτσι δημιουργεί έναν μηχανισμό με επίδραση στη μηχανική του τρεξίματος, η οποία συμβαίνει όταν το κέντρο πίεσης ενός δρομέα ξεπερνά το σημείο κάμψης της καμπύλης δομής και προκαλεί τη δύναμη αντίδρασης να δράσει στη φτέρνα κάθετα προς το άκαμπτο στοιχείο παρέχοντας μόχλευση κατά τη διάρκεια της ώθησης. Καθώς η φτέρνα του παπουτσιού σηκώνεται πιο γρήγορα, οι γοφοί περνούν πάνω από το κέντρο βάρους γρηγορότερα και αυτό βελτιώνει την ορμή προς τα εμπρός. Αυτός ο μηχανισμός μειώνει τη μηχανική ενέργεια που χάνεται στις μεταταρσοφαλαγγικές αρθρώσεις, φαινόμενο teeter-totter, και κατά συνέπεια μειώνεται και ο φόρτος εργασίας στην ποδοκνημική και τον γαστροκνήμιο (Subramaniam & Nigg, 2021).

Το μεγάλο ύψος της ενδιάμεσης σόλας ενισχύει αυτόν τον μηχανισμό και επιτρέπει την εισαγωγή μιας πιο καμπύλης πλάκας στην ενδιάμεση σόλα. Το ανθεκτικό, ελαφρύ αφρώδες υλικό για την ενδιάμεση σόλα διασφαλίζει ότι το βάρος του παπουτσιού παραμένει ελαφρύ, ενώ εξακολουθεί να έχει μαλακό αφρό με επιστροφή υψηλής ενέργειας, καθώς όλα αυτά επηρεάζουν επίσης, την απόδοση.

Η πρώτη έρευνα έδειξε ότι ο πιο συμβατός και ανθεκτικός αφρός ενδιάμεσης σόλας από θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) βελτίωσε την δρομική οικονομία κατά 1% σε σύγκριση με τον παραδοσιακό αφρό οξικού αιθυλενίου-βινυλίου (EVA) σε ένα πρωτότυπο παπούτσι Adidas χωρίς πλάκα από ανθρακόνημα (Worobets et al., 2014).

Το ενεργειακό κόστος τρεξίματος έχει αποδειχθεί ότι αυξάνεται κατά 0,9% έως 1,2% ανά 100 g προστιθέμενης μάζας (Franz et al., 2012; Hoogkamer et al., 2016). Ως εκ τούτου, φαίνεται να υπάρχει ένα όριο περίπου 220 g ανά παπούτσι, όπου τα οφέλη των ελαφρύτερων παπουτσιών, είναι λιγότερα για τους δρομείς αποστάσεων (Fuller et al., 2015). Τα μοντέλα Nike Vaporfly 4% και Alphafly Next% ζυγίζουν περίπου 195 g και 210 g, αντίστοιχα, παρά τον όγκο τους λόγω του πάχους και της ακαμψίας τους, που προσδίδει η πλάκα από ανθρακονήματα πλήρους μήκους.

Από την πρώτη κυκλοφορία του Nike Vaporfly το 2017, οι περισσότερες μεγάλες εταιρίες παπουτσιών για τρέξιμο έχουν επενδύσει στην κατασκευή νέων αγωνιστικών υπερ-παπουτσιών. Τα παπούτσια αυτά έχουν προωθηθεί όχι μόνο για τους ελίτ δρομείς αλλά διατίθενται σε όλες τις βαθμίδες των δρομέων. Μεγάλο μέρος της έρευνας έκτοτε έχει επικεντρωθεί σε διάφορες εκδόσεις του Nike Vaporfly, το οποίο ενσωματώνει νέο, παχύτερο αφρό ενδιάμεσης σόλας από πολυαιθερικό μπλοκ αμιδίου (PEBAX) και πλάκα ανθρακονημάτων πλήρους μήκους (Barnes & Kilding, 2019; Hébert-Losier et al., 2020; Hoogkamer et al., 2018; Hunter et al., 2019). Οι (Hoogkamer et al., 2018) βρήκαν 4% βελτίωση στην δρομική οικονομία σε ένα πρωτότυπο Nike Vaporfly σε ταχύτητες τρεξίματος 14-18 km/h, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από τους (Barnes & Kilding, 2019). Εκτός από την αυξημένη διαμήκη ακαμψία κάμψης που παρέχεται από την πλάκα από ανθρακονήματα σε αυτά τα παπούτσια, ο νέος αφρός ενδιάμεσης σόλας στο Nike Vaporfly ήταν πιο ελαφρύς και ανθεκτικός, επιστρέφοντας περισσότερη μηχανική ενέργεια μετά τη συμπίεση (Hoogkamer et al., 2018).

Οι περισσότερες έρευνες έχουν συγκρίνει τα Nike Vaporfly και Alphafly με τα παραδοσιακά αγωνιστικά παπούτσια, αλλά σπάνια με άλλα υπέρ-παπούτσια. Σε μία τέτοια μελέτη, το Nike Alphafly Next% αποδείχθηκε ότι βελτιώνει την δρομική οικονομία κατά 4%, όχι μόνο συγκριτικά με ένα παραδοσιακό αγωνιστικό παπούτσι, αλλά και σε σύγκριση με ένα υπέρ-παπούτσι ανταγωνιστή του, το Hoka carbon X (Joubert et al., 2021). Σε παρόμοια έρευνα, το Nike Alphafly Next% συγκρινόμενο με πέντε ακόμα υπερ-παπούτσια, Hoka Rocket X, Saucony Endorphin Pro, Asics Metaspeed Sky, New Balance RC Elite, Brooks Hyperion Elite 2 και ένα συμβατικό, διαπιστώθηκε ότι βελτίωνε, περισσότερο από τα υπόλοιπα παπούτσια, τη δρομική οικονομία κατά 3% σε σύγκριση με παραδοσιακό αγωνιστικό παπούτσι (Joubert et al., 2022). Οι πιο πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι οι ανταγωνίστριες εταιρείες υποδημάτων (Asics, Brooks, Hoka, New Balance και Saucony) δεν έχουν ακόμη καταφέρει να λανσάρουν υπέρ-παπούτσια, που να προσφέρουν τα πλεονεκτήματα των μοντέλων της Nike (Joubert & Jones, 2022).

Όσον αφορά το Adidas Adizero Adios Pro 3 δεν έχει γίνει κάποια μελέτη που να το συγκρίνει με το Nike Alphafly Next% 2 ή με κάποιο άλλο υπέρ-παπούτσι ή με το συμβατικό παπούτσι.

1.2. Ενεργειακό όφελος και ταχύτητα

Σε μια σχετικά πρόσφατη μελέτη των (Joubert & Dominy, 2022) παρατηρήθηκε πως τα ενεργειακά οφέλη των υπέρ-παπουτσιών εξαρτώνται από την ταχύτητα τρεξίματος, με τα οφέλη στη δρομική οικονομία να είναι μικρότερα στα 10 km/h (0,9%) από ό,τι στα 12 km/h (1,6%) και πολύ μικρότερα από τα 16 km/h (2,7%).

Μια εξήγηση θα μπορούσε να είναι αυτή των μειωμένων κάθετων δυνάμεων αντίδρασης εδάφους που βιώνουν οι δρομείς. Σε χαμηλότερες ταχύτητες, οι δρομείς δεν συμπιέζουν πλήρως τον αφρό ώστε να κερδίσουν το πλήρες ελαστικό δυναμικό που προσφέρει το παπούτσι. Ταυτόχρονα, στις χαμηλές ταχύτητες, οι δυνάμεις είναι αρκετά μικρότερες και η λεπτή ενδιάμεση σόλα EVA του παπουτσιού δεν είναι τόσο αποδοτική, όσο θα ήταν σε μεγαλύτερες ταχύτητες, καθώς υπάρχει λιγότερη απόλυτη ενέργεια που πρέπει να χαθεί. Ως εκ τούτου, σε όλα τα υπέρ-παπούτσια, χρειάζεται να υπάρχει ένα «όριο δύναμης» πάνω από το οποίο οι δυνάμεις του δρομέα συμπιέζουν πλήρως τις περιοχές του αφρού και το ενεργειακό όφελος που προκύπτει είναι μεγαλύτερο (Hoogkamer et al., 2018).

