

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

ΤΙΤΛΟΣ

Σχεδιασμός, Υλοποίηση, και Έλεγχος Εγκυρότητας και Αξιοπιστίας Ενός Λογισμικού για την προάσπιση της υγείας και της βελτίωση της απόδοσης σε θερμό περιβάλλον.

ΤΟΥ

Κωνσταντίνου Μάντζιου

Επιβλέπων Καθηγητής

Ανδρέας Φλουρής

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για τη μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Άσκηση και Υγεία» του Τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

2019

©

Copyright

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την συγγραφή της Μεταπτυχιακής μου Διατριβής ολοκληρώνω τις σπουδές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Άσκηση και Υγεία». Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια του προγράμματος των μεταπτυχιακών σπουδών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανδρέα Φλουρή, για τη δυνατότητα και την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διατριβή. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω και για τις πολύτιμες οδηγίες και συμβουλές του κατά την διάρκεια των μετρήσεων και της συγγραφής της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Λεωνίδα Ιωάννου, υποψήφιο διδάκτορα της σχολής μας. Η βοήθεια και η καθοδήγησή του ήταν πολύτιμη και αναντικατάστατη. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής μου. Ευχαριστώ για την συμβολή τους στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, αλλά και για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν ως μέλη για την αξιολόγησή της, τους κυρίους Ιωάννη Κουτεντάκη και Ιωάννη Γιάκα.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου και μέλη του εργαστηρίου περιβαλλοντικής φυσιολογίας FAME Laboratory, για την συνεργασία και συμπαράστασή που μου προσέφεραν. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και ηθική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της παρακολούθησης των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο πρώτος στόχος αυτής της μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και η εφαρμογή ενός νέου λογισμικού (PHS_{FL}) για τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης κατά την εργασία ή την άσκηση, βασισμένο στο ISO 7933: 2004. Δεύτερος στόχος ήταν η αύξησή της πρακτικότητας του PHS_{FL} με τη χρήση άλλων προτύπων ISO και βιβλιογραφίας. Ο τρίτος στόχος ήταν η αξιολόγηση: i) της εγκυρότητας του PHS_{FL} συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του χρησιμοποιώντας είτε τον αρχικό κώδικα ISO 7933: 2004 είτε μια εφαρμογή για κινητές συσκευές, και ii) την αξιοπιστία του PHS_{FL} συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του, με αντίστοιχα μέσω μελετών εργαστηρίου και πεδίου σε ανθρώπους κατά τη διάρκεια της εργασίας και της άσκησης στη ζέστη. Τέταρτος στόχος αυτής της μελέτης ήταν η πρόβλεψη της θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής κατά τη διάρκεια μεγάλων αθλητικών διοργανώσεων. Οι αναλύσεις για την εγκυρότητα του PHS_{FL} έδειξαν τέλειες συσχετίσεις μεταξύ των πακέτων λογισμικού ($r = 1,0$, $p < 0,001$). Η αξιολόγηση με μελέτες πεδίου έδειξε ισχυρές σχέσεις μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών θερμοκρασιών του πυρήνα ($r = 0.598$, $p < 0.001$) και του δέρματος ($r = 0.713$, $p < 0.001$). Επιπλέον, τα ίδια αποτελέσματα έδειξε και η αξιολόγηση με μελέτες εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα προσομοίωσης είχαν ισχυρές συσχετίσεις με τα δεδομένα που μετρήθηκαν σε επαγγελματίες και μη αθλητές [θερμοκρασία πυρήνα ($r = 0,78$ και $r = 0,82$, $p < 0,001$), μέση θερμοκρασία δέρματος ($r = 0,75$ και $r = 0,77$, $p < 0,001$) αντίστοιχα. Τέλος, βρήκαμε περιβαλλοντικά δεδομένα για 444 αθλητικές διοργανώσεις. Τα δεδομένα προσομοίωσης έδειξαν ότι η άσκηση σε θερμές συνθήκες αυξάνει την θερμοκρασία πυρήνα κατά μέσο όρο $1,1^{\circ}\text{C}$ σε σύγκριση με την άσκηση σε ψυχρότερες περιβαλλοντικές συνθήκες. Συμπερασματικά, το λογισμικό PHS_{FL} έχει ισχυρή αξιοπιστία και εγκυρότητα, όπως

επίσης, είναι ικανό να προβλέψει τις θερμοφυσιολογικές αποκρίσεις αθλητών υψηλού επιπέδου.

Λέξεις κλειδιά: υπερθερμία, θερμικό στρες, εργασία, άσκηση

ABSTRACT

The first aim of this study was to design and implement a new software (PHS_{FL}) to calculate the predicted heat strain based on ISO 7933:2004. The second aim was to increase the practicality of the PHS_{FL} through other ISO standards and published literature. The third aim was to assess: (i) the criterion-related validity of the PHS_{FL} by comparing its results using either the original ISO 7933:2004 code or a mobile application and (ii) the construct validity of the PHS_{FL} by comparing its results against those obtained via field and lab studies during work and exercise in the heat. The fourth aim of this study was to examine the thermal strain experienced by professional athletes the largest prolonged sport events in the world. The analyses for criterion validity showed perfect relationships in all outputs between all software packages ($r=1.0$, $p<0.001$). The construct validity in field studies showed strong relationships between the simulated and measured core temperature ($r=0.598$, $p<0.001$) and mean skin temperature ($r=0.713$, $p<0.001$). Similar results have been found in lab studies. Specifically, we found strong relationships between the simulated and measured data in professional (core temperature: $r=0.78$; mean skin temperature: $r=0.75$; $p<0.001$) and non-professional (core temperature: $r=0.82$; mean skin temperature: $r=0.77$; $p<0.001$) athletes. Furthermore, simulated data for the largest prolonged sport events (444 sport events) showed that athletes running in warm conditions experience on average 1.1°C higher core temperature compared to the same athletes running in cooler environmental conditions. In conclusion, the PHS_{FL} software demonstrated strong criterion-related and construct-related validity and be used to calculate the thermal strain experienced by professional athletes when physiological data are not available.

Key words: PHS; hyperthermia; heat stress; work; exercise;

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Μάντζιος, μεταπτυχιακός φοιτητής του τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού του προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Άσκηση και Υγεία»

δηλώνω υπεύθυνα ότι αποδέχομαι τους παρακάτω όρους που αφορούν

(α) στα πνευματικά δικαιώματα της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας (ΜΔΕ) μου με τίτλο: **«Σχεδιασμός, Υλοποίηση, και Έλεγχος Εγκυρότητας και Αξιοπιστίας Ενός Λογισμικού για την προάσπιση της υγείας και της βελτίωση της απόδοσης σε θερμό περιβάλλον»**

(β) στη διαχείριση των ερευνητικών δεδομένων που θα συλλέξω στην πορεία εκπόνησής της:

1. Τα πνευματικά δικαιώματα του τόμου της μεταπτυχιακής διατριβής που θα προκύψει θα ανήκουν σε μένα. Θα ακολουθήσω τις οδηγίες συγγραφής, εκτύπωσης και κατάθεσης αντιτύπων της διατριβής στα ανάλογα αποθετήρια (σε έντυπη ή/και σε ηλεκτρονική μορφή).

2. Η διαχείριση των δεδομένων της διατριβής ανήκει από κοινού σε εμένα και στον κύριο επιβλέποντα καθηγητή.

3. Οποιαδήποτε επιστημονική δημοσίευση ή ανακοίνωση (αναρτημένη ή προφορική), ή αναφορά που προέρχεται από το υλικό/δεδομένα της εργασίας αυτής θα γίνεται με συγγραφείς εμένα την ίδια, τον κύριο επιβλέποντα ή/και άλλους ερευνητές (πχ μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, συνεργάτες κλπ), ανάλογα με τη συμβολή τους στην έρευνα και στη συγγραφή των ερευνητικών εργασιών.

4. Η σειρά των ονομάτων στις επιστημονικές δημοσιεύσεις ή επιστημονικές ανακοινώσεις θα αποφασίζεται από κοινού από εμένα και τον κύριο επιβλέποντα της εργασίας, πριν αρχίσει η εκπόνησή της. Η απόφαση αυτή θα πιστοποιηθεί εγγράφως μεταξύ εμού και του κύριου επιβλέποντος.

Τέλος, δηλώνω ότι γνωρίζω τους κανόνες περί δεοντολογίας και περί λογοκλοπής και πνευματικής ιδιοκτησίας και ότι θα τους τηρώ απαρέγκλιτα καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης και κάλυψης των εκπαιδευτικών υποχρεώσεων μου που προκύπτουν από το ΠΜΣ/τμήμα και καθ' όλη τη διάρκεια των διαδικασιών δημοσίευσης που θα προκύψουν μετά την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ο δηλών 09/01/2019



Μάντζιος Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	16
Σχεδιασμός και εφαρμογή του λογισμικού PHS _{FL} (στόχος i).....	16
Αύξηση της πρακτικότητας του λογισμικού PHS _{FL} (στόχος ii).....	16
Προσθήκες στον προγραμματιστικό κώδικα ISO 7933: 2004.	16
Περιγραφή του λογισμικού.....	19
Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS _{FL} με άλλα λογισμικά (στόχος iii α).....	22
Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS _{FL} με πραγματικά δεδομένα (στόχος iii β)	24
Μετρήσεις πεδίου.	24
Μετρήσεις εργαστηρίου	26
Πρόβλεψη θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα.....	30
Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS _{FL} με άλλα λογισμικά (στόχος iii α).....	30
Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS _{FL} με πραγματικά δεδομένα (στόχος iii β)	33
Αξιολόγηση με μετρήσεις πεδίου.	33
Αξιολόγηση με μετρήσεις εργαστηρίου.	36
Πρόβλεψη θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συζήτηση	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία.....	45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Επεξήγηση των 29 διαφορετικών επιλογών/εισόδων της κύριας οθόνης του λογισμικού όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2	20
Πίνακας 2. Τιμές προσομοίωσης για την αξιολόγηση των λογισμικών.....	22
Πίνακας 3. Οι θερμότερες και οι ψυχρότερες θερμοκρασίες για κάθε αγώνισμα για τα έτη 1996-2018.....	39
Πίνακας 4. Προσομοιωμένες τιμές ΘΠ για κάθε άθλημα για τα θερμά και τα ψυχρά περιβάλλοντα.....	40

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1.** Αριθμός άρθρων που χρησιμοποίησαν το μοντέλο πρόβλεψης θερμικής καταπόνησης (PHS) κατά τα έτη 2001 (δμιουργία του PHS) έως το 2017, βάσει δεδομένων που συλέχθησαν από το Google Scholar. Οι μπλε κύκλοι αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των άρθρων που χρησιμοποίησαν ή αναφέρθηκαν στο PHS ετησίως. Η κόκκινη γραμμή συμβολίζει την πολυωνμική παλινδρόμηση ($R^2 = 0,95$)..... 15
- Εικόνα 2.** Κύρια οθόνη του λογισμικού FAME Lab Predicted Heat Strain. Οι αριθμοί δείχνουν τις 29 διαφορετικές επιλογές / κουμπιά που υπάρχουν στην κύρια οθόνη του λογισμικού. Όλες οι επιλογές εξηγούνται στον Πίνακα 1. 20
- Εικόνα 3.** Γεωγραφική αναπαράσταση των τοποθεσιών στις οποίες έλαβαν χώρα οι σημαντικότεροι αγώνες κατά τα τελευταία 22 έτη. 29
- Εικόνα 4.** Η θερμοκρασία ορθού (άνω γράφημα) και η μέση θερμοκρασία δέρματος (κάτω γράφημα) κατά τη διάρκεια των έξι σεναρίων για τον έλεγχο της εγκυρότητας του PHS_{FL}. Τα σενάρια αυτά περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 2. 31
- Εικόνα 5.** Χρόνος που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί απώλεια σωματικών υγρών αντίστοιχη με 5% της μάζας σώματος, στις περιπτώσεις όπου το προσομοιωμένο άτομο δεν μπορεί να πει ελεύθερα νερό. Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι ταυτόσημες με τα σενάρια εγκυρότητας που αναφέρονται στον πίνακα 2, εκτός από το χρόνο έκθεσης. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον εκτιμώμενο χρόνο μέσω του PHS_{FL}. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον εκτιμώμενο χρόνο μέσω του ISO 7933: 2004. 32
- Εικόνα 6.** Διαφορές μεταξύ προσομοιωμένων και καταγεγραμμένων θερμοκρασιών πυρήνα και δέρματος (μέσος όρος \pm TK). Οι αστερίσκοι υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές $p < 0.05$ 34

Εικόνα 7. Όρια συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών ΘΠ και ΘΔ.....	35
Εικόνα 8. Διακύμανση πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών για την θερμοκρασία πυρήνα σώματος.....	37
Εικόνα 9. Διαφορές μεταξύ καταγεγραμμένων (μπλε) και προσομοιωμένων (κόκκινο) τιμών ΘΠ και ΘΔ.....	38
Εικόνα 10. Διαφορές στη θερμοκρασία πυρήνα σε προσομοιωμένους αθλητές κατά την άσκηση σε θερμό και κρύο περιβάλλον.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος αναμφισβήτητα επηρεάζεται από το περιβάλλον που ζει. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η έκθεση του ανθρώπου σε θερμό περιβάλλον προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιών του πυρήνα σώματος (ΘΠ) και δέρματος (ΘΔ), με φυσικό επακόλουθο τη μείωση της ανθρώπινης φυσιολογικής και γνωστικής ικανότητάς (Flouris & Schlader, 2015). Μέσα από μία εξελικτική πορεία εκατομμυρίων χρόνων ο ανθρώπινος οργανισμός ανέπτυξε φυσιολογικούς [εφίδρωση, αγγειοκίνηση (αγγειοσυστολή και αγγειοδιαστολή), και ανατρίχιασμα] και συμπεριφοριστικούς (αλλαγή ενδυμασίας, μετακίνηση σε ψυχρότερο περιβάλλον, και μείωση του μεταβολικού ρυθμού) μηχανισμούς προκειμένου να διατηρεί τη θερμική του ομοιόσταση (θερμοκρασία πυρήνα σώματος ~37°C).

