



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

Υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση κατά τη σωματική άσκηση

Ορφέας Βέργος
Αριθμός Μητρώου: 48017011

Επιβλέπουσα
Αικατερίνη Σκουρολιάκου
Καθηγήτρια

Αθήνα, Μάρτιος 2024

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Η Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Αικατερίνη Σκουρολιάκου

Καθηγήτρια

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Νεκτάριος Καλύβας

Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Ευστράτιος Δαβίδ

Επίκουρος Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Βέργος Ορφέας του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 48017011 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

21/3/2024

Ο Δηλών

Βέργος Ορφέας



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας εστιάζεται στην μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος με την τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης, πριν και μετά την αερόβια άσκηση και συγκεκριμένα την υπαίθρια ποδηλασία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την θερμοκάμερα FLIR ONE PRO, της εταιρίας FLIR. Σκοπός ήταν η παρατήρηση της θερμοκρασίας του σώματος υπό πραγματικές συνθήκες άσκησης σε εξωτερικό χώρο και όχι σε κάποιο εργαστηριακό περιβάλλον.

Τα πρώτα τρία κεφάλαια αφιερώθηκαν στην εισαγωγή και το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τους δυο βασικούς άξονες αυτής της εργασίας. Ο πρώτος άξονας αφορά την αλληλεπίδραση του ανθρώπινου οργανισμού με το περιβάλλον του και τη σωματική άσκηση, η οποία δεν αποτέλεσε μια τυχαία επιλογή, καθώς η αξία της είναι αδιαμφισβήτητη για την ποιότητα της ζωής του ανθρώπου. Τον δεύτερο βασικό άξονα αποτελεί η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας, η οποία έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια συμμετέχοντας σε πλήθος εφαρμογών και κατακτώντας μια θέση στην μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος στους τομείς της ιατρικής και του αθλητισμού.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας δεν έδειξαν σταθερή αντίδραση του σώματος στη διαδικασία της άσκησης, με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας του δέρματος, γεγονός το οποίο καταδεικνύει το μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας της απόπειρας εκτέλεσης της αθλητικής δοκιμασίας σε εξωτερικό περιβάλλον σε σχέση με έναν ελεγχόμενο εργαστηριακό χώρο. Επιπλέον, γεννάται η ανάγκη επανάληψης παρόμοιων πειραμάτων υπό διαφορετικές, καλύτερες συνθήκες, διαμορφωμένες βάσει των δεδομένων της εργασίας αυτής.

Λέξεις κλειδιά: Άσκηση, Ποδηλασία, Θερμότητα, Θερμοκρασία, IRT

ABSTRACT

The scope of this study focuses on the measurement of body surface temperature using infrared thermographic imaging technique before and after aerobic exercise, specifically outdoor cycling. The measurements were carried out with the FLIR ONE PRO thermal camera, manufactured by FLIR. The aim was to observe the body temperature under real exercise conditions in an outdoor environment rather than in a laboratory setting.

The first three chapters were devoted to the introduction and theoretical background about the two main aspects of this work. The first axis concerns the interaction of the human body with its environment and physical exercise, which was not an accidental choice, as its value for the quality of human life is undeniable. The second main axis is the technique of infrared thermography, which has developed a lot in recent years, participating in numerous applications and gaining a place in the measurement of surface body temperature in the fields of medicine and sport.

The results of the experimental procedure did not show a stable reaction of the body to the process of exercise, with an increase or decrease in skin temperature, which demonstrates the greater degree of difficulty of attempting to perform the sports test in an outdoor environment compared to a controlled laboratory environment. In addition, it raises the need to repeat similar experiments under different, better conditions, modulated on the basis of the data of this work.

Keywords: Exercise, Cycling, Heat, Temperature, IRT

Περιεχόμενα

<u>Περιεχόμενα</u>	5
<u>Εισαγωγή</u>	7
<u>1. Άσκηση και ομοιοστατικοί μηχανισμοί</u>	8
<u>1.1 Η κίνηση στο ανθρώπινο σώμα</u>	8
<u>1.1.2 Οφέλη της κίνησης</u>	8
<u>1.2 Μύες ανθρώπινου σώματος</u>	10
<u>1.2.1 Μέθοδοι ταξινόμησης μυών του σώματος</u>	10
<u>1.2.2 Σκελετικοί μύες</u>	11
<u>1.2.3 Δομή σκελετικού μυός</u>	11
<u>1.2.4 Δομή μυϊκής ίνας και μυϊκή συστολή</u>	12
<u>1.3 Μύες που χρησιμοποιούνται στην ποδηλασία</u>	15
<u>1.4 Θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί του Σώματος</u>	17
<u>2. Θερμική εκπομπή και φυσικοί νόμοι</u>	20
<u>2.1 Τα σώματα εκπέμπουν θερμότητα</u>	20
<u>2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και η υπέρυθη ακτινοβολία</u>	22
<u>2.3 Φυσικοί νόμοι</u>	28
<u>2.3.1 Νόμος του Planck</u>	33
<u>2.3.2 Νόμος μετατοπίσεως του Wien</u>	34
<u>2.3.3 Νόμος των Stefan-Boltzmann</u>	35
<u>3. Υπέρυθη θερμογραφία</u>	37
<u>3.1 Ορισμός</u>	37
<u>3.1.1 Γενικός ορισμός</u>	37
<u>3.1.2 Ορισμός της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης στην ιατρική</u>	37
<u>3.2 Ιστορική αναδρομή</u>	38
<u>3.2.1 Η εξέλιξη των τεχνικών μέτρησης της Θερμοκρασίας του σώματος</u>	39
<u>3.2.2 Ιστορία και μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας</u>	40
<u>3.3 Διαμορφώσεις</u>	44
<u>3.4 Τεχνικές</u>	45
<u>3.4.1 Παθητική θερμογραφία</u>	45
<u>3.4.2 Ενεργητική θερμογραφία</u>	46
<u>3.5 Σύστημα υπέρυθρης θερμογραφίας – Θερμοκάμερα</u>	52
<u>3.5.1 Φάσμα υπέρυθρου και υπέρυθη θερμογραφία</u>	53
<u>3.5.2 Τύποι θερμοκάμερας</u>	54
<u>3.5.3 Οπτικό σύστημα</u>	55
<u>3.5.4 Ανιχνευτές</u>	56
<u>3.5.5 Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων/σήματος</u>	60
<u>3.5.6 Διεπαφή χρήστη - Οθόνη</u>	60

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

3.5.7 Ανάγκη για έλεγχο και αξιολόγηση συστήματος υπέρυθρης θερμογραφίας	62
3.5.8 Επιλογή κατάλληλης θερμοκάμερας	62
3.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση	62
3.6.1 Συνθήκες κατά τη λήψη του θερμογραφήματος	64
3.6.2 Σύστημα απεικόνισης	65
3.6.3 Χρήση κατάλληλου ή μη κατάλληλου εξοπλισμού	65
3.6.4 Τήρηση ή όχι κατάλληλου πρωτοκόλλου από τον εξεταζόμενο	65
3.6.5 Πρωτόκολλο απεικόνισης	66
3.6.6 Επιλογή προσωπικού για την πραγματοποίηση της διαδικασίας	66
3.7 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας	67
3.7.1 Πλεονεκτήματα	67
3.7.2 Μειονεκτήματα – Περιορισμοί	68
3.8 Εφαρμογές	69
3.8.1 Παρακολούθηση κατάστασης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων	69
3.8.2 Επιθεώρηση υποδομών	69
3.8.3 Ανίχνευση αερίων	70
3.8.4 Παρατήρηση άγριων ζώων και διάγνωση στην κτηνιατρική	70
3.8.5 Συστήματα παρακολούθησης	70
3.8.6 Έλεγχοι σε αεροσκάφη και αξιολόγηση σύνθετων υλικών της αεροδιαστημικής	70
3.8.7 Εφαρμογές στη γεωργία και τη βιομηχανία τροφίμων	71
3.8.8 Έλεγχοι σε πυρηνικές βιομηχανίες	71
3.8.9 Εφαρμογές στην ιατρική	71
3.8.10 Εφαρμογές στον αθλητισμό	73
3.9 Μετρήσεις ακτινοβολίας με χρήση κάμερας υπέρυθρης θερμογραφίας κατά την αερόβια σωματική άσκηση	74
4. Πειραματική διαδικασία – Αποτελέσματα	77
4.1 Εξοπλισμός πειράματος	77
4.2 Πειραματική διαδικασία	80
4.2.1 Λήψη θερμογραφημάτων και Αθλητική δοκιμασία	80
4.2.2 Επεξεργασία θερμογραφημάτων και εξαγωγή πληροφοριών	82
4.3 Αποτελέσματα	83
5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές εξελίξεις	88
5.1 Συμπεράσματα / σχολιασμός	88
5.2 Μελλοντικές εξελίξεις	89
Βιβλιογραφία	90
Πηγές εικόνων	103

Εισαγωγή

Η εξέλιξη των συστημάτων υπέρυθρης θερμογραφίας τις τελευταίες δεκαετίες σε συνδυασμό με την ανάγκη εύρεσης όλο και περισσότερων μη επεμβατικών – μη επιβαρυντικών μεθόδων διάγνωσης και παρατήρησης στο ανθρώπινο σώμα οδήγησε στην ανάδειξη των θερμοκαμερών σε σημαντικά διαγνωστικά εργαλεία με αρκετές εφαρμογές στην ιατρική και στον αθλητισμό. Το έναυσμα για τη δημιουργία της παρούσας εργασίας δόθηκε από την απορία σχετικά με το κατά πόσο είναι εφικτό να παρατηρηθούν αλλαγές στην επιφανειακή θερμοκρασία του σώματος πριν και μετά τη σωματική άσκηση, όταν αυτή η εκτελείται σε εξωτερικό χώρο, πώς μπορούν να ερμηνευτούν και σε τι συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε. Στην εργασία αυτή θα γίνει η προσπάθεια εξαγωγής πληροφοριών από το ανθρώπινο σώμα αναφορικά με τις αντιδράσεις, τις οποίες αυτό παρουσιάζει ύστερα από την υποβολή του σε άσκηση υπό την επίδραση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών και συγκεκριμένα μετά από υπαίθρια ποδηλασία.

Η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε από το ίδιο υποκείμενο αρκετές φορές, ώστε να μην υπάρξουν διαφορετικές αποκρίσεις στο ίδιο ερέθισμα που θα οφείλονται σε ενδεχόμενες διαφορές που παρατηρούνται από οργανισμό σε οργανισμό. Το πείραμα διεξήχθη με τη χρήση ενός κοινού ποδηλάτου δρόμου και οι λήψεις πάρθηκαν με τη χρήση θερμοκάμερας, ελεγχόμενης μέσω μιας συσκευής κινητού τηλεφώνου (smartphone).

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με την κίνηση, την άσκηση και τους θερμορυθμιστικούς μηχανισμούς του ανθρώπινου σώματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στο θεωρητικό υπόβαθρο και αναφέρονται η θερμική εκπομπή των σωμάτων, η υπέρυθρη ακτινοβολία και η θέση της στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και οι φυσικοί νόμοι, οι οποίοι διέπουν την υπέρυθρη θερμογραφία. Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην υπέρυθρη θερμογραφία με αναφορά στην ιστορία, τις τεχνικές, τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων, τα δυνατά και αδύνατα σημεία, τις ιδανικές συνθήκες μέτρησης καθώς και τις εφαρμογές αυτής της μεθόδου. Στο τέταρτο κεφάλαιο βρίσκεται η πειραματική διαδικασία καθώς και τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από αυτή, ενώ στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο βρίσκονται τα συμπεράσματα, ο σχολιασμός και οι ενδεχόμενες μελλοντικές εξελίξεις.

1. Άσκηση και ομοιοστατικοί μηχανισμοί

1.1 Η κίνηση στο ανθρώπινο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα είναι σχεδιασμένο για να κινείται. Φυσική δραστηριότητα καλείται κάθε κίνηση η οποία προκαλείται από τη σύσπαση σκελετικών μυών και χρειάζεται ενέργεια για την εκτέλεσή της [1]. Η κίνηση σε αντίθεση με την άσκηση, σε έναν υγιή οργανισμό, δεν απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια αλλά δράση [2]. Αρκετά χρόνια πριν η κίνηση ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη με την επιβίωση του ανθρώπου, όμως ο σύγχρονος άνθρωπος, χάρη στα επιτεύγματα του πολιτισμού, έχει απεμπολήσει την ανάγκη για κίνηση και φυσική δραστηριότητα, παρά το γεγονός ότι είναι γενετικά προγραμματισμένος για αυτή [3].

1.1.2 Οφέλη της κίνησης

Τα οφέλη της κίνησης είναι πολυάριθμα τόσο στην σωματική, όσο και στην πνευματική, ψυχική και συναισθηματική μας υγεία [2,4,7]. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί τρόποι με τους οποίους η κίνηση και η άσκηση προάγουν την υγεία σε κάθε μια από τις παραπάνω πτυχές της ανθρώπινης ύπαρξης.

Στη σωματική υγεία

- Οι μύες διατηρούνται δυνατοί και το σώμα χαλαρώνει
- Μειώνονται οι πιθανότητες εμφάνισης κάποιας χρόνιας νόσου
- Ρυθμίζεται ο διαβήτης τύπου II
- Θωρακίζεται το ανοσοποιητικό σύστημα
- Αυξάνεται η πυκνότητα των οστών
- Βελτιώνεται η καρδιαγγειακή λειτουργία

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- Μειώνεται η αρτηριακή πίεση
- Βελτιώνεται η κυκλοφορία του αίματος
- Καθίσταται ευκολότερη η διαχείριση του πόνου
- Αποτρέπονται νευροεκφυλιστικές ασθένειες (όπως νόσος Alzheimer και Parkinson)

Στην πνευματική και ψυχική υγεία

Η σωματική δραστηριότητα βάσει πολλών μελετών [5,6,8] μπορεί να αποτελέσει μια μη επεμβατική θεραπευτική μέθοδο για τη βελτίωση της ψυχικής υγείας και της γνωστικής λειτουργίας ως εξής :

- Μειώνεται το άγχος
- Μειώνονται τα συμπτώματα της κατάθλιψης με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της ψυχοθεραπείας
- Καταπολεμάται ο εθισμός στα ναρκωτικά
- Αποτρέπεται η αϋπνία
- Αυξάνεται η σαφήνεια και η ικανότητα της σκέψης
- Βελτιώνεται η συγκέντρωση

Στη Συναισθηματική υγεία

- Απελευθερώνονται ντοπαμίνη και ενδορφίνες, οι οποίες ευθύνονται για τη βελτίωση της διάθεσής μας [9]

Παρά τα γνωστά οφέλη της άσκησης, οι περισσότεροι ενήλικες και πολλά παιδιά ακολουθούν σχετικά καθιστικό τρόπο ζωής με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι χρόνιες παθήσεις, τα μυοσκελετικά προβλήματα, η παχυσαρκία και οι πόνοι. Τον 5^ο αιώνα π.Χ. ο αρχαίος γιατρός Ιπποκράτης δήλωσε: «Όλα τα μέρη του σώματος, αν χρησιμοποιούνται με μέτρο και ασκούνται σε εργασίες για τις οποίες το καθένα είναι φτιαγμένο, γίνονται υγιή, καλά αναπτυγμένα και γερνούν αργά, ενώ αν μείνουν

αχρησιμοποίητα και σε αδράνεια, γίνονται ευπαθή σε ασθένειες, ελαττωματικά στην ανάπτυξη και γερνούν γρήγορα». Ωστόσο, μέχρι τον 21ο αιώνα, η πίστη στην αξία της άσκησης για την υγεία έχει ξεθωριάσει τόσο πολύ, που η έλλειψη άσκησης αποτελεί πλέον ένα σημαντικό πρόβλημα δημόσιας υγείας, αλλά και πραγματική αιτία χρόνιων ασθενειών και θανάτου [4].

1.2 Μύες ανθρώπινου σώματος

Το άνοιγμα των ματιών μας, ο χτύπος της καρδιάς μας, η κίνηση οποιουδήποτε μέρους του σώματός μας, ακόμα και η κίνηση της τροφής που έχουμε καταναλώσει κατά μήκος του εντέρου μας, όλα αυτά πραγματοποιούνται χάρη σε κάποιους μυς [3]. Έτσι λοιπόν οι χιλιάδες λειτουργίες του μυϊκού συστήματος, του ανθρώπινου σώματος, εκτελούνται από τρεις μονάχα τύπους μυών. Αυτοί είναι οι σκελετικοί, ο καρδιακός και οι λείοι.

1.2.1 Μέθοδοι ταξινόμησης μυών του σώματος

Οι μύες του ανθρώπινου σώματος είναι εφικτό να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Μια μέθοδος, η οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η περιγραφή των μυών βάσει της παρατήρησής τους κάτω από το φως ενός μικροσκοπίου. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να διακρίνουμε τους σκελετικούς μύες, οι οποίοι αποτελούνται από γραμμώσεις και ονομάζονται γραμμωτοί. Οι μύες αυτοί αποτελούνται από ίνες που σχηματίζουν εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ζώνες – λωρίδες (γραμμώσεις). Η διάμετρος των γραμμώσεων είναι μικρότερη από εκείνη μιας ανθρώπινης τρίχας, ενώ το μήκος τους είναι μερικά εκατοστά. Οι υπόλοιποι μύες οι οποίοι δεν αποτελούνται από γραμμώσεις ονομάζονται λείοι (μη γραμμωτοί) [10]. Τέτοιοι μύες καλύπτουν τα τοιχώματα των πεπτικών, των ουρογεννητικών οργάνων αλλά και των αγγείων του αίματος, συμβάλλοντας έτσι στον έλεγχο και την προαγωγή της ροής [11].

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των μυών είναι με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους [10]. Έτσι έχουμε τους εκούσιους (σκελετικούς μύες) και τους ακούσιους (λείοι και καρδιακός μυς). Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται στον εάν ο εκάστοτε μυς νευρώνεται από το σωματικό νευρικό σύστημα, με αποτέλεσμα να λειτουργεί εκούσια (με τη θέλησή μας) ή από το αυτόνομο νευρικό σύστημα με αποτέλεσμα την ακούσια λειτουργία του (κίνηση η οποία δεν υπόκειται στον συνειδητό έλεγχό μας).

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης των μυών είναι με κριτήριο τον χρόνο απόκρισής τους σε ένα ερέθισμα. Οι λείοι χρειάζονται μερικά δευτερόλεπτα, ενώ οι ραβδωτοί μύες χρειάζονται περίπου χρόνο ίσο με 0,1 sec για να συσταλούν.

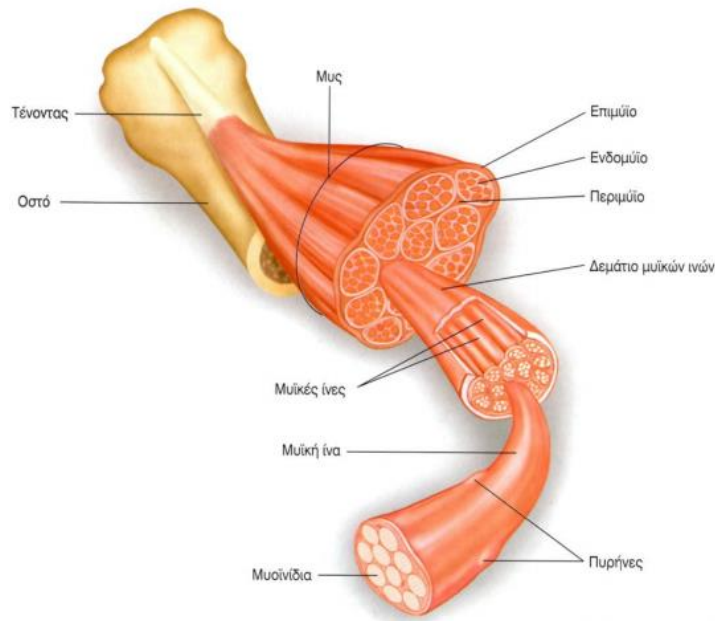
1.2.2 Σκελετικοί μύες

Στο ανθρώπινο σώμα υπάρχουν πάνω από 600 σκελετικοί μύες, οι οποίοι αποτελούν το 40% - 50% της συνολικής σωματικής μάζας. Οι κυριότερες λειτουργίες αυτής της κατηγορίας μυών είναι η παραγωγή δύναμης για την επίτευξη της κίνησης, την διατήρηση της στάσης, την αναπνοή και την παραγωγή θερμότητας σε περίπτωση έκθεσης σε ψυχρό περιβάλλον. Οι σκελετικοί μύες συνδέονται με τα οστά μέσω ενός σκληρού συνδετικού ιστού που ονομάζεται τένοντας.

1.2.3 Δομή σκελετικού μυός

Ο σκελετικός μυς αποτελείται από πολλά είδη ιστών. Τέτοιοι ιστοί είναι τα ίδια τα μυϊκά κύτταρα, που ονομάζονται μυϊκές ίνες, διάφοροι τύποι συνδετικού ιστού, αγγεία και ο νευρικός ιστός.

Εξετάζοντας τον σκελετικό μυ και κατευθυνόμενοι από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του αρχικά συναντάμε το επιμύιο, ένα στρώμα συνδετικού ιστού, το οποίο περιβάλλει ολόκληρο τον μυ και τον συγκρατεί. Στη συνέχεια βρίσκουμε το περιμύιο, έναν άλλο συνδετικό ιστό ο οποίος περιβάλλει κάποιες μεμονωμένες – μικρές δέσμες οι οποίες καλούνται μυϊκά δεμάτια. Μέσα σε κάθε τέτοιο δεμάτιο η εκάστοτε μυϊκή ίνα περιβάλλεται από ένα στρώμα συνδετικού ιστού, το ενδομύιο. Η διάταξη των μυϊκών ινών σε έναν μυ, όπως περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται στην εικόνα 1:



Εικόνα 1. Δομή σκελετικού μυός

1.2.4 Δομή μυϊκής ίνας και μυϊκή συστολή

Με σκοπό την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συστέλλεται ένας μυς στο σώμα μας θα αναφερθούμε συνοπτικά στη δομή της μυϊκής ίνας, καθώς η διαδικασία της μυϊκής συστολής είναι περίπλοκη και η λεπτομερής ανάλυσή της ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας.

Κάθε μυϊκή ίνα είναι πολυπύρηνη με τους πυρήνες της να βρίσκονται κατά μήκος της περιφέρειας της [13] και μπορεί να παρομοιαστεί με έναν κύλινδρο, ο οποίος επεκτείνει το μήκος του μυός και καλύπτεται από μια κυτταρική μεμβράνη, το σαρκείλημα. Πάνω σε αυτό βρίσκονται τα δορυφόρα κύτταρα τα οποία είναι πρόδρομα μυϊκά κύτταρα που παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιδιόρθωση και τη μυϊκή αύξηση. Κάτω από το σαρκείλημα υπάρχει το σαρκόπλασμα (ή κυτταρόπλασμα) στο οποίο περιλαμβάνονται τα οργανίδια, οι κυτταρικές πρωτεΐνες και τα μυοϊνίδια. Εντός του σαρκοπλάσματος του μυός υπάρχουν ορισμένα δίκτυα μεμβρανωδών καναλιών, κάθε ένα από τα οποία επιτελεί διαφορετικούς σκοπούς. Παράλληλα με τα μυοϊνίδια κείται το σαρκοπλασματικό δίκτυο, το οποίο χρησιμεύει ως αποθήκη ασβεστίου. Ένα άλλο δίκτυο μεμβρανωδών καναλιών είναι οι εγκάρσιοι σωληνίσκοι που εκτείνονται από το σαρκείλημα ως τη μυϊκή ίνα και τη διαπερνούν πλήρως [3].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Κάθε μυοϊνίδιο περιέχει δυο βασικούς τύπους συστατικών πρωτεϊνικών νηματίων. Αυτά είναι τα παχιά νημάτια και τα λεπτά νημάτια, τα οποία είναι διατεταγμένα κατά μήκος του μυϊνιδίου σε μεμονωμένα τμήματα που ονομάζονται σαρκομέρια.