Όσον αφορά το ρόλο της άκαμπτης καμπύλης πλάκας (ανθρακόνημα) στο ενεργειακό όφελος των σύγχρονων υπέρ-παπουτσιών, εξακολουθεί να μελετάται (Healey & Hoogkamer, 2021). Οι περιορισμένες έως τώρα έρευνες, υποδηλώνουν ότι τα χαρακτηριστικά της πλάκας αυτής στα υπέρ-παπούτσια, έχουν την τάση να τα καθιστούν πιο αποδοτικά σε υψηλότερες ταχύτητες.

Μια πρόσφατη ανάλυση των (Bermon et al., 2021) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία παπουτσιών τρεξίματος συνέβαλαν ουσιαστικά στη βελτίωση των κορυφαίων χρόνων διεθνώς στον μαραθώνιο και τον ημιμαραθώνιο μεταξύ των ελίτ αθλητών από το 2017 έως το 2020. Ομοίως, οι (Senefeld et al., 2021) έδειξαν βελτίωση 2% (2,8 λεπτά) και 2,6% (4,3 λεπτά) στους χρόνους ελίτ ανδρών και γυναικών μαραθωνοδρόμων, αντίστοιχα, τρέχοντας στους παγκόσμιους μεγάλους μαραθωνίους με τη νέα τεχνολογία παπουτσιών Nike. Τον Ιανουάριο του 2020, η World Athletics περιόρισε το ύψος της σόλας των υπέρ-παπουτσιών που φοριούνται για αγώνες δρόμου, στα 40 mm και απαγόρευσε τα παπούτσια αυτά να περιέχουν περισσότερες από μία ενσωματωμένες πλάκες.

Οι περισσότερες έρευνες που έχουν διεξαχθεί έως τώρα έχουν μελετήσει την επίδραση του προκατόχου του Nike Alphafly Next% 2, το Nike Alphafly Next και το Nike

Varorfly, οι οποίες έδειξαν ότι κατά μέσο όρο η δρομική οικονομία βελτιώνεται κατά 4% σε σύγκριση με το παραδοσιακό παπούτσι (Joubert & Jones, 2021), ενώ για το Adidas Adizero Adios Pro 3 υπάρχει μόνο μια σχετική έρευνα (Denis et al., 2024) που το σύγκρινε με τον διάδοχό του Adizero Adios Pro 4 και έδειξε 1,31% μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας, στην ταχύτητα των $13,4 \pm 1,1$ km/h. Καμία όμως μελέτη μέχρι στιγμής δεν έχει συγκρίνει τα δύο αυτά νέα μοντέλα τόσο μεταξύ τους όσο και με συμβατικά παπούτσια. Η διερεύνηση των παραπάνω έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο για τους επαγγελματίες αθλητές όσο και για τους ερασιτέχνες δρομείς αντοχής που θέλουν να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους. Είναι περιορισμένος ο αριθμός στη σύγχρονη βιβλιογραφία που αφορά την μελέτη των υπέρ-παπουτσιών και ειδικά τη σύγκριση των επιδράσεων δύο κορυφαίων μοντέλων στην ενεργειακή οικονομία κατά τη διάρκεια του τρεξίματος.

1.3. Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετηθεί ποιο από τα δύο αγωνιστικά υπέρ-παπούτσια, Nike Alphafly Next% 2 ή Adizero Adios Pro 3 μειώνει περισσότερο το ενεργειακό κόστος σε σύγκριση με το συμβατικό παπούτσι κατά τη διάρκεια του τρεξίματος σε τρεις δρομικές ταχύτητες.

1.4. Ερευνητικές υποθέσεις

Οι βασικές ερευνητικές υποθέσεις της παρούσας μελέτης ήταν:

- τα νέα αγωνιστικά υπέρ-παπούτσια θα βελτιώσουν τη δρομική οικονομία και στις τρεις ταχύτητες τρεξίματος (μείωση κατανάλωσης οξυγόνου, μείωση παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, μείωση θερμιδικού κόστους, αύξηση μήκους διασκελισμού, μείωση χρόνου επαφής με το έδαφος και αύξηση συχνότητας διασκελισμού).
- Η βελτίωση της δρομικής οικονομίας από τα νέα αυτά αγωνιστικά παπούτσια θα αυξάνεται, όσο αυξάνεται η ταχύτητα που τρέχει ο αθλητής.
- Τα οφέλη των δύο υπέρ-παπουτσιών στη δρομική οικονομία, θα διαφέρουν μεταξύ τους με το Adidas να είναι καλύτερο του Nike.

1.5. Οριοθετήσεις και περιορισμοί της έρευνας

Οι οριοθετήσεις της παρούσας έρευνας αναφέρονται παρακάτω:

- Η προπονητική ηλικία των συμμετεχόντων ήταν άνω των 8 ετών και διέφερε από άτομο σε άτομο.
- Όλοι ήταν ερασιτέχνες και όχι επαγγελματίες δρομείς.
- Ο αριθμός των δρομέων ήταν 12 και τα μεγέθη των παπουτσιών EU 44,5-45,5. Ίσως ένας μεγαλύτερος αριθμός δρομέων και μια μεγαλύτερη γκάμα μεγεθών παπουτσιών, να έδινε περισσότερα στοιχεία.
- Όλοι οι συμμετέχοντες ήταν άνδρες.
- Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Κλινικής Εργοφυσιολογίας & Φυσιολογίας της Άσκησης, του Τ.Ε.Φ.Α.Α. Δ.Π.Θ., δηλαδή σε εργαστηριακές συνθήκες και όχι στο πεδίο.

1.6. Ορισμοί και συντομογραφίες

Μήκος διασκελισμού: ως μήκος διασκελισμού καθορίζεται η απόσταση από την επαφή με το ένα πόδι, έως την επόμενη επαφή με το ίδιο πόδι στο έδαφος (cm)

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

Ενεργειακή δαπάνη: είναι η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του τρεξίματος (kcal/kg/km)

Κατανάλωση οξυγόνου: αναφέρεται στην ποσότητα οξυγόνου που χρησιμοποιεί ο οργανισμός για να παράγει ενέργεια (ml/kg/min)

Χρόνος επαφής: Ο χρόνος κατά τον οποίο το άκρο έρχεται σε επαφή με το έδαφος (sec)

TPU: Thermoplastic Polyurethane - θερμοπλαστική πολυουρεθάνη

PEBAX: Polyether Block Amide- πολυαιθερικό μπλοκ αμιδίου

EVA: Ethylene Vinyl Acetate - αφρός οξικού αιθυλενίου βινυλίου

TPEE: Thermoplastic Polyester Elastomer - θερμοπλαστικό πολυεστερικό ελαστομερές

AIR PODS: θάλαμοι πεπιεσμένου αέρα

TEETER-TOTTER: αναφέρεται για να περιγράψει το φαινόμενο, όταν το σημείο εφαρμογής της δύναμης αντίδρασης του εδάφους, μετακινείται στις πλάκες από ανθρακονήματα και συμβάλλει στην απόδοση.

DROP: διαφορά ύψους σόλας μεταξύ φτέρνας και μπροστινών δακτύλων.