Η εργασία/άσκηση σε θερμό περιβάλλον σχετίζεται με επιπτώσεις στην υγεία, με μείωση της αθλητικής και εργασιακής απόδοσης και σαν αποτέλεσμα αυξάνονται οι οικονομικές απώλειες. Πρόσφατες μελέτες σε εργαζόμενους και αθλητές δείχνουν πως για κάθε ένα βαθμό κελσίου που αυξάνεται η θερμοκρασία του δέρματος, μειώνεται κατά 2.1% η ικανότητα για εργασία και κατά 1.5% η αθλητική απόδοση (Ioannou et al., 2017; Michael N. Sawka, 2012). Ενώ παράλληλα για κάθε ένα βαθμό αύξησης του περιβαλλοντικού στρες η παραγωγικότητα μειώνεται κατά 2.6% (Andreas D Flouris, 2018). Παρόλα αυτά, πολλές φορές είναι δύσκολη η αξιολόγηση των φυσιολογικών παραμέτρων/αποκρίσεων στο πεδίο λόγω έλλειψης πόρων, χρόνου, εξοπλισμού, και εξειδικευμένου προσωπικού. Εντούτοις, η αξιολόγησης τέτοιων μετρήσεων είναι σημαντική προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μείωση της εργασιακής και αθλητικής απόδοσης και να προασπιστεί η υγεία.

Πρωτεύων στόχος της παρούσας μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και η εφαρμογή ενός νέου λογισμικό ανοικτής πρόσβασης [FAME Lab PHS (PHS_{FL})], για τον

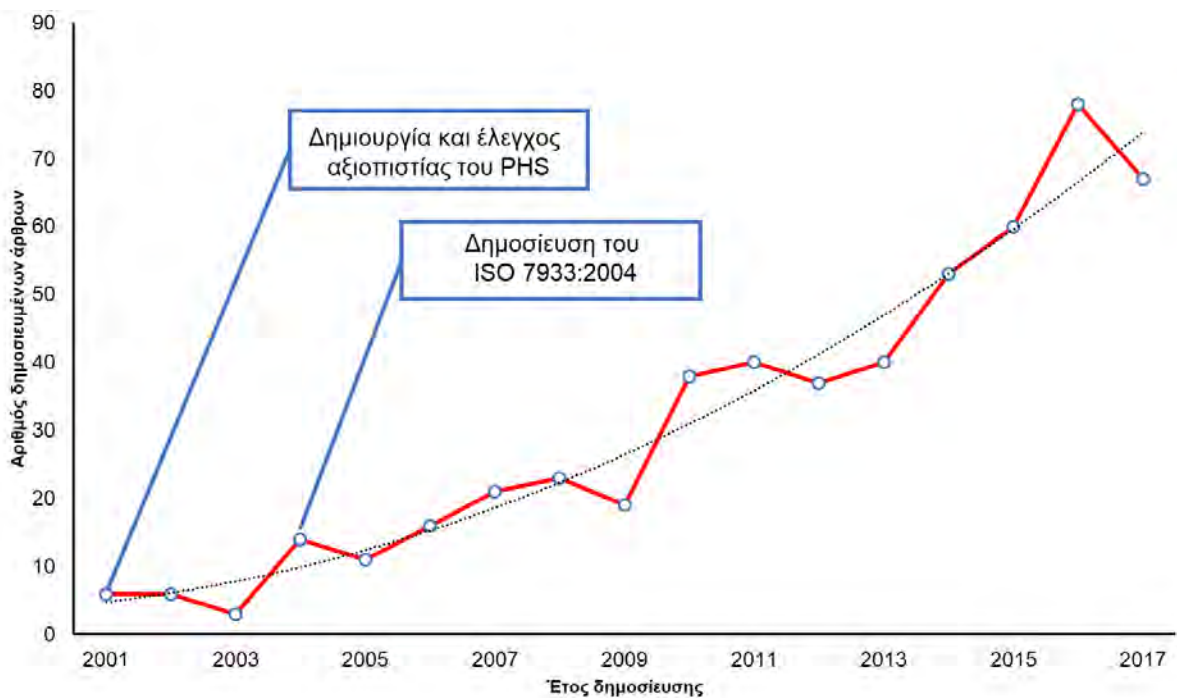
υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης χωρίς την απαίτηση φυσιολογικών δεδομένων, βασισμένο στο ISO 7933 (ISO 7933, 2004). Περαιτέρω στόχοι της μελέτης ήταν η αύξηση της πρακτικότητας του PHS_{FL} χρησιμοποιώντας προηγούμενες μελέτες και πρότυπα ISO (7726: 1998, 8996: 2004, και 7730: 1994)(ISO 7933, 2004; ISO, 2004) και η αξιολόγηση της εγκυρότητας και της αξιοπιστίας του PHS_{FL}: α) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το PHS_{FL} με τα αποτελέσματα, είτε του αρχικού κώδικα (ISO 7933: 2004), είτε από την έκδοση του PHS για κινητές συσκευές (PHS_{mobile}),(Johnstone, 2016) β) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του PHS_{FL} με πραγματικά δεδομένα που έχουν προκύψει από μελέτες πεδίου (εργασία) και εργαστήριου (άσκηση) στη ζέστη. Τέλος, στην παρούσα ερευνα μελετήθηκε η πρόβλεψη της θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής κατά τη διάρκεια μεγάλων αθλητικών διοργανώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το 2001 δημοσιεύθηκε το μοντέλο πρόβλεψης της θερμικής καταπόνησης «Predicted Heat Strain» (PHS) το οποίο έχει την δυνατότητα να προβλέψει βασικές θερμοφυσιολογικές αποκρίσεις (ΘΠ, ΘΣ, και ρυθμός εφίδρωσης) καταπόνηση ενός ατόμου κάτω από μια σειρά γνωστών περιβαλλοντικών και φυσιολογικών συνθηκών.(Malchaire et al., 2001) Έπειτα το μοντέλο PHS συμπεριλήφθηκε στο πρότυπο ISO 7933: 2004) (ISO 7933, 2004) και η δημοτικότητά του αυξάνεται μέχρι σήμερα (Εικόνα 1). Έως το 2017 συνολικά 600 άρθρα έχουν χρησιμοποιήσει ή έχουν αναφέρει το μοντέλο PHS (μετρήσεις λήφθηκαν το 2018 από το Google Scholar). Αυτό σημαίνει ότι δημοσιεύονται τρία επιστημονικά άρθρα κάθε δύο εβδομάδες που χρησιμοποιούν ή και αναφέρονται στο μοντέλο PHS κατά το έτος 2017.

Παρά την αυξανόμενη δημοτικότητα του μοντέλου PHS, οι υπολογισμοί που απαιτούνται για την πραγματοποίηση της πρόβλεψης του θερμικού στρες είναι χρονοβόροι. Το PHS απαιτεί την λήψη ενός ηλεκτρονικού αντιγράφου του κώδικα, το οποίο τρέχει σε ξεπερασμένο λειτουργικό σύστημα. (<http://www.md.ucl.ac.be/hytr/new/Download/iso7933n.txt>).

Εικόνα 1. Αριθμός άρθρων που χρησιμοποίησαν το μοντέλο πρόβλεψης θερμικής καταπόνησης (PHS) κατά τα έτη 2001 (δημιουργία του PHS) έως το 2017, βάσει δεδομένων που συλέχθησαν από το Google Scholar. Οι μπλε κύκλοι αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των άρθρων που χρησιμοποίησαν ή αναφέρθηκαν στο PHS ετησίως. Η κόκκινη γραμμή συμβολίζει την πολυωνμική παλινδρόμηση ($R^2 = 0,95$)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σχεδιασμός και εφαρμογή του λογισμικού PHS_{FL} (στόχος i)

Το λογισμικό PHS_{FL} αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (Microsoft; USA). Είναι βασισμένο σε εξισώσεις και τύπους που αναπτύσσονται στο πρότυπο ISO 7933: 2004 (ISO 7933, 2004).

Αύξηση της πρακτικότητας του λογισμικού PHS_{FL} (στόχος ii)

Αφού ολοκληρώθηκε η συγγραφή του βασικού κώδικα του PHS_{FL}, προστέθηκαν έπειτα στοιχεία από υπάρχουσες μελέτες ώστε να αυξηθεί η φιλικότητα και ευχρηστία του προγράμματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλες οι τροποποιήσεις του αρχικού κώδικα που περιγράφονται στο ISO 7933: 2004 είναι προαιρετικές, καθώς ο χρήστης έχει την επιλογή να τις χρησιμοποιήσει ή όχι. Οι προσθήκες αυτές περιγράφονται λεπτομερώς στις ακόλουθες υπό-ενότητες.

Προσθήκες στον προγραμματιστικό κώδικα ISO 7933: 2004.

- i. Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (Mean radiant temperature)

Προστέθηκε μια επιλογή για τον υπολογισμό της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας το ISO 7726: 1998(ISO 7726, 1998b):

$$Tr = [(Tg + 273.15)^4 + 1 + \frac{1.1 * 10^8 * Va^{0.6}}{\epsilon * D^{0.4}} * (Tg - Ta)]^{0.25} - 273.15$$

Tr = Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (°C)

Tg = Θερμοκρασία σφαιριδίου (°C)

Va = Ταχύτητα αέρα (m/s)

ε = Εκπομπή σφαιριδίου

D = Διάμετρος σφαιριδίου (m)

Ta = Θερμοκρασία αέρα (°C)

Σημείωση: η συνηθισμένη σφαίρα είναι: ε = 0.95 (χρώματος μαύρου ματ); D = 0.15 m (ISO 7726, 1998a)

ii. Ατμοσφαιρική πίεση (Vapour pressure)

Προστέθηκε μια επιλογή για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής πίεσης βασισμένη στη σχετική υγρασία. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία των Η.Π.Α. και περιγράφονται ως εξής (National Weather Service, 2018):

$$rh = \frac{e}{es} * 100$$

rh = relative humidity – σχετική υγρασία (%)
 e = πραγματική ατμοσφαιρική πίεση
 es = πίεση κορεσμένων ατμών

iii. Μεταβολικός Ρυθμός (Metabolic Rate)

Προστέθηκε η επιλογή για την πρόβλεψη του μεταβολικού ρυθμού βασισμένη στην ηλικία, το φύλο και τη σωματική μάζα ενός ατόμου σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8996: 2004(ISO 8996, 2004).