Η κύρια μονάδα του παχέων νηματίων είναι η πρωτεΐνη μυοσίνη, ενώ των λεπτών νηματίων είναι κυρίως η πρωτεΐνη ακτίνη, μαζί με τις πρωτεΐνες τροπομυοσίνη και τροπονίνη. Η μυοσίνη αποτελείται από δύο ζεύγη ελαφρών αλυσίδων και ένα ζευγάρι βαριών αλυσίδων. Οι δύο βαριές αλυσίδες της μυοσίνης συστρέφονται η μία γύρω από την άλλη για να δημιουργήσουν την ελικοειδή ουρά της μυοσίνης, ενώ οι ελαφριές αλυσίδες αλληλεπιδρούν με τις βαριές αλυσίδες για να σχηματίσουν τις δύο κεφαλές της μυοσίνης στο άλλο άκρο. Στις κεφαλές βρίσκεται μια σημαντική θέση δέσμησης που διευκολύνει την αλληλεπίδραση της μυοσίνης με την ακτίνη [13]. Ο ρόλος της τροπομυοσίνης είναι η παρεμπόδιση της αλληλεπίδρασης της ακτίνης και της μυοσίνης όταν ο μυς είναι σε ηρεμία, αποτρέποντας κατά συνέπεια τη συστολή των μυών. Η τροπονίνη αποτελείται από ένα σύμπλεγμα τριών πρωτεϊνών και βρίσκεται κατά μήκος των νηματίων της τροπομυοσίνης. Η πρώτη πρωτεΐνη, η τροπονίνη T, διευκολύνει τη σύνδεση της τροπονίνης με την τροπομυοσίνη. Η τροπονίνη I βοηθά και αυτή όπως και η τροπομυοσίνη στη διακοπή της αλληλεπίδρασης ακτίνης-μυοσίνης αποκλείοντας τις θέσεις δέσμησης της μυοσίνης. Τέλος, η τροπονίνη C δεσμεύει το ασβέστιο για την έναρξη της μυϊκής συστολής.[3]

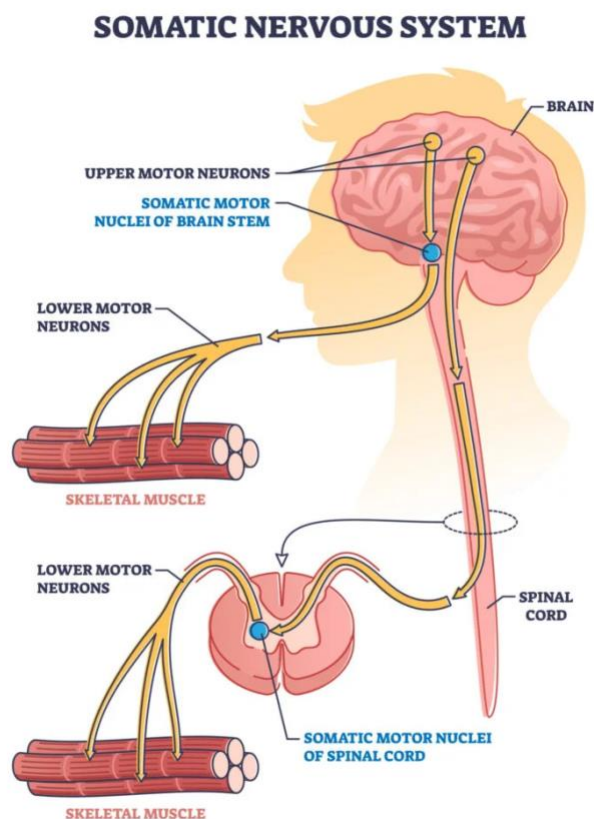
Η οργάνωση του σκελετικού μύος σε επίπεδα μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής :

Μυς → Μυϊκή ίνα → Μυοϊνίδιο → Νημάτια λεπτά & παχέα →

Ακτίνη & Μυοσίνη

Ο συνειδητός έλεγχος των σκελετικών μυών γίνεται από τον κινητικό φλοιό του εγκεφάλου με τη βοήθεια του σωματικού νευρικού συστήματος. Ωστόσο, η κίνηση συντονίζεται από διάφορες δομές στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), συμπεριλαμβανομένων των εξωπυραμιδικών περιοχών και της παρεγκεφαλίδας. Τις κινήσεις επίσης ελέγχουν και τα νωτιαία αντανακλαστικά [15,16].

Τα νεύρα που είναι υπεύθυνα για τη νέρωση των μυϊκών ινών ονομάζονται κινητικοί νευρώνες. Ως κινητική μονάδα ορίζεται ένας μεμονωμένος κινητικός νευρώνας και οι μυϊκές ίνες τις οποίες αυτός νευρώνει. Σε μια κινητική μονάδα ο αριθμός των μυϊκών ινών ποικίλλει προβλέψιμα ανάλογα με τη λειτουργία του μυός. Η συστολή των σκελετικών μυών αρχίζει πρώτα στη νευρομυϊκή σύναψη, στον τόπο δηλαδή όπου ο κινητικός νευρώνας συναντά το μυϊκό κύτταρο. Η νευρική ώση φτάνει στη νευρομυϊκή σύναψη και από τις σχισμές του



Εικόνα 2. Σωματικό νευρικό σύστημα

τελικού κομβίου του κινητικού νευρώνα απελευθερώνεται μια ουσία (νευροδιαβιβαστής) που ονομάζεται ακετυλοχολίνη (Ach). Αν η ποσότητα Ach που θα απελευθερωθεί είναι αρκετή, τότε αφού συνδεθεί με τους υποδοχείς που βρίσκονται στο σαρκείλημμα, θα παραχθεί ένα δυναμικό ενέργειας στη μυϊκή ίνα (διέγερση). Αυτό το δυναμικό ενέργειας φτάνοντας στο σαρκοπλασματικό δίκτυο πυροδοτεί την απελευθέρωση ιόντων ασβεστίου (Ca^{++} ή Ca^{2+}) στο σαρκόπλασμα. Στη συνέχεια το Ca^{++} συνδέεται στην πρωτεΐνη τροπονίνη αλλάζοντας τη θέση της τροπομυοσίνης, με αποτέλεσμα να μείνουν ελεύθερες οι ενεργές περιοχές, επιτρέποντας στις κεφαλές της μυοσίνης να συνδεθούν με την ακτίνη. Η σύνδεση αυτή και κατ' επέκταση η μυϊκή δράση απαιτεί ενέργεια την οποία παρέχει η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP) όταν διασπάται από το ένζυμο αδενοσινοτριφωσφατάση (ATPase), το οποίο βρίσκεται στην κεφαλή της μυοσίνης. Από τη διάσπαση της ATP προκύπτει διφωσφορική αδενοσίνη (ADP), ανόργανο φωσφορικό άλας (Pi) και ενέργεια. Η ολίσθηση των ινιδίων ακτίνης πάνω στα ινίδια μυοσίνης συνεπάγεται το φαινόμενο της συστολής του μυός. Όσο υπάρχουν ελεύθερα ιόντα ασβεστίου και συνδέονται με την τροπονίνη η βράχυνση

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

συνεχίζεται. Όταν η νευρική δραστηριότητα, στη νευρομυϊκή σύναψη πάψει, τα ιόντα Ca^{++} επιστρέφουν στο σαρκοπλασματικό δίκτυο μέσω της αντλίας Ca^{++} . Η τροπομυοσίνη στη συνέχεια μετακινείται καλύπτοντας το ενεργό κέντρο της ακτίνης με αποτέλεσμα την χαλάρωση του μυός [13,14].

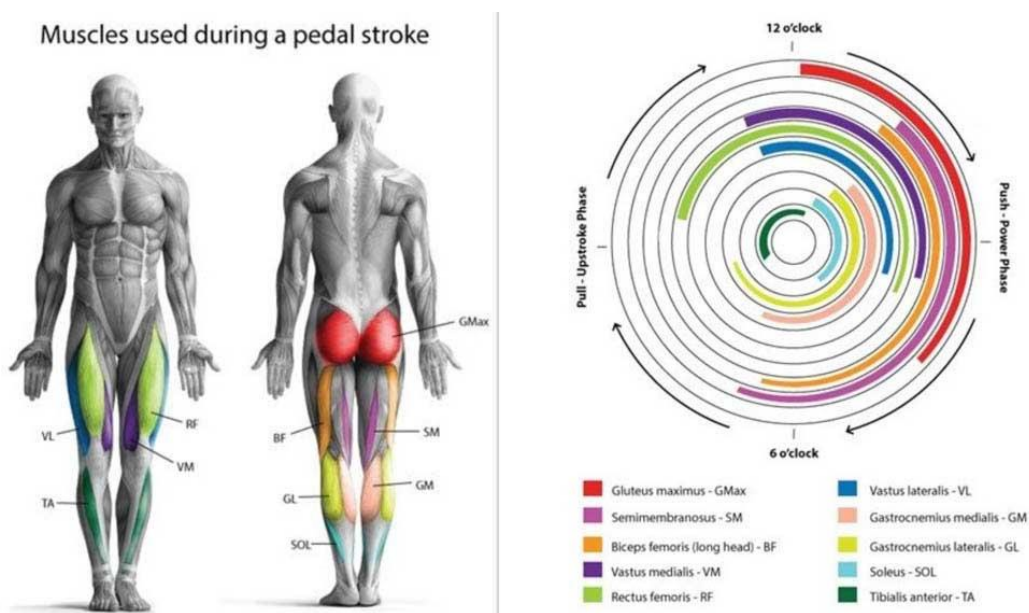
1.3 Μύες που χρησιμοποιούνται στην ποδηλασία

Η ποδηλασία θεωρείται μια, κατά κύριο λόγο, αερόβια μορφή άσκησης που βοηθά στη βελτίωση της υγείας της καρδιάς αλλά και των πνευμόνων. Κατά τη διάρκειά της ενεργοποιούνται πολλές μεγάλες μυϊκές ομάδες και η τακτική προπόνηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της δύναμης και της μυϊκής ανάπτυξης [17].

Οι μύες που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι εκείνοι οι οποίοι βρίσκονται στα πόδια και ευθύνονται για τη δύναμη που τελικά ασκείται στα πεντάλ, με σκοπό να περιστραφεί ο τροχός του ποδηλάτου [21]. Το πετάλι κατά την κίνησή του διαγράφει μια κυκλική τροχιά η οποία μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα. Σε κάθε τμήμα ενεργοποιούνται διαφορετικοί μύες [18]. Αν παρομοιάσουμε την περιστροφή του πεντάλ με την περιστροφή του δείκτη ενός ρολογιού, τότε στην πάνω ακραία θέση βρισκόμαστε στις 12 η ώρα και στην κάτω ακραία θέση βρισκόμαστε στις 6 η ώρα. Οι μύες που λαμβάνουν δράση σε κάθε φάση είναι οι εξής :

- Έξω πλατύς και έσω πλατύς (από τις 11 έως τις 4)
- Ορθός μηριαίος (από τις 11 μέχρι τις 9)
- Μείζων γλουτιαίος, 30% της δύναμης στο πεντάλ (από τις 12 έως τις 5)
- Δικέφαλος Μηριαίος και Ημιμεμβρανώδης Μυς (από τις 1:30 έως τις 6:30)
- Μύες της γάμπας, 20% της δύναμης στο πεντάλ
 - Έσω γαστροκνήμιος (από τις 2 έως τις 6:30)
 - Έξω γαστροκνήμιος (από τις 2 έως τις 9)
- Υποκνημίδιος (από τις 2 έως τις 5)
- Πρόσθιος κνημιαίος (από τις 9 μέχρι μετά τις 12)

} 40% της
δύναμης στο
πεντάλ



Εικόνα 3. Μύες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της πεταλιάς

Εκτός από τους μυς των κάτω άκρων συμμετέχουν και οι μύες του κορμού του σώματος, οι οποίοι, συμπεριλαμβανομένων των εν τω βάθει σταθεροποιητικών μυών της πλάτης και των κοιλιακών, βοηθούν στη διατήρηση της ισορροπίας. Σύμφωνα με την Laura Williams M.S. μια μελέτη, η οποία δημοσιεύτηκε το 2022 στο Sensors, συνέκρινε τη μυϊκή ενεργοποίηση στον κορμό και στο πάνω μέρος του σώματος σε ανθρώπους που στέκονταν όρθιοι και σε ανθρώπους που έκαναν ποδήλατο. Εκ των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι ο υπακάνθιος μυς (μέρος της μυϊκής ομάδας του στροφικού πετάλου, που βοηθά στην κίνηση του ώμου), ο πλατύς ραχιαίος (ο μεγαλύτερος μυς της πλάτης), ο έξω λοξός μυς (πλάγιος κοιλιακός) και ο μείζων θωρακικός μυς εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερη δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της ποδηλασίας.

Για την διατήρηση της ισορροπίας, του χειρισμού του ποδηλάτου και τους σταθερότητας σημαντικό ρόλο παίζουν, επίσης, οι μύες του άνω μέρους του σώματος και των άνω άκρων. Σε μια μελέτη τους οι Nicolas A. Turpin, Antony Costes, Pierre Moretto & Bruno Watier [19] κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ακόμα και στη στατική ποδηλασία παρατηρείται συνεργατική ενεργοποίηση μυών των άνω άκρων κάτι που ενδεχομένως έχει σημαντική συνεισφορά στην αθλητική απόδοση. Σύμφωνα με έρευνες, όσο δυνατότερο είναι το άνω τμήμα του σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η

δύναμη που ασκείται στο τιμόνι του ποδηλάτου και αυτό συνεπάγεται την εφαρμογή μεγαλύτερης δύναμης στα πεντάλ [20].

1.4 Θερμορρυθμιστικοί μηχανισμοί του Σώματος

Στον ανθρώπινο οργανισμό η θερμοκρασία του πυρήνα του σώματος παραμένει σχεδόν σταθερή για όλη τη διάρκεια της ζωής. Αυτό οφείλεται στους μηχανισμούς της θερμορύθμισης, οι οποίοι αποτελούν σημαντική πτυχή της ομοιόστασης. Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζει είναι μικρότερες από 1°C, με εξαίρεση συνθήκες ακραίου ψύχους ή θερμότητας, ασθένειας ή συνεχόμενης βαριάς άσκησης [3, 22-23, 26]. Το σώμα ως ένα ανοιχτό σύστημα ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του, διατηρώντας όμως μια δυναμική ισορροπία μέσω της οποίας κρατά σταθερή την εσωτερική του θερμοκρασία. Ο έλεγχος καθώς και η ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος γίνεται από μια περιοχή του εγκεφάλου η οποία καλείται υποθάλαμος. Ο πρόσθιος υποθάλαμος είναι υπεύθυνος για την αντίδραση σε μια αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ο οπίσθιος υποθάλαμος ευθύνεται για τις αντιδράσεις σε μια πτώση της θερμοκρασίας του σώματος. Πρόκειται για ένα θερμορρυθμιστικό κέντρο που εκτελεί χρέη «θερμοστάτη» [30]. Σε αυτόν φτάνουν πληροφορίες από ορισμένους αισθητικούς υποδοχείς, τους λεγόμενους θερμοϋποδοχείς. Υπάρχουν οι κεντρικοί υποδοχείς, οι οποίοι ελέγχουν τη θερμοκρασία του αίματος στον εγκέφαλο και οι περιφερειακοί υποδοχείς που βρίσκονται στο δέρμα και ελέγχουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Το ανθρώπινο σώμα παράγει συνεχώς θερμότητα λόγω του μεταβολισμού των κυττάρων. Κατά τη διαδικασία αυτή, η οποία ονομάζεται και κυτταρική αναπνοή, η βιοχημική ενέργεια από την τροφή μετατρέπεται σε χημική ενέργεια (τριφωσφορική αδενοσίνη – ATP) και θερμική ενέργεια [25]. Σε κατάσταση ηρεμίας το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας προέρχεται από τα εσωτερικά όργανα (περίπου 50%) και το υπόλοιπο από τον εγκέφαλο, τον σκελετό, το δέρμα και φυσικά από τους σκελετικούς μύες [24]. Κατά την άσκηση η συνεισφορά των σκελετικών μυών στην παραγόμενη θερμότητα μπορεί να φτάσει το 90%. Αυτό συμβαίνει λόγω της περιορισμένης ικανότητας του σώματος στην παραγωγή μηχανικού έργου (περίπου 20 – 30%), με αποτέλεσμα η υπόλοιπη ενέργεια (70 – 80 %) να δαπανάται εμφανιζόμενη υπό μορφή θερμότητας. Λόγω του γεγονότος ότι το σώμα έχει περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και με σκοπό τη διατήρηση της προαναφερθείσας

θερμικής ισορροπίας, όταν η θερμοκρασία του πυρήνα αυξάνεται, η θερμότητα η οποία πλησιάζει στο δέρμα μπορεί να μεταφερθεί στο περιβάλλον με τους ακόλουθους φυσικούς μηχανισμούς [25]:

Μεταγωγή

Η μεταγωγή μπορεί να χωριστεί σε δυο φάσεις. Η πρώτη είναι η αγωγή κατά την οποία η θερμότητα μεταφέρεται από το σώμα σε ένα άλλο σώμα ή μέσο με το οποίο υπάρχει φυσική επαφή [27]. Το ποσό της ανταλλασσόμενης θερμότητας εξαρτάται από την επιφάνεια και τη θερμική αγωγιμότητα του εκάστοτε μέσου. Η θερμότητα φτάνοντας στην επιφάνεια του δέρματος από το εσωτερικό του σώματος μεταφέρεται στον αέρα ή στον ιματισμό που έρχεται σε άμεση μοριακή επαφή με το δέρμα. Η δεύτερη φάση είναι η μεταφορά των μορίων του μέσου το οποίο έχει θερμανθεί και εφάπτεται του δέρματος [25, 28]. Αν το μέσο αυτό είναι ο αέρας, και με την παραδοχή ότι είναι πιο ψυχρός από το δέρμα, τότε με την διαρκή κίνησή του τα θερμά μόρια πλησίον της επιφάνειας του δέρματος απομακρύνονται και τη θέση τους καταλαμβάνουν νέα ψυχρότερα. Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται η απαγωγή θερμότητας από το σώμα. Σε κατάσταση ηρεμίας ο μηχανισμός της μεταγωγής συνεισφέρει κατά 20 % στην συνολική απώλεια θερμότητας, ενώ κατά την άσκηση το αντίστοιχο ποσοστό είναι περίπου 15%.

Εξάτμιση

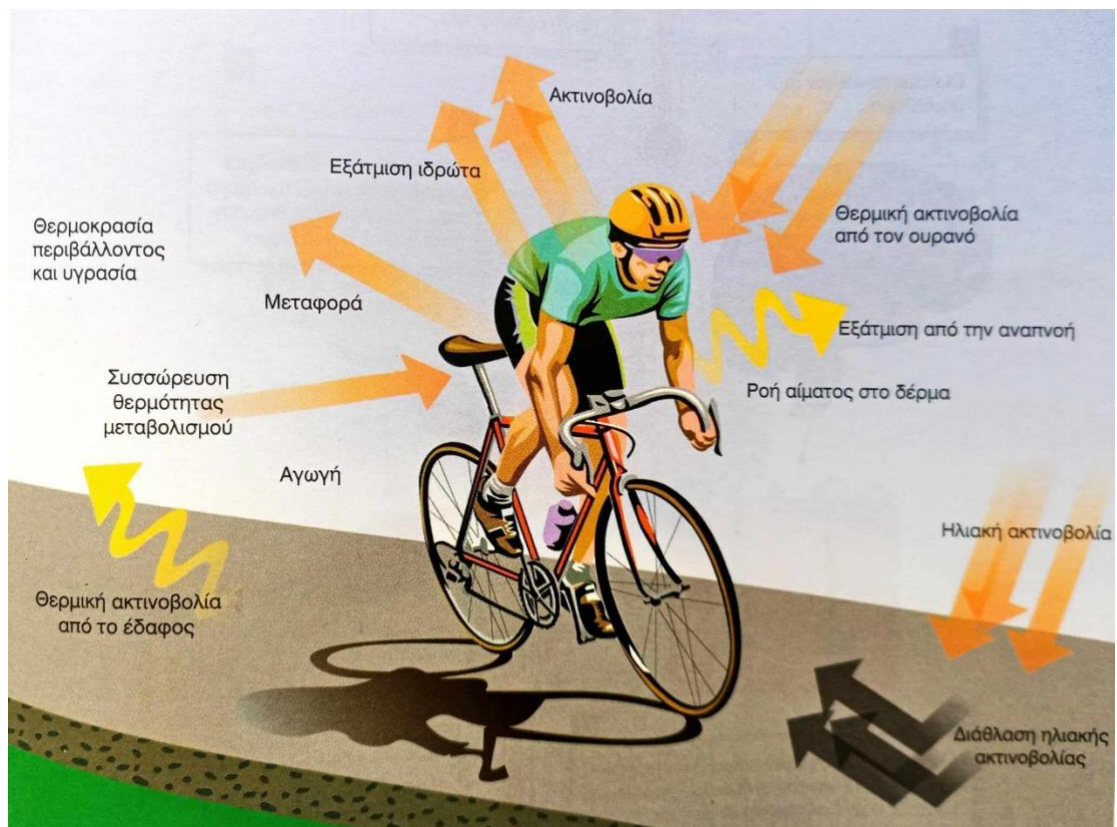
Εξάτμιση είναι η αλλαγή της κατάστασης μιας ουσίας από την υγρή στην αέρια μορφή. Πρόκειται για το κύριο μέσο αποβολής θερμότητας κατά τη σωματική άσκηση με ποσοστό που αντιστοιχεί στο 80% της συνολικής θερμότητας που αποβάλλεται. Σε κατάσταση ηρεμίας το ποσοστό αυτό πέφτει στο 20% [29].

Όταν το θερμό αίμα φτάσει στην επιφάνεια του δέρματος, το δέρμα θερμαίνεται. Τα μόρια του ιδρώτα, τα οποία εκκρίνονται από τους ιδρωτοποιούς αδένες, απορροφούν τη θερμική ενέργεια και εξατμίζονται στον περιβάλλοντα αέρα. Όταν το περιβάλλον έχει υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του δέρματος, η μόνη μορφή μεταφοράς θερμότητας που έχει την ικανότητα να δροσίσει το σώμα είναι η εξάτμιση. Η διαδικασία απομάκρυνσης της θερμότητας από το σώμα μέσω της εξάτμισης των μορίων του ιδρώτα γίνεται όλο και πιο δύσκολη όσο αυξάνεται η υγρασία του περιβάλλοντος.

Ακτινοβολία

Ένα σώμα σε ηρεμία, ευρισκόμενο σε θερμοκρασία δωματίου ($21^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$), χάνει περίπου το 60% της περισσευόμενης θερμότητάς του μέσω της ακτινοβολίας. Κατά την άσκηση το ποσοστό της θερμότητας που αποβάλλεται από το σώμα υπό μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι περίπου 5%. Το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει διαρκώς θερμική ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φωτονίων) από το θερμό ανθρώπινο σώμα προς ένα ψυχρότερο σώμα ή περιβάλλον. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την έκθεση μας σε μια πηγή θερμότητας, όπως οι ακτίνες του ήλιου, η φωτιά ή ένα θερμαντικό σώμα. Στην περίπτωση αυτή σε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C το 80 % της θερμότητας που προσλαμβάνουμε είναι υπό τη μορφή ακτινοβολίας [23,25]. Η ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιου μέσου διάδοσης και λαμβάνει χώρα χωρίς καμία φυσική επαφή [31].

Οι διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον, οι οποίες αναλύθηκαν παραπάνω, φαίνονται σχηματικά στην εικόνα 4 :



Εικόνα 4. Μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας - θερμορύθμιση

Η σωματική άσκηση αποτελεί μια πρόκληση για την ομοιόσταση και προκαλεί σύνθετες θερμορυθμιστικές διαδικασίες με σκοπό την αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα είναι ανάλογη της άσκησης. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο στη θερμοκρασία του δέρματος καθώς εκείνη σχετίζεται κυρίως με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την ικανότητα απώλειας θερμότητας. Η προσοχή των ερευνών σχετικά με την κόπωση και την αύξηση των επιδόσεων στον αθλητισμό έχει κατά κύριο λόγο στραφεί προς τους παράγοντες που αφορούν το κρύο, τη ζέστη και την αυξημένη θερμοκρασία του πυρήνα του σώματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι η κόπωση κατά τη σωματική άσκηση δε σχετίζεται μόνο με την αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα αλλά και με τη θερμοκρασία του δέρματος με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μέτρησή της [137, 138]. Τα τελευταία χρόνια, η ερευνητική προσοχή έχει στραφεί περισσότερο στη μελέτη της θερμικής ισορροπίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντός του [136].

2. Θερμική εκπομπή και φυσικοί νόμοι

2.1 Τα σώματα εκπέμπουν θερμότητα

Οι έννοιες της θερμότητας και της θερμοκρασίας τείνουν να συγχέονται πολλές φορές, ενώ είναι στην πραγματικότητα διακριτές. Θερμότητα είναι η ενέργεια, η οποία περνά από ένα σώμα (ή σημείο του σώματος) υψηλότερης θερμοκρασίας, όπου τα μόρια του κινούνται γρήγορα, σε έναν άλλο σώμα (ή μια άλλη περιοχή-σημείο του ίδιου σώματος) χαμηλότερης θερμοκρασίας όπου τα μόριά του κινούνται αργά. Μονάδα μέτρησης της θερμότητας είναι το joule (J) και για τον προσδιορισμό της ροής της θερμότητας στη μονάδα του χρόνου χρησιμοποιούνται τα Watt (W) ή τα joule/s. Η θερμότητα, δηλαδή, είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία ρέει και το αποτέλεσμα της ροής αυτής είναι η μείωση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος από το οποίο ξεκινά και η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος ή του συστήματος στο οποίο μεταφέρεται [37, 38].

Αντιθέτως, η θερμοκρασία αποτελεί το μέτρο της εσωτερικής ενέργειας των σωμάτων. Αφορά αποκλειστικά και μόνο στην κατάσταση ενός σώματος και περιγράφει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του, τα οποία κινούνται συνεχώς και ατάκτως. Πρόκειται

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

για το φυσικό μέγεθος που περιγράφει πόσο θερμό ή ψυχρό είναι ένα σώμα. Υπάρχουν διάφορες κλίμακες βάσει των οποίων μετράται η θερμοκρασία, με τις πλέον επικρατέστερες να είναι η κλίμακα των βαθμών Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$), εκείνη των βαθμών Κέλβιν (K) και η κλίμακα των βαθμών Φαρενάιτ ($^{\circ}\text{F}$). Οι βαθμοί Κελσίου είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι στον κόσμο με την πλειονότητα των χωρών της γης να τους χρησιμοποιούν. Από την άλλη, η κλίμακα Φαρενάιτ, έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από την κλίμακα Κελσίου και χρησιμοποιείται κυρίως για μη επιστημονικούς σκοπούς, κατά βάση στον αγγλοσαξονικό κόσμο [37]. Η μαθηματική σχέση, με την οποία μπορούν να μετατραπούν οι βαθμοί $^{\circ}\text{F}$ σε βαθμούς $^{\circ}\text{C}$ είναι η ακόλουθη :

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9} \quad (1)$$

Παρ' όλα αυτά η θερμοκρασία στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) υπολογίζεται σε βαθμούς Κέλβιν (K). Η κλίμακα Κέλβιν ονομάζεται απόλυτη διότι σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής δεν είναι δυνατόν να υπάρχει σώμα με θερμοκρασία μικρότερη των 0 K [39]. Η σχέση η οποία συνδέει τους βαθμούς $^{\circ}\text{C}$ με τους βαθμούς K είναι η εξής :

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15 \quad (2)$$

Η κλίμακα Κέλβιν χρησιμοποιείται σε όλες τις πτυχές της φυσικής της θερμογραφίας ανεξάρτητα από το αν ο χρήστης μιας θερμοκάμερας επιλέγει να βλέπει τις θερμοκρασίες μιας λήψης σε βαθμούς Κελσίου.