ECr: ενεργειακό κόστος τρεξίματος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Δείγμα

Το δείγμα αποτέλεσαν 12 άνδρες ερασιτέχνες δρομείς (ηλικία: $39,6 \pm 8,2$ έτη, σωματικό ύψος: $181,2 \pm 4,91$ cm, σωματικό βάρος: $74,9 \pm 5,07$ kg, VO_2max : $55,6 \pm 2,15$ ml/min/kg και μέγιστη αερόβια ταχύτητα: $17,5 \pm 0,74$ km/h) οι οποίοι συμμετείχαν εθελοντικά στην έρευνα. Οι δοκιμαζόμενοι είχαν προπονητική ηλικία μεγαλύτερη των 8 ετών με εβδομαδιαίο όγκο προπόνησης 70 - 90 km και ατομικό ρεκόρ στον ημιμαραθώνιο δρόμο <1 h 30 min. Όλοι ήταν υγιείς, χωρίς ορθοπεδικά προβλήματα ή ενοχλήσεις και ήταν εξοικειωμένοι με το τρέξιμο σε δαπεδοεργόμετρο.

2.2. Πειραματικός σχεδιασμός

Οι συμμετέχοντες επισκέφθηκαν το εργαστήριο 2 διαφορετικές ημέρες μέσα σε διάστημα 2 εβδομάδων. Σκοπός της πρώτης επίσκεψης ήταν η εξοικείωση με τον χώρο του εργαστηρίου και η ενημέρωση των συμμετεχόντων σχετικά με τον τρόπο διεξαγωγής των μετρήσεων. Την ίδια ημέρα, πραγματοποιήθηκε η συμπλήρωση των ατομικών στοιχείων των συμμετεχόντων, καταγράφηκαν τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά (ύψος, βάρος, ηλικία) και ακολούθησε μέτρηση της μέγιστης κατανάλωσης οξυγόνου με δοκιμασία αυξανόμενης επιβάρυνσης έως την εξάντληση σε δαπεδοεργόμετρο. Όλοι οι συμμετέχοντες είχαν λάβει οδηγίες να φορούν δρομικά ρούχα και τα δικά τους παπούτσια για τρέξιμο και να μην καταναλώσουν φαγητό ή ποτό, εκτός από νερό, 90 λεπτά πριν από τη μέτρηση.

Στη δεύτερη επίσκεψη, οι συμμετέχοντες αφού είχαν λάβει τις ίδιες οδηγίες, έτρεξαν στο δαπεδοεργόμετρο, σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες, 11,5, 13,5 και 15,5 km/h, και με τα τρία υποδήματα (Nike Alphafly Next% 2, το Adidas Adizero Adios Pro 3 και το δικό τους συμβατικό παπούτσι). Μεταξύ των επαναλήψεων υπήρξε διάλειμμα 7 λεπτών για ξεκούραση και αλλαγή παπουτσιού. Κατά την εκτέλεση των επαναλήψεων μετρήθηκαν η καρδιακή συχνότητα (b/min), η κατανάλωση οξυγόνου (ml/kg/min), η παραγωγή CO_2 (ml/min) και υπολογίστηκε το θερμιδικό κόστος της άσκησης (kcal/kg/km), κατά τα τελευταία 2 λεπτά της κάθε επανάληψης. Επίσης, κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων καταγράφηκε το μήκος διασκελισμού, δηλαδή η απόσταση που διανύεται με ένα βήμα (cm), ο χρόνος επαφής με το έδαφος (sec) και η συχνότητα διασκελισμού (steps/min). Η

σειρά εκτέλεσης των τρεξιμάτων στις τρεις διαφορετικές ταχύτητες με τα τρία διαφορετικά υποδήματα έγινε με αντιστάθμιση και τυχαία σειρά.

2.3. Μετρήσεις και όργανα μέτρησης

2.3.1. Μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης κατανάλωσης οξυγόνου των συμμετεχόντων, ακολουθήθηκε ένα πρωτόκολλο με τρέξιμο προοδευτικά αυξανόμενης επιβάρυνσης σε ηλεκτροκινούμενο δαπεδοεργόμετρο (Hr Cosmos Quasar, Germany). Η αρχική ταχύτητα ήταν 10 km/h και αυξάνονταν κάθε 2 λεπτά κατά 1 km/h έως το σημείο της εξάντλησης. Η κλίση του διαδρόμου ήταν σταθερή στο 1%, ως προσομοίωση του τρεξίματος σε εξωτερικό χώρο. Πριν από τη διαδικασία της μέτρησης της μέγιστης κατανάλωσης οξυγόνου, όλοι οι συμμετέχοντες έκαναν μια σύντομη προθέρμανση 6 min στο δαπεδοεργόμετρο. Η ανταλλαγή αερίων μετρήθηκε με τη μέθοδο ανοιχτού κυκλώματος σπιρομέτρησης (Cosmed, Italy) και όλοι οι συμμετέχοντες ανέπνεαν μέσω μιας διπλής κατεύθυνσης βαλβίδας και μιας μάσκας (Hans Rudolph V2 Mask, USA) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της πρόσληψης οξυγόνου και άλλων καρδιοαναπνευστικών παραμέτρων. Οι αναλυτές αερίων βαθμονομούνταν συνεχώς έναντι τυποποιημένων αερίων. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον ίδιο εξεταστή.

2.3.2. Ενεργειακό κόστος

Για την μέτρηση του ενεργειακού κόστους κατά το τρέξιμο, οι συμμετέχοντες έτρεξαν στο δαπεδοεργόμετρο με κλίση 1%, σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες: 11,5, 13,5 και 15,5 km/h για 5 λεπτά σε κάθε ταχύτητα και με τα τρία υποδήματα, το Nike Alphafly Next% 2, το Adidas Adizero Adios Pro 3 και το δικό τους συμβατικό παπούτσι. Μεταξύ των επαναλήψεων υπήρχε στατικό διάλειμμα 7 λεπτών, για ξεκούραση και αλλαγή παπουτσιού. Κατά τη διάρκεια των 5λεπτων τρεξιμάτων γινόταν συνεχής μέτρηση της κατανάλωσης οξυγόνου και της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα και για τον προσδιορισμό του ενεργειακού κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα τελευταία 2 λεπτά της κάθε προσπάθειας.

Τα δεδομένα ανταλλαγής αερίων (VO_2 , VCO_2) που συλλέχθηκαν κατά τα τελευταία 2 λεπτά 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):

$$\text{Οξείδωση λίπους (g} \cdot \text{min}^{-1}) = 1.6947 \times \text{VO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) - 1.7012 \times \text{VCO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$\text{Οξείδωση υδατανθράκων (g} \cdot \text{min}^{-1}) = 4.5851 \times \text{VCO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) - 3.22259 \times \text{VO}_2 (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ενέργεια 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 ECr ποσοτικοποιήθηκε από το άθροισμα των τιμών ενέργειας των δύο υποστρωμάτων και εκφράστηκε σε $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2 λεπτών των μετρήσεων, σε κάθε ταχύτητα και με κάθε παπούτσι, καταγράφονταν η καρδιακή συχνότητα των δρομέων, μέσω φορητού καρδιοσυχνόμετρου (Polar H10, Finland).

2.3.3. Μέτρηση μηχανικών παραμέτρων

Για την μέτρηση συγκεκριμένων μηχανικών παραμέτρων κατά το τρέξιμο, της συχνότητας και του μήκους διασκελισμού, και του χρόνου επαφής με το έδαφος, χρησιμοποιήθηκε σύστημα οπτικής συλλογής δεδομένων (Optojump Next, Microgate It). Το σύστημα αποτελείται από δυο μπάρες (μεγέθους $100 \times 4 \times 3$ 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 κάθε 5 λεπτής διαδικασίας ενώ οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, ήταν από το τελευταίο 2 λεπτό της κάθε προσπάθειας.



Εικόνα 2. Τοποθέτηση Optojump Next, Microgate πάνω στο δαπεδοεργόμετρο.