Ηλικία (Χρόνια)	Σωματική μάζα (kg)				
	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg
ΚΣ=Καρδιακή Συχνότητα					
Γυναίκες					
20	2.9*ΚΣ-150	3.4*ΚΣ-181	3.8*ΚΣ-210	4.2*ΚΣ-237	4.5*ΚΣ-263
30	2.8*ΚΣ-143	3.3*ΚΣ-173	3.7*ΚΣ-201	4.0*ΚΣ-228	4.4*ΚΣ-254
40	2.7*ΚΣ-136	3.1*ΚΣ-165	3.5*ΚΣ-192	3.9*ΚΣ-218	4.3*ΚΣ-244
50	2.6*ΚΣ-127	3.0*ΚΣ-155	3.4*ΚΣ-182	3.7*ΚΣ-207	4.1*ΚΣ-232
60	2.5*ΚΣ-117	2.9*ΚΣ-145	3.2*ΚΣ-170	3.6*ΚΣ-195	3.9*ΚΣ-219
Άνδρες					
20	3.7*ΚΣ-201	4.2*ΚΣ-238	4.7*ΚΣ-273	5.2*ΚΣ-307	5.6*ΚΣ-339
30	3.6*ΚΣ-197	4.1*ΚΣ-233	4.6*ΚΣ-268	5.1*ΚΣ-301	5.5*ΚΣ-333
40	3.5*ΚΣ-192	4.0*ΚΣ-228	4.5*ΚΣ-262	5.0*ΚΣ-295	5.4*ΚΣ-326
50	3.4*ΚΣ-186	4.0*ΚΣ-222	4.4*ΚΣ-256	4.9*ΚΣ-288	5.3*ΚΣ-319
60	3.4*ΚΣ-180	3.9*ΚΣ-215	4.5*ΚΣ-249	4.8*ΚΣ-280	5.2*ΚΣ-311

iv. Αποδοτικότητα του μηχανικού έργου (Effective mechanical power)

Το ISO 7933: 2004 αναφέρει ότι "στις περισσότερες καταστάσεις, το μηχανικό έργο είναι ελάχιστο και παραλείπεται". Ωστόσο, ο Fiala (Fiala, 1998) καταλήγει ότι " το ανθρώπινο μηχανικό έργο δεν είναι σταθερό, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνονται τα επίπεδα φυσικής δραστηριότητας". Έτσι προστέθηκε στο λογισμικό μια επιλογή για τον υπολογισμό του μηχανικού έργου βασισμένη στον τύπο του Fiala :

$$\eta = 0.2 * \tanh \left(0.39 * \left(\frac{act}{58.15} \right) - 0.60 \right)$$

η = Mechanical efficiency - Μηχανική απόδοση (%)

act = Activity – Δραστηριότητα (W/m^2)

Σημείωση: Η εξίσωση του Fiala έχει τροποποιηθεί για τον υπολογισμό της δραστηριότητας σε W/m^2 , αντί για το μεταβολικό ισοδύναμο (MET). Ένα μεταβολικό ισοδύναμο ισούται με $58.15 W/m^2$ ($1 MET=58.15 W/m^2$) σύμφωνα με το ISO 7730: 1994(ISO 7730, 1994))

v. Διαφορετικές χρονικοί περίοδοι

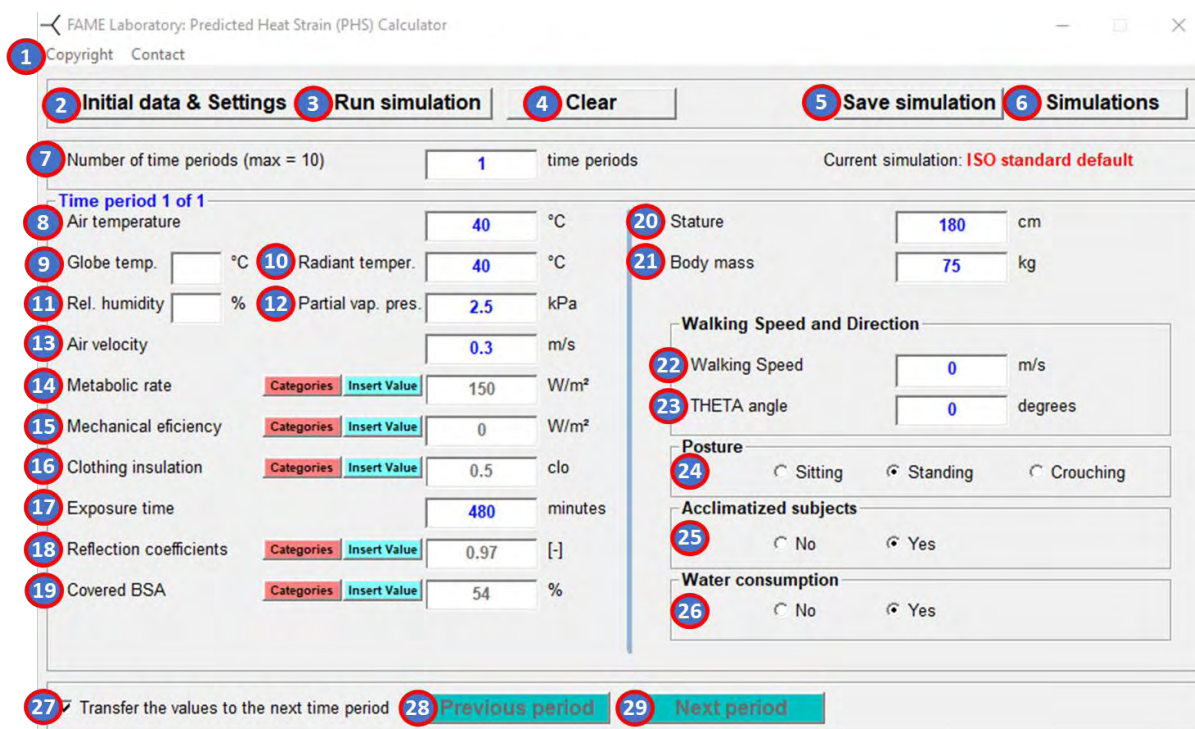
Τις περισσότερες φορές οι περιβαλλοντικές και φυσιολογικές παράμετροι που απαιτούνται για τους υπολογισμούς του PHS δεν παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης. Ακόμα και ο ρουχισμός πολλές φορές μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας δραστηριότητας. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένας αθλητής μεγάλων αποστάσεων ξεκινάει τον αγώνα το πρωί (όταν το περιβαλλοντικό θερμικό στρες είναι χαμηλό), παρόλα αυτά, μία ώρα μετά την έναρξη του αγώνα τα περιβαλλοντικά στοιχεία (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, και ταχύτητα αέρα) θα αλλάξουν, πιθανός αυξάνοντας το θερμικό στρες το οποίο θα δεχτεί ο ασκούμενος. Για το λόγο αυτό, προσθέσαμε την επιλογή διαδοχικών χρονικών περιόδων, όπου ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις περιβαλλοντικές, φυσιολογικές και τις παραμέτρους ενδυμασίας. Για τον υπολογισμό του θερμικού στρες σε ξεχωριστές χρονικές περιόδους, οι τελευταίες προσομοιωμένες τιμές κάθε χρονικής

περιόδου, ορίζονται ως αρχικά δεδομένα για την επόμενη περίοδο, ενώ οι διαδικασίες υπολογισμού παραμένουν αμετάβλητες.

Περιγραφή του λογισμικού.

Το λογισμικό PHS_{FL} διατίθεται προς ελεύθερη χρήση. Ο ακόλουθος διαδικτυακός σύνδεσμος www.famelab.gr/research/downloads οδηγεί στο αρχείο εγκατάστασης το οποίο είναι κατάλληλο για λειτουργικά συστήματα Microsoft Windows (XP / Vista / Win7 / Win10). Επιπλέον, με τη χρήση προγραμμάτων εξομοίωσης των Windows, το PHS_{FL} μπορεί να τρέξει σε πλατφόρμες Linux και Apple Macintosh. Η αρχική οθόνη περιλαμβάνει 29 κουμπιά και κουτιά υποδοχής τιμών (Εικόνα 2), τα οποία περιγράφονται με λεπτομέρεια στον Πίνακα 1. Βασισμένο στο πρότυπο ISO 7933: 2004, το λογισμικό PHS_{FL} παρέχει τιμές προσομοίωσης για την θερμοκρασία ορθού (°C) και την συνολική απώλεια νερού (g) λεπτό προς λεπτό. Επιπλέον, το PHS_{FL} παρέχει αποτελέσματα λεπτό προς λεπτό για τη θερμοκρασία πυρήνα σώματος και τη μέση θερμοκρασία δέρματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι παραπάνω τιμές συμπεριλαμβάνονται στον κώδικα του ISO 7933: 2004, αλλά τα τελικά αποτελέσματα δεν παρέχουν αυτές τις εκτιμήσεις. Επιπρόσθετα, το λογισμικό υπολογίζει: το χρόνο που χρειάζεται προκειμένου η θερμοκρασία του ορθού να ξεπεράσει τους 38°C, τον χρόνο για να απολεσθούν σωματικά υγρά ίσα με το 5% της μάζας σώματος. Το PHS_{FI} παρέχει δεδομένα ανά λεπτό σε αριθμητική και οπτική (γραφήματα) μορφή. Τα τελικά αρχεία δίνονται σε μορφές * .csv, * .txt και * .bmp.

Εικόνα 2. Κύρια οθόνη του λογισμικού FAME Lab Predicted Heat Strain. Οι αριθμοί δείχνουν τις 29 διαφορετικές επιλογές / κουμπιά που υπάρχουν στην κύρια οθόνη του λογισμικού. Όλες οι επιλογές εξηγούνται στον Πίνακα 1.



Πίνακας 1. Επεξήγηση των 29 διαφορετικών επιλογών/εισόδων της κύριας οθόνης του λογισμικού όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.

#	Όνομα	Περιγραφή
1	Copyright	Ανοίγει ένα νέο παράθυρο που παρέχει γενικές πληροφορίες σχετικά με τα πνευματικά δικαιώματα του παρόντος λογισμικού.
2	Initial data & settings	Ανοίγει ένα νέο παράθυρο που επιτρέπει στο χρήστη να αλλάξει τις αρχικές τιμές και τις ρυθμίσεις του λογισμικού.
3	Calculate	Υπολογίζει την θερμική καταπόνηση και ανοίγει ένα νέο παράθυρο.
4	Clear	Σβήνει όλες τις αλλαγές και διαγράφει τα αποτελέσματα..
5	Save simulation	Σώζει όλες τις μεταβλητές και τα δεδομένα.
6	Simulations	Ανοίγει ένα νέο παράθυρο που παρέχει τέσσερις επιλογές: α) εισαγωγή μιας προϋπάρχουσας προσομοίωσης από ένα σωσμένο αρχείο. β) αποθήκευση της επιλεγμένης προσομοίωσης. γ) Διαγραφή της επιλεγμένης προσομοίωσης. δ) φόρτωση της επιλεγμένης προσομοίωσης.
7	Number of time periods	Δείχνει τον αριθμό διαφορετικών φάσεων προσομοίωσης. Κάθε χρονική περίοδος μπορεί να έχει διαφορετικές παραμέτρους εισόδου. Ο μέγιστος αριθμός χρονικών περιόδων είναι 10.
8	Air temperature	Αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του αέρα.
9	Globe temperature	Μετριέται με ειδικό αισθητήρα θερμοκρασίας.
10	Radiant temperature	Περιγράφει την μέση ακτινόμενη θερμοκρασία.
11	Relative humidity	Αντιπροσωπεύει την σχετική υγρασία.
12	Vapour pressure	Αναφέρεται στην πραγματική ποσότητα νερού που βρίσκεται στον αέρα.
13	Air velocity	Ταχύτητα του αέρα.
14	Metabolic rate	Μεταβολικός ρυθμός της τρέχοντος δραστηριότητας.
15	Mechanical efficiency	Περιγράφει την αποτελεσματικότητα της δραστηριότητας.
16	Clothing insulation	Αναφέρεται στην θερμική μόνωση που προσφέρει ο τρέχον ρουχισμός.
17	Exposed time	Ισοδυναμεί στον συνολικό χρόνο σε λεπτά της δραστηριότητας.
18	Reflection coefficients	Περιγράφει την ικανότητα των ρούχων για εκπομπή της αντανακλώμενης ακτινοβολίας.
19	Covered BSA	Είναι το ποσοστό της επιφάνειας σώματος η οποία είναι καλυμμένη από ρούχα.
20	Stature	Ανάστημα του ατόμου
21	Body mass	Σωματική μάζα του ατόμου.
22	Walking speed	Ταχύτητα κίνησης (περπάτημα, τρέξιμο).
23	THETA angle	Γωνία μεταξύ κατεύθυνσης κίνησης και κατεύθυνσης αέρα.
24	Posture	Στάση του σώματος
25	Acclimatized subjects	Ο χρήστης επιλέγει το αν το προσομοιωμένο άτομο είναι εγκλιματισμένο στο περιβάλλον που θα εκτεθεί.
26	Water consumption	Επιλογή στον αν κατά τη διάρκεια της άσκησης – εργασίας θα υπάρχει πρόσβαση σε νερό.
27	Transfer the values to the next time period	Μεταφορά όλων των τιμών στην επόμενη περίοδο.
28	Previous period	Μετακίνηση στην προηγούμενη περίοδο
29	Next period	Μετακίνηση στην επόμενη περίοδο

Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS_{FL} με άλλα λογισμικά (στόχος iii α)

Η εγκυρότητα του PHS_{FL} αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με τα αντίστοιχα χρησιμοποιώντας είτε τον αρχικό κώδικα ISO 7933: 2004 (ISO 7933, 2004) είτε την εφαρμογή για κινητές συσκευές iOS (PHS_{mobile}) (Johnstone, 2016). Συγκρίθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια (Πίνακας 2), χρησιμοποιώντας τα τρία λογισμικά. Το πρωτόκολλο περιλάμβανε: 60 λεπτά εργασίας σε ένταση χαμηλού ή πολύ υψηλού φόρτου εργασίας με μεταβολικό ρυθμό (70 W/m²) και (260 W/m²) αντίστοιχα (κατηγοριοποιημένο σύμφωνα με το ISO 8996 (ISO 8996, 2004). Για τα παραπάνω πρωτόκολλα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε τρεις χώρους εργασίας με θερμό-ουδέτερο (20°C), θερμό (30°C) και πολύ θερμό (40 °C) περιβάλλον. Και τα τρία αυτά περιβάλλοντα περιγράφουν πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες σε διάφορα επαγγέλματα, όπως στη γεωργία (Ioannou et al., 2017) και σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρισμού (Meade, Lauzon, Poirier, Flouris, & Kenny, 2015). Για τις υπόλοιπες παραμέτρους, περιβαλλοντικές, φυσιολογικές, ανθρωπομετρικές και ενδυμασίας χρησιμοποιήθηκαν οι προβλεπόμενες αρχικές τιμές που αναγράφονται στο ISO 7933.

Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των λογισμικών, τροποποιήσαμε ελαφρώς τον κώδικα προγραμματισμού του ISO 7933: 2004, χωρίς να κάνουμε αλλαγές στους υπολογισμούς και στους τύπους. Ο λόγος τροποποίησης έγινε προκειμένου να παρέχονται δεδομένα κάθε λεπτό αντί για το τελευταίο λεπτό. Έτσι λοιπόν διεξήχθησαν συγκρίσεις μεταξύ του ISO 7933: 2004 και του PHS_{FL} για κάθε λεπτό (δηλαδή από το πρώτο λεπτό έκθεσης μέχρι και το τελευταίο). Αντίθετα, το PHS_{mobile} δεν παρέχει δεδομένα για κάθε λεπτό παρά μόνο το τελευταίο λεπτό. Έτσι συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του PHS_{mobile} και του PHS_{FL} μόνο για τις τελευταίες τιμές (δηλ. 60^ο λεπτό).

Πίνακας 2. Τιμές προσομοίωσης για την αξιολόγηση των λογισμικών.

Μεταβλητές λογισμικού	Σενάρια προσομοίωσης					
	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Air temperature (°C)	20	20	30	30	40	40
Radiant temperature (°C)	20	20	30	30	40	40
Vapour pressure (kPa)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Air velocity (m/s)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Metabolic rate (W/m ²)	70	260	70	260	70	260
Work efficiency (W/m ²)	0	0	0	0	0	0
Clothing insulation (clo)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Exposure time (minutes)	180	180	180	180	180	180
Reflection coefficients	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Covered body surface area (%)	54	54	54	54	54	54
Stature (cm)	180	180	180	180	180	180
Body mass (kg)	75	75	75	75	75	75
Walking speed (m/s)	0	0	0	0	0	0
THETA angle (degrees)	0	0	0	0	0	0
Posture	St.	St.	St.	St.	St.	St.
Acclimatized subject	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Water consumption	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Στατιστική ανάλυση

Οι στατιστικές αναλύσεις έγιναν χρησιμοποιώντας το πακέτο στατιστικών αναλύσεων SPSS v25.0 (IBM, Armonk, NY, USA). Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιολόγηση της αξιοπιστίας, ο συντελεστής συσχέτισης καθορίστηκε στο $r = 1.0$. Για τον ίδιο λόγο, η στατιστική σημαντικότητα καθορίστηκε στο $p < 0.001$ (κριτήριο που σχετίζεται με την εγκυρότητα). Εκτελέστηκε ανάλυση συσχέτισης Pearson r προκειμένου να εξετασθεί η σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων (ΘΠ και ΘΔ) που δίνει το PHS_{FL} με τα τις τιμές αποτελεσμάτων που δίνουν τα υπόλοιπα λογισμικά (ISO 7933: 2004 και PHS_{mobile}). επίσης, ανάλυση διακύμανσης One-way ANOVA με post-hoc κατά Bonferroni χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση τυχών διαφορών στις τελικές τιμές (δηλ. 60ο λεπτό) μεταξύ του PHS_{FL}, του ISO 7933: 2004 και του PHS_{mobile}. Τέλος, εκτελέστηκαν t-tests για ανεξάρτητα δείγματα προκειμένου να εξετασθούν πιθανές διαφορές μεταξύ

των τιμών ανά λεπτό που λαμβάνονται για κάθε προσομοίωση από το PHS_{FL} και το ISO 7933: 2004.

Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS_{FL} με πραγματικά δεδομένα (στόχος iii β)

Η εγκυρότητα του λογισμικού εκτιμήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του PHS_{FL} με πραγματικές καταγραφές δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις πεδίου και εργαστηρίου. Συγκεκριμένα συγκρίθηκαν θερμοκρασίες δέρματος και πυρήνα σώματος που λήφθηκαν μέσω πειραμάτων σε συμμετέχοντες κατά τη διάρκεια της εργασίας (μελέτες πεδίου) και της άσκησης (μελέτες εργαστηρίου) στη ζέστη.

Μετρήσεις πεδίου.

Δείγμα

Το πειραματικό πρωτόκολλο εγκρίθηκε από την Εθνική Επιτροπή Βιοηθικής Κύπρου. Το δείγμα της μελέτης αποτελούνταν από πέντε γεωργούς (8-16 έτη εργασιακής εμπειρίας) εγκλιματισμένους (δηλαδή, συνεχής διαβίωση και εργασία στην περιοχή τουλάχιστον τις 90 προηγούμενες ημέρες).

Μετρήσεις

Μία ημέρα πριν από το πείραμα καταγράφηκε η ηλικία το ανάστημα (Seca 213; seca GmbH & Co. KG; Hamburg, Germany) και η σωματική μάζα (BC1000, Tanita corporation, Tokyo, Japan). Την ημέρα του πειράματος συλλέχθηκαν δεδομένα συνεχούς καρδιακού παλμού, με την χρήση αισθητήρων Polar (Polar Team2. Polar Electro Oy, Kempele, Finland), θερμοκρασίες πυρήνα σώματος χρησιμοποιώντας τηλεμετρικές κάψουλες (BodyCap, Caen, France), και δέρματος με φορητούς αισθητήρες (iButtons type DS1921H, Maxim/Dallas Semiconductor Corp., USA). Οι αισθητήρες θερμοκρασίας του δέρματος τοποθετήθηκαν σε τέσσερα σημεία του σώματος (μείζων θωρακικός, δικέφαλος βραχιόνιος, τετρακέφαλος μηριαίος και

γαστροκνήμιος) και η μέση θερμοκρασία δέρματος ΘΔ εκφράστηκε σύμφωνα με τον τύπο Ramanathan:

$$T_{sk} = [0,3 (\text{μείζων θωρακικός} + \text{δικέφαλος βραχιόνιος}) + 0,2 (\text{τετρακέφαλος μηριαίος} + \text{γαστροκνήμιος})] .$$

(Ramanathan, 1964)

Επιπλέον, καταγράφηκαν λεπτό προς λεπτό περιβαλλοντικά δεδομένα [Θερμοκρασία αέρα (°C), Θερμοκρασία βολβού (°C), σχετική υγρασία (%), και ταχύτητα αέρα (m/s)] χρησιμοποιώντας έναν φορητό μετεωρολογικό σταθμό (Kestrel 5400FW, Nielsen- Pennsylvania, USA). Στο χώρο εργασίας (χωράφια με αμπέλια) εγκαταστάθηκε σε πολύ κοντινή απόσταση (~40m) με τους εθελοντές μια βιντεοκάμερα (Hero 5 black, GoPro, California, USA) με σκοπό να διεξαχθεί στη συνέχεια ανάλυση βίντεο (Ioannou et al., 2017). Η καταγραφή των βίντεο χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό και άλλων παραμέτρων όπως το είδος ενδυμασίας, το ποσοστό της καλυμμένης από ρούχα επιφάνειας σώματος, και το μεταβολικό ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Αναλύσεις

Χρησιμοποιήθηκε το πακέτο στατιστικών αναλύσεων SPSS v25.0 (IBM, Armonk, NY, USA) και τα υπολογιστικά φύλλα EXCEL (Microsoft Office, Microsoft, Washington, USA). Υπολογίστηκαν οι μέσες ωριαίες τιμές για όλα τα δεδομένα. Έπειτα, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PHS_{FL} διεξήχθησαν πέντε προσομοιώσεις (δηλ. μία ανά εργαζόμενο) για οκτώ χρονικές περιόδους (δηλ. μία για κάθε ώρα εργασίας). Χρησιμοποιήθηκε ανάλυση συσχέτισης Pearson-r για να εξεταστεί η σχέση των πραγματικών τιμών ΘΠ και ΘΔ ανά λεπτό μεταξύ των προσομοιωμένων τιμών μέσω του PHS_{FL}. Επίσης, εκτελέστηκε t-test για ανεξάρτητα δείγματα για να εξετασθούν πιθανές διαφορές στα αποτελέσματα ΘΠ και ΘΔ μεταξύ πραγματικών και

προσομοιωμένων τιμών ανά λεπτό μέσω του PHS_{FL}. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ανάλυση Bland-Altman για την οπτικοποίηση και τον προσδιορισμό του 95% των ορίων συμφωνίας της μετρημένης τιμής με την προσομοιωμένη.

Μετρήσεις εργαστηρίου

Δείγμα

Η παρούσα μελέτη πήρε έγκριση από την επιτροπή βιοηθικής του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το δείγμα της έρευνας αποτελούνταν από 20 άντρες αθλητές. Όλοι οι εθελοντές ήταν συστηματικά ασκούμενοι, εκ των οποίων τέσσερεις ήταν μέλη της εθνικής ομάδας. Όλοι οι ασκούμενοι ήταν υγιείς, μη καπνιστές, και δεν ακολουθούσαν κάποια φαρμακευτική αγωγή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν επιτρεπόταν η κατανάλωση αλκοόλ και καφεΐνης μέχρι και έξι ώρες πριν την μέτρηση. Επιπλέον, λήφθηκε έντυπο συγκατάθεσης από όλους τους συμμετέχοντες μετά την πλήρη επεξήγηση των διαδικασιών.

Πειραματικό πρωτόκολλο

Κατά τη διάρκεια της πρώτης επίσκεψής στο εργαστήριο, δόθηκε στους συμμετέχοντες μια λεπτομερής λεκτική περιγραφή του πειραματικού πρωτοκόλλου με όλες τις διαδικασίες και τα μέσα συλλογής δεδομένων. Κατά την πρώτη επίσκεψη στο εργαστήριο συλλέχθηκαν ανθρωπομετρικά δεδομένα. Επιπλέον στην πρώτη επίσκεψη πραγματοποιήθηκε εργομετρικό τεστ προκειμένου να αξιολογηθεί η μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2peak}). Στη συνέχεια, περίπου τρεις μέρες μετά την εργομετρική εξέταση, οι εθελοντές πραγματοποίησαν το πρωτόκολλο άσκησης το οποίο περιλάμβανε μία ώρα συνεχόμενο τρέξιμο στο 70% της VO_{2peak} σε θερμό περιβάλλον (θερμοκρασία: 35°C, υγρασία: 30%). Κατά την διάρκεια της άσκησης οι εθελοντές δεν είχαν πρόσβαση σε νερό ή οποιοδήποτε άλλο ρόφημα. Τέλος, ο

ρουχισμός (0.5 clo) και η καλυμμένη επιφάνεια σώματος (61%) ήταν σταθμισμένα για όλους τους συμμετέχοντες.

Μετρήσεις

Κατά την πρώτη επίσκεψη στο εργαστήριο εκτός από την αξιολόγηση της μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (VO₂ analyzer, Care Fusion Germany 234 GmbH, Germany) μετρήθηκε το ανάστημα (Seca 213; seca GmbH & Co. KG; Hamburg, Germany) και το σωματικό βάρος (Version 5.3 KERN & Sohn GmbH,). Την ημέρα του πειραματικού πρωτοκόλλου συλλέχθηκαν δεδομένα συνεχούς καρδιακού παλμού, με την χρήση αισθητήρων Polar (V800, Polar Electro, Kempele, Finland). Επιπλέον, συλλέχθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας πυρήνα σώματος χρησιμοποιώντας τηλεμετρικές κάψουλες (CoreTemp, HQInc., Sarasota, Florida, USA) και δέρματος χρησιμοποιώντας αισθητήρες θερμοκρασίας (SmartReader Plus 3, Surrey, British Columbia V3S 5X7 Canada,). Οι αισθητήρες θερμοκρασίας του δέρματος τοποθετήθηκαν σε τέσσερα σημεία του σώματος (μείζων θωρακικός, δικάφαλος βραχιόνιος, τετρακέφαλος μηριαίος και γαστροκνήμιος) και η μέση θερμοκρασία δέρματος εκφράστηκε σύμφωνα με τον τύπο του Ramanathan (Ramanathan, 1964).