Όλα τα σώματα, των οποίων η θερμοκρασία βρίσκεται πάνω από το απόλυτο μηδέν ($0\text{K} = -273,15^{\circ}\text{C}$), εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η ενέργεια της οποίας σύμφωνα με τον νόμο των Stefan-Boltzmann, είναι και ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας τους. Τα αντικείμενα όμως δεν εκπέμπουν μόνο ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και απορροφούν από το περιβάλλον τους. Όταν ένα σώμα διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή, τότε η θερμική ενέργεια που εκπέμπει είναι ίση με τη θερμική ενέργεια που απορροφά από το περιβάλλον του. Τότε το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Αν ένα σώμα έχει μικρότερη ή μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντός του, τότε η τιμή της μεταφερόμενης θερμότητας αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ της εκπεμπόμενης και της απορροφούμενης, από αυτό, θερμικής ακτινοβολίας.

Το ανθρώπινο σώμα έχει, συνήθως, μεγαλύτερη θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντός του. Ωστόσο απορροφά θερμότητα όταν εκτίθεται στο ήλιο [40], όταν το περιβάλλον του είναι θερμό, όταν βρεθεί κοντά σε κάποια πηγή θερμότητας (όπως η φωτιά) ή όταν είναι σε κοντινή απόσταση ένα θερμότερο αντικείμενο [41]. Στη θερμογραφία ανιχνεύεται η μεταφορά θερμότητας μέσω της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας των σωμάτων, η οποία τελικά μεταφράζεται σε τιμές θερμοκρασίας. Χαρτογραφείται δηλαδή ένα σώμα σε μια δεδομένη στιγμή ως προς τις θερμοκρασίες της επιφάνειάς του. Τα φαινόμενα της μεταφοράς και της αγωγής, τα οποία αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λήψη ενός θερμογραφήματος, καθώς αποτελούν παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη θερμοκρασία του δέρματος και κατά συνέπεια την εκπεμπόμενη από αυτό ακτινοβολία.

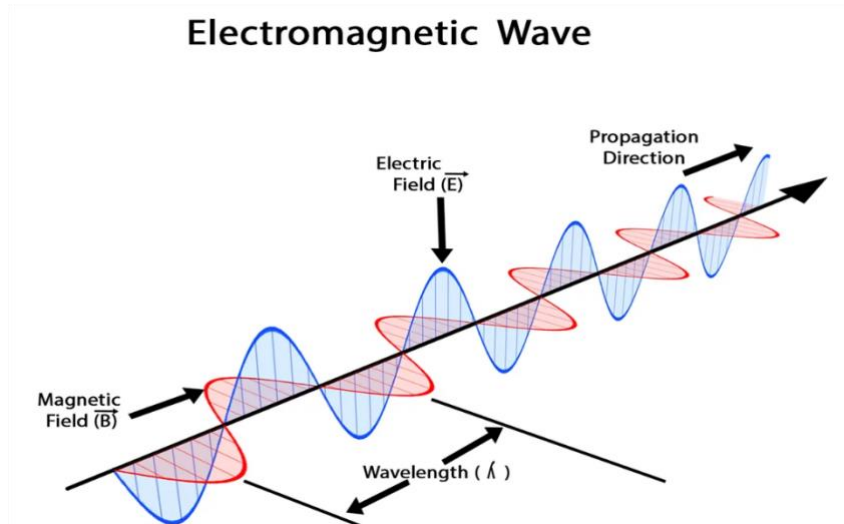
Όπως θα δούμε στο επόμενο υπο κεφάλαιο (2.2), το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει στην περιοχή του υπέρυθρου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και η ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από αυτό καλείται θερμική [42].

2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και η υπέρυθρη ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ο συνδυασμός μιας ηλεκτρικής και μιας μαγνητικής διαταραχής η οποία διαδίδεται σε ένα υλικό μέσο ή στο κενό μεταφέροντας ενέργεια αλλά όχι μάζα ή φορτίο [43]. Το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνονται κάθετα τόσο μεταξύ τους, όσο και ως προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ενέργειας που παράγουν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 [37,44,45]. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξιδεύει στο κενό με την ταχύτητα του φωτός (2.998×10^8 m/s) υπό μορφή κυμάτων, τα οποία λέγονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Σε όλα τα υλικά η ταχύτητα αυτή είναι μικρότερη. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξιδεύει σε πακέτα ενέργειας τα οποία ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια [46].

Οι κυματικές ιδιότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας περιγράφονται με μεγέθη σχετικά με τη συχνότητα, το μήκος αλλά και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού [46]. Ως συχνότητα του κύματος ορίζεται ο αριθμός των ταλαντώσεων του κύματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο, στη μονάδα του χρόνου s^{-1} (Hz). Το αντίστροφο της συχνότητας είναι η περίοδος του κύματος η οποία εκφράζει τον χρόνο (σε δευτερόλεπτα) που χρειάζεται για να διέλθουν δυο διαδοχικά μέγιστα από ένα σταθερό

σημείο. Το μήκος κύματος (λ) εκφράζεται σε μονάδες απόστασης (μέτρα, εκατοστά, μικρόμετρα, νανόμετρα) και αποτελεί τη χωρική περίοδο του κύματος. Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δυο μεγίστων ή ελαχίστων του κύματος.



Εικόνα 5. Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος

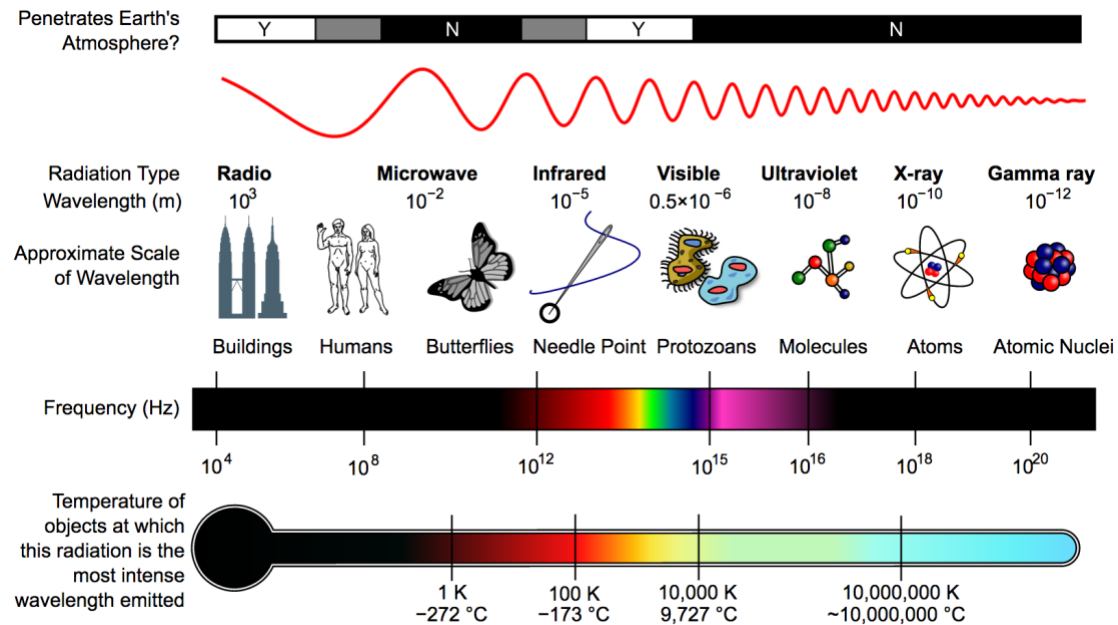
Η συχνότητα (f), το μήκος κύματος (λ) και η ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (c), δίνεται από την παρακάτω σχέση [47], η οποία αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, φαίνεται ότι η συχνότητα και το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη, με αποτέλεσμα όταν αυξάνεται η συχνότητα να μειώνεται το μήκος κύματος. Ανάλογα με τη συχνότητα και το μήκος κύματός της, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και πάνω στο γεγονός αυτό στηρίζεται η ύπαρξη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το φάσμα χωρίζεται σε περιοχές, των οποίων τα μήκη κύματος ονομάζονται διαφορετικά περιγράφοντας τις ξεχωριστές ιδιότητες της ακτινοβολίας σε κάθε τμήμα του φάσματος. Όλες οι ακτινοβολίες παράγονται εξαιτίας του ίδιου φαινομένου που δεν είναι άλλο από την επιτάχυνση ηλεκτρικών φορτίων. Λόγω αυτού τα όρια διαχωρισμού μεταξύ των ειδών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι αυστηρώς ορισμένα και δεν υπάρχει ένα σαφές σημείο το οποίο διαχωρίζει τη μια μορφή ακτινοβολίας με την επόμενη [48]. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 8 και

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

αναπαριστά την κατανομή των συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που το αποτελούν. Εκτείνεται από ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος και μικρής ενέργειας όπως τα μακρά κύματα, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το υπέρυθρο και το ορατό φως, έως ακτινοβολίες με μεγάλη ενέργεια και μικρό μήκος κύματος. Τέτοιες ακτινοβολίες κατά σειρά αυξανόμενης ενέργειας είναι η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα (γ) [49].



Εικόνα 6. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και τα είδη της ακτινοβολίας

Τα περισσότερα είδη ακτινοβολίας είναι γνωστά σε όλους. Τα ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται στις συσκευές των τηλεοράσεων και των ραδιοφώνων. Τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται στην εκπομπή επίγειου και δορυφορικού τηλεοπτικού σήματος, στο Wi-Fi (Wireless Fidelity), στους γνωστούς φούρνους μικροκυμάτων και σε αρκετές ακόμα εφαρμογές. Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι γνωστή για τις αρνητικές επιπτώσεις της στο δέρμα, ενώ οι ακτίνες X είναι πασίγνωστες για τις εφαρμογές τους στον τομέα της ιατρικής. Στην Εικόνα 9 φαίνονται ενδεικτικά διάφορες απεικονιστικές τεχνικές στο πεδίο της ιατρικής, κάθε μια από τις οποίες βασίζεται σε διαφορετικό είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης, η οποία στηρίζεται στην ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα. Αυτή η ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή του υπέρυθρου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

εκεί θα εστιάσουμε. Η υπέρυθρη ή αλλιώς θερμική ακτινοβολία έχει συχνότητα μικρότερη από εκείνη της ορατής ακτινοβολίας και τοποθετείται μεταξύ αυτής και των μικροκυμάτων στο φάσμα.

	Wavelength in meters		Imaging modality	Medical information
	Radio Wave 10^3		MRI image	<i>Anatomy</i> Edema, flow Chemical composition
	Microwave 10^{-2}		Ultrasound	<i>Anatomy</i> Tissue structure characteristics, flow
	Infrared 10^{-5}		Infrared Imaging	<i>Anatomy and Physiology</i> Surface temperature
	Visible Light 10^{-6}		Arthroscopy	<i>Anatomy</i> Intraarticular structure, inflammation
	Ultraviolet 10^{-8}		UV-radiation	<i>Healing/Therapy</i> Skin, chronic Inflammation
	X-Ray 10^{-10}		X-Ray	<i>Anatomy</i> Bone injuries
	Gamma ray 10^{-12}		Scintigraphy	<i>Physiology</i> Inflammation, metabolism of the bone

Εικόνα 7. Είδος ακτινοβολίας και απεικόνιση

Ακριβέστερα, αποτελεί την προέκταση του κόκκινου ορατού φωτός, από όπου πήρε και το όνομά της. Το μήκος κύματός της εκτείνεται μεταξύ των 760 nm (νανομέτρων) και του 1mm (χιλιοστού), περίπου και αντιστοιχεί σε ένα εύρος συχνοτήτων από 300 GHz έως 400 THz [50]. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας όμως, είναι σημαντικότερο το εύρος μηκών κύματος μέχρι τα 20 μm (μικρόμετρα).

Η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει τις εξής ιδιότητες, οι οποίες την χαρακτηρίζουν[83-85]:

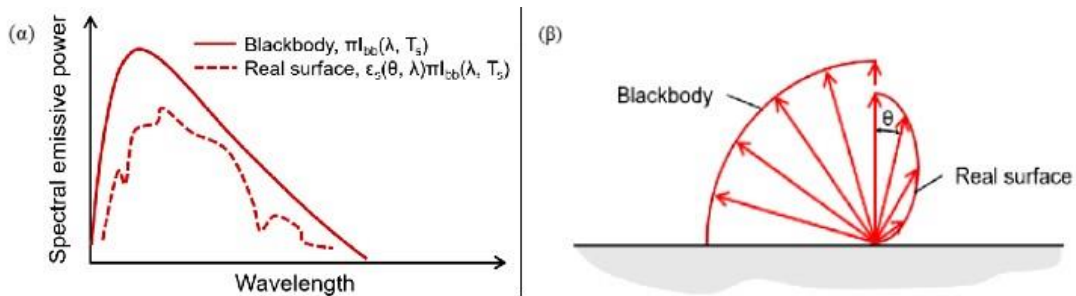
1. Περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος.

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

2. Το υπέρυθρο φως και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γενικότερα προέρχεται από σημεία όπου υπάρχει αλλαγή στην κίνηση των ηλεκτρονίων, έχει δηλαδή ηλεκτρονική προέλευση.
3. Εκπέμπεται από όλα τα σώματα με θερμοκρασία άνω του απόλυτου μηδενός, επιτρέποντας της μέτρηση θερμοκρασίας τους μέσω αυτής.
4. Διαδίδεται με ταχύτητα 299.792.458 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, υπό τη μορφή εγκαρσίων κυμάτων.
5. Είναι μη ιοντίζουσα ακτινοβολία όπως τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργειά της είναι μικρή και δεν μπορεί να ιονίσει τα μόρια ή τα άτομα της ύλης αφαιρώντας τους ηλεκτρόνια και διασπώντας βιολογικούς δεσμούς.
6. Παρουσιάζει χαρακτηριστικά των σωματιδίων επαληθεύοντας τη διττή της υπόσταση, αφού έχει τόσο κυματική όσο και σωματιδιακή φύση.
7. Μπορεί να απορροφηθεί ή να ανακλαστεί, όπως και η ακτινοβολία του ορατού φωτός, ανάλογα με τη φύση της επιφάνειας στην οποία θα προσπέσει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το διοξείδιο του άνθρακα, το όζον και οι υδρατμοί που την απορροφούν αποτελεσματικά.
8. Αποτελεί σημαντικό παράγοντα, ο οποίος επηρεάζει τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των σωμάτων, λόγω της θερμικής της ιδιότητας.
9. Έχει, όπως και το ορατό φως την ικανότητα να διαθλάται, αλλάζοντας κατεύθυνση όταν περνά από ένα μέσο σε άλλο μέσο διάδοσης διαφορετικής πυκνότητας.
10. Κατά τη συμβολή κυμάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας ίδιας συχνότητας, υπάρχει πιθανότητα να ενισχύσει ή να ακυρώσει το ένα το άλλο.

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Η θερμική ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται από τα σώματα παρουσιάζει μια φασματική κατανομή καθώς εμπεριέχει ένα εύρος μηκών κύματος. Επίσης, η θερμική εκπομπή μιας πραγματικής επιφάνειας, σε αντίθεση με το μέλαν σώμα (η έννοιά και οι ιδιότητές του αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο), παρουσιάζει ανομοιομορφία ως προς τη διεύθυνση διάδοσής της [86, 87]. Η φασματική και η κατευθυντική κατανομή ενός ιδανικού (μέλανος) σώματος και μιας πραγματικής επιφάνειας φαίνονται στα σχήματα (α) και (β) αντίστοιχα, στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 8. Φασματική (α) και Κατευθυντική (β) κατανομή ακτινοβολία ιδανικού και πραγματικού σώματος

Η θερμοκρασία ενός σώματος εκφράζει τη μέση κινητική ενέργειά του και σχετίζεται άμεσα με την θερμική ακτινοβολία την οποία εκπέμπει. Πιο συγκεκριμένα οι αλλαγές στην ταχύτητα και την κίνηση των μορίων ενός σώματος συνεπάγονται την εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας [51]. Η σχέση αυτή εξηγεί το γιατί μπορούμε μέσω της μέτρησης της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία της. Ωστόσο, δεν είναι πάντοτε στο φάσμα του υπέρυθρου η ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα. Όταν η θερμοκρασία ενός σώματος είναι πολύ υψηλή τότε αυτό μπορεί να εκπέμπει στο φάσμα του ορατού ή και του υπεριώδους. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα σώματα θερμαίνονται κατά την απορρόφηση της ακτινοβολίας τους. Παρ' όλα αυτά όταν ένα σώμα έχει θερμοκρασία κοντά σε εκείνη του περιβάλλοντός του, η ενέργεια που ακτινοβολεί βρίσκεται στο τμήμα του υπέρυθρου του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [52].

Το υπέρυθρο φάσμα ή IR υποδιαιρείται σε τέσσερα τμήματα: το εγγύς υπέρυθρο το οποίο βρίσκεται κοντά στο ορατό φως με μήκος κύματος από 780nm έως 3000nm, το ενδιάμεσο με μήκος κύματος από 3000nm έως 6000nm, το απώτερο με μήκος κύματος από 6000nm έως 15000nm και το μακρύ υπέρυθρο, το οποίο έχει μήκος κύματος

μεταξύ 15000nm και 1mm. Η υποδιαίρεση αυτή γίνεται γιατί τα αντικείμενα εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία σε κάποια περιοχή σε αντίθεση με τις υπόλοιπες. Το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει από τα 3000nm ασθενικά, η εκπομπή του κορυφώνεται στα 10000nm, στην περιοχή του απώτερου υπέρυθρου και από εκεί και πέρα η πορεία του φθίνει έως το μακρύ υπέρυθρο, ενώ μετά από αυτό η ακτινοβολία που εκπέμπει είναι αμελητέα. Άλλα υλικά είναι μη ανιχνεύσιμα στο μακρύ υπέρυθρο, καθώς εκπέμπουν στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου. Εξαιτίας αυτών των διαφορών υπάρχουν διαφορετικές κάμερες για την ανίχνευση συγκεκριμένου εύρους μηκών κύματος [53]. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κάμερες είναι εκείνες που έχουν ανιχνευτές για το απώτερο υπέρυθρο στο οποίο εκπέμπουν τα περισσότερα σώματα συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων. Υπάρχουν βέβαια κάμερες οι οποίες ανιχνεύουν σε όλες τις περιοχές του υπέρυθρου, ενώ σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο συχνοτήτων με μήκος κύματος μεταξύ 5μm και 7,5 μm οι λήψεις είναι δύσκολες και σπάνιες γιατί η ατμόσφαιρα απορροφά τις ακτινοβολίες αυτές, με αποτέλεσμα ο αέρας να είναι αδιαφανής για τις κάμερες [52].

2.3 Φυσικοί νόμοι

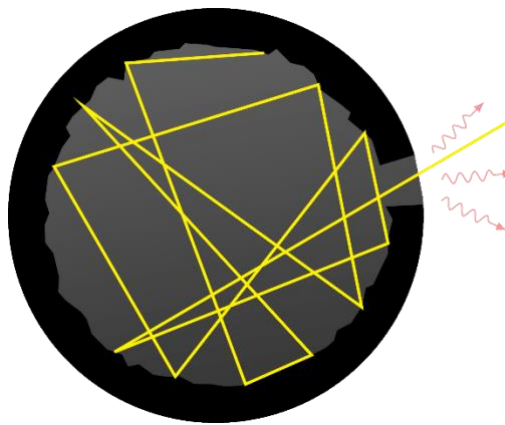
Εξ' αιτίας του φαινομένου της εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα σώματα, αναπτύχθηκε η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας. Οι φυσικοί νόμοι, οι οποίοι διέπουν το φαινόμενο της θερμικής ακτινοβολίας και συνδέουν την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα με τη θερμοκρασία του βασίζονται στη θεωρία του μέλανος σώματος. Το μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό, ιδανικό σώμα, το οποίο θεωρείται τέλειος απορροφητής και εκπομπός ακτινοβολίας [39, 53, 54]. Η έννοιά του εισήχθη από τον Γερμανό φυσικό Γκούσταβ Κίρχοφ (Gustav Kirchhoff) το έτος 1860. Αυτό το σώμα έχει την ικανότητα να απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία, χωρίς εκείνη να μπορεί να το διαπεράσει, να ανακλαστεί ή να διαχυθεί σε αυτό [56]. Επίσης, το μέλαν σώμα έχει ομοιόμορφη επιφάνεια και θερμοκρασία και χαρακτηρίζεται από τις εξής τρεις ιδιότητες:

- 1) Απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανεξάρτητα της κατεύθυνσης και του μήκους κύματος της, ενώ εκπέμπει πιο πολύ για συγκεκριμένο μήκος κύματος και θερμοκρασία.

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

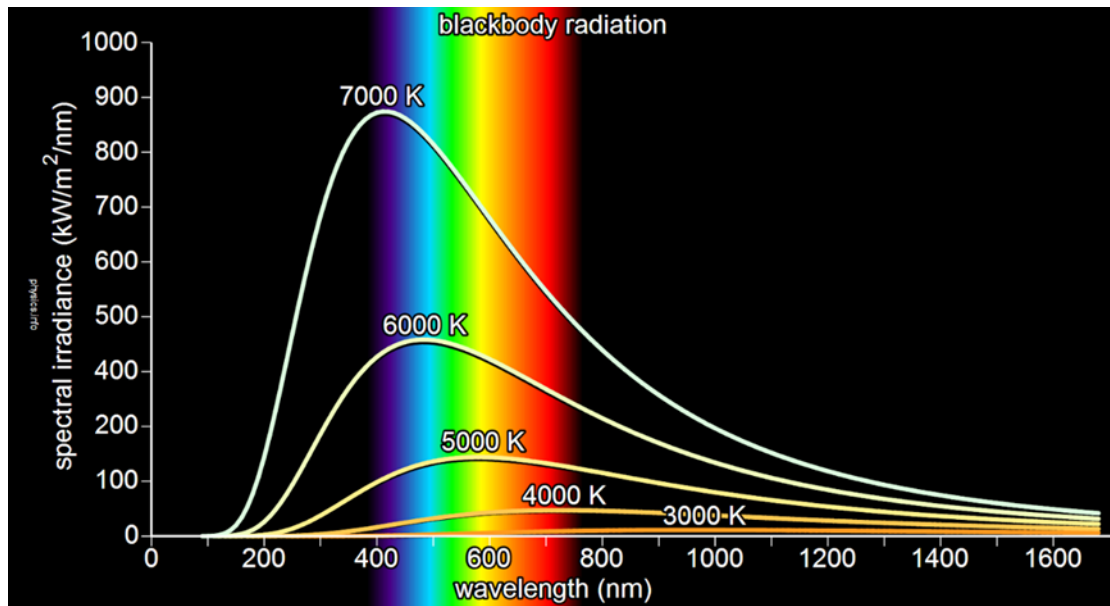
- 2) Για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν υπάρχει καμία επιφάνεια, η οποία εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από το αυτό.
- 3) Η ακτινοβολία του (εκπεμπόμενη) δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση, αλλά από το μήκος κύματος, ενώ στο κενό η ολική του ακτινοβολία εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τη θερμοκρασία του.

Στην πράξη, ένα τέλειο μέλαν σώμα, μπορεί να περιγραφεί ως μια κοιλότητα της οποίας τα τοιχώματα έχουν ομοιόμορφη και σταθερή θερμοκρασία και η ύπαρξη μιας πολύ στενής οπής επιτρέπει την επικοινωνία του εσωτερικού της κοιλότητας με το εξωτερικό της περιβάλλον. Αν υποθέσουμε ότι εισέρχεται ακτινοβολία δια μέσου της οπής στην κοιλότητα, ένα μέρος αυτής θα απορροφηθεί άμεσα ενώ η υπόλοιπη θα ανακλάται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων, μη μπορώντας να εξέλθει από την οπή, έως ότου απορροφηθεί πλήρως και αυτή. Αν τα τοιχώματα έχουν αποκτήσει ομοιόμορφη και υψηλή θερμοκρασία τότε θα εξέλθει από την οπή ακτινοβολία η οποία ονομάζεται ακτινοβολία μέλανος σώματος [57].



Εικόνα 9. Μέλαν σώμα

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός σώματος ποσοτικοποιείται και εκφράζεται, ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, ως συνολική ισχύς εκπομπής (E). Όμως η συνολική ισχύς εκπομπής δεν είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Έτσι, υπάρχει και η φασματική εκπεμπόμενη ισχύς (E_λ) η οποία εκφράζει τη συνολική εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας και εύρους μήκους κύματος. Η φασματική ισχύς εκπομπής του μέλανος σώματος για κάθε μήκος κύματος, σε διαφορετικές θερμοκρασίες, φαίνεται στη γραφική παράσταση της εικόνας 12.