2.4. Παπούτσια

Στην παρούσα έρευνα, τα παπούτσια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένα συμβατικό (χωρίς ανθρακόνημα) αθλητικό παπούτσι, που χρησιμοποιούσαν οι συμμετέχοντες στις δικές τους προπονήσεις, και δύο εμπορικά υπέρ-παπούτσια, το Nike Alphafly Next% 2 και το Adidas Adizero Adios Pro 3. Τα μεγέθη των παπουτσιών ήταν EU 44,5 - 45,5 και το βάρος τους 242 gr έως 270 gr, αναλόγως τον κάθε εξεταζόμενο. Στο Nike Alphafly Next% 2 χρησιμοποιείται αφρός PEBAΧ που ονομάζεται ZOOM X, μία ενιαία πλάκα από ανθρακόνημα σε όλο το μήκος του και μία σειρά AIR PODS στο μπροστινό μέρος του. Στο Adidas Adizero Adios Pro 3 χρησιμοποιείται αφρός TPEE που ονομάζεται LightStrike Pro και 5 ράβδοι από ανθρακόνημα σε όλο το μήκος του. Ενώ οι πλάκες από ανθρακονήματα έχουν αποδειχθεί ότι βελτιώνουν την δρομική οικονομία κατά 1%, οι αφροί PEBAΧ και TPEE έχει αποδειχθεί ότι την βελτιώνουν από 4 - 6% και μερικές φορές περισσότερο ανάλογα με το άτομο (Barnes & Kilding, 2019). Οι μηχανισμοί πίσω από αυτά τα αποτελέσματα, δείχνουν βελτιωμένη επιστροφή ενέργειας στους αθλητές, για μεγαλύτερης διάρκειας προσπάθειες (Hoogkamer et al., 2019).



Εικόνα 3. Nike Alphafly Next% 2 και Adidas Adizero Adios Pro 3.

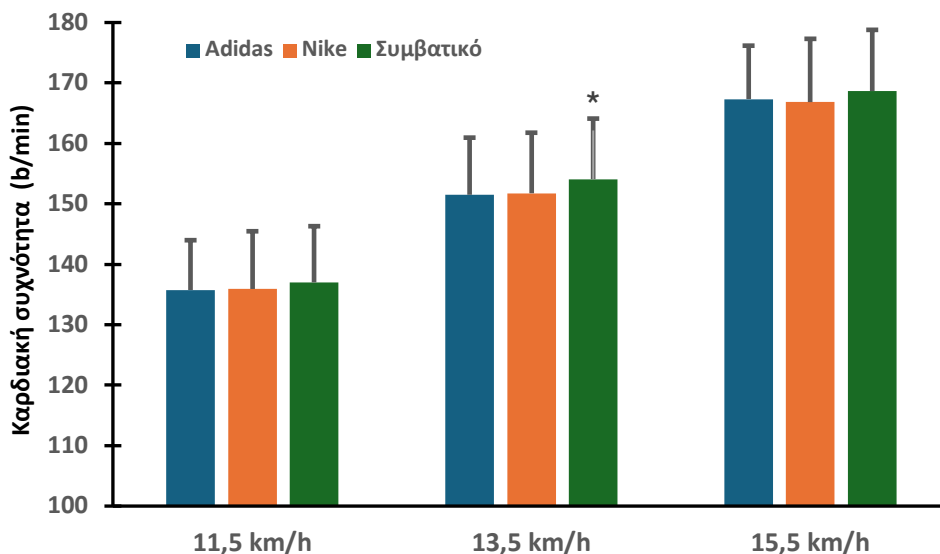
2.5. Στατιστική ανάλυση

Για τη σύγκριση της επίδρασης των διαφορετικών αθλητικών παπουτσιών (Nike Alphafly Next% 2, Adizero Adios Pro 3 και τα συμβατικά) στη δρομική οικονομία, τη συχνότητα και το μήκος διασκελισμού, και τον χρόνο επαφής με το έδαφος στην κάθε ταχύτητα τρεξίματος, 11,5 km/h, 13,5 km/h και 15,5 km/h, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα. Για τον προσδιορισμό των επιμέρους διαφορών μεταξύ των παπουτσιών τρεξίματος χρησιμοποιήθηκε το post hoc test του Tukey. Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε το $p < 0,05$.

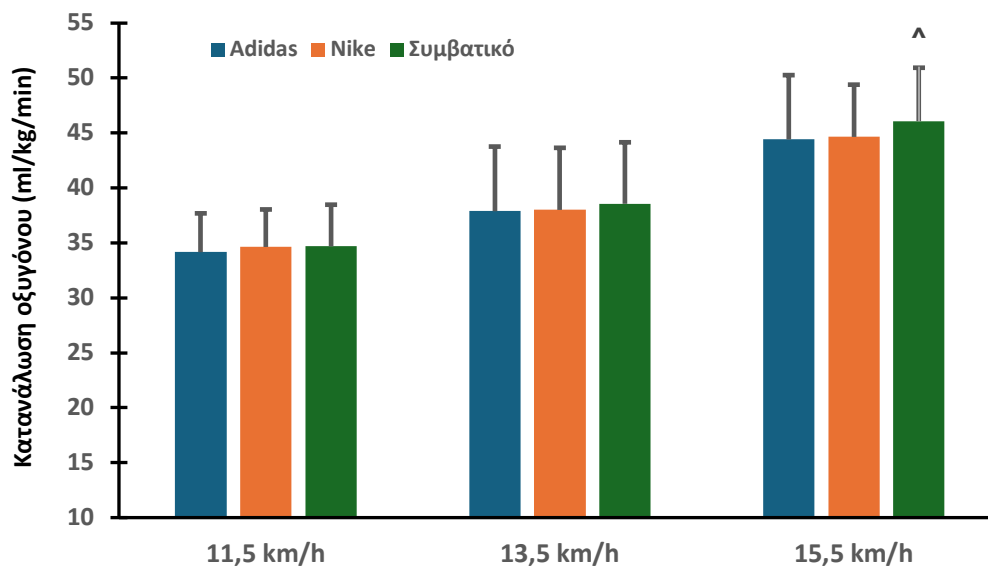
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Καρδιακή συχνότητα

Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 2,49$; $p= 0,11$)] στην καρδιακή συχνότητα, στην ταχύτητα των 11,5 km/h (Σχήμα 1). Διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 11,67$; $p= 0,01$] στην καρδιακή συχνότητα κατά το τρέξιμο με ταχύτητα 13,5 km/h. Πιο συγκριμένα, η καρδιακή συχνότητα με το συμβατικό παπούτσι ($154,08 \pm 10,02$ b/min) ήταν υψηλότερη συγκριτικά με το Adidas ($151,50 \pm 9,45$ b/min) και το Nike ($151,75 \pm 10,02$ b/min) (Σχήμα 1). Δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 1,43$; $p= 0,26$)] στην καρδιακή συχνότητα, τρέχοντας με ταχύτητα 15,5 km/h (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Καρδιακή συχνότητα σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). * $p < 0,05$ από τα Adidas adios pro 3 και Nike alphafly 2.