Αναλύσεις

Χρησιμοποιήθηκε το πακέτο στατιστικών αναλύσεων SPSS v25.0 (IBM, Armonk, NY, USA) και τα υπολογιστικά φύλλα EXCEL (Microsoft Office, Microsoft, Washington, USA). Συγκεκριμένα, εκτελέστηκε ανάλυση συσχέτισης pearson-r για να εξετασθεί η σχέση μεταξύ των προσομοιωμένων τιμών θερμοκρασίας σώματος και δέρματος και των καταγεγραμμένων τιμών συλλέχθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις. Ακόμα, ανάλυση μεγέθους επίδρασης (effect size) και Paired-Samples T Test πραγματοποιήθηκαν για να εξετασθούν τυχόν διάφορες στη θερμοκρασία πυρήνα σώματος μεταξύ των προσομοιωμένων και των καταγεγραμμένων τιμών.

Πρόβλεψη θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής

Συλλογή δεδομένων.

Για την διαδικασία της συλλογή των δεδομένων επιλέχθηκαν πέντε αγωνίσματα-αθλήματα με παρατεταμένη διάρκεια. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν, τέσσερα αγωνίσματα κλασικού αθλητισμού (3km, 5km, 10km, 42.1km) και το ποδόσφαιρο. Οι αθλητικές διοργανώσεις που συμπεριλήφθηκαν στη συλλογή δεδομένων ήταν οι Ολυμπιακοί και ηπειρωτικοί αγώνες, παγκόσμια πρωταθλήματα, παγκόσμιες συναντήσεις “diamond league”, και οι δέκα σημαντικότεροι μαραθώνιοι δρόμοι στον κόσμο (με βάση το πλήθος συμμετοχής αθλητών). Η συλλογή πραγματοποιήθηκε για τις κατηγορίες ανδρών και γυναικών και συλλέχθηκαν δεδομένα για την τοποθεσία και την ώρα διεξαγωγής κάθε αγώνα. (Εικόνα 3)

Έπειτα συλλέχθηκαν περιβαλλοντικά δεδομένα για τις τοποθεσίες όπου διεξήχθησαν οι αγώνες για τα τελευταία 22 έτη (1996-2018). Ειδικότερα μέσω των ιστοσελίδων www.wunderground.com και www.timeanddate.com βρεθήκαν περιβαλλοντικά δεδομένα (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) για την ημέρα και την ώρα διεξαγωγής κάθε αγώνα. Στη συνέχεια, με τη χρήση αυτών των περιβαλλοντικών δεδομένων υπολογίστηκε ο περιβαλλοντικός δείκτης WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο (ABM, 2009).

$$WBGT = (0.567 \times Ta + 0.393 \times e + 3.94)$$

$$e = rh / 100 \times 6.105 \times \exp (17.27 \times Ta / (237.7 + Ta))$$

Rh= Σχετική Υγρασία

Ta= Θερμοκρασία Αέρα

Τέλος, χρησιμοποιώντας το δείκτη WBGT οι αγώνες κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες (ψυχρό: <17.9°C, θερμό-ουδέτερο: 18-23.9°C, και θερμό: >24°C περιβάλλον) περιβαλλοντικού στρες.

Εικόνα 3. Γεωγραφική αναπαράσταση των τοποθεσιών στις οποίες έλαβαν χώρα οι σημαντικότεροι αγώνες κατά τα τελευταία 22 έτη.



Αναλύσεις

Χρησιμοποιήθηκε το πακέτο στατιστικών αναλύσεων SPSS v25.0 (IBM, Armonk, NY, USA) και τα υπολογιστικά φύλα EXCEL (Microsoft Office, Microsoft, Washington, USA). Προσομοιώθηκαν και τα πέντε αγωνίσματα – αθλήματα στο πιο ψυχρό και στο πιο θερμό περιβάλλον προκειμένου να υπολογιστεί η ΘΠ. Για κάθε αγώνισμα υπολογίστηκαν οι δρομικές ταχύτητες, ο χρόνος άσκησης ο μεταβολικός ρυθμός και το ποσοστό του μηχανικού έργου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας αυτές τις μεταβλητές και τα περιβαλλοντικά στοιχεία επιτεύχθηκαν δέκα προσομοιώσεις. Ανάλυση μεγέθους επίδρασης (effect size) και Paired-t test πραγματοποιήθηκαν για να εξετασθούν τυχόν διαφορές στη θερμοκρασία πυρήνα σώματος μεταξύ του ψυχρού και του θερμού περιβάλλοντος.

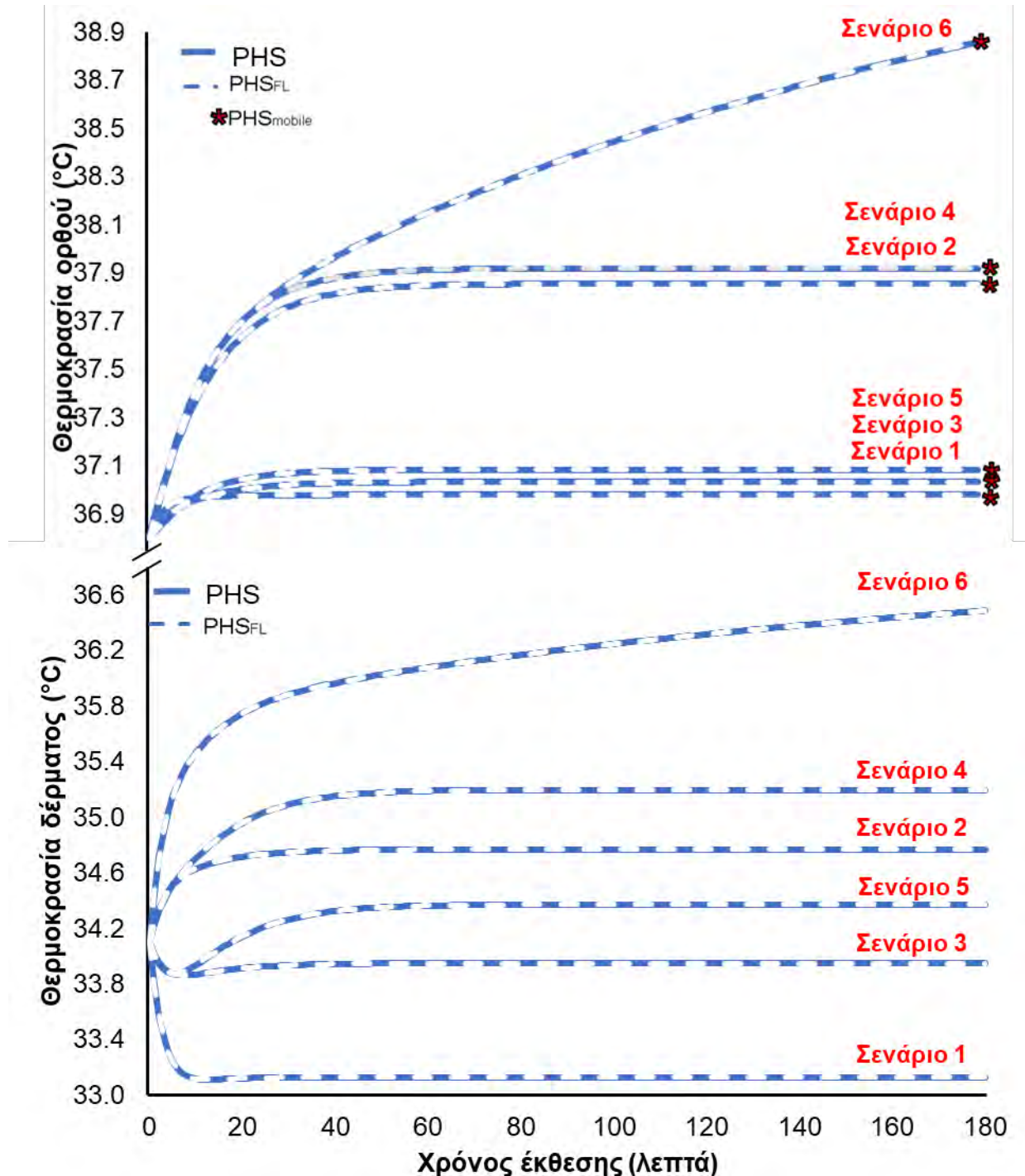
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα

Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHS_{FL} με άλλα λογισμικά (στόχος iii α)

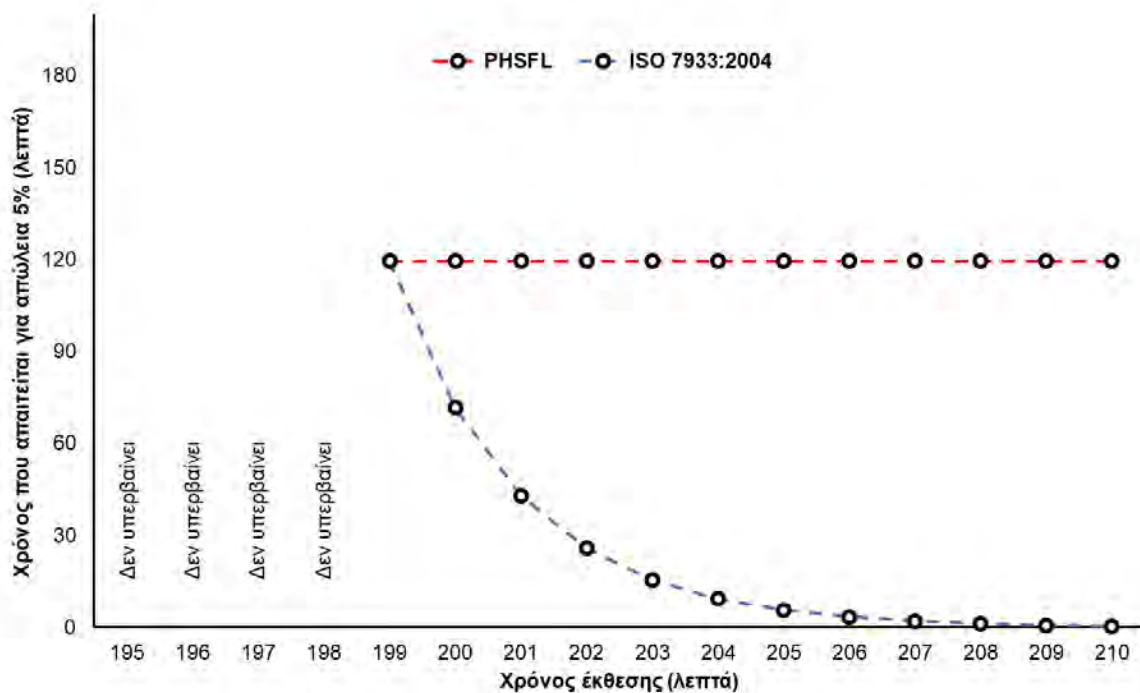
Το PHS_{FL} είναι σε θέση να προβλέψει τέσσερις μεταβλητές (θερμοκρασίες ορθού, δέρματος, πυρήνα σώματος καθώς επίσης και την συνολική απώλεια νερού). Ενώ οι άλλες δύο μέθοδοι (ISO 7933: 2004 και PHS_{mobile}) προβλέπουν μόνο δύο μεταβλητές (θερμοκρασία του ορθού την συνολική απώλεια νερού). Επίσης, όλα τα λογισμικά παρέχουν: i) τον χρόνο για να φθάσει η θερμοκρασία του ορθού πάνω από τους 38.0°C, ii) τον χρόνο για να επιτευχθεί η μέγιστη απώλεια νερού κατά 7.5% για ένα μέσο άτομο iii) τον χρόνο για να επιτευχθεί η μέγιστη απώλεια νερού κατά 5% για το 95% του ενεργού πληθυσμού.

Η ανάλυση συσχέτισης έδειξε πως υπάρχουν τέλειες σχέσεις σε όλες τις τιμές που παράγουν τα λογισμικά μεταξύ τους ($r = 1.0$, $p < 0.001$). Ακόμα δεν εντοπίστηκαν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση των τριών λογισμικών (Εικόνα 4). Παρόλο που δεν εντοπίστηκαν διαφορές μεταξύ των λογισμικών, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι βρέθηκε μια διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέρχονται από το PHS_{FL} και των υπόλοιπων πακέτων λογισμικού στα αποτελέσματα, όταν τα άτομα δεν πίνουν νερό. Συγκεκριμένα, το πρότυπο ISO 7933: 2004 και το PHS_{mobile} δίνουν αποτέλεσμα το "0" για τον χρόνο που χρειάζεται η απώλεια υγρών να φτάσει στο 5% της σωματικής μάζας (εικόνα 5) όταν "τα άτομα δεν πίνουν ελεύθερα νερό". Λεπτομερείς αναλύσεις έδειξαν ότι στο πρότυπο ISO 7933: 2004 και στο PHS_{mobile} υπάρχει προγραμματιστικό σφάλμα. Αυτός ο προβληματισμός περιγράφεται λεπτομερώς στην Εικόνα 5 και στο κεφάλαιο της «συζήτησης».