Εικόνα 10. Φασματική ισχύς εκπομπής του μέλανος σώματος συναρτήσεως του μήκους κύματος για διάφορες θερμοκρασίες

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το μέλαν σώμα εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα ανάλογα με τη θερμοκρασία του. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία των σωμάτων, τόσο αυξάνεται το ποσοστό της εκπεμπόμενης, από αυτά ακτινοβολίας, στην περιοχή του υπέρυθρου. Έτσι, ένα μέλαν σώμα, του οποίου η θερμοκρασία βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία δωματίου, εκπέμπει όλη την ακτινοβολία του στο εύρος του υπέρυθρου. Το ανθρώπινο σώμα έχει θερμοκρασία περίπου 37°C (310,15 K) [58] και εκπέμπει ακτινοβολία με κορύφωση στο μήκος κύματος των 10μm, κάτι που σημαίνει πως το 90% της ολικής ακτινοβολίας βρίσκεται στην περιοχή του απώτερου υπέρυθρου. Η συμπεριφορά του ανθρώπινου σώματος μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά εκείνη του μέλανος σώματος. Το ανθρώπινο σώμα μέσω των ομοιοστατικών μηχανισμών του καταφέρνει να διατηρήσει την εσωτερική του θερμοκρασία σταθερή εκπέμποντας θερμότητα με συντελεστή 0,98 έναντι του ιδανικού μέλανος σώματος το οποίο έχει συντελεστή εκπεμπτικότητας $\epsilon = 1$, δηλαδή εκπέμπει όλη την απορροφούμενη ενέργεια χωρίς καμία απολύτως απώλεια. Τα υπόλοιπα αντικείμενα έχουν συντελεστή μικρότερο της μονάδας [60, 61].

Όσο υψηλότερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα, τόσο μεγαλύτερη ένταση έχει η θερμική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από αυτό. Όταν η θερμική ακτινοβολία συναντά την ύλη υπάρχουν τρία πιθανά ενδεχόμενα: να ανακλαστεί, να απορροφηθεί ή να διαπεράσει το σώμα στο οποίο προσέπεσε [80]. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$F_i = F_r + F_a + F_t$$

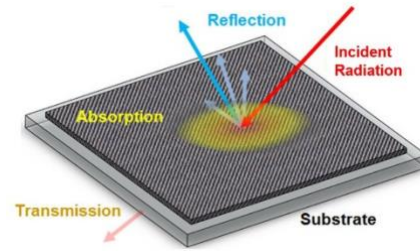
όπου,

F_i , προσπίπτουσα ακτινοβολία

F_r , ανακλώμενη ακτινοβολία

F_a , ακτινοβολία η οποία απορροφήθηκε

F_t , ακτινοβολία η οποία διαπέρασε το σώμα



Εικόνα 11. Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με το υλικό μιας επιφάνειας

Από τα παραπάνω προκύπτει ο συντελεστής απορρόφησης $a = \frac{F_a}{F_i}$, ο συντελεστής ανάκλασης $\rho = \frac{F_r}{F_i}$, και ο συντελεστής διαπερατότητας $\tau = \frac{F_t}{F_i}$. Οι τρεις αυτοί συντελεστές είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι του μηδενός και μικρότεροι ή ίσοι της μονάδας και ισχύει:

$$a + \rho + \tau = 1 \quad (4)$$

Στην περίπτωση του μέλανος σώματος ($\rho = 0$ και $\tau = 0$), το οποίο είναι τέλειος απορροφητής και εκπομπός ο συντελεστής απορρόφησης ισούται με τον συντελεστή εκπομπής, δηλαδή $a = \varepsilon$ [92].

Η θεωρητική ερμηνεία των καμπυλών, οι οποίες εκφράζουν την φασματική ισχύ εκπομπής συναρτήσει της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος ή άλλων σωμάτων, δεν είχε γίνει μέχρι το 1900. Η ερμηνεία αυτή ήταν πρωτοποριακή για την εποχή εκείνη καθώς βασιζόταν σε φαινόμενα τα οποία περιγράφονται με τη βοήθεια όχι της κλασικής αλλά της σύγχρονης φυσικής και της κβαντομηχανικής. Παρ' όλα αυτά οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη θερμογραφία είχαν θεσπιστεί αρκετά χρόνια πριν [39]. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις οι οποίες συνδέουν την απόλυτη θερμοκρασία ενός αντικειμένου με το μήκος κύματος και την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας δίνονται από τους νόμους του Planck, τον νόμο μετατοπίσεως του Wien και τον νόμο των Stefan-Boltzmann.

Η αποτυχία της κλασικής φυσικής και η κβαντική θεωρία του Planck

Μέχρι το 1900 η ακτινοβολία του μέλανος σώματος αποτελούσε ένα πειραματικό φαινόμενο, το οποίο η κλασική φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει επαρκώς. Οι προσπάθειες από την κλασική θεωρία, να εξηγηθεί ή να υπολογιστεί η φασματική κατανομή ισχύος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ήταν αποτυχημένες. Οι Rayleigh και Jeans, στηριζόμενοι σε αρχές της κλασικής φυσικής και στη συνάρτηση φασματικής κατανομής, διατύπωσαν μια θεωρία με σκοπό να ερμηνεύσουν την ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Σύμφωνα με αυτή η ένταση σε μικρά μήκη κύματος θα πρέπει να φτάνει στο άπειρο, ενώ στην πραγματικότητα συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο, πέφτει στο μηδέν. Μεταξύ θεωρίας και πειράματος δεν υπήρξε συμφωνία στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος του μέλανος σώματος και το αποτέλεσμα των Rayleigh-Jeans ονομάστηκε «υπεριώδης καταστροφή» [59, 62].

Η αδυναμία της κλασικής φυσικής να ερμηνεύσει το φάσμα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, οδήγησε τον Γερμανό φυσικό Max Planck να καταλήξει σε μια «πράξη απελπισίας», όπως είχε δηλώσει, με σκοπό να δώσει μια θεωρητική εξήγηση [63,64]. Αναγκάστηκε να αμφισβητήσει την καθολικότητα του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου θεωρώντας την ισχύ του στατιστική και να υιοθετήσει την άποψη πως η ενέργεια ταλάντωσης την ατόμων παρουσιάζει ασυνέχεια έχοντας διακριτές τιμές. Η στοιχειώδης ποσότητα ενέργειας την οποία θα μπορούσε να έχει ο ταλαντωτής πήρε την ονομασία κβάντο και μπορεί να οριστεί απλούστερα ως το μικρότερο διακριτό «πακέτο» (κβάντο) ενέργειας. Επομένως, η ενέργεια μπορεί να κερδηθεί ή να χαθεί μόνο σε ακέραια πολλαπλάσια της στοιχειώδους ποσότητας ενέργειας που δεν είναι άλλη από το κβάντο. Η ενέργεια κάθε κβάντου υπολογίζεται από τη σχέση (5) :

$$E = nhf \quad , n = 1, 2, 3... \quad (5)$$

Όπου,

E, ενέργεια

n, ακέραιος αριθμός

h, η σταθερά του Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$)

f, η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή σε Hz ή s^{-1}



Εικόνα 12. Max Planck

Με βάση αυτές τις θεωρήσεις για κάθε θερμοκρασία υπάρχει μια μέγιστη ένταση ακτινοβολίας για το μέλαν σώμα, ενώ στο φάσμα εκπομπής του η ένταση δεν ακολουθεί μια ομαλή καμπύλη καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, όπως θα περιμέναμε να δούμε αν εξετάζαμε το φαινόμενο υπό την οπτική της κλασικής φυσικής. Σύμφωνα με τον Max Planck και όπως επιβεβαιώνεται από τον νόμο που πήρε το όνομά του, ο κίνδυνος της υπεριώδους ακτινοβολίας των Rayleigh και Jeans καταρρίφθηκε καθώς η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υφίσταται αποκλειστικά με τη μορφή κβάντων και είναι ανάλογη της συχνότητας την οποία έχουν [65, 66,67].

Οι υποθέσεις του Planck, τις οποίες απρόθυμα εξέφρασε στις 14 Δεκεμβρίου 1900 και που ακόμα και ο ίδιος δυσκολευόταν να πιστέψει, έμελλαν να αποτελέσουν την εναρκτήριο γραμμή στο ταξίδι της εξερεύνησης της κβαντικής φυσικής.

2.3.1 Νόμος του Planck

Με την παραδοχή ότι η ακτινοβολία μεταδίδεται σε κβάντα, ο νόμος αυτός εκφράζει τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα συναρτήσει του μήκους κύματος (σε μέτρα – m) και της θερμοκρασίας του σε βαθμούς K (Kelvin) ως εξής [68 - 70]:

$$E_{b,\lambda(\lambda,T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [exp(hc/\lambda k_B T) - 1]} \quad (6)$$

Όπου,

$E_{b,\lambda}(\lambda, T)$, η ισχύς εκπομπής της ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος (λ) και της θερμοκρασίας (T), ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα διαστήματος στην περιοχή μήκους κύματος λ , $Wcm^{-2} \mu m^{-1}$

π , μαθηματική σταθερά με τιμή 3,14159

h , η σταθερά του Planck, 6.6256×10^{-34} Js

k_B , η σταθερά Boltzmann, $1,380649 \times 10^{-23}$ J/K

c , η ταχύτητα του φωτός στο κενό, 299.792.458 m/s, προσεγγιστικά 3×10^8 m/s

T, η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin

Από τον νόμο του Planck (σχέση 5) απορρέουν τα ακόλουθα:

1. Όταν το μήκος κύματος είναι σταθερό, η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της ακτινοβολίας.
2. Η ισχύς της ακτινοβολία εξαρτάται από το μήκος κύματος της
3. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η ακτινοβολία εμφανίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος

2.3.2 Νόμος μετατόπισης του Wien

Ο νόμος μετατόπισης του Wien θεσπίστηκε το έτος 1893 από τον Γερμανό φυσικό Wilhelm Wien, ο οποίος μερικά χρόνια αργότερα (1911) τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για τις ανακαλύψεις του σχετικά με τους φυσικούς νόμους, οι οποίοι διέπουν τη θερμική ακτινοβολία [71].

Σύμφωνα με τη φύση του φάσματος της θερμικής ακτινοβολίας, η κατανομή που παρουσιάζει το μέλαν σώμα έχει μια μέγιστη τιμή μήκους κύματος λ_{max} , η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος [72]. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μήκους κύματος της κορυφής στην καμπύλη της ακτινοβολίας του [73]. Αυτό αποτυπώνεται στην εξίσωση του νόμου μετατόπισης του Wien, η οποία έχει ως εξής:

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T} \quad (7)$$

Όπου,

λ_{max} , το μήκος κύματος της κορυφής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε μέτρα (m)

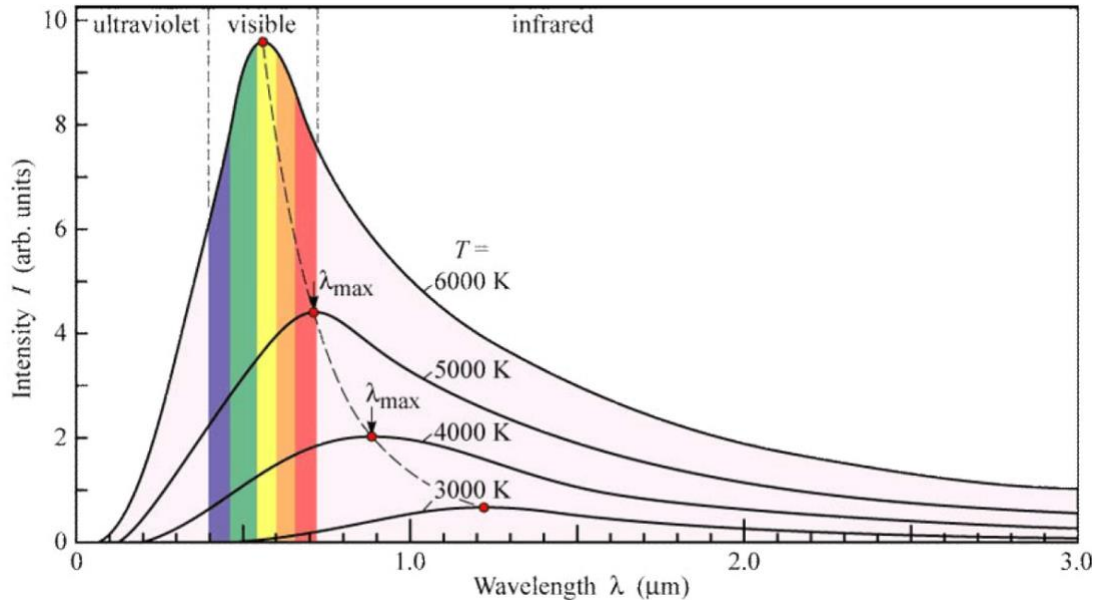
a, η σταθερά μετατόπισης του Wien, 2.897×10^{-3} m K

T, η απόλυτη θερμοκρασία σε Κέλβιν

Από τη σχέση (7) είναι εμφανές ότι το μήκος κύματος, το οποίο αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος ακτινοβολίας του μέλανος σώματος (λ_{max}), είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόλυτης θερμοκρασίας του.

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Η μετατόπιση του μεγίστου της ισχύος στη φασματική κατανομή του μέλανος σώματος, ανάλογα με την θερμοκρασία του, αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα της εικόνας 15.



Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση του νόμου μετατόπισης του Wien

2.3.3 Νόμος των Stefan-Boltzmann

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann, ανακαλύφθηκε από τον Josef Stefan το 1879 [74], ο οποίος στηρίχθηκε στις πειραματικές μετρήσεις του John Tyndall, οι οποίες είχαν παρουσιαστεί το 1864 και αφορούσαν τη μέτρηση υπέρυθρης εκπομπής από το νήμα μιας πλατίνας σε συνδυασμό με το χρώμα αυτού [75 – 77]. Η θεωρητική ερμηνεία του νόμου βασίστηκε στη θεωρία της θερμοδυναμικής, στο έργο του Ιταλού φυσικού Adolfo Bartoli και εκφράστηκε από τον Αυστριακό θεωρητικό φυσικό και φιλόσοφο Ludwig Boltzmann το 1884 [78]. Ο νόμος αυτός εκφράζει ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια ή αλλιώς, η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα, ανά μονάδα επιφάνειας, είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας T του σώματος και δίνεται από τη σχέση :

$$E_b = \int_0^{\infty} E_b(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Αν εκτελεστεί το παραπάνω ολοκλήρωμα, προκύπτει η μαθηματική σχέση (9), η οποία συνδέει άμεσα τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος με τη συνολική ισχύ εκπομπής [79] :

$$E_b = \sigma T^4 \quad (9)$$

Όπου,

E_b , η αφετική ικανότητα, η οποία εκφράζει πυκνότητα ισχύος (είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, μονάδα μέτρησης $J/s/m^2$ ή W/m^2)

σ , η σταθερά Stefan-Boltzmann, $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5670400 \times 10^{-8} W / m^{-2} K^{-4}$

T , η απόλυτη θερμοκρασία

Η σχέση 8 αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του νόμου των Stefan-Boltzmann και μας επιτρέπει τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος, η οποία εκπέμπεται προς πάσα κατεύθυνση και για όλα τα μήκη κύματος αυτής. Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς ακτινοβολίας ενός σώματος είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μια ελάχιστη μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος μεταφράζεται σε μια πολύ μεγαλύτερη ισχύ εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει τη διαφοροποίηση γειτονικών περιοχών ενός σώματος λόγω μιας μικρής διαφοράς θερμοκρασίας η οποία μπορεί να ανιχνευτεί εξαιτίας της διαφορετικής εκπεμπόμενης ισχύος κάθε περιοχής. Ο νόμος των Stefan-Boltzmann μπορεί να θεωρηθεί επάξια ως ο θεμελιώδης νόμος που διέπει την υπέρυθρη θερμογραφία.

Για τη θερμοκρασιακή χαρτογράφηση πραγματικών επιφανειών ο παραπάνω νόμος τροποποιείται με την εισαγωγή του συντελεστή ϵ ως εξής:

$$E_{b0} = \sigma \epsilon T^4 \quad (10)$$

Ο συντελεστής ϵ , λέγεται συντελεστής εκπομπής και είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ο οποίος εκφράζει το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπει μια επιφάνεια προς την ακτινοβολία που θα εξέπεμπε το μέλαν σώμα αν είχε την ίδια θερμοκρασία με την επιφάνεια αυτή [80]. Για το μέλαν σώμα ο συντελεστής αυτός έχει τιμή 1, η οποία είναι και η μέγιστη που μπορεί να λάβει, ενώ για οποιοδήποτε άλλο σώμα η τιμή αυτή είναι μικρότερη της μονάδας. Όπως προαναφέρθηκε, το ανθρώπινο δέρμα έχει συντελεστή

εκπομπής 0,98, προσεγγίζοντας αρκετά τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος. Η πλειονότητα των υπέρυθρων καμερών όπως και των υπέρυθρων θερμομέτρων, με σκοπό τη μέτρηση θερμοκρασίας μιας επιφάνειας, χρησιμοποιούν την τροποποιημένη εξίσωση (9) των Stefan-Boltzmann [41, 81, 82].

3. Υπέρυθρη θερμογραφία

3.1 Ορισμός

3.1.1 Γενικός ορισμός

Η υπέρυθρη θερμογραφία ορίζεται ως η απεικονιστική τεχνική κατά την οποία ανιχνεύεται, με τη βοήθεια ειδικού εξοπλισμού η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία ενός αντικειμένου – σώματος και μεταφράζεται σε τιμή θερμοκρασίας του σημείου από το οποίο εκπέμφθηκε. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία εικόνων, οι οποίες παρουσιάζουν τη θερμοκρασιακή χαρτογράφηση της επιφάνειας του σώματος. Οι ληφθείσες εικόνες καλούνται θερμογραφήματα και καθιστούν τελικά εφικτή τη θέαση της θερμικής εικόνας ενός υλικού, μετατρέποντας το αόρατο για τον γυμνό οφθαλμό, σε ορατό. Η υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση χρησιμοποιείται κυρίως με σκοπό την παρακολούθηση ή την πρόγνωση κάποιας κατάστασης [88].

3.1.2 Ορισμός της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης στην ιατρική

Στην ιατρική, η υπέρυθρη θερμογραφία (InfraRed Thermography - IRT) αποτελεί μια γρήγορη, χωρίς επαφή, ανώδυνη, μη επεμβατική και χωρίς τη χρήση ιοντίζουσας ακτινοβολίας μέθοδο φωτογραφικής απεικόνισης των διαφόρων θερμοκρασιών της επιφάνειας του δέρματος [89]. Με τη θερμική απεικόνιση της επιφάνειας του ανθρώπινου σώματος μπορούν να ανιχνευτούν μικρές ή μεγαλύτερες αλλαγές στους υποκείμενους ιστούς, γεγονός που ενδέχεται να συνδέεται με αγγειακές, μεταβολικές, καθώς και νευρολογικές παθολογίες. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται σύγχρονες κάμερες θερμικής απεικόνισης, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην υπέρυθρη ακτινοβολία, παράγοντας θερμικές εικόνες υψηλής διακριτικής ικανότητας. Οι συσκευές αυτές ανιχνεύουν την εκπεμπόμενη, από την επιφάνεια του σώματος,

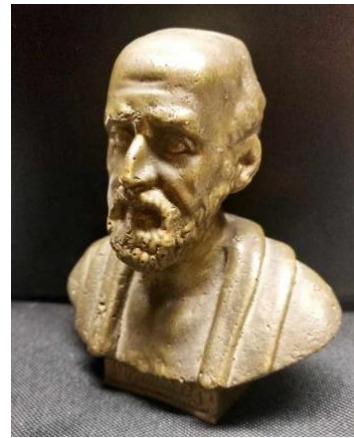
θερμική ακτινοβολία, η οποία είναι αόρατη για το ανθρώπινο οπτικό σύστημα, τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα και από αυτά δημιουργείται τελικά ένα θερμογράφημα, το οποίο αποτελεί εικαστική αναπαράσταση των θερμοκρασιών της επιφάνειας σε τόνους του γκρι ή σε διάφορες χρωματικές παλέτες. Η υπέρυθρη θερμογραφία, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής της διακρίνεται: σε ενεργητική θερμογραφία, όταν η λήψη γίνεται ύστερα από θερμική διέγερση, σε παθητική θερμογραφία, όταν δεν έχει προηγηθεί διέγερση, ενώ καλείται δυναμική όταν παρατηρείται επαναφορά της θερμοκρασίας στο πέραςμα του χρόνου, ύστερα από θερμική καταπόνηση [90, 91].

3.2 Ιστορική αναδρομή

Η συσχέτιση των ασθενειών και της θερμοκρασίας του σώματος είναι γνωστή εδώ και χιλιάδες χρόνια. Ο πυρετός ήταν, είναι και θα είναι από τα πρώτα συμπτώματα που μπορούν να παρατηρηθούν σε μια έγκαιρη ιατρική εξέταση και που ενδεχομένως σχετίζεται με κάποια παθολογική κατάσταση. Η σημασία της θερμοκρασίας στην ιατρική διάγνωση ήταν γνωστή ήδη από την εποχή του Ιπποκράτη, αλλά για αρκετούς αιώνες η μέτρησή της αποτελούσε περισσότερο μια υποκειμενική δεξιότητα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας με τη χρήση οργάνων ξεκίνησε να πραγματοποιείται από τον 16ο αιώνα και μετά. Για να γίνει εφικτή μια τέτοια μέτρηση θα έπρεπε με κάποιο τρόπο να υπολογιστεί η θερμότητα που αποβάλλει το σώμα και να μεταφραστεί στην τιμή της θερμοκρασίας του. Η μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα περιγράφηκε με σύγχρονους όρους στο υποκεφάλαιο 1.4 και περιλαμβάνει τις διαδικασίες της αγωγής και μεταφοράς, της εξάτμισης και της ακτινοβολίας. Τα πρώτα συστήματα μέτρησης εκμεταλλεύτηκαν την μεταφορά της θερμότητας από το δέρμα σε αυτά λόγω του φαινομένου της αγωγής. Η θερμική εκπομπή όμως υπό μορφή ακτινοβολίας για να ανιχνευτεί οδηγεί σε μεθόδους απομακρυσμένης ανίχνευσης. Η έλευση νέων τεχνολογιών τα τελευταία έτη έχει καταστήσει τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δέρματος εξ αποστάσεως ως μια σημαντική, ταχεία και εύκολη διαγνωστική μέθοδο για την ανίχνευση ασθενειών[55].

3.2.1 Η εξέλιξη των τεχνικών μέτρησης της Θερμοκρασίας του σώματος

Σύμφωνα με τον αρχαίο Έλληνα ιστορικό Ηρόδοτο (484–425 π.Χ.) οι πρώτες καταγεγραμμένες απόπειρες μέτρησης της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος για ιατρικούς σκοπούς, έγιναν από τους αρχαίους Αιγύπτιους οι οποίοι ψηλάφιζαν την επιφάνεια του κορμιού άρρωστων ανθρώπων προσπαθώντας με τα δάχτυλά τους να ανιχνεύσουν αλλαγές στη θερμοκρασία [92]. Αργότερα, γύρω στο 400 π.Χ., ο Έλληνας ιατρός Ιπποκράτης επισημοποίησε την αρχαία αιγυπτιακή τεχνική και υποστήριξε ότι η θερμοκρασία του σώματος είναι ένας πολύ χρήσιμος διαγνωστικός δείκτης για περιπτώσεις οξείων ασθενειών. Σύμφωνα με τον Ιπποκράτη η ασθένεια βρισκόταν στα σημεία όπου το σώμα ήταν πολύ ζεστό ή πολύ κρύο. Πηγές αναφέρουν ότι για να αναγνωριστούν ψυχρότερα και θερμότερα σημεία άλειψαν το σώμα με λάσπη και παρατηρούσαν τη διαδικασία ξήρανσής της. Στις περιοχές όπου η λάσπη στέγνωνε γρήγορα η θερμοκρασία ήταν αυξημένη και με αυτόν τον τρόπο μπορούσε να γίνει ο εντοπισμός των άρρωστων περιοχών [91, 93].



Εικόνα 14. Μπρούτζινη προτομή του αρχαίου ιατρού και πατέρα της ιατρικής Ιπποκράτη

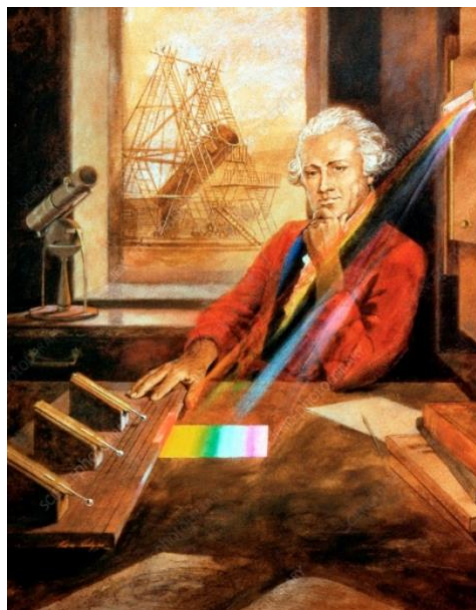
Για να αναπτυχθούν τεχνικές οπτικοποίησης της κατανομής των θερμοκρασιών των αντικειμένων χρειάστηκαν πάνω από 2000 χρόνια. Κάπου στο 1600 ο Γαλιλαίος κατασκεύασε το θερμοσκόπιο, μια συσκευή αποτελούμενη από έναν γυάλινο σωλήνα στον οποίο ένα υγρό ανέβαινε και κατέβαινε ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Το θερμοσκόπιο ήταν ο πρόδρομος του σημερινού θερμομέτρου. Στα τέλη του 17^{ου} και αρχές του 18^{ου} αιώνα η επιστημονική κοινότητα πρότεινε τη δημιουργία μιας βαθμονομημένης κλίμακας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Τότε ο Άντερς Κέλσιος (Anders Celsius) έκανε την πρόταση να χρησιμοποιηθεί μια κλίμακα η οποία θα ξεκινά από 100 και θα αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του πάγου, ενώ θα καταλήγει στο 0 που θα αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του βραστού νερού. Το 1750 όμως, ο Σουηδός βιολόγος και Φυσικός Κάρολος Λινναίος (Carl Linnaeus) πρότεινε την αντιστροφή της κλίμακας Κελσίου, η οποία επικράτησε μέχρι και σήμερα αλλά το

όνομά της δεν άλλαξε. Έτσι, παρά το γεγονός ότι για να είμαστε ιστορικά ακριβείς θα λέγαμε ότι πρόκειται για την κλίμακα Λινναίου, τα διεθνή πρότυπα ορίζουν την κλίμακα με το όνομα Κελσίου παρά την αντιστροφή που υπέστη. Το 1868 αναπτύχθηκε από τον Γερμανό φυσικό, ψυχίατρο και καθηγητή ιατρικής Carl Wunderlich το κλινικό θερμομόμετρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε καθολικά στην ιατρική και εξακολουθεί ακόμα εδώ και πάνω από 150 χρόνια. Η κλίμακα του θερμομέτρου όπως όλοι γνωρίζουν είναι περιορισμένη γύρω από τη φυσιολογική θερμοκρασία του ανθρώπου, η οποία είναι περίπου 37°C. Η χρήση όμως των γυάλινων θερμομέτρων όλο και μειώνεται παγκοσμίως με τα θερμομέτρα νέας τεχνολογίας να κερδίζουν συνεχώς έδαφος [94,95].