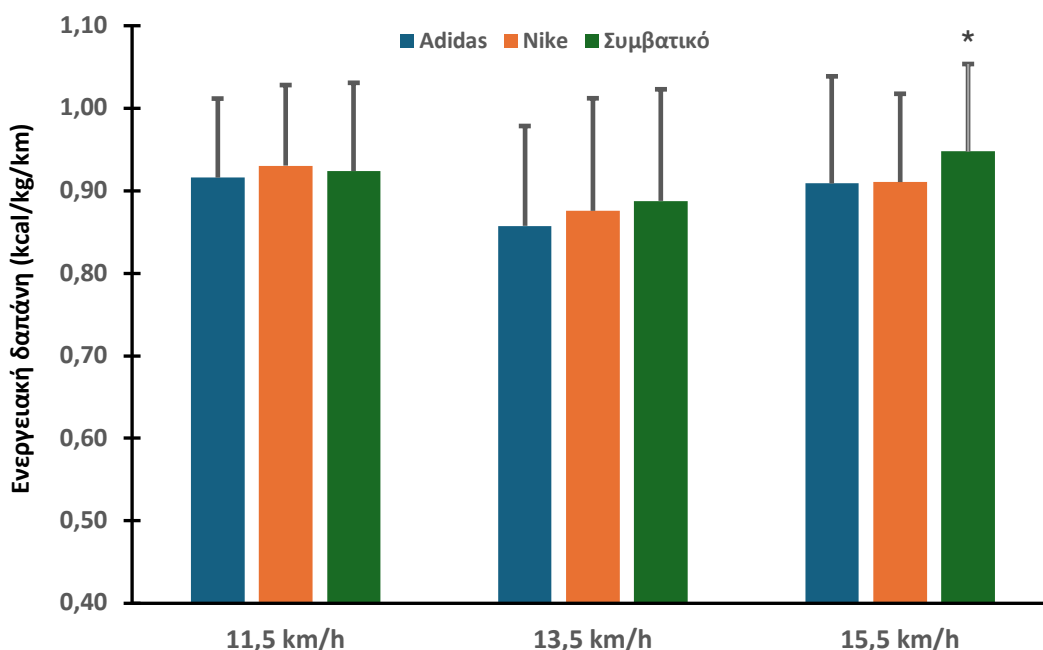
Σχήμα 2. Κατανάλωση οξυγόνου σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). [^] $p < 0,05$ από τα Adidas adios pro 3.

3.2. Κατανάλωση οξυγόνου

Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι στην κατανάλωση οξυγόνου στις ταχύτητες των 11,5 km/h [$F(2,22) = 0,39$; $p = 0,68$] και των 13,5 km/h [$F(2,22) = 0,62$; $p = 0,55$] (Σχήμα 2). Ωστόσο, διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22) = 6,22$; $p = 0,007$] στην κατανάλωση οξυγόνου με ταχύτητα τρεξίματος 15,5 km/h. Πιο συγκεκριμένα, η κατανάλωση οξυγόνου με το συμβατικό παπούτσι ($46,08 \pm 4,86$ ml/kg/min) ήταν υψηλότερη συγκριτικά με το Adidas ($44,40 \pm 5,86$ ml/kg/min) (Σχήμα 2).

3.3. Ενεργειακή δαπάνη

Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι στην ενεργειακή δαπάνη στις ταχύτητες των 11,5km/h [$F(2,22) = 0,30$; $p = 0,74$] και των 13,5 km/h [$F(2,22) = 1,26$; $p = 0,30$] (Σχήμα 3).

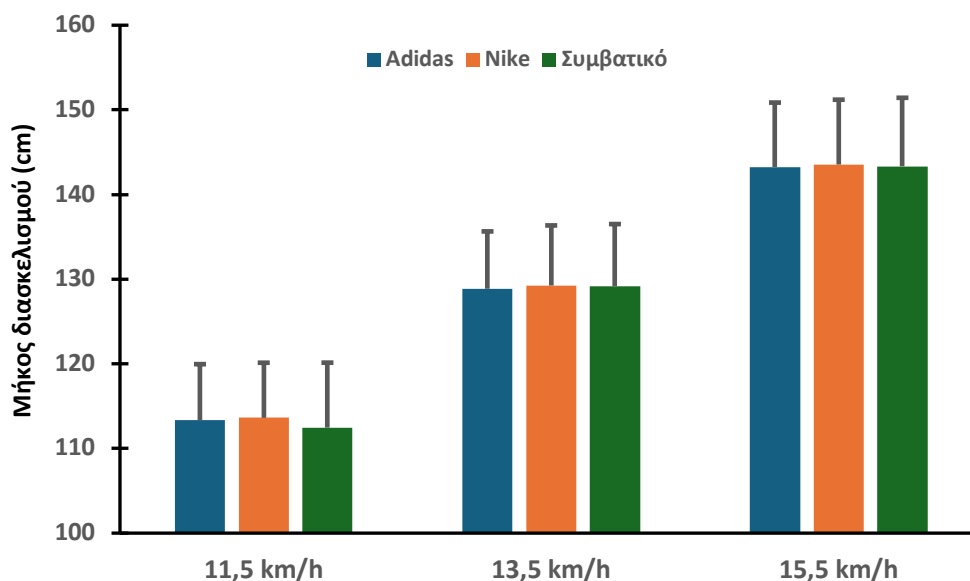


Σχήμα 3. Ενεργειακή δαπάνη σε τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). * $p < 0,05$ από τα Adidas adios pro 3 και Nike alphafly 2.

Διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι στην ενεργειακή δαπάνη με ταχύτητα τρεξίματος 15,5 km/h [$F(2,22) = 10,25$; $p = 0,01$]. Πιο συγκριμένα, η ενεργειακή δαπάνη με το συμβατικό παπούτσι ($0,95 \pm 0,10$ kcal/kg/km) ήταν υψηλότερη συγκριτικά με το Adidas ($0,91 \pm 0,13$ kcal/kg/km) και το Nike ($0,91 \pm 0,11$ kcal/kg/km) (Σχήμα 3).

3.4. Μήκος διασκελισμού

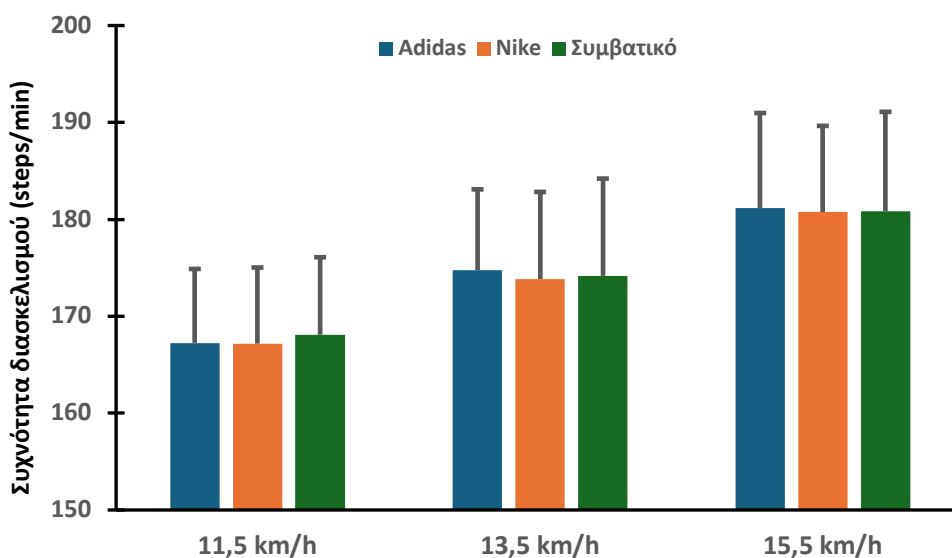
Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι στο μήκος διασκελισμού στις ταχύτητες τρεξίματος των 11,5 km/h [$F(2,22) = 1,58$; $p = 0,23$], 13,5 km/h [$F(2,22) = 0,35$; $p = 0,71$] και 15,5 km/h [$F(2,22) = 0,18$; $p = 0,83$] (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Μήκος διασκελισμού στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα).