Εικόνα 4. Η θερμοκρασία ορθού (άνω γράφημα) και η μέση θερμοκρασία δέρματος (κάτω γράφημα) κατά τη διάρκεια των έξι σεναρίων για τον έλεγχο της εγκυρότητας του PHS_{FL}. Τα σενάρια αυτά περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 2.



Εικόνα 5. Χρόνος που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί απώλεια σωματικών υγρών αντίστοιχη με 5% της μάζας σώματος, στις περιπτώσεις όπου το προσομοιωμένο άτομο δεν μπορεί να πει ελεύθερα νερό. Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι ταυτόσημες με τα σενάρια εγκυρότητας που αναφέρονται στον πίνακα 2, εκτός από το χρόνο έκθεσης. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον εκτιμώμενο χρόνο μέσω του PHS_{FL}. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον εκτιμώμενο χρόνο μέσω του ISO 7933: 2004.



Η αξιολόγηση της εγκυρότητας του PHSFL με πραγματικά δεδομένα (στόχος iii β)

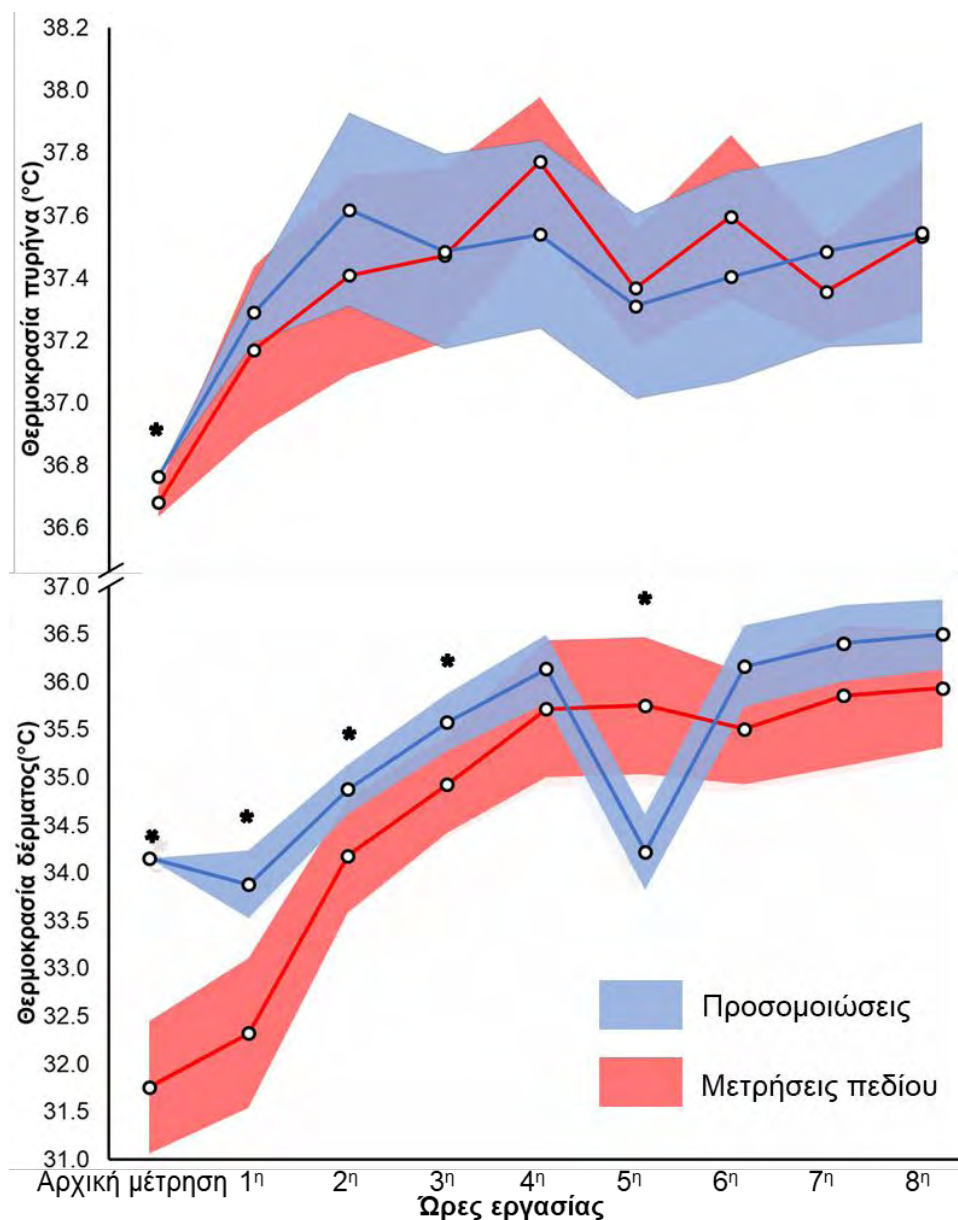
Αξιολόγηση με μετρήσεις πεδίου.

Πέντε αγρότες [3 γυναίκες (ηλικίας: 46.0 ± 6.9 ετών, ύψους: 157.9 ± 8.5 cm, βάρους: 55.9 ± 2.0 kg), 2 άνδρες (ηλικίας 31.0 ± 14.1 ετών, ύψους 177.6 ± 5.1 cm, βάρους 81.5 ± 0.6 kg)], εργάστηκαν για οκτώ ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($28.5 \pm 3.3^\circ\text{C}$) που κυμαίνονταν από 18.6°C έως 35.1°C . Η καρδιακή συχνότητα τους διακυμάνθηκε από 75 έως 172 χτύπους ανά λεπτό (103.5 ± 12.6 bpm). Οι θερμοκρασίες πυρήνα ($37.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$) και δέρματος ($34.6 \pm 1.5^\circ\text{C}$) κυμάνθηκαν από 36.7°C έως 38.2°C και από 30.9°C έως 36.6°C , αντίστοιχα. Από την ανάλυση βίντεο τώρα προκύπτει ότι οι εργαζόμενοι ξόδεψαν το 81.4% της εργασίας σκύβοντας, το 12.0% σε όρθια στάση και το 6.6% σε καθιστή θέση. Επιπλέον, όλοι οι εργαζόμενοι είχαν σταθμισμένο ρουχισμό (0.90 clo) ο οποίος κάλυπτε 88% έως 93% της επιφάνεια του σώματος από των εργαζομένων ($89 \pm 2\%$). Επίσης, υπολογίστηκε πως όλοι οι εργαζόμενοι είχαν μια μέση ταχύτητα περπατήματος τα 0.035 μέτρα ανά δευτερόλεπτο που υπολογίστηκε από την συνολική απόσταση περπατήματος / διάρκεια εργασίας \Rightarrow ~ 1000 μέτρα / 28800 δευτερόλεπτα.

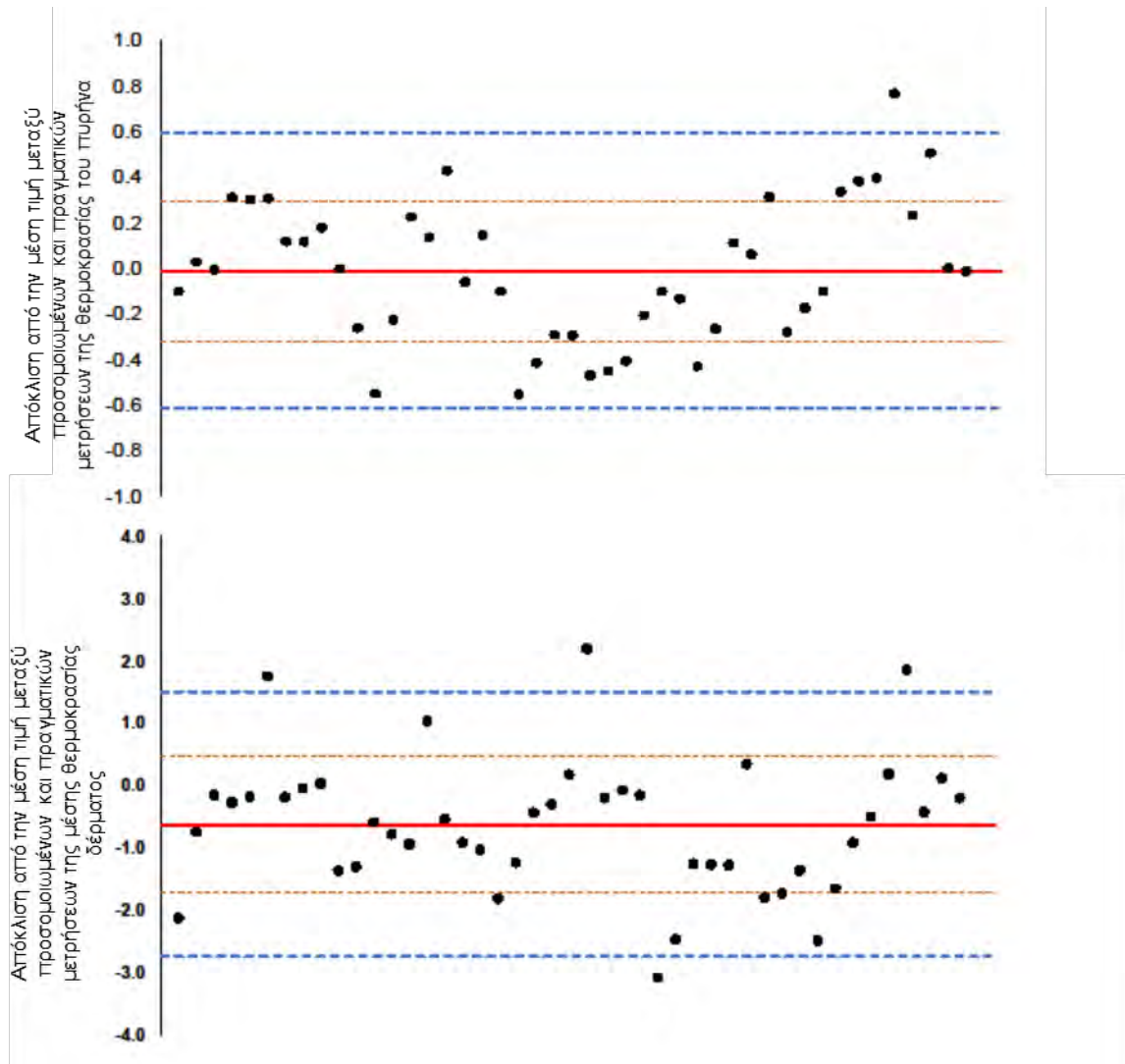
Ανάλυση συσχέτισης Pearson-r έδειξε ότι υπάρχει μία ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και των καταγεγραμμένων ΘΠ ($r=0.598$, $p<0.001$) και ΘΔ ($r=0.713$, $p<0.001$) (Εικόνα 6). Επίσης, δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ωριαίων προσομοιωμένων τιμών ΘΠ ($37.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$) και των καταγεγραμμένων τιμών ΘΠ ($37.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$) ($p=0.845$), καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας (Εικόνα 6). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν διαπιστώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της προσομοιωμένης ΘΠ ($37.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$) και καταγεγραμμένης ΘΠ ($37.5 \pm 0.3^\circ\text{C}$) ($p=0.890$) μετά το τέλος της συνεδρίας (Εικόνα 5). Αντίθετα, βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ της προσομοιωμένης ΘΔ

($35.2 \pm 1.0^\circ\text{C}$) και της πραγματικής ΘΔ ($34.6 \pm 1.5^\circ\text{C}$) ($p < 0.001$) κατά τις πρώτες ώρες της προσομοίωσης. Ωστόσο, δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις υπόλοιπες ώρες (δηλαδή, 4η, 6η, 7η και 8η ώρα εργασίας) (Εικόνα 6). Τέλος τα όρια συμφωνίας Bland-Altman 95% μεταξύ καταγεγραμμένων και προσομοιωμένων ΘΠ και ΘΔ (Εικόνα 7) ήταν $-0.01 \pm 0.6^\circ\text{C}$ και $-0.6 \pm 2.1^\circ\text{C}$, αντίστοιχα.

Εικόνα 6. Διαφορές μεταξύ προσομοιωμένων και καταγεγραμμένων θερμοκρασιών πυρήνα και δέρματος (μέσος όρος \pm ΤΚ). Οι αστερίσκοι υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές $p < 0.05$.



Εικόνα 7. Όρια συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών ΘΠ και ΘΔ.