3.2.2 Ιστορία και μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η σύγχρονη ιστορία της επιστήμης της υπέρυθρης ακτινοβολίας ξεκίνησε το 1737, όταν η Γαλλίδα μαθηματικός, φυσικός και συγγραφέας Εμιλί ντι Σατλέ έλαβε συμμετοχή σε έναν διαγωνισμό της Γαλλικής Ακαδημίας Επιστημών καταθέτοντας την εργασία της, η οποία πραγματευόταν τη φύση του φωτός, της φωτιάς και της θερμότητας. Παρότι δεν κέρδισε στο διαγωνισμό η εργασία της δημοσιεύτηκε στην πορεία και σε αυτήν υποστήριζε πως κάθε χρώμα έχει διαφορετική θερμαντική ισχύ, πιστεύοντας στην ύπαρξη εκείνου που ονομάζουμε σήμερα υπέρυθρο (InfraRed – IR) [96]. Σχεδόν μισό αιώνα μετά, το 1786, ο Βρετανός φυσικός και εφευρέτης Benjamin Thompson, γνωστός και ως Count Rumford, εκμεταλλευόμενος το κενό των σωλήνων Torricelli μέτρησε και παρατήρησε τη μεταφορά θερμότητας μέσω του κενού. Η επιστημονική κοινότητα της εποχής αντιμετώπιζε με ιδιαίτερη δυσπιστία τους ισχυρισμούς περί διάδοσης της θερμότητας στο κενό για αρκετά χρόνια καθώς θεωρούνταν απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου διάδοσης. Μερικά χρόνια αργότερα, το 1800, έμελλε να ανακαλυφθεί τυχαία η ύπαρξη της υπέρυθρης ακτινοβολίας και οι θερμικές της ιδιότητες από τον Βασιλικό αστρονόμο του βασιλιά Γεωργίου Γ΄ της Αγγλίας, William Herschel, ο οποίος ήταν ήδη γνωστός από την

ανακάλυψη του πλανήτη ουρανού. Ο William Herschel, κατά τις προσπάθειές του να παρατηρήσει τον ήλιο συμπέρανε πως είναι απαραίτητο να βρει ένα υλικό το οποίο θα μείωνε τη φωτεινότητα του ήλιου και ταυτόχρονα δεν θα εξέπεμπε τόση θερμότητα ώστε να προκληθεί βλάβη στους οφθαλμούς του χρήστη του τηλεσκοπίου. Αφού λοιπόν έκανε αρκετές δοκιμές οι οποίες αποδείχθηκαν άκαρπες πήρε την απόφαση να εκτελέσει μεθοδικά ένα συστηματικό πείραμα το οποίο θα τον οδηγούσε στην εύρεση του επιθυμητού υλικού. Ξεκίνησε πραγματοποιώντας ξανά το πείραμα του Νεύτωνα με τη χρήση του πρίσματος, μετρώντας όμως τη θερμαντική



Εικόνα 15. Ο William Herschel και το πείραμα που οδήγησε στην ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας

ικανότητα κάθε χρώματος του φάσματος [97]. Τοποθέτησε στην κορυφή ενός τραπεζιού το γυάλινο πρίσμα και με τη χρήση ευαίσθητων θερμομέτρων, τοποθετημένων κατά μήκος του φάσματος που δημιουργούσε το πρίσμα μετρούσε τη θερμοκρασία σε κάθε περιοχή. Διαπίστωσε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από τη θέση του θερμομέτρου πάνω στο φάσμα των 10 εκατοστών (cm), που είχε προκύψει. Φάνηκε πως το ιώδες αύξησε κατά 2°F τη θερμοκρασία, το πράσινο κατά 3,5 °F περίπου, ενώ το κόκκινο κατά 7°F πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ενώ όμως πέρα από το ιώδες δεν παρατηρήθηκε κάποια μεταβολή στη θερμοκρασία, δε συνέβη το ίδιο στην αντίθετη πλευρά, με αποτέλεσμα να μετρηθεί κατά 9°F υψηλότερη θερμοκρασία αρκετά πέρα από το κόκκινο χρώμα. Στη συνέχεια ο Herschel παρατήρησε ότι οι αποκαλούμενες ακτίνες θερμότητας υπακούουν στους ίδιους φυσικούς νόμους της διάθλασης και της ανάκλασης με το ορατό φως [96].

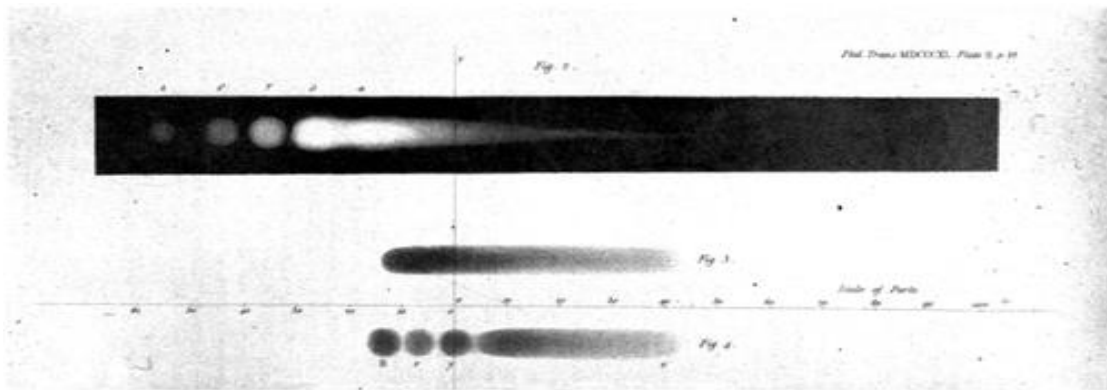
Όμως οι ανακαλύψεις αυτές δε μπορούσαν να χαρακτηριστούν απροσδόκητες, γιατί το 1777 παρατηρήθηκαν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, σε ένα παρόμοιο πείραμα του Ιταλού ερευνητή Marsilio Landriani. Ο όρος «υπέρυθρο» άρχισε να χρησιμοποιείται περίπου 75 χρόνια μετά τις ανακαλύψεις του William Herschel, χωρίς να γνωρίζουμε ποιος εισήγαγε τον όρο. Ο Herschel, ύστερα από πειράματα παρατήρησε πως το γυαλί δεν είναι πλήρως διαφανές για το υπέρυθρο και κατέληξε πως η οπτική του υπέρυθρου

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

θα περιοριζόταν στη χρήση ανακλαστικών επιφανειών, δηλαδή καθρεπτών. Το 1830 ο Ιταλός ερευνητής Melloni κατέρριψε τη θεωρία αυτή καθώς ανακάλυψε πως το ορυκτό αλάτι (χλωριούχο νάτριο – NaCl), το οποίο υπήρχε διαθέσιμο σε μεγάλους φυσικούς κρυστάλλους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φακών και πρισμάτων λόγω της εξαιρετικής διαφάνειάς του στο υπέρυθρο. Οι κρύσταλλοι άλατος χρησιμοποιήθηκαν για περίπου 100 χρόνια, ώσπου τη δεκαετία του 1930 τη θέση τους πήραν οι τεχνητοί συνθετικοί κρύσταλλοι. Από την άλλη μεριά, τα κλασσικά θερμόμετρα δεν είχαν βελτιωθεί περαιτέρω ως το 1829, όπου ο Leopoldo Nobili εφηύρε το θερμοστοιχείο. Στη συνέχεια ο Melloni μέσω της σύνδεσης πολλών θερμοστοιχείων σε σειρά, δημιούργησε μια συσκευή, με όνομα «θερμοσυστοιχία» (thermopile), η οποία είχε ευαισθησία 40 φορές μεγαλύτερη από το καλύτερο θερμόμετρο της εποχής, ενώ ήταν σε θέση να ανιχνεύσει θερμική ακτινοβολία ανθρώπινου σώματος από απόσταση 3 μέτρων[97].

Το 1840 ο John Herschel, γιος του William θα παρουσιάσει το πρώτο θερμογράφημα στην ιστορία, μια απλή εικόνα στην οποία πραγματοποιούνταν εξάτμιση ενός μείγματος αλκοόλης και σωματιδίων άνθρακα πάνω σε ένα χαρτί με την εστίαση σε αυτό ηλιακού φωτός. Το υγρό χαρτί στέγνωσε πιο γρήγορα στις περιοχές όπου το «χτυπούσε» υπέρυθρη ακτινοβολία [96, 98].

Το 1878 ο Αμερικανός αστρονόμος Samuel Pierpont Langley εφηύρε το βολόμετρο,

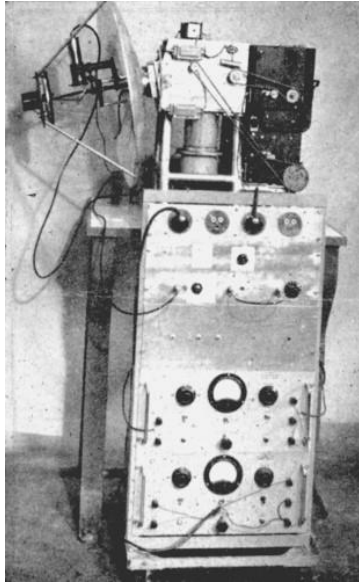


Εικόνα 16. Το πρώτο θερμογράφημα

μια συσκευή η οποία μπορούσε να μετρήσει την υπέρυθρη ακτινοβολία έμμεσα, εξαιτίας της αλλαγής της ηλεκτρικής του αντίστασης μιας μεταλλικής επιφάνειας όταν αυτή ακτινοβολούνταν και θερμαινόταν [99]. Η συσκευή αυτή ήταν ικανή να ανιχνεύσει τη θερμότητα μιας αγελάδας από απόσταση 400 μέτρων. Λίγα χρόνια

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

αργότερα, το 1892 ο Άγγλος επιστήμονας James Dewar ανέδειξε για πρώτη φορά τη χρήση υγροποιημένων αερίων σε ρόλο ψυκτικών παραγόντων, ενώ κατασκεύασε ένα μονωτικό κουτί κενού για την αποθήκευση αυτών των αερίων για μέρες. Κατά την περίοδο μεταξύ 1900 – 1920 και κυρίως κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, αναπτύχθηκαν αρκετά συστήματα, η πλειονότητα των οποίων αποτελούσε παραλλαγή του βολομέτρου, ενώ η χρήση τους αφορούσε κατά βάση στρατιωτικούς σκοπούς [97].



Εικόνα 17. Προτότυπο σύστημα υπέρυθρης θερμογραφίας Pyroscan, 1942

πολύ αργή μηχανική σάρωση (2-5 λεπτά), με την εικόνα να αποδίδεται γραμμή – γραμμή σε ηλεκτροευαίσθητο χαρτί. Από τότε και μετά το ενδιαφέρον του επιστημονικού κόσμου για την εξέλιξη των συστημάτων θερμογραφίας οδήγησε στην εκπόνηση πολλών μελετών παγκοσμίως [94].

Σημαντική εξέλιξη αποτέλεσε η κατασκευή του πρώτου ηλεκτρονικού αισθητήρα υπέρυθρης ακτινοβολίας το 1940. Υλικό κατασκευής αυτού του αισθητήρα ήταν το αντιμονίδιο ινιδίου, τοποθετημένο στη βάση ενός μικρού δοχείου Dewar με υγρό άζωτο για την ψύξη του. Οι πρώτες ιατρικές εικόνες τραβήχτηκαν με ένα πρωτότυπο βρετανικό σύστημα, το «Pyroscan», στο νοσοκομείο Middlesex του Λονδίνου και στο βασιλικό Εθνικό Νοσοκομείο Ρευματικών Ασθενειών, στο Bath το 1959 – 1961. Ένα δεύτερο πρότυπο σύστημα δημιουργήθηκε το 1962, με βελτιωμένες εικόνες αλλά



Εικόνα 18. Bofors/Philips κάμερα υπέρυθρου 1975

Το 1972 ιδρύεται η Ευρωπαϊκή Θερμογραφική Ένωση και το πρώτο μεγάλο συνέδριο είναι πλέον γεγονός το 1974 στο Άμστερνταμ. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 εγκαθίσταται το πρώτο υπολογιστικό σύστημα, με επεξεργαστή PDP8, στο Bath του Ηνωμένου Βασιλείου. Πλέον έγινε δυνατή η ψηφιακή απεικόνιση και αποθήκευση των εικόνων, ενώ ήταν εφικτή και η μελέτη μεμονωμένων περιοχών ενδιαφέροντος. Οι τεχνολογικές εξελίξεις των επόμενων ετών οδήγησαν στην απομάκρυνση των

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ψυκτικών υγρών, τη δυνατότητα απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο και τη βελτίωση των ανιχνευτών για την πιο γρήγορη δημιουργία εικόνων καλύτερης διακριτικής ικανότητας, κάτι στο οποίο βοήθησε επίσης, η βελτίωση του λογισμικού. Αρκετά εμπορικά συστήματα χρησιμοποιούν γενικό λογισμικό, σε αντίθεση με εκείνα που προορίζονται αποκλειστικά για ιατρικούς σκοπούς. Ένα λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως για ιατρική θερμογραφία είναι το CTHERM, κατασκευασμένο το Ηνωμένο Βασίλειο. Στόχος πλέον είναι η κατασκευή βάσεων δεδομένων με εικόνες και δεδομένα αναφοράς τα οποία θα λειτουργούν ως διαγνωστικά βοηθήματα. Με την εξέλιξή τους, τα συστήματα υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης γίνονται όλο και πιο σύνθετα, αλλά ταυτοχρόνως ικανότερα και μικρότερα σε διαστάσεις διευκολύνοντας τη μεταφορά και τη χρήση τους. Σήμερα υπάρχουν εξαιρετικά μικρές θερμοκάμερες στο μέγεθος ενός σπυρτόκουτου, όπως εκείνη που απεικονίζεται στην εικόνα 20 [94].



Εικόνα 19. FLIR T540



Εικόνα 20. Flir One Gen 3

3.3 Διαμορφώσεις

Ένας παράγοντας για τη διενέργεια της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης είναι η θέση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου που μελετάται καθώς και η ύπαρξη ή μη σχετικής κίνησης μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου. Σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά υπάρχουν οι:

- Στατικές διαμορφώσεις στις οποίες το αντικείμενο, η πηγή διέγερσης και η κάμερα παραμένουν ακίνητα.

- Δυναμικές διαμορφώσεις στις οποίες τουλάχιστον ένα από τα τρία στοιχεία (αντικείμενο, κάμερα και πηγή διέγερσης) βρίσκεται σε κίνηση.

Ανάλογα με τη διαμόρφωση, διαφέρει και ο τρόπος λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων. Η στατική διαμόρφωση βοηθά πολύ στην ανάλυση των δεδομένων, καθώς σε αυτή το χρονικό ιστορικό κάθε σημείου της επιφάνειας μπορεί να παρακολουθηθεί άμεσα. Παρ' όλα αυτά σε περιπτώσεις, στις οποίες εξετάζεται ένα πολύ μεγάλο ή καμπυλωτό εξάρτημα, ένα κινούμενο αντικείμενο, η λειτουργία ενός τμήματος μιας γραμμής παραγωγής που δεν επιτρέπεται να σταματήσει, η στατική διαμόρφωση δεν είναι πρακτική, αφού η μελέτη του αντικειμένου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα σταθερό σημείο. Σε αυτές τις περιπτώσεις η δυναμική διαμόρφωση δίνει τη λύση, ενώ τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από αυτή μπορούν να παράξουν ψευδοστατικές ακολουθίες στις οποίες είναι εφικτό να εφαρμοστούν τεχνικές επεξεργασίας στατικού σήματος (εάν αυτό είναι αναγκαίο) [104].

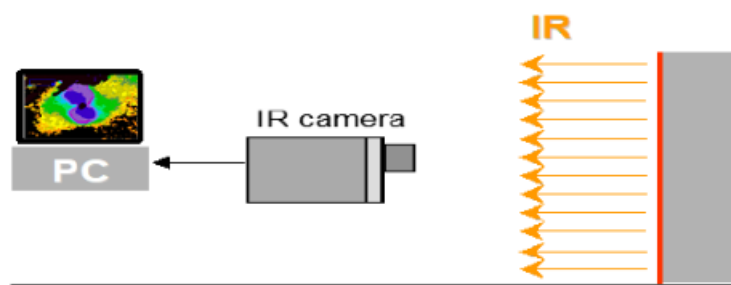
3.4 Τεχνικές

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαφόρων τεχνικών, αλλά υπάρχουν δυο κύριες προσεγγίσεις οι οποίες περιλαμβάνουν το σύνολο των τεχνικών. Αυτές είναι η παθητική υπέρυθρη θερμογραφία (passive infrared thermography) και η ενεργητική υπέρυθρη θερμογραφία (active infrared thermography).

3.4.1 Παθητική θερμογραφία

Η παθητική θερμογραφία είναι μια τεχνική ιδανική για τη μελέτη υλικών τα οποία έχουν διαφορετική θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντός τους (συνήθως υψηλότερη). Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργεί την απαραίτητη, για την απεικόνιση, θερμική αντίθεση, με αποτέλεσμα να μην χρειάζονται μέσα θέρμανσης ή ψύξης του δείγματος [100]. Η θερμότητα η οποία ανιχνεύεται σε αυτή την περίπτωση προέρχεται από το αντικείμενο, χωρίς κάποια εξωτερική διέγερση. Οι περισσότερες εφαρμογές αυτής της μεθόδου αφορούν την επιθεώρηση κτηρίων και υποδομών (έλεγχος υγρασίας και θερμομόνωσης), τον έλεγχο διεργασιών και εξαρτημάτων, τη συντήρηση μηχανολογικού, ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και εγκαταστάσεων, τον

έλεγχο των ιδιοτήτων ενός υλικού, τη δημιουργία δημόσιων προληπτικών μηχανισμών για έγκαιρη ανίχνευση δασικών πυρκαγιών και κυκλοφοριακών συμφορήσεων και φυσικά την ιατρική παρακολούθηση, διάγνωση και τον αθλητισμό [101]. Στόχος αυτής προσέγγισης είναι κυρίως η ποιοτική αξιολόγηση, όπως ο εντοπισμός κάποιας δυσλειτουργίας ή ανωμαλίας του υπό εξέταση σώματος, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν είναι εφικτές και ποσοτικές εκτιμήσεις [100]. Στο πειραματικό σκέλος της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η παθητική προσέγγιση της υπέρυθρης θερμογραφίας, η οποία αναπαριστάται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 21. Παθητική θερμογραφία

3.4.2 Ενεργητική θερμογραφία

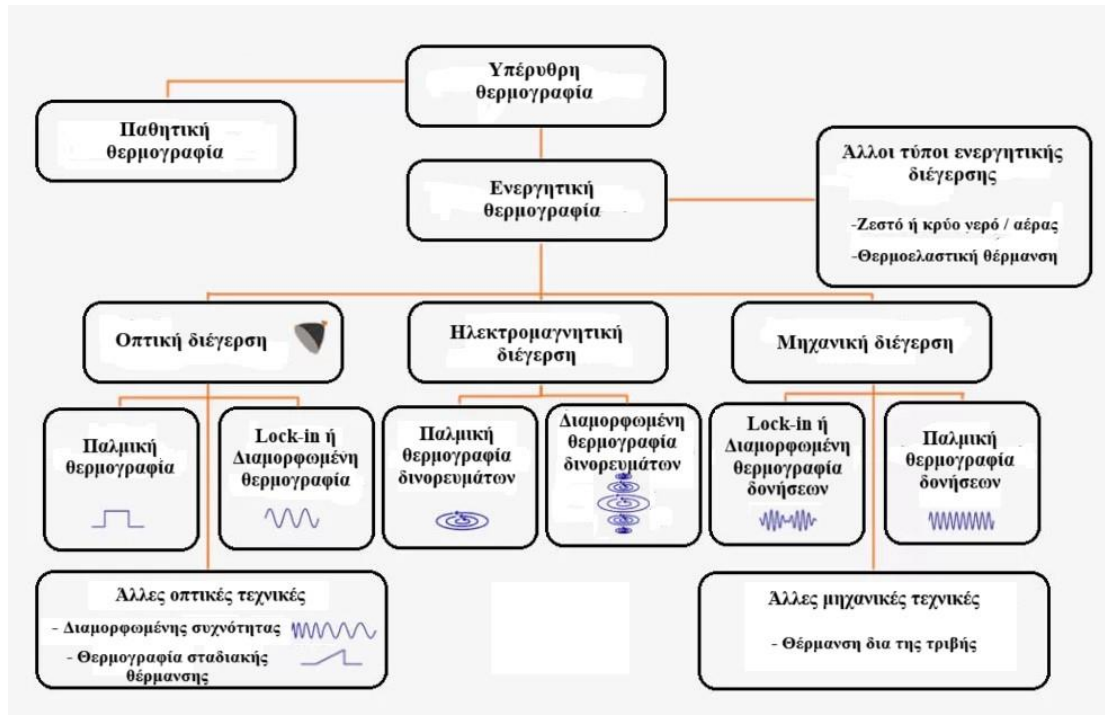
Η ενεργητική θερμογραφία αφορά την επιθεώρηση ενός αντικειμένου το οποίο βρίσκεται, αρχικά, σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον του. Στη συνέχεια εισάγεται σε αυτό ένα ποσό ενέργειας μέσω ενός συστήματος διέγερσης με σκοπό και τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμικής αντίθεσης των περιοχών ενδιαφέροντος του προς μελέτη αντικειμένου σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο [102]. Πρόκειται δηλαδή για μια τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου (non-destructive testing) υλικών, στην οποία υπάρχει σχετική αντίθεση μεταξύ των περιοχών ενδιαφέροντος ή της περιοχής ενδιαφέροντος και του υποβάθρου, χάρη στη διέγερση που προκαλείται από μια εξωτερική πηγή [103].

Για τη διαδικασία του ελέγχου απαιτείται η ύπαρξη μιας εξωτερικής πηγής διέγερσης και ένα σύστημα υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης μέσω του οποίου θα παρακολουθείται η διακύμανση της θερμοκρασίας του δείγματος κατά την παροδική χρονική περίοδο της ομοιόμορφης θέρμανσης ή της ψύξης του. Μελετώνται με αυτόν τον τρόπο οι ιδιότητες του αντικειμένου βάσει της συσχέτισης της διέγερσης και της θερμικής του αγωγιμότητας. Τα δυο αυτά μεγέθη σχετίζονται καθώς ο παράγοντας,

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

από τον οποίο εξαρτάται η διάδοση της θερμότητας εντός ενός υλικού, είναι οι στατικές θερμικές του ιδιότητες.

Οι τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ενεργητική θερμογραφία κατηγοριοποιούνται με δυο κριτήρια. Το πρώτο είναι το είδος της πηγής διέγερσης και το δεύτερο η τεχνική διέγερσης του σώματος. Το σύνολο των κύριων τεχνικών της υπέρυθρης θερμογραφίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 24.



Εικόνα 22. Τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας

Με σκοπό τη διέγερση του υπό εξέταση αντικειμένου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα πλήθος πηγών, από θερμό/ψυχρό αέρα ή νερό έως μικροκύματα. Συνήθως, επιλέγεται μια πηγή θερμότητας και όχι ψύχους διότι είναι πιο εύκολος ο έλεγχός της. Οι κύριες κατηγορίες πηγών διέγερσης του δείγματος είναι οι εξής [104]:

- Οπτικές πηγές, οι οποίες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες και περιλαμβάνουν φωτογραφικά φλας, λυχνίες υπέρυθρων, λαμπτήρες αλογόνου
- Ηλεκτρομαγνητικές – επαγωγικές πηγές, όπως δινορεύματα
- Μηχανικές πηγές, όπως πηγές ήχων ή υπερήχων

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- Άλλες πηγές, όπως θερμαντικές κουβέρτες για θέρμανση μεγάλων τμημάτων αεροσκαφών στην αεροναυπηγική, οι οποίες εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της αγωγής και θερμικά πιστόλια για τη θέρμανση μικρότερων εξαρτημάτων με εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας.