3.5. Συχνότητα διασκελισμού

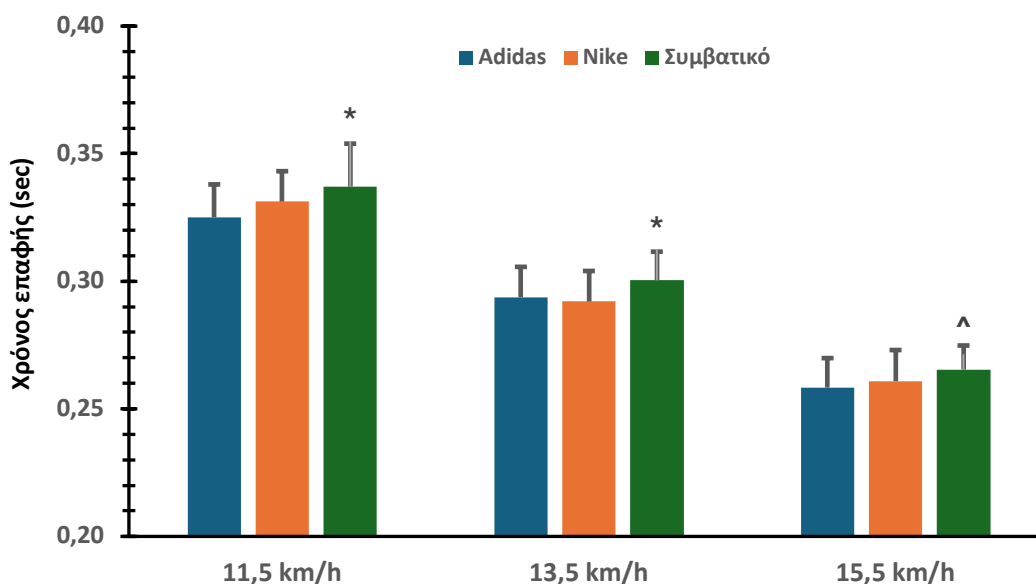
Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι στη συχνότητα διασκελισμού στις ταχύτητες τρεξίματος των 11,5 km/h [$F(2,22) = 0,93$; $p = 0,41$], 13,5 km/h [$F(2,22) = 1,06$; $p = 0,36$] και 15,5 km/h [$F(2,22) = 0,22$; $p = 0,80$] (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Συχνότητα διασκελισμού στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα).

3.6. Χρόνος επαφής

Από την ανάλυση διακύμανσης για εξαρτημένες μετρήσεις ως προς έναν επαναλαμβανόμενο παράγοντα, διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 10,25$; $p= 0,01$] στον χρόνο επαφής στην ταχύτητα 11,5 km/h. Πιο συγκριμένα, ο χρόνος επαφής με το έδαφος με το συμβατικό παπούτσι ($0,34 \pm 0,17$ sec) ήταν μεγαλύτερος συγκριτικά με το Adidas ($0,32 \pm 0,13$ sec) και το Nike ($0,33 \pm 0,12$ sec) (Σχήμα 6). Παρόμοια, διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 4,60$; $p= 0,02$] στον χρόνο επαφής με το έδαφος τρέχοντας με ταχύτητα 13,5km/h. Πιο συγκριμένα, ο χρόνος επαφής με το έδαφος με το συμβατικό παπούτσι ($0,30 \pm 0,11$ sec) ήταν μεγαλύτερος συγκριτικά με το Adidas ($0,294 \pm 0,12$ sec) και το Nike ($0,292 \pm 0,12$ sec) (Σχήμα 6). Επίσης, διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση του παράγοντα αθλητικό παπούτσι [$F(2,22)= 3,56$; $p= 0,05$] στον χρόνο επαφής με το έδαφος τρέχοντας και με την ταχύτητα των 15,5 km/h. Πιο συγκριμένα, ο χρόνος επαφής με το έδαφος με το συμβατικό παπούτσι ($0,265 \pm 0,009$ sec) ήταν μεγαλύτερος συγκριτικά με το Adidas ($0,258 \pm 0,012$ sec) (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Χρόνος επαφής στο τρέξιμο με ταχύτητες 11,5 , 13,5 και 15,5 km/h φορώντας συμβατικό παπούτσι (χωρίς ανθρακόνημα) και τα παπούτσια Adidas Adios pro 3 και Nike Alphafly 2 (με ανθρακόνημα). * $p < 0,05$ από τα Adidas adios pro 3 και Nike alphafly 2. ^ $p < 0,05$ από τα Adidas adios pro 3.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν διαφορές στην δρομική οικονομία ανάμεσα στα δύο υπέρ-παπούτσια, Nike Alphafly Next% 2 και Adizero Adios Pro 3 και το συμβατικό. Συγκεκριμένα έδειξαν, χαμηλότερη κατανάλωση οξυγόνου, μειωμένη ενεργειακή δαπάνη και μικρότερο χρόνο επαφής με το έδαφος, στις υψηλές ταχύτητες τρεξίματος, ενώ στο μήκος και τη συχνότητα διασκελισμού δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές.

Η δρομική οικονομία είναι σημαντική για την απόδοση, επειδή επηρεάζει άμεσα το πόσο αποτελεσματικά ένας δρομέας χρησιμοποιεί την ενέργεια για να διατηρήσει έναν συγκεκριμένο ρυθμό. Αποτελεί έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της απόδοσης αντοχής, μαζί με τη VO_2max . Η βελτίωση της δρομικής οικονομίας, σημαίνει ότι ένας δρομέας μπορεί να καλύψει την ίδια απόσταση με λιγότερη κατανάλωση οξυγόνου, γεγονός που μεταφράζεται σε βελτιωμένη αντοχή και ταχύτερους χρόνους αγώνα, ειδικά στις μεγάλες αποστάσεις (Saunders et al., 2004). Φυσικά, δεν είναι μόνο το πόσο οξυγόνο καταναλώνουμε, αλλά και πόσο αποτελεσματικά το σώμα μας το χρησιμοποιεί (Barnes & Kilding, 2015).

Έχει αποδειχθεί ότι η δρομική οικονομία είναι ένας καλός προγνωστικός δείκτης της απόδοσης ενός αθλητή και ακριβέστερος από τη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_2max) σε προπονημένους δρομείς με τις ίδιες τιμές μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (Kipp et al., 2019).

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την πρόσληψη οξυγόνου και την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, τα αποτελέσματα της έρευνας μας έδειξαν, μείωση των τιμών με την χρήση των δύο υπέρ-παπουτσιών, έναντι του συμβατικού, στις υψηλές ταχύτητες. Στην ταχύτητα των 15,5 km/h, η κατανάλωση οξυγόνου μειώθηκε κατά 3,65% με το Adidas και 3,12% με το Nike, ενώ η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα μειώθηκε κατά 5,02% με το Adidas και 4,36% με το Nike. Παρόμοια αποτελέσματα είχαν και η έρευνες των (Hoogkamer et al., 2018; Barnes & Kilding, 2019) που βρήκαν βελτίωση 3.0% - 4,2% στις αντίστοιχες παραμέτρους σε ταχύτητες τρεξίματος 15 - 18 km/h, συγκρίνοντας το Nike Vaporfly 4% με το συμβατικό παπούτσι. Οι διαφορές αυτές μεταξύ των μελετών, πιθανόν σχετίζονται με τις διαφορές στην ταχύτητα τρεξίματος, στο επίπεδο των δρομέων και στα διαφορετικά υποδήματα που εξετάστηκαν.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μειωμένες τιμές της πρόσληψης οξυγόνου και της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, διαπιστώνουμε και μείωση της ενεργειακής δαπάνης. Δεδομένου λοιπόν, ότι το τρέξιμο είναι οικονομικό, όταν η ενεργειακή δαπάνη εκφρασμένη σε απόλυτες τιμές, είναι μικρή σε μια δεδομένη ταχύτητα, παρατηρήθηκε και μείωση κατά 3,62% στο ενεργειακό κόστος τρεξίματος με τα δύο υπέρ-παπούτσια, συγκριτικά με το συμβατικό, στην ταχύτητα 15,5 km/h. Στις χαμηλότερες ταχύτητες 11,5 και 13,5 km/h δεν σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές. Αντίστοιχα αποτελέσματα υπήρξαν και στην έρευνα των (Healey & Hoogkamer, 2021; Joubert & Dominy, 2022) όπου παρατηρήθηκε πως τα ενεργειακά οφέλη των υπέρ-παπουτσιών εξαρτώνται από την ταχύτητα τρεξίματος και η δρομική οικονομία είναι μικρότερη στα 10 km/h (0,9%) από ό,τι στα 12km/h (1,6%) και πολύ μικρότερη από τα 16km/h (2,7%). Βέβαια, μια πρόσφατη έρευνα των (Paradisis et al., 2023) σε ερασιτέχνες δρομείς που έτρεξαν σε χαμηλές ταχύτητες (9,4-11,5 km/h), έδειξε ότι ακόμη και οι πιο αργοί μαραθωνοδρόμοι μπορούν να επωφεληθούν από την προηγμένη τεχνολογία υποδημάτων. Είναι πιθανό ορισμένα υπέρ-παπούτσια να είναι πιο κατάλληλα για την παροχή ενεργειακού οφέλους σε χαμηλές ταχύτητες και άλλα σε μεγαλύτερες ταχύτητες.