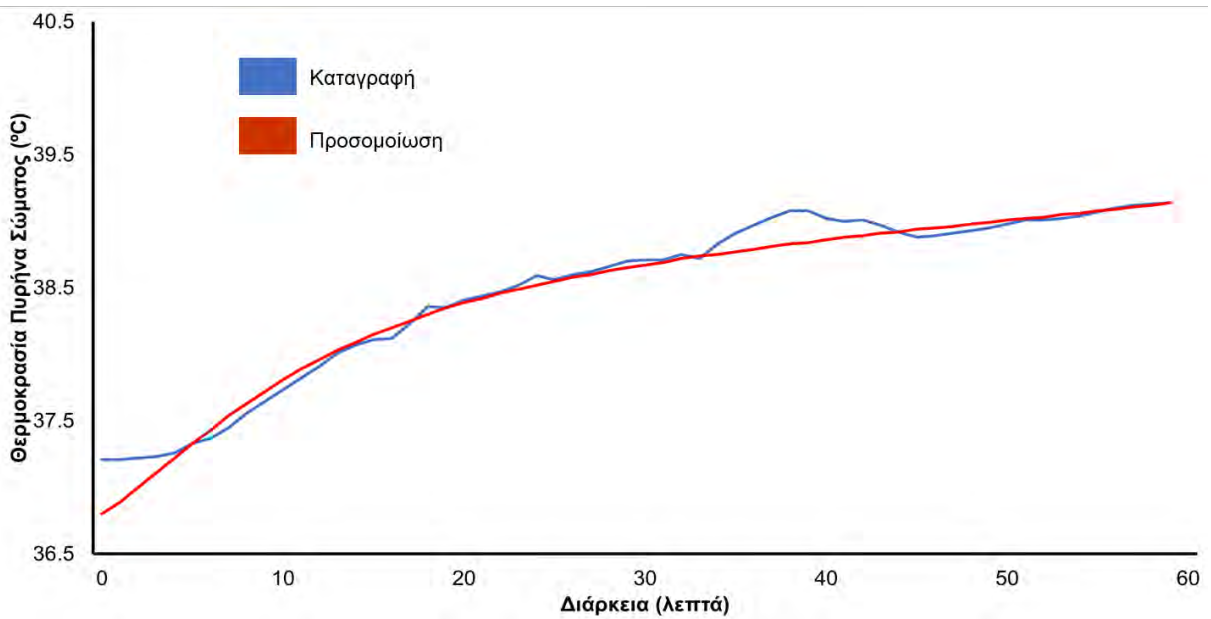


Αξιολόγηση με μετρήσεις εργαστηρίου.

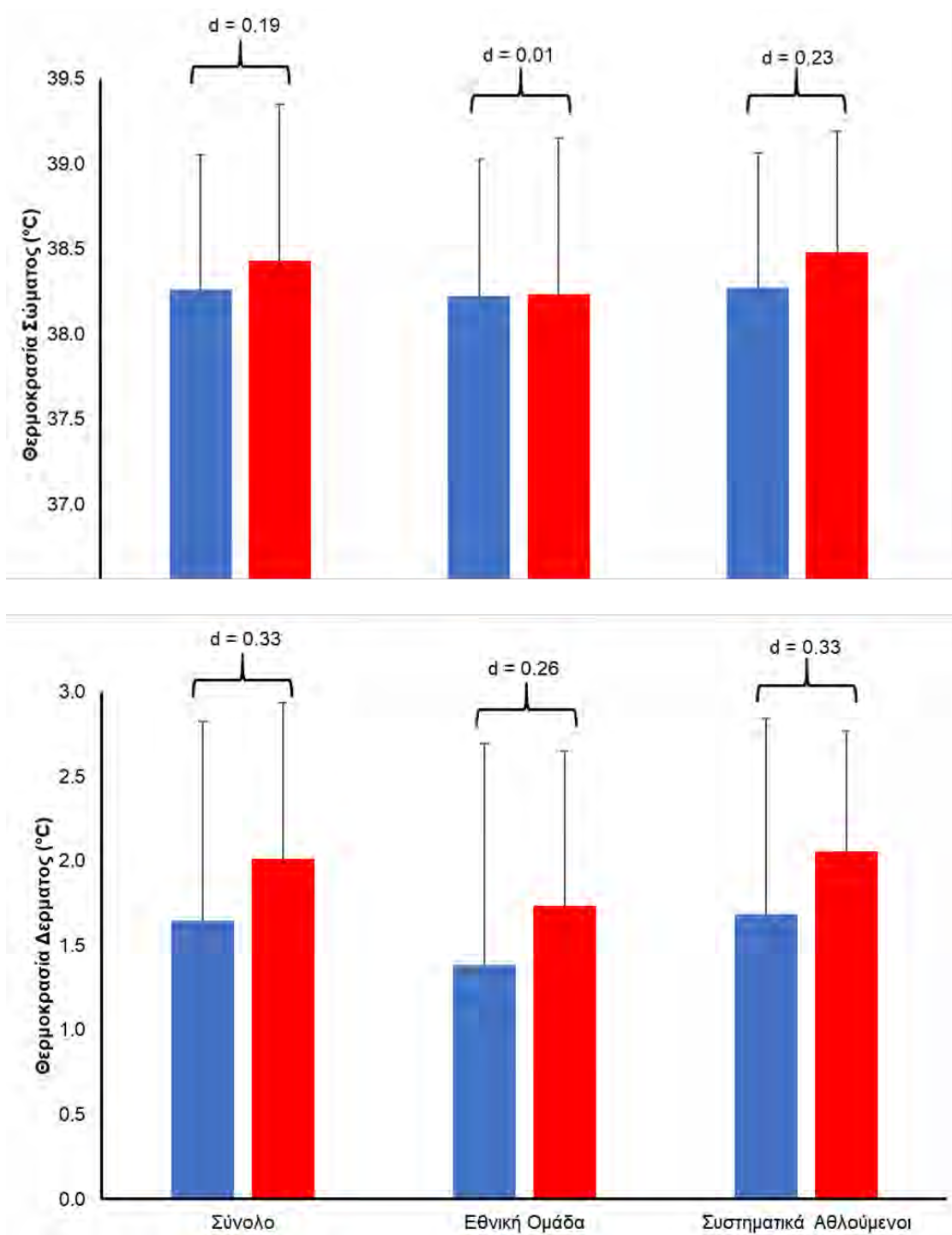
Είκοσι αθλητές, άντρες [ηλικίας: 28.20 ± 3.94 ετών, βάρους: 72.69 ± 5.76 kg, ύψους: 1.75 ± 0.53 cm, ποσοστό σωματικού λίπους: $9.34 \pm 2.87\%$, και μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (VO_{2peak}) 54.0 ± 6.5 ml/kg/min] εκτέλεσαν μία ώρα άσκηση σε δαπεδοεργόμετρο στον περιβαλλοντικό θάλαμο με συνθήκες 35°C και 30% υγρασία. Η καρδιακή τους συχνότητα διακυμάνθηκε στους 154 ± 10 bpm και οι θερμοκρασίες πυρήνα σώματος για τους αθλητές και τους πρωταθλητές ήταν 38.28 ± 0.78 και 38.22 ± 0.80 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι υπάρχουν υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των προβλεπόμενων θερμοκρασιών πυρήνα και δέρματος και των καταγεγραμμένων τιμών [ΘΠ (μέλη εθνικής ομάδας: $r=0.78$, έμπειροι αθλητές: $r=0.82$) και ΘΔ (μέλη εθνικής ομάδας: $r=0.75$, έμπειροι αθλητές: $r=0.77$)] (Εικόνα 8). Επιπλέον, δεν παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των καταγεγραμμένων θερμοκρασιών καθ' όλη τη διάρκεια της άσκησης (Εικόνα 9). Τέλος σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών, προσομοιωμένη ($39.4 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$) και πραγματική ($39.3 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$) κατά το τέλος του πρωτοκόλλου της άσκησης ($d=0.17$).

Εικόνα 8. Διακύμανση πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών θερμοκρασίας πυρήνα σώματος ενός Έλληνα πρωταθλητή μεγάλων αποστάσεων.



Εικόνα 9. Διαφορές μεταξύ καταγεγραμμένων (μπλε) και προσομοιωμένων (κόκκινο) τιμών θερμοκρασιών πυρήνα σώματος και δέρματος.



Πρόβλεψη θερμικής καταπόνησης αθλητών αντοχής

Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως το μεγαλύτερο πλήθος των αγώνων (41.6%) πραγματοποιείται σε θερμοουδέτερο περιβάλλον, το 35.4% σε ψυχρό περιβάλλον, και το υπόλοιπο 23% σε θερμό περιβάλλον. Οι αγώνες που γίνονται στο ψυχρότερο περιβάλλον είναι οι μαραθώνιοι δρόμοι ($16.6 \pm 5.3^{\circ}\text{C}$), ενώ στο θερμότερο οι αγώνες ποδοσφαίρου ($23.7 \pm 6.1^{\circ}\text{C}$) (Πίνακας 3). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, οι αθλητές που λαμβάνουν μέρος σε αγώνες με υψηλή περιβαλλοντική θερμοκρασία κατά μέσο όρο 1.1°C υψηλότερη θερμοκρασία πυρήνα σώματος σε σχέση με το αν έτρεχαν σε ψυχρό περιβάλλον ($d=1.40$) (Πίνακας 4). Επιπλέον, ακόμα μεγαλύτερες διαφορές προκύπτουν μεταξύ των δυο σεναρίων προσομοίωσης (ψυχρό και θερμό περιβάλλον) για το μαραθώνιο δρόμο ($d=2.33$). Πέρα από τα αγωνίσματα των τριών και των πέντε χιλιομέτρων τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρότερη διάρκεια, υπολογίστηκε ότι η άσκηση σε θερμό περιβάλλον είναι σε θέση μπορεί λειτουργήσει ως αυξητικός παράγοντας ο οποίος είναι ικανός να οδηγήσει σε ΘΠ $>39^{\circ}\text{C}$ στο τέλος της προσομοιωμένης συνεδρίας άσκησης (Εικόνα 10).

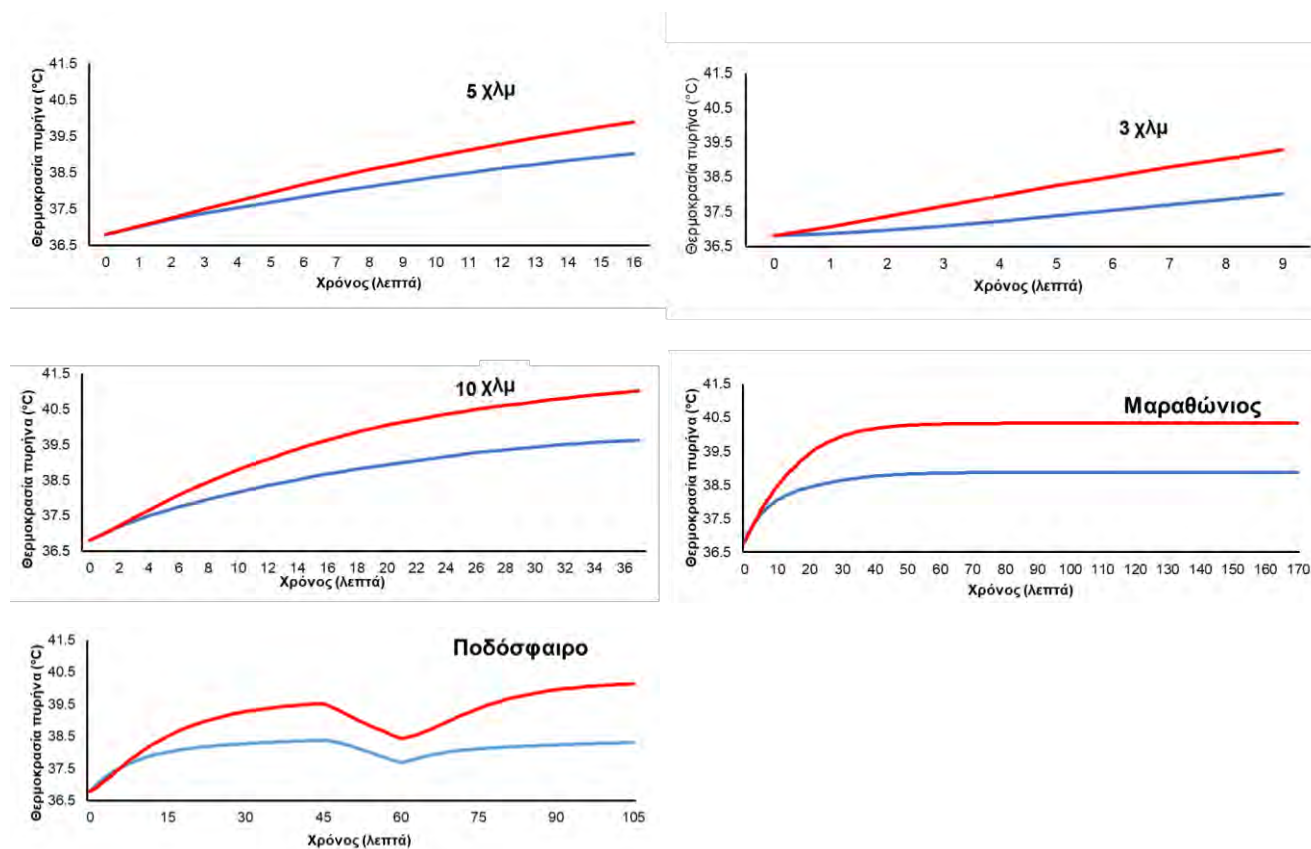
Πίνακας 3. Οι θερμότερες και οι ψυχρότερες θερμοκρασίες για τα κάθε αγώνισμα για τα έτη 1996-2018.