Η δημιουργία και μεταφορά της ενέργειας στο δείγμα μπορεί να γίνει:

- Με αντανάκλαση, όταν η ενέργεια μεταφέρεται στο σώμα από την πλευρά όπου γίνεται η καταγραφή των δεδομένων
- Με μετάδοση, όταν η ενέργεια μεταφέρεται στο σώμα από την αντίθετη πλευρά από εκείνη όπου καταγράφονται τα δεδομένα
- Εσωτερικά, όταν ανεξάρτητα από τη θέση της πηγής διέγερσης, η θερμότητας ή το κρύο παράγεται εντός του επιθεωρούμενου αντικειμένου, ενώ η συλλογή των δεδομένων μπορεί να γίνεται και από τις δυο πλευρές του

Στις πηγές διέγερσης που λειτουργούν με οπτικά μέσα, η απόδοση της ενέργειας μέσω ανάκλασης επιτρέπει την ανίχνευση ελαττωμάτων τα οποία βρίσκονται πλησίον της θερμαινόμενης επιφάνειας, ενώ η απόδοση ενέργειας στο αντικείμενο μέσω μετάδοσης ενδείκνυται για εντοπισμό ελαττωμάτων τα οποία βρίσκονται εν τω βάθει [103, 104].

Τρόπος μεταφοράς της ενέργειας διέγερσης στο υπό μελέτη σώμα

- Σημειακή σάρωση: θερμαίνεται μόνο ένα σημείο του αντικειμένου κάθε φορά. Για να σαρωθεί όλη η εξεταζόμενη επιφάνεια γίνεται δυναμική σάρωση με λέιζερ, σημείο προς σημείο.
- Γραμμική σάρωση: η θερμαντική πηγή η οποία μπορεί να είναι μια λυχνία κινούμενη από έναν μηχανικό βραχίονα, σαρώνει την επιφάνεια προβάλλοντας πάνω της μια γραμμή ακτινοβολήσης
- Επιφανειακή σάρωση: μια πηγή διέγερσης (παραδείγματος χάριν ένας λαμπτήρας αλογόνου) θερμαίνει ταυτόχρονα μια ολόκληρη επιφάνεια του υπό μελέτη δείγματος

Η γραμμική και η σημειακή σάρωση παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε μια δυναμική διαμόρφωση, αφού η εκεί η θέρμανση ή η ψύξη μπορεί να πραγματοποιηθεί γραμμή προς γραμμή ή σημείο προς σημείο, καθώς η κάμερα καταγράφει δεδομένα. Από την άλλη μεριά η επιφανειακή σάρωση ενδείκνυται σε περιπτώσεις στατικής διαμόρφωσης, στις οποίες δίνεται η δυνατότητα μελέτης μεγαλύτερης επιφάνειας ταυτόχρονα [102 -104].

Οι κυριότερες και συχνότερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι οι ακόλουθες :

- Παλμική Θερμογραφία (Pulsed thermography – PT)

Η παλμική θερμογραφία αποτελεί την πιο κοινή τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας με θερμική διέγερση, εξαιτίας της εύκολης και ταυτόχρονα γρήγορης εφαρμογής της. Το σώμα θερμαίνεται από έναν σύντομο παλμό (διάρκειας μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου) θερμικής διέγερσης και στη συνέχεια καταγράφονται τα δεδομένα στη φάση κατά την οποία η θερμοκρασία του δείγματος μειώνεται [105]. Με τον αρχικό παλμό προκαλείται ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και η θερμική ενέργεια διαδίδεται με το μηχανισμό της διάχυσης στην επιφάνεια. Όταν αυτό το θερμικό μέτωπο συναντήσει κάποια ασυνέχεια, ο ρυθμός διάχυσης μειώνεται και αρχίζουν να φαίνονται περιοχές με διαφορετικές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, ανωμαλίες ή ασυνέχειες του υλικού οι οποίες βρίσκονται βαθύτερα θα παρατηρηθούν αργότερα και θα απεικονιστούν με χαμηλότερη αντίθεση. Οι πηγές θερμότητας οι οποίες χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν φωτογραφικά φλας, λαμπτήρες και πιστόλια θέρμανσης [103].

- Θερμογραφία τετραγωνικού παλμού (Square Pulse Thermography – SPT)

Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με την παλμική θερμογραφία. Διαφέρει ως προς τη διάρκεια του παλμού, ο οποίος διαρκεί από μερικά δευτερόλεπτα έως αρκετά λεπτά και στο γεγονός πως η θερμοκρασία της επιφάνειας του αντικειμένου ανιχνεύεται όχι μόνο κατά την ψύξη αλλά και κατά τη θέρμανσή του, εκτός αν η δομή του έχει ελαττώματα. Αν παρατηρηθεί κάτι τέτοιο κατά την ψύξη του τότε παρακολουθείται μόνο η φάση μείωσης της θερμοκρασίας του [104].

- Lock – in ή Διαμορφωμένη θερμογραφία (Modulated or Lock-in thermography –LT)

Κατά την τεχνική αυτή το αντικείμενο δέχεται περιοδική θέρμανση συγκεκριμένης συχνότητας. Σε περίπτωση που υπάρχει κάποια ανωμαλία στο εσωτερικό του υλικού τα θερμικά κύματα αλλάζουν και τελικά μετράται από το σύστημα ανίχνευσης μια διαφορά φάσης ή/και πλάτους μεταξύ του κύματος της θερμικής πηγής και της θερμικής απόκρισης [104, 105]. Για να συμβεί αυτό η θερμική κάμερα συγχρονίζεται με το διεγερτικό σήμα της πηγής. Σε αντίθεση με την παλμική θερμογραφία δημιουργούνται θερμικά κύματα εντός του αντικειμένου και όχι ένα θερμικό μέτωπο, το οποίο διαδίδεται στο υλικό. Η θερμοκρασία κάθε σημείου της επιφάνειας αλλάζει διαρκώς στο πέρασμα του χρόνου γιατί επηρεάζεται από τα θερμικά κύματα της πηγής, αλλά και από εκείνα τα οποία ανακλώνται από θερμικά εμπόδια (ελαττώματα) εντός του υλικού. Στο θερμογράφημα το οποίο προκύπτει, κάθε εικονοστοιχείο (pixel) αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του αντίστοιχου σημείου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται συγκεκριμένοι υπολογισμοί που αφορούν το κάθε pixel ανά κύκλο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας βελτιωμένης εικόνας με καλύτερη διακριτική ικανότητα, η οποία επηρεάζεται λιγότερο από την παρουσία θορύβου, διακυμάνσεων εκπομπής και ετερογενειών θέρμανσης. Στην τελική εικόνα φαίνονται αρκετά ξεκάθαρα τα διάφορα θερμικά εμπόδια και τα πιθανά ελαττώματα, καθώς παρουσιάζεται με ικανοποιητική ανάλυση η εσωτερική δομή του σώματος. Αν και είναι πολύ καλή αυτή η τεχνική ως προς την ποιότητα της τελικής απεικόνισης, πρόκειται για μια χρονοβόρα μέθοδο καθώς για κάθε διαφορετικό βάθος που θέλουμε να εστιάσουμε επιβάλλεται η διεξαγωγή δοκιμών σε συγκεκριμένες συχνότητες διέγερσης και σε κάθε μια από αυτές τις δοκιμές η διέγερση πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές, ώστε να υπάρξει μια σταθερή κατάσταση [103].

- Θερμογραφία Σταδιακής Θέρμανσης (Step Heating Thermography - SHT)

Στην τεχνική αυτή η προς εξέταση δομή θερμαίνεται ή ψύχεται συνεχώς για μια χρονική περίοδο διάρκειας αρκετών δευτερολέπτων ή λεπτών και στη συνέχεια

παρατηρείται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του αντικειμένου. Τα ελαττώματα, τα οποία ενδέχεται να υπάρχουν, έχουν τη μορφή θερμών ή ψυχρών σημείων και εντοπίζονται γιατί αποτελούν περιοχές των οποίων ο ρυθμός ψύξης ή θέρμανσης είναι διαφορετικός [103, 104, 106].

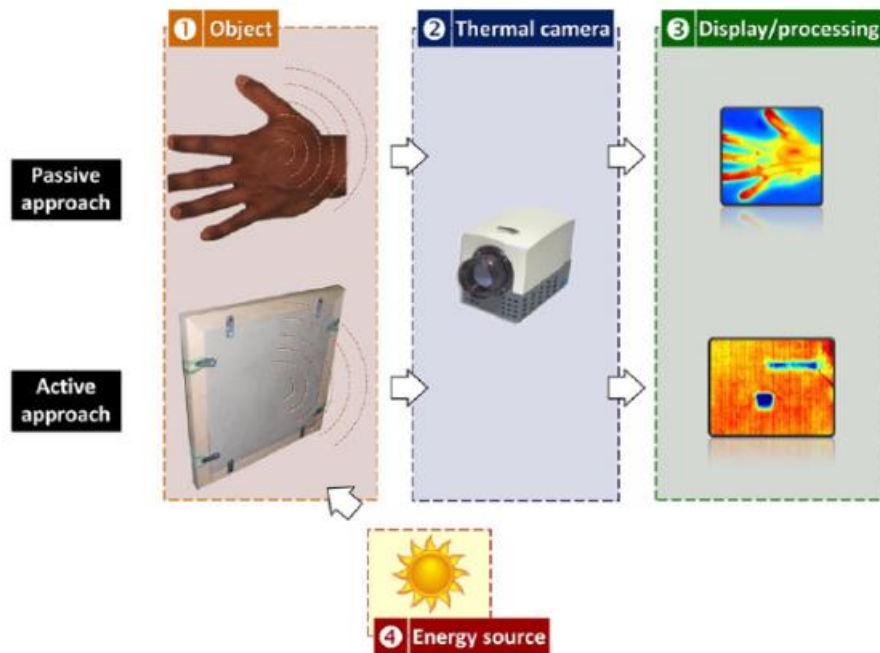
- Θερμοεπαγωγική Θερμογραφία ή Θερμογραφία δινορευμάτων (Inductive Thermography - IT or eddy current thermography)

Σε αυτή την τεχνική δημιουργούνται δινορευμάτα εντός του υπό μελέτη υλικού. Συγκεκριμένα κυκλοφορεί ρεύμα σε συγκεκριμένες συχνότητες εξαιτίας ενός επαγωγικού πηνίου. Στις περιοχές όπου υπάρχουν ελαττώματα η αντίσταση που συναντά το ρεύμα είναι διαφορετική με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Η διαφορά μεταξύ της παλμικής (pulsed) και της διαμορφωμένης/εκρηκτικής (burst) θερμογραφίας δινορευμάτων είναι άμεσα σχετιζόμενη με τη συχνότητα [103,104, 107, 108].

- Θερμογραφία Δονήσεων (Vibrothermography)

Η τεχνική της θερμογραφίας δονήσεων βασίζεται στην δημιουργία δονήσεων από ηχητικά (20 – 50 Hz) ή υπερηχητικά κύματα (15–40 kHz), τα οποία προέρχονται από μια πηγή διέγερσης με μηχανικά μέσα, εξωτερικά του αντικειμένου. Η ενέργεια από μηχανική μετατρέπεται σε θερμική εντός του υλικού από την τριβή των ρωγμών, των αποκολλήσεων ή των ασυνεχειών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση, στην απεικόνιση, θερμικών κηλίδων στα σημεία τα οποία έχουν κάποιο ελάττωμα. Η εμφάνιση ή όχι μιας ανωμαλίας στο υλικό εξαρτάται από τη συχνότητα της μηχανικής διέγερσης [104 -105].

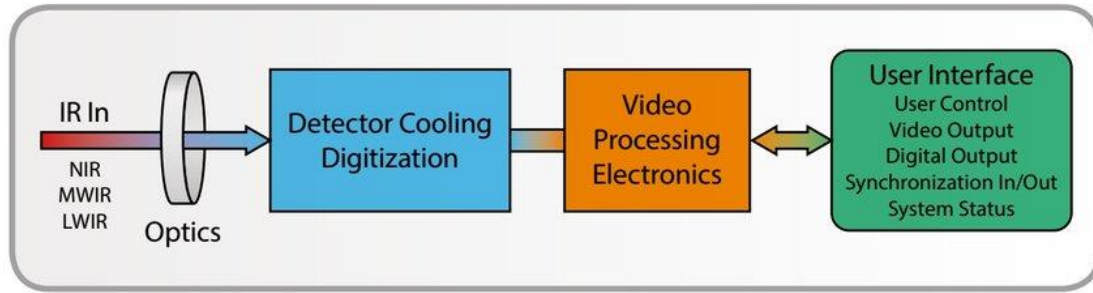
Η υπερηχογραφική θερμογραφία (Ultrasound Thermography - UT) αποτελεί παραλλαγή της θερμογραφίας δονήσεων. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται ένας συνδυασμός (διαμόρφωση) ενός σήματος χαμηλής συχνότητας με ένα σήμα υψηλής συχνότητας και η διαμόρφωση αυτή διαδίδεται στο υλικό με τη βοήθεια του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Το σήμα χαμηλής συχνότητας εξυπηρετεί τη διάδοση της διαμόρφωσης στο σώμα, ενώ τα κύματα υψηλής συχνότητας είναι υπεύθυνα για την διέγερση των περιοχών όπου υπάρχουν ελαττώματα και την τοπική αύξηση στη θερμοκρασία, η οποία στη συνέχεια απεικονίζεται στο θερμογράφημα [103, 109].



Εικόνα 23. Πειραματική διάταξη για παθητική (πάνω) και ενεργητική (κάτω) θερμογραφία

3.5 Σύστημα υπέρυθρης θερμογραφίας – Θερμοκάμερα

Μια θερμική κάμερα αποτελείται από 4 βασικά τμήματα: ένα οπτικό σύστημα, ένα σύστημα ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, ένα ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας δεδομένων και ένα σύστημα απεικόνισης. Το οπτικό σύστημα εστιάζει τις ακτίνες της υπέρυθρης ακτινοβολίας στα φωτοευαίσθητα στοιχεία του ανιχνευτικού συστήματος, μέσω ενός συστήματος φακών. Ο ανιχνευτής ή η συστοιχία ανιχνευτών υπέρυθρου μετατρέπει την ενέργεια της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα και αποτελεί τον πυρήνα της θερμοκάμερας. Εν συνεχεία, τα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας δεδομένων ενισχύουν και επεξεργάζονται τα ηλεκτρικά σήματα βελτιώνοντας το σηματοθορυβικό λόγο (Signal-to-Noise Ratio – SNR). Τέλος, το σύστημα απεικόνισης λαμβάνει το βελτιωμένο σήμα και το εμφανίζει ως ορατή εικόνα σε μια οθόνη [41, 103, 110].



Εικόνα 24. Διάγραμμα βασικών τμημάτων θερμοκάμερας

3.5.1 Φάσμα υπέρυθρου και υπέρυθρη θερμογραφία

Ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας δεν χρησιμοποιείται στην υπέρυθρη θερμογραφία, διότι απορροφάται από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μένει το εξής τμήμα του φάσματος, το οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε χρήσιμο για μετρήσεις:

- Εγγύς υπέρυθρο (Near-InfraRed - NIR) από 0,8 μm έως 1,7 μm .
- Υπέρυθρο μικρού μήκους κύματος (Short-Wavelength InfraRed - SWIR) από 1 μm έως 2,5 μm .
- Υπέρυθρο μεσαίου μήκους κύματος (Mid-Wavelength Infrared - MWIR) από 2 μm έως 5 μm .
- Υπέρυθρο μεγάλου μήκους κύματος (Long-Wavelength Infrared - LWIR) από 8 μm έως 14 μm .

Στην υπέρυθρη θερμογραφία (IRT), από τις παραπάνω περιοχές οι πιο συχνά εκμεταλλευόμενες είναι το υπέρυθρο μεσαίου μήκους κύματος (MWIR) και το υπέρυθρο μεγάλου μήκους κύματος (LWIR). Αυτό συμβαίνει για δυο λόγους. Αφενός για να είναι η μέτρηση όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική θα πρέπει να διενεργείται για το εύρος μηκών κύματος, όπου η εκπεμπόμενη από το σώμα ακτινοβολία παρουσιάζει τη μέγιστη έντασή της και αφετέρου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για το μήκος κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Όσον αφορά τη μέγιστη ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, έχει

παρατηρηθεί ότι για τις περισσότερες εφαρμογές βρίσκεται μεταξύ των ορίων των MWIR και LWIR. Επιπροσθέτως, η απορρόφηση της ακτινοβολίας στο εύρος των MWIR και LWIR από τα διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας και κυρίως από το CO₂ και τα μόρια H₂O, είναι χαμηλή γεγονός που της επιτρέπει να φτάσει χωρίς μεγάλη εξασθένηση στον ανιχνευτή της κάμερας [53, 103].

3.5.2 Τύποι θερμοκάμερας

Σύμφωνα με το φάσμα του υπερέρυθρου στο οποίο λειτουργούν, οι κάμερες υπέρυθρης θερμογραφίας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες [103, 114]:

- Κάμερες που καταγράφουν στο εγγύς υπέρυθρο (NIR), οι οποίες διαθέτουν ανιχνευτές φωτονίων, κατασκευασμένους από αρσενίδιο γαλλίου-ινδίου (InGaAs) με ευαισθησία στα 0,9 μm έως 1,7 μm. Οι κάμερες αυτές μπορούν να λειτουργούν χωρίς ψύξη, με θερμοηλεκτρική ψύξη ή με κρυογονική ψύξη για περιπτώσεις καμερών υψηλής ποιότητας, ενώ ανιχνεύουν θερμική ακτινοβολία και όχι αντανάκλασεις σε υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες.
- Κάμερες υπερέρυθρου μεσαίου μήκους κύματος (MWIR), οι οποίες λειτουργούν με ανιχνευτές φωτονίων και χαρακτηρίζονται από μεγάλη ταχύτητα ανίχνευσης (frame rate), μεγαλύτερη από 100Hz για μέγεθος μήτρας ανιχνευτών 640 × 512, υψηλή ευαισθησία (*NEDT έως 15mK), ανάγκη για ψύξη με χρήση υγρού αζώτου ή κ κινητήρων Stirling σε θερμοκρασία περίπου 77 K και συνήθως χρησιμοποιούν μεταξύ άλλων υλικών αντιμόνιο του ινδίου (InSb) για χρήση στο ανιχνευτικό σύστημα. Επίσης, διαθέτουν εξαιρετικά φάσμα εφαρμογών.
- Κάμερες υπερέρυθρου μεγάλου μήκους κύματος (LWIR), οι οποίες είναι πιο αργές με συχνότητα ανανέωσης καταγραφής/ προβολής (frame rate) μικρότερη από 60 Hz για μήτρα ανιχνευτών 640 × 512, με ανιχνευτές τύπου μικροβολομέτρων, δεν απαιτούν ψύξη και είναι λιγότερο ευαίσθητες με NEDT μεγαλύτερο των 60 mK. Κάμερες τέτοιου τύπου εξοπλίζονται με ανιχνευτές HgCdTe εκτοξεύοντας το κόστος κατασκευής και αγοράς τους, ενώ η μη γραμμική απόκρισή δυσκολεύει τη βαθμονόμηση και τη χρήση τους. Πλέον έχουν εισαχθεί κάποιοι νέοι ανιχνευτές SLS (Super Lattice Structure) οι οποίοι είναι πολύ πιο οικονομικοί, πιο γραμμικοί αλλά και πιο αργοί.

*Το NEDT (Noise Equivalent Temperature Difference - Διαφορά Θερμοκρασίας Ισοδύναμου Θορύβου) το οποίο αναφέρεται και ως «θερμική αντίθεση» είναι ο βασικός δείκτης ο οποίος χαρακτηρίζει τις υπέρυθρες κάμερες MWIR και LWIR και απλοποιημένα εκφράζει την ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να ανιχνεύσει η κάμερα, σε milli Kelvin (mK). Όταν ο θόρυβος είναι ίσος με τη μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να ανιχνεύσει ο ανιχνευτής, τότε το σύστημα έχει φτάσει στα όρια των δυνατοτήτων του να ανιχνεύει ένα θερμικό σήμα. Η τιμή του NEDT του ανιχνευτή είναι ανάλογη του θορύβου [103, 111].

3.5.3 Οπτικό σύστημα

Το οπτικό σύστημα μιας θερμοκάμερας αποτελείται, όπως προαναφέρθηκε, από τους φακούς εστίασης της ακτινοβολίας στο υλικό των ανιχνευτών. Υπάρχουν αρκετοί τύποι φακών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα θερμικής απεικόνισης. Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου φακού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή (μεταξύ άλλων) είναι:

- Το φασματικό εύρος ενδιαφέροντος (NIR, SWIR, MWIR ή LWIR)
- το οπτικό πεδίο (Field Of View – FOV) που αποτελεί τη μέγιστη περιοχή ενός δείγματος που είναι σε θέση να απεικονίσει μια κάμερα και εξαρτάται από το μέγεθος του αισθητήρα και την εστιακή απόσταση του φακού [113]
- Η ανάγκη για επανεστίαση ύστερα από αλλαγή της θερμοκρασίας
- Ο μηχανισμός εστίασής τους (σταθερός, μηχανοκίνητος ή χειροκίνητος)
- Το κόστος κατασκευής

Τα υλικά κατασκευής των φακών πρέπει να έχουν χαμηλή απορρόφηση στο εύρος του φάσματος των υπέρυθρων, στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και περιλαμβάνουν το Ge, το Si, το ZnS, το ZnSe, το CaF₂ και τα χαλκογονίδια [112]. Από αυτά, χρησιμοποιούνται πιο πολύ το πυρίτιο (Si) για κάμερες μεσαίου μήκους κύματος – MWIR (3–5 μm) και το γερμάνιο (Ge), ένα γυαλιστερό γκριζόλευκο μεταλλοειδές, που μοιάζει χημικά με το πυρίτιο, για κάμερες μεγάλου μήκους κύματος - LWIR (7–

14 μm). Το οπτικό σύστημα θα πρέπει να μεταδίδει στους ανιχνευτές σχεδόν το 100% της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας και για να συμβαίνει αυτό είναι πολύ σημαντικός ο εσωτερικός σχεδιασμός του.

Η λειτουργία της σάρωσης με σκοπό τη δημιουργία εικόνας έχει εξελιχθεί πολύ με το πέρασμα του χρόνου. Στα πρώτα συστήματα η λειτουργία της σάρωσης πραγματοποιούνταν από ένα στοιχείο αισθητήρα πολύ μικρής διάστασης που σάρωνε σημείο - σημείο την επιφάνεια. Στη συνέχεια μια συστοιχία αισθητήρων επέτρεπε τη σάρωση μιας ολόκληρης γραμμής κατευθείαν, ολοκληρώνοντας την εικόνα γραμμή προς γραμμή. Το πιο πρόσφατο σύστημα πλέον, βασίζεται σε μια μήτρα αποτελούμενη από στοιχεία αισθητήρων, η οποία ονομάζεται συστοιχία εστιακού επιπέδου (Focal Plane Array - FPA) και επιτρέπει τη σάρωση ολόκληρης της σκηνής μονομιάς με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ηλεκτρονικής δισδιάστατης εικόνας ταχύτερα και με καλύτερη ποιότητα [41, 102].

3.5.4 Ανιχνευτές

Ένα σύστημα ανιχνευτών επιλέγεται με σκοπό να έχει τη βέλτιστη απόκριση για τις εφαρμογές και το εύρος του υπέρυθρου φάσματος στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να βρίσκεται εντός των δυο ατμοσφαιρικών παραθύρων (MWIR και LWIR). Εκτός από την ικανότητα ανίχνευσης του κατάλληλου εύρους μηκών κύματος , ο ανιχνευτής επιλέγεται και βάσει άλλων κριτηρίων όπως η ευαισθησία του, η ανάγκη του για ψύξη ή όχι και η ικανότητα του να αποτελεί δομική μονάδα μιας συστοιχίας εστιακού επιπέδου (FPA) με το μικρότερο δυνατό μέγεθος εικονοστοιχείου [115].

Οι ανιχνευτές υπέρυθρων χωρίζονται σε δυο οικογένειες, σε αυτή των **ψυχόμενων** (cooled) και σε εκείνη των **μη ψυχόμενων** (uncooled) ανιχνευτών.

Οι ψυχόμενοι ανιχνευτές απαιτούν ψύξη για τη λειτουργία τους σε κρυογονικές θερμοκρασίες, οι οποίες είναι συνήθως μεταξύ 60 – 100 K. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η ανάγκη για τη μείωση του θερμικού επαγόμενου θορύβου σε επίπεδο πιο χαμηλό από αυτό του θερμικού σήματος εκπομπής του αντικειμένου που

μελετάται. Τα παλαιότερα συστήματα ψύχονταν μέσω αερίου αργού και υγρού αζώτου, ενώ τα πιο πρόσφατα συστήματα ανιχνευτών χρησιμοποιούν θερμοηλεκτρική ψύξη ή ψύκτες Stirling. Η ζωή των ανιχνευτών αυτών είναι περιορισμένη (8 με 15 ώρες συνήθως) και η παραγωγή, η χρήση και η επισκευή τους δαπανηρή. Επίσης, η διαδικασία ψύξης είναι ενεργοβόρα και χρονοβόρα διαδικασία, ενώ η ψυκτική συσκευή είναι και αυτή δαπανηρή και ογκώδης. Η λειτουργία τους αφορά το φασματικό τμήμα μεταξύ 3 – 5 μm και έχουν ανώτερη ποιότητα εικόνας και ευαισθησία από τους μη ψυχόμενους ανιχνευτές σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές σκηνης [41, 116].