Ο χρόνος επαφής με το έδαφος, τρέχοντας με το συμβατικό παπούτσι, ήταν μεγαλύτερος συγκριτικά με το Adidas και το Nike και στις τρεις ταχύτητες (11,5, 13,5, 15,5 km/h), ενώ στο μήκος διασκελισμού και στη συχνότητα διασκελισμού δεν παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Ο μικρότερος χρόνος επαφής με το έδαφος που επιτεύχθηκε με τα υπέρ-παπούτσια πιθανά σχετίζεται με την καλύτερη δρομική οικονομία, διότι η επιθετική τους σχεδίαση, με το χαμηλό drop (μικρή διαφορά ύψους σόλας, μεταξύ φτέρνας και μπροστινών δακτύλων) αυτών των υποδημάτων, ελαχιστοποιεί τις δυνάμεις πέδησης, με αποτέλεσμα συντομότερο χρόνο επαφής (Chapman et al., 2012).

Σε μια παρόμοια έρευνα των (Hunter et al., 2019; Paradisis et al., 2023) οι δρομείς, φορώντας το Nike, μείωσαν τον χρόνο επαφής με το έδαφος κατά 0,05 sec και αύξησαν κατά 0,9% το μήκος διασκελισμού τους σε σύγκριση με το συμβατικό παπούτσι. Η μεγάλη επιστροφή ενέργειας από τους νέους αφρούς της ενδιάμεσης σόλας, οδηγεί σε μεγαλύτερο μήκος διασκελισμού και άρα περισσότερο χρόνο στον αέρα, μειώνοντας παράλληλα τον χρόνο επαφής με το έδαφος και βελτιώνοντας ενδεχομένως την δρομική οικονομία (Joubert et al., 2020). Αν και αυτά μπορεί να μην ακούγονται σημαντικά, αν

επρόκειτο να μεταφραστεί σε έναν αγώνα, ο χρόνος τερματισμού σε αγώνα μαραθωνίου με μέση ταχύτητα 16 km/h (2:38:14) θα μειωνόταν κατά 0:01:25 που είναι σημαντικός για πολλούς μαραθωνοδρόμους. Οι δρομείς που περνούν λιγότερο χρόνο στο έδαφος λαμβάνουν μεγαλύτερο όφελος στην οικονομία τρεξίματος.

Ο μικρός χρόνος επαφής με το έδαφος βελτιώνει τόσο την δρομική οικονομία όσο και τη μέγιστη δρομική ταχύτητα. Αυτό φαίνεται να είναι λογικό, δεδομένου ότι το κρίσιμο σημείο, στο τρέξιμο σπριντ και στο οικονομικό τρέξιμο, είναι η απώλεια ταχύτητας κατά τη διάρκεια της φάσης φρεναρίσματος. Η οριζόντια δύναμη πέδησης και ο χρόνος πέδησης, καθώς και η οριζόντια απόσταση μεταξύ του πρώτου σημείου επαφής και του κέντρου βάρους του σώματος κατά την επαφή, πρέπει να είναι πολύ μικρές ώστε να αποφεύγεται η απώλεια ταχύτητας κατά τη φάση πέδησης στην επαφή με το έδαφος. (Kyröläinen et al., 2001; Nummela & Keränen, 2007).

Η καρδιακή συχνότητα ήταν χαμηλότερη τρέχοντας με τα υπέρ-παπούτσια σε όλες τις ταχύτητες, αλλά μόνο στην ταχύτητα 13,5 km/h υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ του συμβατικού ($154,08 \pm 10,02$ b/min) και των Adidas ($151,50 \pm 9,45$ b/min) και Nike ($151,75 \pm 10,02$ b/min). Ένας πιθανός λόγος που οφείλεται αυτό, είναι ότι σε αυτή την ταχύτητα ξεκινούν οι καρδιακές προσαρμογές στους δρομείς αυτού του επιπέδου. Αν και γενικά διαπιστώθηκε μικρή πτώση των τιμών της καρδιακής συχνότητας με τα δύο υπέρ-παπούτσια σε σχέση με το συμβατικό, όπως και στη μελέτη των (Ortega et al., 2021), εντούτοις θα μπορούσε να είναι ένας καθοριστικός φυσιολογικός παράγοντας απόδοσης, σε έναν αγώνα όπως ο μαραθώνιος.

Ένας περιορισμός της έρευνάς μας, καθώς και άλλων παρόμοιων ερευνών σχετικά με τα υπέρ-παπούτσια, είναι ότι το υψηλό κόστος αυτών των υποδημάτων και η τεράστια ποσότητα των διαθέσιμων μοντέλων (πάνω από 30 κατασκευαστές έχουν υπέρ-παπούτσια εγκεκριμένα από την World Athletics), καθιστούν αδύνατη την αξιολόγηση κάθε ενός παπουτσιού ή τη σύγκριση του με όλα τα άλλα, χωρίς την ύπαρξη χορηγών ή την δωρεάν διάθεση αυτών από τις εταιρίες.

Δεδομένου ότι το όφελος για την δρομική οικονομία από τη χρήση των υπέρ-παπουτσιών ποικίλλει μεταξύ των δρομέων, αναλόγως την προπονητική ηλικία, το φύλο, τους μυϊκούς και μεταβολικούς παράγοντες, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν την προσαρμογή των ιδιοτήτων των παπουτσιών αυτών στα χαρακτηριστικά μεμονωμένων δρομέων. Επίσης, σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να μετρήσει την