Άθλημα	N	Μ.Ο.	Ελάχιστες Τιμές			Μέγιστες Τιμές		
			WBGT	WBGT	Θ.Α.	Σ.Υ.	WBGT	Θ.Α.
3 χλμ	55	23.2 ± 5.1	9.1	9.0	93.0	33.8	31.0	70.0
5 χλμ	117	21.4 ± 3.6	13.5	13.0	38.0	30.7	29.0	66.0
10 χλμ	30	23.2 ± 4.0	13.8	10.0	87.0	32.4	31.0	62.0
Μαραθώνιος Δρόμος	190	16.6 ± 5.2	6.6	2.0	54.0	31.3	30.0	62.0
Ποδόσφαιρο	52	23.7 ± 6.1	6.8	1.0	87.0	33.8	31.0	70.0
“Θ.Α.” Θερμοκρασία Αέρα		“Σ.Υ.” Σχετική Υγρασία						

Πίνακας 4. Προσομοιωμένες τιμές ΘΠ για κάθε άθλημα για τα θερμά και τα ψυχρά περιβάλλοντα.

Άθλημα	3 χιλ.	5 χιλ.	10 χιλ.	Μαραθώνιος Δρόμος	Ποδόσφαιρο	Σύνολο
Ψυχρά	37.3±0.4	38.1±0.7	38.7±0.8	38.7±0.4	38.1±0.3	38.4±0.6
Θερμά	38.1±0.9	38.5±0.1	39.5±1.3	40.0±0.7	39.1±0.8	39.6±1.0
Διαφορές	0.73	0.43	0.89	1.31	1.01	1.11
ρ	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Μέγεθος επίδρασης (d)	1.05	0.49	0.83	2.33	1.71	1.40

Εικόνα 10. Διαφορές στη θερμοκρασία πυρήνα σε προσομοιωμένους αθλητές κατά την άσκηση σε θερμό και κρύο περιβάλλον, σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για τους 444 μεγαλύτερους αγώνες των τελευταίων 22 ετών.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το PHS_{FL}, ένα νέο λογισμικό για την πρόβλεψη της θερμικής καταπόνησης ενός ατόμου κάτω γνωστές περιβαλλοντικές συνθήκες βασισμένο στο πρωτότυπο ISO 7933: 2004. Το νέο λογισμικό περιλαμβάνει νέες δυνατότητες που βελτιώνουν την πρακτικότητα και τη φιλικότητα του προς τον χρήστη. Παράγει αποτελέσματα πανομοιότυπα με τον κώδικα ISO 7933: 2004 και το PHS_{mobile} και δεν περιέχει το σφάλμα προγραμματισμού που ανιχνεύθηκε στα άλλα δύο πακέτα λογισμικού. Οι αναλύσεις αξιοπιστίας μας έδειξαν ότι οι προσομοιώσεις που έγιναν με τη χρήση του PHS_{FL} παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση με τα πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από μελέτες πεδίου και εργαστηρίου.

Το σφάλμα προγραμματισμού στο πρότυπο ISO εντοπίστηκε κατά την διάρκεια των αναλύσεων της αξιοπιστίας του PHS_{FL}. Παρατηρήθηκε πως το ISO 7933: 2004 έδινε λανθασμένο αποτέλεσμα στην τιμή απώλειας του 5% των σωματικών υγρών. Η τιμή αυτή υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν περιβαλλοντικές, μεταβλητές ενδυμασίας, φυσιολογικές και ανθρωπομετρικές παραμέτρους. Σύμφωνα με τον κώδικα ISO 7933:2004 η τιμή του αποτελέσματος μειώνεται κατά 40% όταν το προσομοιωμένο άτομο δεν έχει πρόσβαση σε νερό κατά τη διάρκεια της εργασίας/άσκησης. Στην επιλογή «το άτομο δεν μπορεί να πει ελεύθερα νερό κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης» τα λογισμικά υπολογίζουν την απώλεια νερού δίνοντας την τιμή «0». Αυτό συμβαίνει γιατί τα προηγούμενα λογισμικά υπολογίζουν λάθος την μείωση του 40% όταν το άτομο δεν έχει πρόσβαση σε νερό. Συγκεκριμένα, όταν ο χρόνος έκθεσης που ορίζεται από τον χρήστη υπερβαίνει τον χρόνο που το άτομο θα φτάσει στο 5% της απώλειας υγρών τότε για κάθε επόμενο λεπτό χρόνου έκθεσης ο πρότυπος κώδικας εξακολουθεί να μειώνει κατά 40% την εκτιμώμενη τιμή. Αυτό οδηγεί

σε μια εκθετική μείωση του χρόνου που θα χρειαστεί προκειμένου να επέλθει απώλεια υγρών ίση με 5% του σωματικού βάρους. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 ο χρόνος έκθεσης αυξάνεται σταδιακά από τα 195 στα 210 λεπτά, ενώ ο χρόνος απώλειας υγρών είναι στα 119 λεπτά.

Οι προσομοιώσεις μας έδειξαν ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην ΘΠ συγκρίνοντας τα προσομοιωμένα αποτελέσματα με πραγματικές τιμές. Αντίθετα, είδαμε πως κατά τις πρώτες ώρες της εργασίας υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών τιμών ΘΔ. Αυτό θεωρούμε ότι οφείλεται στην πρώτη τιμή αναφοράς της θερμοκρασίας του δέρματος, που στο πρότυπο ISO 7933: 2004 είναι οι 34.1°C. Παρά τις διαφορές αυτές, βρέθηκαν ισχυρές γραμμικές σχέσεις μεταξύ των προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών και για τις δύο μεταβλητές (ΘΠ και ΘΔ).

Τα όρια συμφωνίας 95% Bland-Altman του δείγματος δείχνουν ότι το PHS_{FL} είναι σε θέση να εκτιμήσει την ΘΠ των 38°C (μετρημένη με θερμίστορ κατά τη διάρκεια της έκθεσης στη ζέστη) από 37.4°C μέχρι 38.6°C και την ΘΔ των 32°C από 29.3°C έως 33.5°C. (Εικόνα 7)

Αφού αξιολογήθηκε η εγκυρότητα του λογισμικού, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το PHS_{FL} για την πρόβλεψη της θερμικής καταπόνησης που δέχονται οι αθλητές κατά τις μεγάλες αθλητικές διοργανώσεις. Παρατηρήθηκε πως το 41.6% των αγώνων πραγματοποιείτε σε θερμό-ουδέτερα περιβάλλοντα δηλαδή μεταξύ 18 και 23.9 βαθμών WBGT και το 35.4% σε ψυχρά περιβάλλοντα δηλαδή <17.9°C WBGT. Οι αγώνες του μαραθωνίου δρόμου είναι αυτοί με τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές θερμοκρασίες (16.6±5.2°C). Παρ' όλα αυτά σύμφωνα με τον Maughan η ιδανικότερη θερμοκρασία για να πετύχεις την μέγιστη δυνατή επίδοση σε

έναν μαραθώνιο βρίσκεται κοντά στους 10°C (Maughan, 2010). Αυτό σημαίνει πως το θερμικό στρες παρατηρείται ακόμα και στους ψυχρότερους αγώνες.

Από τα αποτελέσματα μας βρήκαμε πως η άσκηση σε θερμό περιβάλλον αυξάνει την θερμοκρασία του πυρήνα του σώματος κατά 1.1°C που συμφωνεί με την μελέτη του Morris που αναφέρει πως η διαφορά της θερμοκρασίας ορθού κατά το τέλος της άσκησης σε δυο διαφορετικά περιβάλλοντα είναι 0.9°C (J. G. Morris, 2005). Σε μια πρόσφατη μελέτη ο James και οι συνεργάτες του βρήκαν πως η άσκηση στη ζέστη (32°C) αυξάνει την καρδιακή συχνότητα και τις ΘΠ και ΘΔ. Η μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου παρουσιάζεται σε χαμηλότερες ταχύτητες και η συσσώρευση του γαλακτικού αρχίζει νωρίτερα (Carl A. James & Maxwell, 2016). Εξαιτίας αυτών των μεταβολών οι αθλητές παρουσιάζουν μια πρόωρη κούραση κατά την άσκηση στη ζέστη με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση στην αθλητική απόδοση.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί πως υπάρχουν αρκετές λύσεις-προτάσεις με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης στη ζέστη. Το Πανεπιστήμιο του Μπράιτον στην Αγγλία σε μια μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2017 σύγκρινε τρεις μεθόδους που χρησιμοποιούν οι αθλητές για να επιτύχουν την μέγιστη απόδοση σε αγώνες με υψηλές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ειδικότερα αξιολόγησε μέσω ενός τεστ εξάντλησης τις μεθόδους, προ-ψύξης του κεφαλιού, εγκλιματισμού στη ζεστή και έναν συνδυασμό των προηγούμενων. Από τα αποτελέσματα βρέθηκε πως η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι ο συνδυασμός προ-ψύξης και εγκλιματισμού αφού αύξησε την απόδοση κατά 7% (C.A. James, 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε και ελέγξαμε την εγκυρότητα και την αξιοπιστία ενός νέου λογισμικού ανοιχτής πρόσβασης (www.famelab.gr/research/downloads) για την εκτίμηση της θερμικής καταπόνησης ενός ατόμου κάτω από γνωστές περιβαλλοντικές και φυσιολογικές συνθήκες, βασισμένο στο ISO 7933:2004. Η υλοποίηση του PHS_{FL} αποσκοπεί στην προάσπιση της υγείας των εργαζομένων και την βελτίωση της απόδοσης/επίδοσης των αθλητών σε συνθήκες όπου δεν είναι εφικτή η συλλογή φυσιολογικών δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία

- ABM. (2009). About the WBGT and apparent temperature indices.
- Andreas D Flouris, P. C. D., Leonidas G Ioannou, Lars Nybo, George Havenith, Glen P Kenny, Tord Kjellstrom. (2018). Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Planet Health*.
- C.A. James, A. J. R., P.W. Watt, A.G.B Willmott, O.R. Gibson and N.S. Maxwell. (2017). Short-term heat acclimation and precooling, independently and combined, improve 5 km time trial performance in the heat.
- Carl A. James, A. J. R., Peter W. Watt, Ashley G. B. Willmott, Oliver R. Gibson and, & Maxwell, N. S. (2016). Short term heat acclimation improves the determinants of endurance performance and 5,000 m running performance in the heat.
- Fiala, D. (1998). *Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort*. De Montfort University Leicester, UK.
- Flouris, A., & Schlader, Z. (2015). Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25, 52-64.
- Ioannou, L. G., Tsoutsoubi, L., Samoutis, G., Bogataj, L. K., Kenny, G. P., Nybo, L., . . . Flouris, A. D. (2017). Time-motion analysis as a novel approach for evaluating the impact of environmental heat exposure on labor loss in agriculture workers. *Temperature*, 4(3), 330-340.
- ISO 7726. (1998a). Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities.
- ISO 7726. (1998b). *Ergonomics of the Thermal Environment: Instruments for Measuring Physical Quantities* (Vol. 7726): International Organization for Standardization.
- ISO 7730. (1994). Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
- ISO 7933. (2004). Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. *Geneva: International Standards Organization*.
- ISO 8996. (2004). Determination of metabolic rate.
- ISO, B. (2004). 8996: 2004 Ergonomics of the thermal environment—determination of metabolic rate. *BSI, London*.
- J. G. Morris, M. E. N., L. H. Boobis, I. A. Macdonald, C. Williams. (2005). Muscle Metabolism, Temperature, and Function During Prolonged, Intermittent, High-Intensity Running in Air Temperatures of 33 and 17°C.
- Johnstone, K. (2016). PHS. from <https://itunes.apple.com/ca/app/phs/id1148768952?mt=8>.
- Malchaire, J., Piette, A., Kampmann, B., Mehnert, P., Gebhardt, H., Havenith, G., . . . Alfano, G. (2001). Development and validation of the predicted heat strain model. *Annals of Occupational Hygiene*, 45(2), 123-135.
- Maughan, R. J. (2010). Distance running in hot environments: a thermal challenge to the elite runner.
- Meade, R. D., Lauzon, M., Poirier, M. P., Flouris, A. D., & Kenny, G. P. (2015). An evaluation of the physiological strain experienced by electrical utility workers in North America. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 12(10), 708-720.

Michael N. Sawka, S. N. C. a. R. W. K. (2012). High skin temperature and hypohydration impair aerobic performance.

National Weather Service. (2018). Vapor Pressure. from <https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/vaporPressure.pdf>.

Ramanathan, N. (1964). A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *Journal of applied physiology*, 19(3), 531-533.