Οι μη ψυχόμενοι ανιχνευτές, από την άλλη μεριά, έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής και χρήσης και λειτουργούν ή σταθεροποιούνται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος με τη χρήση κάποιων στοιχείων ελέγχου θερμοκρασίας με αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου στην παραγόμενη εικόνα. Αυτοί οι ανιχνευτές δέχονται την θερμική ακτινοβολία η οποία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της προκαλεί αντίστοιχες αλλαγές στην αντίσταση, το ρεύμα ή την τάση λειτουργίας τους και βάση των διαφορών που προκύπτουν παράγεται η εικόνα. Η ποιότητα της εικόνας αλλά και η ευαισθησία αυτών των ανιχνευτών είναι κατώτερη από εκείνη των ψυχόμενων ανιχνευτών, όσον αφορά τις διαφορές θερμοκρασίας της σκηνης. Η λειτουργία τους περιορίζεται στην ανίχνευσης του φασματικού εύρους μεταξύ 7–12 μm , όπου τα περισσότερα επίγεια σώματα εκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής τους ακτινοβολίας. Οι κάμερες με τέτοιου είδους ανιχνευτές είναι οικονομικότερες, μικρότερες, πιο εύχρηστες, με μικρότερο αριθμό κινούμενων μερών, φθηνότερους φακούς και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης σε σχέση με τις ψυχόμενες κάμερες [41, 116].

Οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους θερμικούς ανιχνευτές, οι οποίοι συναντώνται σε μη ψυχόμενες κάμερες, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους ανιχνευτές φωτονίων, οι οποίοι συναντώνται σε ψυχόμενες κάμερες.

Θερμικοί ανιχνευτές

Οι θερμικοί ανιχνευτές ή οι ανιχνευτές ενέργειας ή αλλιώς ανιχνευτές απορρόφησης φωτονίων μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετατροπείς δυο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο η ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτούς, απορροφάται και αλλάζει τη θερμοκρασία ενός υλικού του ανιχνευτή. Στο δεύτερο στάδιο η ηλεκτρική, πλέον, έξοδος του ανιχνευτή έχει τιμή η οποία διαμορφώθηκε από την κάποια φυσική αλλαγή (όπως αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης) που υπέστη το υλικό του ανιχνευτή όταν σε αυτόν έφτασε η θερμική ακτινοβολία μεταφέροντάς του ενέργεια [102, 117].

Το βασικό πλεονέκτημα των θερμικών ανιχνευτών είναι η απόκρισή τους σε ένα ευρύ τμήμα του υπέρυθρου φάσματος και η απόκριση που έχουν σε θερμοκρασία δωματίου. Από την άλλη το κύριο μειονέκτημά τους ο αργός χρόνος της απόκρισής τους, ο οποίος είναι της τάξης χιλιοστών του δευτερολέπτου. Το μειονέκτημα αυτό τους καθιστά ακατάλληλους για φαινόμενα υψηλών συχνοτήτων [102].

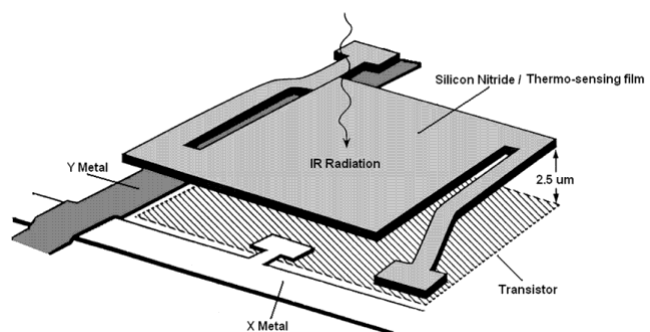
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι εξής ανιχνευτές [102]:

Θερμοστοιχεία (Thermopiles)

Οι ανιχνευτές αυτοί βασίζονται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Ένας τέτοιος ανιχνευτής αποτελείται από έναν αριθμό θερμοζευγών συνδεδεμένων εν σειρά. Το θερμοζεύγος αποτελείται από δυο διαφορετικά μέταλλα και η θέρμανσή του προκαλεί μια τάση ανάλογη της θερμοκρασίας. Μια ειδική συσκευή μετρά τη θερμοηλεκτρική έξοδο και τη μετατρέπει σε τιμή θερμοκρασίας.

Βολόμετρα (Bolometers)

Τα βολόμετρα αποτελούνται από δυο λωρίδες πλατίνας εκ των οποίων η μια είναι εκτεθειμένη στην υπέρυθρη ακτινοβολία ενώ η άλλη όχι και μαζί σχηματίζουν τους δυο κλάδους μιας γέφυρας Wheatstone. Η αλλαγή της θερμοκρασίας της λωρίδας, η οποία



Εικόνα 25. Ανιχνευτής τύπου μικροβολομέτρου,

είναι εκτεθειμένη προκαλεί αλλαγή της ηλεκτρικής της αντίστασης. Το πλέγμα μικροβολομέτρων μπορεί να έχει διαφορετικά μεγέθη συστοιχιών (160×120 , 320×240 , 640×512 και 1024×1024).

Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές (Pyroelectric detectors)

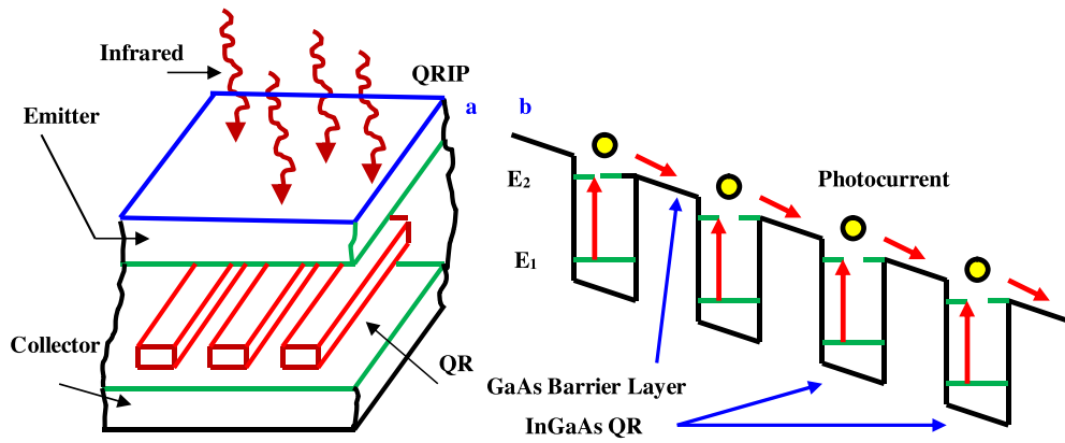
Οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές βασίζονται στην αλλαγή του επιφανειακού φορτίου του υλικού τους με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Μικροπρόβολοι (Microcantilevers)

Αυτοί οι ανιχνευτές βασίζονται στην ανόμοια θερμική διαστολή των ουσιών (όπως του νιτριδίου του πυριτίου και του φιλμ χρυσού). Η μικροπρόβολος (μικροακίδα) δημιουργεί μια χωρητικότητα σε σχέση με μια πλάκα αναφοράς. Η θερμική ακτινοβολία επιδρά κάμπτοντας την ακίδα και ο προσδιορισμός της έκτασης της κάμψης της οδηγεί σε μια αντίστοιχη τιμή θερμοκρασίας.

Ανιχνευτές φωτονίων

Οι ανιχνευτές φωτονίων ή κβαντικοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετατροπείς ενός σταδίου [102]. Κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς και η λειτουργία τους βασίζεται στην επιλεκτική αλλαγή κατάστασης των ηλεκτρονίων του υλικού τους όταν σε αυτό προσπίπτει υπέρυθρη ακτινοβολία, με μια διαδικασία που ονομάζεται εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο [118]. Αυτοί οι ανιχνευτές είναι κατά βάση πιο ευαίσθητοι και ταχύτεροι από τους θερμικούς, αλλά απαιτούν ψύξη, κάποιες φορές ακόμα και σε κρυογονικές θερμοκρασίες με χρήση ψυκτικής μονάδας Stirling ή υγρού αζώτου. Οι ανιχνευτές φωτονίων μπορούν να υποδιαιρεθούν σε ανιχνευτές φωτοαγωγιμότητας, φωτοδιόδους , ανιχνευτές Schottky Barrier, φωτοανιχνευτές QuantumWell IR, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει σχεδιαστεί πλήθος νέων ανιχνευτών υπέρυθρων [117].



Εικόνα 26. Σχηματικό γράφημα Ανιχνευτή φωτονίων τύπου quantum well IR photodetector (QWIP) στα αριστερά (a) και σχηματικό γράφημα λειτουργίας της ζώνης αγωγιμότητας του ανιχνευτή QWIP υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου στα δεξιά (b)

3.5.5 Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων/σήματος

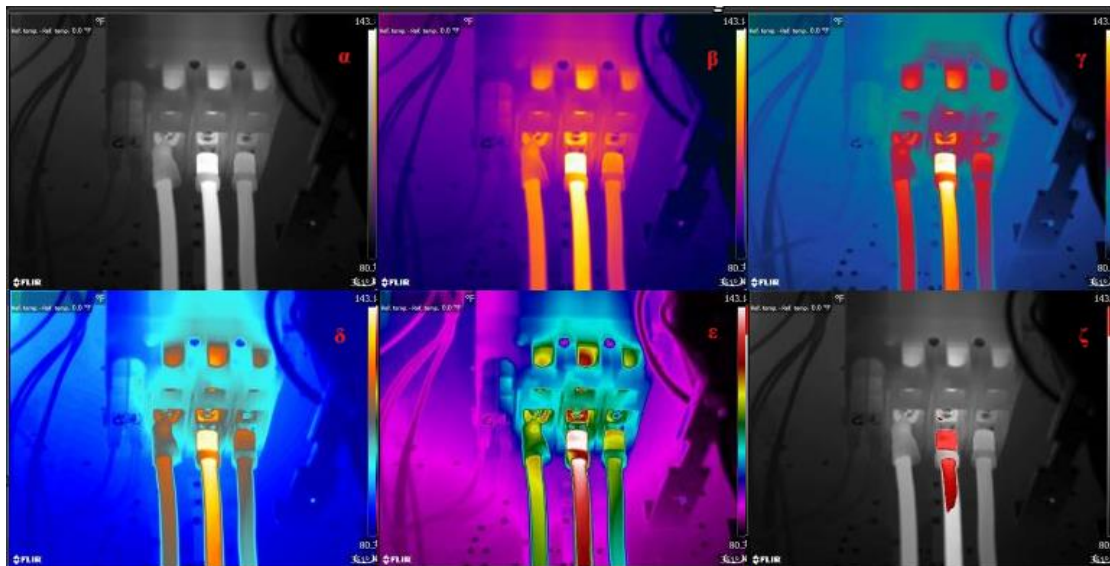
Η εικόνα θερμικής απεικόνισης η οποία προκύπτει από τους ανιχνευτές απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για να μπορέσει να μας αποκαλύψει τις χρήσιμες οπτικές πληροφορίες που περιέχει. Αρχικά είναι σκοτεινή, τα άκρα του απεικονιζόμενου αντικειμένου ασαφή, η αντίθεση του ακτινοβολούντος σώματος σε σχέση με το υπόβαθρό του χαμηλή όπως επίσης χαμηλή είναι και η διακριτική ικανότητα. Το σύστημα επεξεργασίας ενισχύει την ανομοιομορφία της εικόνας, τη διακριτική ικανότητα, την αντίθεση, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει και τον σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Για κάθε μια από τις παραπάνω διαδικασίες μια ή περισσότερες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων της ηλεκτρονικής μονάδας επεξεργασίας και βελτίωσης του αρχικού σήματος, κάνουν χρήση κατάλληλων αλγόριθμων καθώς και φίλτρων τα οποία αποκόπτουν συγκεκριμένα εύρη συχνοτήτων [110, 117,119].

3.5.6 Διεπαφή χρήστη - Οθόνη

Το τέταρτο βασικό «κομμάτι» της μιας θερμοκάμερας είναι το σύστημα διεπαφής με τον χρήστη, στο οποίο το ηλεκτρονικό σήμα που προέρχεται από το σύστημα επεξεργασίας απεικονίζεται τελικά ως θερμική εικόνα σε μια οθόνη. Μέσω των

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

πλήκτρων, των μηχανισμών και της οθόνης γίνεται εφικτή τόσο η παρουσίαση του θερμογραφήματος, όσο η ρύθμιση και ο έλεγχος της κάμερας. Οι οθόνες των θερμοκαμερών μπορεί να βασίζονται σε τεχνολογία υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display - LCD), οργανικής διόδου εκπομπής φωτός (organic light emitting diode - OLED) ή υγρών κρυστάλλων σε πυρίτιο (Liquid Crystal on Silicon - LCOS). Αυτές οι οθόνες είναι έγχρωμες και οι περιοχές οι οποίες έχουν ίδια θερμοκρασία απεικονίζονται με το ίδιο χρώμα. Για την αναπαράσταση εικόνων με βάθος από 8 έως 16 bit ανά pixel χρησιμοποιείται η κλίμακα του γκρι. Για την διευκόλυνση της ερμηνείας, της ανάλυσης τους και τον τονισμό των διαφορετικών θερμοκρασιών, τα θερμογραφήματα οπτικοποιούνται με τη βοήθεια διάφορων παλετών ψευδοχρωμάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 29 [125]. Η χρωματική παλέτα απεικόνισης μπορεί να διαφέρει αλλά συνήθως οι θερμότερες περιοχές απεικονίζονται με χρώμα που τείνει προς το ερυθρό όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία και προς το ιώδες όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία [119,120,].



Εικόνα 27. Διάφορες χρωματικές παλέτες: (α) WHITE HOT, (β) IRONBOW, (γ) LAVA, (δ) ARCTIC, (ε) RAINBOW HC, (ζ) ISOTHERMS

Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω διασυνδέσεων USB, FireWire, Ethernet ή RS-232. Οι εικόνες συμπίεζονται σε μορφή JPEG, ενώ τα βίντεο σε μορφή H264 ή MPEG. Η χωρική διακριτική ικανότητα στα εμπορικά συστήματα ποικίλει από 160×120 pixel έως 1280×1024 pixel και το οπτικό πεδίο έχει εύρος από 1° έως 58°.

3.5.7 Ανάγκη για έλεγχο και αξιολόγηση συστήματος υπέρυθρης θερμογραφίας

Πολύ σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα συστήματα υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης πρέπει να αξιολογούνται ως προς την απόδοσή τους με τη διενέργεια ποιοτικών ελέγχων καθώς και να βαθμονομούνται ύστερα από τον χρόνο χρήσης του οποίου ορίζει ο κατασκευαστής, ώστε να διασφαλίζεται η καλή ποιότητα απεικόνισης, αλλά και η ακρίβειά τους να βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων [117, 118].

3.5.8 Επιλογή κατάλληλης θερμοκάμερας

Κατά την αναζήτηση μιας θερμοκάμερας, τα κριτήρια του βάρους, του μεγέθους και της φορητότητας δεν αρκούν για τη λήψη μιας σωστής απόφασης. Παράγοντες όπως η θερμική ανάλυση, η χωρική διακριτική ικανότητα, ο τρόπος λειτουργίας, ο τύπος του ανιχνευτή, η δυναμική περιοχή, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη διαφορά θερμοκρασίας, η σταθερότητα, η ακρίβεια και η απόκριση, είναι εξαιρετικά σημαντικοί [41].

Στην αγορά διατίθεται μεγάλο πλήθος πολλών διαφορετικών μοντέλων, όμως κανένα από αυτά δεν έχει σχεδιαστεί για ιατρική χρήση. Παρ' όλα αυτά όταν μια θερμοκάμερα χρησιμοποιείται για ιατρικούς σκοπούς πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις καθώς συγκαταλέγεται, σε αυτή την περίπτωση, στον ιατροτεχνολογικό εξοπλισμό. Για την ορθότερη επιλογή μιας θερμικής κάμερας για ιατρικούς σκοπούς οι Kevin J Howell και Roy E Smith το 2009, ύστερα από εξέταση πολλών παραγόντων παρουσίασαν ένα σύνολο οδηγιών για την προμήθεια ιατρικού θερμογραφικού εξοπλισμού, με σκοπό να διασφαλιστεί η λήψη αξιόπιστων μετρήσεων και η υιοθέτηση ασφαλών πρακτικών [121]. Πλέον, η διεθνής ακαδημία κλινικής θερμολογίας, διαθέτει κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες διασφάλισης ποιότητας, πρότυπα και πρωτόκολλα για την κλινική θερμογραφική απεικόνιση από το 2015, τα οποία έχουν επιθεωρηθεί το έτος 2020 χωρίς να αναθεωρηθεί κάτι [124].

3.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση

Οι θερμικές κάμερες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μετρούν την ενέργεια της θερμικής ακτινοβολίας ενός σώματος και τη μετατρέπουν σε τιμή θερμοκρασίας. Ωστόσο, η

ανιχνευόμενη, από τους ανιχνευτές, ακτινοβολία δεν αντιστοιχεί εξ ολοκλήρου στην ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από την υπό μελέτη δομή. Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια που μετράται αποτελεί το άθροισμα των ενεργειών του εξεταζόμενου αντικειμένου, της εκπομπής λόγω ανάκλασης από πηγές του περιβάλλοντος και της εκπομπής της ίδιας της ατμόσφαιρας (εξαρτάται από την ατμοσφαιρική διαπερατότητα) η οποία περιέχει μόρια που αλληλεπιδρούν με τις θερμικές ακτίνες, διασκορπίζοντας τις ή απορροφώντας τις [122].

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διενέργεια υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης είναι η διαπερατότητα του μέσου διάδοσης, η οποία μπορεί να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό για διαφορετικά μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάδοση του ορατού φωτός μέσα στο νερό, η οποία πραγματοποιείται με μεγάλη επιτυχία και μικρές απώλειες. Αντιθέτως, η υπέρυθρη ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του νερού πλήρως και η διαπερατότητά του προσεγγίζει το μηδέν για μήκη κύματος άνω των 1500nm. Κατά συνέπεια, η υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί κάτω από το νερό [122].

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τις μετρήσεις, οδηγώντας στην παραποίηση της πραγματικής θερμοκρασίας του μελετούμενου σώματος είναι η ύπαρξη κάποιας άλλης πηγής θερμότητας όπως ο ήλιος, ένας λαμπτήρας ή κάποιο άλλο θερμαντικό σώμα. Επίσης, με σκοπό την αποφυγή κάποιου σφάλματος μέτρησης είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε την ικανότητα εκπομπής του σώματος που μελετάμε καθώς πρόκειται για έναν παράγοντα τον οποίο σε ορισμένες θερμοκάμερες δίνεται η δυνατότητα να τον εισάγουμε πριν τη λήψη και αν κάτι τέτοιο δε γίνει ή πρόκειται για μια άγνωστη τιμή, το επακόλουθο είναι η παραμόρφωση των αποτελεσμάτων της εξόδου της κάμερας. Όταν η ικανότητα εκπομπής είναι κοντά σε αυτή του μέλανος σώματος, όπως συμβαίνει με το ανθρώπινο δέρμα, το οποίο αποτελεί την κύρια επιφάνεια ενδιαφέροντος στις ιατρικές εφαρμογές, τότε οι υπολογισμοί βάσει της θεωρίας του μέλανος σώματος μπορούν να εφαρμοστούν και να δώσουν τη λύση. Κάτι τέτοιο δε μπορεί να εφαρμοστεί στα εσωτερικά όργανα και στην καρδιά όπου ο συντελεστής εκπομπής είναι αισθητά μικρότερος της μονάδας. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περιπτώσεις χειρουργικών εφαρμογών θερμικής απεικόνισης [123].

Εκτός των παραπάνω, από τα πρότυπα και τις οδηγίες κλινικής θερμογραφίας, τα οποία έχουν οριστεί από τη διεθνή ακαδημία κλινικής θερμολογίας, απορρέει το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της υπέρυθρης θερμογραφίας. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να αναλυθούν σε έξι συνιστώσες, οι οποίες είναι: οι συνθήκες κατά τη λήψη του θερμογραφήματος, το σύστημα απεικόνισης, η χρήση κατάλληλου ή μη κατάλληλου εξοπλισμού, η τήρηση ή όχι κατάλληλου πρωτοκόλλου από τον εξεταζόμενο, το πρωτόκολλο απεικόνισης και η επιλογή προσωπικού για την πραγματοποίηση της διαδικασίας [124].

3.6.1 Συνθήκες κατά τη λήψη του θερμογραφήματος

- Κατάλληλη αίθουσα απεικόνισης: Θα πρέπει ο χώρος και ο σχεδιασμός του να πληρούν τις εκάστοτε θερμοδυναμικές απαιτήσεις (διατήρηση ομοιογενούς θερμοκρασίας). Σημαντικά είναι η επαρκής χωρητικότητα, η τοποθέτηση του εξεταζόμενου σε ίση απόσταση από τοίχους και η ύπαρξη μονωτικού υλικού στο δάπεδο (όπως μοκέτα ή χαλί).
- Θερμοκρασία δωματίου: Ιδανικό εύρος θερμοκρασιών θεωρείται μεταξύ 18 και 23 °C, ενώ η διακύμανσή της δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μια μονάδα κατά τη διαδικασία μέτρησης.
- Υγρασία δωματίου: Πρέπει να ελέγχεται, όπως και η θερμοκρασία και να μην είναι σε υψηλά επίπεδα καθώς η συσσώρευσή της στο δέρμα, οι ατμοί ή η εφίδρωση μπορεί να αλληλεπιδράσουν με την υπέρυθρη ακτινοβολία, αλλοιώνοντας τα αποτελέσματα.
- Πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας ή παράγοντες απώλειας ενέργειας στο χώρο: Δεν πρέπει να υπάρχουν πηγές υπέρυθρων, όπως φωτιστικά πυρακτώσεως, ηλιακή ακτινοβολία, αγωγοί θέρμανσης/ AC και σωλήνες ζεστού νερού, ρεύματα αέρα, ενώ οι πόρτες και τα παράθυρα πρέπει να σφραγίζουν επαρκώς.

3.6.2 Σύστημα απεικόνισης

Τήρηση των ελαχίστων προτύπων εξοπλισμού: Με σκοπό την ποιοτική παραγωγή εικόνας και τις ακριβείς κλινικές ερμηνείες τα συστήματα απεικόνισης για ιατρικές εφαρμογές πρέπει να έχουν τις κατάλληλες προδιαγραφές. Οι δυο αναγνωρισμένοι τύποι εξοπλισμού σήμερα είναι η θερμογραφία υγρών κρυστάλλων (LCT) και η ηλεκτρονική υπέρυθη τηλεθερμογραφία (IRT). Τα ελάχιστα όρια είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία και οι περισσότερες θερμοκάμερες της αγοράς για κλινική χρήση υπερβαίνουν τις απαιτήσεις.

3.6.3 Χρήση κατάλληλου ή μη κατάλληλου εξοπλισμού

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την παραγωγή υπέρυθρων εικόνων με διαγνωστική αξία πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, ώστε να μην προκύπτουν σφάλματα. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι συσκευών θερμικής ανίχνευσης όμως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι για υπέρυθη θερμογραφική απεικόνιση. Τέτοιες συσκευές είναι οι παρασπονδυλικές συσκευές διπλού αισθητήρα (για αξιολόγηση καταστάσεων των παρασπονδυλικών ιστών και της σπονδυλικής στήλης), οι συσκευές θερμογραφίας μικροκυμάτων και η συσκευή μονού αισθητήρα - Single Sensor Devices, οι οποίες μετρούν τη θερμοκρασία ενός σημείου του σώματος και είναι ακατάλληλες για εφαρμογές υπέρυθρης απεικόνισης.

3.6.4 Τήρηση ή όχι κατάλληλου πρωτοκόλλου από τον εξεταζόμενο

Η τήρηση του πρωτοκόλλου από τον ασθενή πριν την εξέταση, αλλά και η σωστή διαχείρισή του ασθενή από τον τεχνικό, οδηγούν συνδυαστικά στη μείωση των σφαλμάτων και στην μεγαλύτερη ακρίβεια των παραγόμενων εικόνων. Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες μετρήσεις είναι:

- Η ηλιοθεραπεία πριν την εξέταση
- Η χρήση αλοιφών ή άλλων σκευασμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- Το ξύρισμα της περιοχής ενδιαφέροντος τη μέρα της εξέτασης
- Η φυσιοθεραπεία, ο βελονισμός, θεραπεία με υπερήχους, χειροπρακτική, φυσική άσκηση, το λουτρό, η χρήση ατμόλουτρου ή σάουνας, η θερμοθεραπεία ή παγοθεραπεία σε χρόνο λιγότερο από 24 ώρες πριν την εξέταση
- Η λήψη αγειοδραστικών ή παυσίπονων φαρμάκων τη μέρα της εξέτασης
- Το ντους ή ο θηλασμός όταν πραγματοποιείται λιγότερο από μια ώρα πριν την εξέταση (σε περίπτωση εξέτασης των μαστών)
- Κάποια χειρουργική επέμβαση που διενεργήθηκε σε χρόνο λιγότερο από 12 εβδομάδες από την ημερομηνία της εξέτασης
- Η ύπαρξη κάποιου πόνου, κάποιου τραυματισμού ή δυσλειτουργίας, που δεν έχει αναφερθεί, στην περιοχή ενδιαφέροντος
- Ο μη επαρκής χρόνος εγκλιματισμού του εξεταζόμενου στις περιβαλλοντικές συνθήκες χώρο εξέτασης

3.6.5 Πρωτόκολλο απεικόνισης

Ένα πρωτόκολλο σχετικό με τις παραγόμενες εικόνες καθορίζει πως δε θα υπάρξουν εσφαλμένα αποτελέσματα λόγω:

- Ανεπαρκούς αριθμού ή λανθασμένης γωνίας λήψεων
- Λανθασμένης θέσης εξεταζόμενου σε σχέση με τη θερμοκάμερα (ανάλογα τον τύπο της)

3.6.6 Επιλογή προσωπικού για την πραγματοποίηση της διαδικασίας

Η επαρκής εκπαίδευση, η εξειδίκευση και γενικότερα η άρτια κατάρτιση αποτελούν αναγκαία χαρακτηριστικά των τεχνικών στη θερμογραφική απεικόνιση. Αν δεν υπάρχουν η ποιότητα της λήψης είναι αμφίβολη, όπως και η μετέπειτα ερμηνεία της. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η ύπαρξη πιστοποιημένων τεχνικών κλινικής θερμογραφίας.