δρομική οικονομία, και όχι να διεξάγει δοκιμές υλικών των υπέρ-παπουτσιών που χρησιμοποιήθηκαν. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν μηχανικές διαφορές μεταξύ της πλάκας από ανθρακόνημα και άλλων υλικών (π.χ. πλάκες νάιλον).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι και τα δύο αυτά νέα μοντέλα αγωνιστικού παπουτσιού το ADIDAS ADIZERO ADIOS PRO 3 και το NIKE ALPHAFLY NEXT %2, μειώνουν σημαντικά το ενεργειακό κόστος τρεξίματος σε σύγκριση με τα συμβατικά παπούτσια, ενώ δεν επηρεάζουν το μήκος και τη συχνότητα διασκελισμού. Οι ιδιότητες αυτών των παπουτσιών όπως το βάρος, το μεγάλο ύψος της ενδιάμεσης σόλας από αφρό και η διαμήκης ακαμψία κάμψης, αποδείχτηκε από την παρούσα έρευνα, ότι βελτιώνουν τη δρομική οικονομία αλλά μόνο σε υψηλές ταχύτητες, με το ADIDAS ADIZERO ADIOS PRO 3 να έχει τάση για ελαφρώς μεγαλύτερα ποσοστά βελτίωσης από το NIKE ALPHAFLY NEXT %2. Τα οφέλη στο μεταβολικό κόστος και στην βιομηχανική του τρεξίματος από τα δύο αυτά υπέρ-παπούτσια είναι αρκετά για να βελτιώσουν οι δρομείς τους χρόνους απόδοσης με ουσιαστικό τρόπο και ειδικά σε αγώνες μεγάλων αποστάσεων όπως ο μαραθώνιος, όπου η οικονομία τρεξίματος είναι καθοριστικός παράγοντας για την επίδοση. Ωστόσο, τα δύο αυτά υπέρ-παπούτσια απευθύνονται κυρίως σε δρομείς που μπορούν να τρέχουν για ώρα σε υψηλές ταχύτητες (άνω των 15 km/h) και όχι σε χαμηλότερες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Barnes, K.R., & Kilding, A.E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, 1, 1-15.
2. Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2019). A randomized crossover study investigating the running economy of highly-trained male and female distance runners in marathon racing shoes versus track spikes. *Sports Medicine*, 49, 331-342.
3. Bermon, S., Garrandes, F., Szabo, A., Berkovics, I., & Adami, P.E. (2021). Effect of advanced shoe technology on the evolution of road race times in male and female elite runners. *Front Sports Act Living*, 3, 153-173.
4. Chapman, R.F., Laymon, A.S., Wilhite, D.P., McKenzie, J.M., Tanner, D.A., & Stager, J.M. (2012). Ground contact time as an indicator of metabolic cost in elite distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(5), 917–925.
5. Denis, Y., Knoke, H., Braun, L., & Willwacher, S. (2024). New year, new gear: Does the next version of an advanced footwear model lead to better performance? *Footwear Science*, 15(3), 1-6
6. Dinato, R.C., Cruz, R., Azevedo, R.A., Hasegawa, J.S., Silva R.G., Ribeiro, A.P., Lima-Silva, A.E., & Bertuzzi, R. (2021). Footwear designed to enhance energy return improves running economy compared to a minimalist footwear: does it matter for running performance? *Braz J Med Biol*, 15, 54(5).
7. Driller, M., Williams, N., & Walker, A. (2017). The reliability of a 5km run test on a motorized treadmill. *Meas Phys Educ Exerc Sci*, 21, 121–6.
8. Fletcher, J.R., Esau, S.P., & MacIntosh, B.R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology*, 107(6), 1918-1922.
9. Franz, J.R., Wierzbinski, C.M., & Kram, R. (2012). Metabolic cost of running barefoot versus shod: is lighter better?. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(8), 1519-1525.
10. Fuller, J.T., Bellenger, C.R., Thewlis, D., Tsiros, M.D., & Buckley, J.D. (2015). The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners. *Sports Med*, 45, 411-422.
11. Jeukendrup, A.E., Wallis, G.A. (2005). Measurement of Substrate Oxidation during Exercise by Means of Gas Exchange Measurements. *Int. J. Sports Med*, 26, S28–S37.
12. Joubert DP, Guerra NA, Jones EJ, Knowles EG, Piper AD. (2020). Ground Contact Time Imbalances Strongly Related to Impaired Running Economy. *Int J Exerc Sci*. 13(4), 427-437.

13. Joubert, D.P., & Jones, G.P. (2021). A comparison of running economy across seven highly cushioned racing shoes with carbon-fibre plates. *Footwear Science*, 1-13.
14. Joubert, D.P. & Dominy, T.A. (2022). Effects of a Carbon-Plated Racing Shoe on Running Economy at Slower Running Speeds. *International Journal of Exercise Science Conference Proceedings* 2(140), Article 15.
15. Joyner, M.J., & Coyle, E.F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *Journal of Physiology*, 586(1), 35-44.
16. Hausswirth, C., & Lehenaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Med*, 31(9), 679-689.
17. Healey, L.A., & Hoogkamer, W. (2021). Energetics and biomechanics of running footwear with increased longitudinal bending stiffness: a narrative review. *Sports Med*, 51(5), 873-894.
18. Hébert-Losier, K., Finlayson, S.J., Driller, M.W., Dubois, B., Esculier, J.F., & Beaven, C.M. (2020). Metabolic and performance responses of male runners wearing 3 types of footwear: Nike vaporfly 4%, saucony endorphin racing flats, and their own shoes. *J Sport Health Sci*, doi: 10.1016/j.jshs.2020.11.012
19. Hoogkamer, W., Kram, R., & Arellano, C.J. (2017). How biomechanical improvements in running economy could break the 2-hour marathon barrier. *Sports Med*, 47, 1739–50.
20. Hoogkamer, W., Kipp, S., Frank, J.H., Farina, E.M., Luo, G., & Kram, R. (2018). A Comparison of the Energetic Cost of Running in Marathon Racing Shoes. *Sports Med*, 48(4), 1009-1019.
21. Hoogkamer, W., Kipp, S., & Kram, R. (2019). The biomechanics of competitive male runners in three marathon racing shoes: A randomized crossover study. *Sports Med*, 49, 133–43.
22. Hunter, I., McLeod, A., Valentine, D., Low, T., Ward, J., & Hager, R. (2019). Running economy, mechanics, and marathon racing shoes. *Journal of Sports Sciences*, 37(20), 2367–2373.
23. Kipp S, Kram, R, Hoogkamer, W. (2019). Extrapolating Metabolic Savings in Running: Implications for Performance Predictions. *Frontiers in Physiology*. 10(79).
24. Knopp, M., Muñiz-Pardos, B., & Wackerhage, H. (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 Med*, 53, 1255–1271.
25. Kram, R., Griffin T.M., Donelan, J.M., et al. (1998). Force treadmill for measuring vertical and horizontal ground reaction forces. *J Appl Physiol*, 85, 764–769.

26. Kyrolainen, H., Belli, A., Komi, P.V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Med Sci Sports Exerc*, 33(8), 1330-1337.
27. Nummela, A., Keränen, T. (2007). Factors related to top running speed and economy. *International Journal of Sports Medicine*, 28(08), 655-661.
28. Ortega, J. A., Healey, L. A., Swinnen, W., & Hoogkamer, W. (2021). Energetics and biomechanics of running footwear with increased longitudinal bending stiffness: a narrative review. *Sports Med*, 51(5), 873-894.
29. Paradisis, G.P., Zacharogiannis, E., Bissas, A., & Hanley, B. (2023). Recreational runners gain physiological and biomechanical benefits from super shoes at marathon paces. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(12), 1420-1426.
30. Pebax Powered® | Innovative Sports Equipment | Stretch Your Limits™ [Internet]. [cited 2020 Dec 3]. <https://www.pebaxpowered.com/en/>.
31. Péronnet, F., & Massicotte, D. (1991). Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Can J Sport Sci*, 16(1), 23-29.
32. Saunders, P, Pyne, D, Telford, R, Hawley, J. (2004). Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners. *Sports Med*, 34(7):465-485.
33. Senefeld, J.W., Haischer, M.H., Jones, A.M., Wiggins, C. C., Beilfuss, R., Joyner, M.J., & Hunter, S.K. (2021). Technological advances in elite marathon performance. *Journal of Applied Physiology*, 130(6), 2002-2008.
34. Subramaniam, A. & Nigg, B. (2021). Highlighting the present state of biomechanics in shoe research. *Footwear Science*, 15(2), 133-143.
35. Toshiya Urushihata, Toshihiro Haba, Yuta Nakagawa, Daichi Kawamura, Yasuyuki Umezaki, Ibuki Kumazawa. (2022). Effect of wearing carbon plate shoes on the running economy of pronated feet. *Journal of International Exercise Science*, 1(1), 40-49.
36. Whiting, C.S., Hoogkamer, W., & Kram, R. (2021). Metabolic cost of level, uphill, and downhill running in highly cushioned shoes with carbon-fiber plates. *J Sport Health Sci*, 11(3), 303-308.
37. Worobets, J., Wannop, J.W., Tomaras, E., & Stefanyshyn, D. (2014). Softer and more resilient running shoe cushioning properties enhance running economy. *Footwear Science*, 6(3), 147-153.
38. World Athletics [Internet]. [cited 2020 Nov 30]. <https://www.worldathletics.org/records/by-category/world-records/>