3.7 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας

3.7.1 Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι τα παρακάτω [104, 139, 140]:

- Πρόκειται για μη καταστρεπτική, μη επεμβατική και ανέπαφη τεχνική
- Είναι ασφαλής τεχνική τόσο για το προσωπικό, όσο και για τον εξεταζόμενο
- Δεν χρησιμοποιεί ιοντίζουσα ακτινοβολία
- Εύκολη ερμηνεία αποτελεσμάτων καθώς αυτά έχουν (συνήθως) μορφή εικόνας ή βίντεο
- Απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο εκπαίδευσης σε σχέση με άλλα απεικονιστικά συστήματα
- Είναι απλή μέθοδος, ως προς τον χειρισμό του εξοπλισμού
- Δεν προκαλεί πόνο
- Εύκολη μεταφορά και αποθήκευση εξοπλισμού
- Είναι μια οικονομική μέθοδος
- Αποτελεί μια ιδανική τεχνική για προληπτική ιατρική
- Έχει ευρύτατο φάσμα εφαρμογών
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο παρακολούθησης της εξέλιξης μιας διαδικασίας ή δυσλειτουργίας χωρίς καμία επιβάρυνση
- Εντοπίζει βλάβες σε μια συσκευή ή έναν εξοπλισμό πριν αυτές να γίνουν αντιληπτές
- Ως διαγνωστικό μέσο βοηθά στη μείωση του χρόνου και του κόστους επισκευής και συντήρησης ενός συστήματος
- Δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο

3.7.2 Μειονεκτήματα – Περιορισμοί

Όπως κάθε τεχνική έτσι και η υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση έχει κάποια μειονεκτήματα και κάποιους περιορισμούς στους οποίους συγκαταλέγονται [41, 104, 141]:

- Η ενδεχόμενη πρόκληση ψευδών αντιθέσεων, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία της ερμηνείας
- Το υψηλό κόστος των συστημάτων ενεργητικής θερμογραφίας
- Ο έλεγχος ελαττωμάτων τα οποία συνδέονται μόνο με μια μετρήσιμη αλλαγή των θερμικών ιδιοτήτων του εξεταζόμενου σώματος
- Η δυνατότητα ελέγχου σε ένα περιορισμένο βάθος του υλικού, καθώς η αποτύπωση χαρακτηριστικών είναι πιο δύσκολη αρκετά εκατοστά κάτω από την επιφάνεια της υπό μελέτη δομής (χωρίς αυτό να είναι αδύνατον σε κάποιες περιπτώσεις)
- Η εφαρμογή της τεχνικής γίνεται αρκετά πιο δύσκολη σε περιπτώσεις σωμάτων με χαμηλή εκπομπή, όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στην εκπομπή ή όταν συμβαίνουν έντονες αντανakλάσεις
- Ο περιορισμός εφαρμογής της τεχνικής λόγω περιβαλλοντολογικών συνθηκών
- Οι κάμερες υψηλής ποιότητας είναι πολύ ακριβές και μπορεί να καταστραφούν εύκολα
- Για να υπάρξει ακρίβεια στις μετρήσεις θα πρέπει αυτές να διενεργούνται σε συγκεκριμένο χώρο, χωρίς την ύπαρξη άλλων πηγών θερμότητας ικανών να επηρεάσουν τα αποτελέσματα
- Οι παραγόμενες εικόνες συχνά χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία και η ερμηνεία τους προϋποθέτει κατάλληλη εκπαίδευση
- Η επιτυχία της μέτρησης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον χειριστή
- Πολλές φορές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός με κάποια άλλη διαγνωστική/ απεικονιστική τεχνική, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα

3.8 Εφαρμογές

Η θερμοκρασία αποτελεί μια από τις πλέον αξιόπιστες παραμέτρους για την κατάσταση ενός σώματος, συστήματος ή εξοπλισμού και στην υπέρυθρη θερμογραφία δίνεται από τα θερμικά δεδομένα τα οποία συνθέτουν μια θερμική και στη συνέχεια θερμοκρασιακή κατανομή. Η υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση χρησιμοποιείται για την πρόληψη, την παρακολούθηση, την επιθεώρηση και τη διάγνωση βλαβών [126]. Χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς και κάποιες από τις κυριότερες εφαρμογές της είναι [126, 141, 142] :

3.8.1 Παρακολούθηση κατάστασης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων

Η αξιοπιστία των ηλεκτρικών συστημάτων συνδέεται άμεσα με την σταθερή τιμή θερμοκρασίας σε όλα τα τμήματα των εξοπλισμών. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οφείλεται σε ελαττώματα εξαρτημάτων, χαλαρές συνδέσεις, υπέρταση, διάβρωση, ανεπαρκή μόνωση, ανισορροπία φορτίου ή άλλους παράγοντες και ενέχεται να οδηγήσει σε βλάβες ή διακοπή λειτουργίας των συστημάτων. Η υπέρυθρη θερμογραφία πλεονεκτεί καθώς δεν απαιτείται η φυσική επαφή, ούτε η διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Η υπέρυθρη θερμογραφική απεικόνιση χρησιμοποιείται επίσης για τον έλεγχο θερμοκρασίας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για τον έλεγχο και τη βελτίωση της λειτουργίας τους [127,128].

3.8.2 Επιθεώρηση υποδομών

Ο έλεγχος των υποδομών δίνει πληροφορίες για την κατάστασή τους, εξασφαλίζει την ασφάλεια των πολιτών και διασφαλίζει ότι δε θα συμβεί ένα ξαφνικό ατύχημα, το οποίο μπορεί να κοστίζει την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Η επιθεώρηση κτηρίων και κατασκευών (όπως σπίτια, σχολεία, γέφυρες, δρόμοι, αεροδρόμια) για την ανίχνευση υγρασίας, διαρροών, ρωγμών και πολλών ακόμα παραγόντων μπορεί να γίνει γρήγορα και εύκολα με την μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας βοηθώντας στην αποφυγή σοβαρών κινδύνων [129,130].

3.8.3 Ανίχνευση αερίων

Αρκετές χημικές ενώσεις και αέρια είναι αόρατα με γυμνό μάτι. Ορισμένα από αυτά τα αέρια είναι επιβλαβή τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο. Με την υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να γίνει ανίχνευση των ουσιών αυτών ή διαρροών χωρίς την έκθεση του ελεγκτή σε αυτές. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν οι πετροχημικές εγκαταστάσεις [126,131].

3.8.4 Παρατήρηση άγριων ζώων και διάγνωση στην κτηνιατρική

Η υπέρυθρη θερμογραφία βρίσκει εφαρμογή στην παρατήρηση πολλών άγριων ζώων κατά τις νυχτερινές ώρες, ενώ αποτελεί χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο στην κτηνιατρική για την ανίχνευση ασθενειών και παθολογιών αποφεύγοντας έτσι περιττές εξετάσεις και χειρουργικές επεμβάσεις [131].

3.8.5 Συστήματα παρακολούθησης

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παρακολούθησης και εντοπισμού εισβολέων σε διάφορους χώρους (όπως σχολεία, στρατόπεδα, αεροδρόμια, κυβερνητικές εγκαταστάσεις, δημόσιες υπηρεσίες, εργοστάσια, αποθήκες, οικείες, εμπορικά κέντρα) με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων ανίχνευσης προτύπων. Το πλεονέκτημα της υπέρυθρης θερμογραφίας έναντι άλλων μεθόδων είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε απόλυτο σκοτάδι, σε καπνό, ομίχλη ή να ανιχνεύει άτομα κρυμμένα πίσω από αντικείμενα των οποίων βέβαια η θερμική διαπερατότητα δεν είναι μικρή [126, 132].

3.8.6 Έλεγχοι σε αεροσκάφη και αξιολόγηση σύνθετων υλικών της αεροδιαστημικής

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον ταχύ και με ακρίβεια έλεγχο πολλών τμημάτων των αεροσκαφών με σκοπό την εύρεση ελαττωμάτων. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πληροφόρηση του πιλότου

για τις εξωτερικές συνθήκες. Μια ακόμα εφαρμογή είναι και η αξιολόγηση σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική [102].

3.8.7 Εφαρμογές στη γεωργία και τη βιομηχανία τροφίμων

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της άρδευσης και της σωστής ωρίμανσης γεωργικών προϊόντων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση ασθενειών και παθογόνων μικροοργανισμών. Επιπροσθέτως, η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι χρήσιμη για την εύρεση χώρων με κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για την αποθήκευση σιτηρών και τροφίμων γενικότερα [133].

3.8.8 Έλεγχοι σε πυρηνικές βιομηχανίες

Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και την ανίχνευση βλαβών πυρηνικού εξοπλισμού στον τομέα της πυρηνικής βιομηχανίας. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση συστημάτων υπέρυθρης θερμογραφίας σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό τον έλεγχο και τη διασφάλιση της καλής λειτουργίας και αξιοπιστίας κρίσιμων για την ασφάλεια συστημάτων [130].

3.8.9 Εφαρμογές στην ιατρική

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένας πολύ αξιόπιστος δείκτης της ασθένειας είναι η θερμοκρασία του σώματος. Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει το πλεονέκτημα της μέτρησης χωρίς φυσική επαφή αλλά και το πλεονέκτημα της παρουσίας μια θερμικής κατανομής. Στον τομέα της ιατρικής χρησιμοποιείται για [126, 130, 133, 134]:

- Ανίχνευση καρκίνου λόγω μη φυσιολογικό μοτίβο θερμότητας στην περιοχή
- Ανίχνευση όγκου, εξαιτίας αυξημένης αιματικής ροής και αυξημένου μεταβολικού ρυθμού

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- Ανίχνευση ενδείξεων για αγγειακές διαταραχές και νευροπάθειες, λόγω φλεγμονών και αλλαγών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του δέρματος
- Ανίχνευση γυναικολογικών προβλημάτων
- Ανίχνευση δερματικών λοιμώξεων
- Ανίχνευση πυρετού
- Διενέργεια προ συμπτωματικού ελέγχου
- Απεικόνιση εγκεφάλου
- Αξιολόγηση πεπτικών διαταραχών
- Παρακολούθηση του πόνου, της διάγνωσης και της θεραπείας
- Εκτίμηση των επιπλοκών του ποδιού σε διαβητικούς ασθενείς
- Ανίχνευση ανωμαλιών του μαστού
- Διάγνωση του καρκίνου του μαστού με χρήση διαφόρων τεχνικών
- Διενέργεια δυναμικής αγγειοθερμογραφίας (DATG)
- Αξιολόγηση των κάτω άκρων σε ασθενείς με αρτηριακές παθήσεις
- Αξιολόγηση του ρυθμού αναπνοής σε συνθήκες κίνησης
- Αξιολόγηση της νόσου της εξαμιστικής ξηροφθαλμίας
- Εκτίμηση παγιδεύσεων νεύρων
- Μετρήσεις θερμοκρασίας σε χειρουργικές επεμβάσεις ανοιχτής καρδιάς και μεταμοσχεύσεις
- Εκτίμηση εγκαυμάτων
- Παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας φαρμακευτικών αγωγών και θεραπειών
- Μετρήσεις θερμοκρασίας στην οδοντιατρική
- Αξιολόγηση της ζωτικότητας των ιστών

3.8.10 Εφαρμογές στον αθλητισμό

- Ανίχνευση τραυματισμών στην αθλητιατρική
- Μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματος στα θαλάσσια σπορ
- Αξιολόγηση των χαρακτηριστικών και της απόδοσης αθλητικών ενδυμάτων
- Αξιολόγηση του εξοπλισμού σε διάφορα αθλήματα
- Έλεγχος αύξησης της θερμοκρασίας στα αγωνιστικά αυτοκίνητα
- Έλεγχος και ανίχνευση βλαβών αθλητικού εξοπλισμού και υλικών
- Πρόληψη τραυματισμών λόγω ανίχνευσης υπερθερμίας ή υποθερμίας πριν την άσκηση
- Αξιολόγηση ή ανίχνευση δερματικών, μυϊκών, αγγειακών κακώσεων ή κακώσεων των οστών και των αρθρώσεων
- Προσδιορισμός του μοτίβου βάρδισης και τρεξίματος
- Αξιολόγηση της επίδρασης των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και των υποδημάτων στα πόδια
- Αξιολόγηση θερμοκρασιών στο σώμα των αλόγων στο άθλημα της ιππασίας
- Μετρήσεις της θερμοκρασίας του δέρματος πριν, μετά, αλλά και κατά τη διάρκεια αερόβιων αθλητικών δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της ποδηλασίας, του ποδοσφαίρου, και του τρεξίματος

Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών και εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιείται στη βιομηχανία χαρτιού, στη ναυτιλιακή βιομηχανία, στην πυρόσβεση και τη δασοπροστασία, ενώ το φάσμα των εφαρμογών διευρύνεται συνεχώς [126].

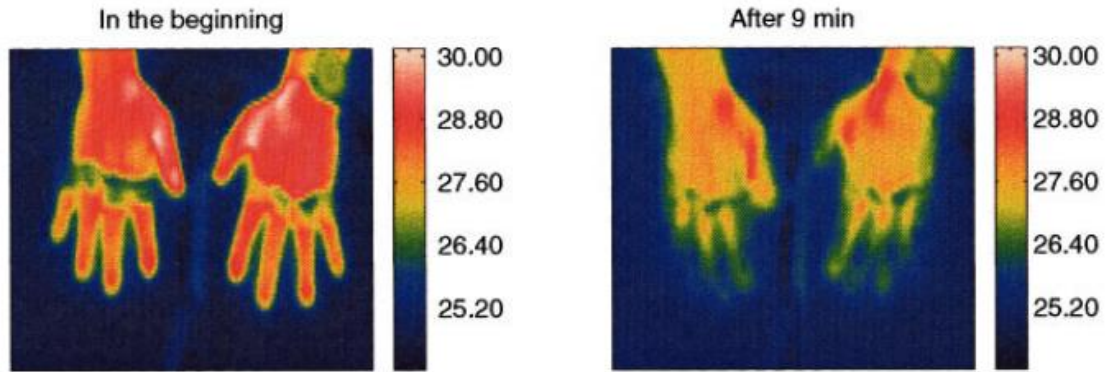
3.9 Μετρήσεις ακτινοβολίας με χρήση κάμερας υπέρυθρης θερμογραφίας κατά την αερόβια σωματική άσκηση.

Όπως έχει προαναφερθεί, το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει πάντοτε θερμική ακτινοβολία, η οποία μπορεί να ανιχνευτεί από μια θερμοκάμερα και να πληροφορηθούμε για την επιφανειακή θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμοκρασία αυτή, πριν, μετά αλλά και κατά τη διάρκεια της άσκησης, μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με την αθλητική απόδοση, την ενεργειακή συμπεριφορά του ανθρώπινου σώματος και τη μυϊκή δραστηριότητα [32, 136].

Σε αρκετές περιπτώσεις η θερμοκρασία της επιφάνειας του δέρματος μειώνεται κατά τη διάρκεια της άσκησης, αντί να αυξάνεται, όμως κάποιες έρευνες παρουσιάζουν ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας πυρήνα και δέρματος [136]. Σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, κατά την αρχική φάση της άσκησης παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας του δέρματος λόγω της αγγειοσυσταλτικής απόκρισης του οργανισμού στην άσκηση. Μετά τη φάση αυτή συνήθως η θερμοκρασία του δέρματος τείνει να αυξηθεί λόγω του αίματος που μετατοπίζεται από το εσωτερικό του σώματος προς το δέρμα. Ωστόσο, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μέτρια, σχετικά με το ιδανικό της εύρος για τον ανθρώπινο οργανισμό, η θερμοκρασία του δέρματος μπορεί να μειωθεί εξαιτίας των φαινομένων της μεταγωγής, της εξάτμισης και της ακτινοβολίας [143, 144]. Σε ορισμένες περιοχές του σώματος η θερμοκρασία είναι το αποτέλεσμα της μυϊκής δραστηριότητας, της διαστολής των αγγείων και της εξάτμισης του ιδρώτα [136, 144].

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών και πειραμάτων σχετικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του δέρματος πριν, μετά, αλλά και κατά τη διάρκεια της αερόβιας σωματικής άσκησης.

Οι Alla Zontak et al. σε μια μελέτη που έκαναν το 1998 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η άσκηση έχει σημαντική επίδραση τόσο στη θερμοκρασία του δέρματος όσο και στην κυκλοφορία του αίματος. Στη μελέτη αυτή έλαβαν μέρος δέκα νέοι και υγιείς άνδρες οι οποίοι ασκήθηκαν με σταθερή ένταση για 20 λεπτά της ώρας. Η άσκηση έγινε σε βαθμονομημένο εργομετρικό ποδήλατο και με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφικής απεικόνισης πραγματοποιήθηκαν λήψεις στην πίσω – πάνω μεριά της παλάμης των χεριών. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα οι θερμοκρασίες των άνω άκρων μειώνονταν αισθητά κατά τη διάρκεια της άσκησης [33].



Εικόνα 28. Θερμογραφήματα κατά τη διάρκεια της άσκησης

Άλλη μια έρευνα των M Torii et al. επιβεβαιώνει τα παραπάνω. Σε αυτή έλαβαν μέρος δέκα υγιείς άνδρες, οι οποίοι έκαναν ποδήλατο με διαφορετικό φόρτο εργασίας από 50 έως 150 Watt (W). Το πείραμα εκτελέστηκε εντός θαλάμου με ελεγχόμενες κλιματικές συνθήκες σε ένα εύρος περιβαλλοντικής θερμοκρασίας μεταξύ 10°C – 40 °C και υγρασίας 45% - 55%. Η θερμοκρασία του δέρματος μετρήθηκε με τη βοήθεια συστημάτων θερμογραφίας και καταγραφής θερμοστοιχείων. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερη ήταν η εφίδρωση. Αντιθέτως η θερμοκρασία του δέρματος μειωνόταν όσο πιο απαιτητική γινόταν η δοκιμασία και όσο ο χρόνος περνούσε, ενώ σε όλες τις συνθήκες πραγματοποίησης του πειράματος η μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος ήταν σχεδόν η ίδια. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι το ποσό της μεταβολή της θερμοκρασίας του δέρματος δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αλλά δεν υπάρχει και συσχέτιση με τον ρυθμό της εφίδρωσης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η πτώση της θερμοκρασίας στο δέρμα δεν οφείλεται σε ψύξη του δέρματος λόγω εξάτμισης του ιδρώτα, αλλά σε αγγειοσυστολή που προκλήθηκε πιθανώς από μη θερμικούς παράγοντες [34].

Σε μια νεότερη μελέτη [32] μετρήθηκε η θερμοκρασία του δέρματος κατά τη διάρκεια της στατικής ποδηλασίας σε εργομετρικό ποδήλατο και κατά το τρέξιμο σε διάδρομο με διαβαθμισμένο φορτίο. Στο πείραμα έλαβαν μέρος 8 ερασιτέχνες αθλητές και προσπάθησαν μέχρι το όριο της αποτυχίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της θερμοκρασίας του δέρματος κατά την άσκηση, η οποία δε διέφερε στα κάτω άκρα για τους δυο τύπους άσκησης, ενώ στα άνω άκρα παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση της

μέσης θερμοκρασίας του δέρματος, κάτι που ίσως οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας εκτέλεσης κινήσεων των άνω άκρων κατά το τρέξιμο.



Εικόνα 29. Θερμογράφημα δρομέα πριν την έναρξη της κούρσας

Σε μια άλλη έρευνα, με τη βοήθεια θερμικής απεικόνισης αποκαλύφθηκαν οι αλλαγές στη θερμοκρασία του δέρματος κατά τη διάρκεια άσκησης διαβαθμισμένης έντασης. Στην πειραματική διαδικασία πήραν μέρος δεκαπέντε καλά εκπαιδευμένοι δρομείς και μελετήθηκε όλη η πρόσθια επιφάνεια του σώματός τους. Εκτέλεσαν τη δοκιμασία σε διάδρομο μέχρι να φτάσουν στο μέγιστο ατομικό καρδιακό ρυθμό τους. Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος παρουσίασε πτώση από την έναρξη της άσκησης, ενώ οι μηροί και οι πηγές ήταν εκείνοι που εμφάνισαν ταχύτερη πτώση της θερμοκρασίας. Στο τέλος της άσκησης η θερμοκρασία της επιδερμίδας ήταν 3-5 °C πιο κάτω σε σχέση με την αρχική τιμή της. Μετά το πέρας της δοκιμασίας και κατά τη διάρκεια της ανάρρωσης, στα θερμογραφήματα, άρχισαν να εμφανίζονται υπερθερμικά σημεία, ενίοτε σε σχήμα κλαδιού, τα οποία οφείλονται σε διατρητικά αγγεία των μυών. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από άλλες μελέτες, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε συσχέτιση της μεταβολής του καρδιακού ρυθμού με την αλλαγή της θερμοκρασίας του δέρματος [36]. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα και με περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαν να προσδιοριστούν τρόποι (όπως κατάλληλη ένδυση, εξοπλισμός και προετοιμασία) οι οποίοι θα βοηθούσαν στη διαδικασία της θερμоруθμησης σε μια συγκεκριμένη αθλητική ή σωματική δραστηριότητα [35].

4. Πειραματική διαδικασία – Αποτελέσματα

4.1 Εξοπλισμός πειράματος

Για τη διαδικασία του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο Παρακάτω εξοπλισμός:

Ποδήλατο

Η αθλητική δοκιμασία πραγματοποιήθηκε με ένα ποδήλατο τύπου « trekking », δηλαδή σχεδιασμένο για μεικτή χρήση σε αστικό και ημιαστικό περιβάλλον. Το συγκεκριμένο δίτροχο ήταν της εταιρίας SCOTT και συγκεκριμένα το μοντέλο SUB CROSS 30 [145].



Εικόνα 30. Ποδήλατο SCOTT SUB CROSS 30

Θερμόμετρο

Για τη μέτρηση του ποσοστού υγρασίας και της τιμής της θερμοκρασίας τόσο του χώρου λήψης του θερμογραφήματος, όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το θερμόμετρο – υγρασιόμετρο TA298, με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [146].



Εικόνα 31. Θερμόμετρο - Υγρασιόμετρο TA298

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμομέτρου

Μάρκα	Cheemi or OEM, ODM
Μοντέλο	TA298
Εύρος μετρούμενης θερμοκρασίας	-10 - 50°C (Εσωτερικός χώρος) -50 - 70°C (Εξωτερικός χώρος)
Ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας	± 1°C (1.8 °F)
Εύρος μέτρησης υγρασίας	10% - 99% RH
Ακρίβεια μέτρησης υγρασίας	5% RH
Περίοδος δειγματοληψίας	8 sec
Ακρίβεια απεικόνισης θερμοκρασίας	0.1 °C (0.2°F)
Ακρίβεια απεικόνισης υγρασίας	1% RH
Μορφή σήματος εξόδου	Ψηφιακό σήμα εξόδου

Συσκευή ανίχνευσης σωματικής δραστηριότητας

Με σκοπό την καταγραφή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών σχετικά με την εκτέλεση της αθλητικής δοκιμασίας και την διακύμανση των ζωτικών λειτουργιών του ατόμου που υποβλήθηκε στη δοκιμασία αυτή, έγινε χρήση μιας συσκευής ανίχνευσης δραστηριότητας της μάρκας Xiaomi και συγκεκριμένα το μοντέλο Mi Smart Band 6 [147].



Εικόνα 32. Συσκευή ανίχνευσης σωματικής δραστηριότητας Mi Smart Band 6

Συσκευή θερμικής απεικόνισης

Για τη μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος και τη δημιουργία των αντίστοιχων θερμογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε η θερμοκάμερα FLIR ONE PRO. Η συγκεκριμένη συσκευή επιτυγχάνει τον βέλτιστο συνδυασμό φορητότητας και

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

απόδοσης. Οι προδιαγραφές της εν λόγω θερμοκάμερας παρουσιάζονται στον πίνακα 2.



Εικόνα 33. Θερμοκάμερα FLIR ONE PRO

Πίνακας 2. Προδιαγραφές θερμοκάμερας FLIR ONE PRO

Μάρκα	FLIR
Μοντέλο	ONE PRO Android (USB-C)
Εύρος μετρούμενης θερμοκρασίας	-20°C to 400°C
Μέγεθος θερμικού pixel	12 μm
Θερμική ανάλυση	19,200 pixels (160 \times 120)
Θερμική ευαισθησία	70 mK
Φασματικό εύρος	8 – 14 μm
Οπτική διακριτική ικανότητα	1440 \times 1080
Οριζόντιο/κάθετο οπτικό πεδίο	50° \pm 1° / 43° \pm 1°
Ρυθμός ανανέωσης εικόνας (Frame rate)	8.7 Hz
Απόσταση εστίασης	Καθορισμένη: 15 cm – άπειρο
Τύπος διεπαφής	USB-C (5V/1A)
Ακρίβεια μέτρησης	* \pm 3°C or \pm 5%, τυπική ποσοστιαία απόκλιση της διαφοράς μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και σκηνής.

*Οι τιμές της ακρίβειας μέτρησης ισχύουν 60 δευτερόλεπτα μετά την εκκίνηση της θερμοκάμερας, όταν η θερμοκρασία της είναι μεταξύ 15°C έως 35°C και για θερμοκρασία σκηνής από 5°C έως 120°C.

Έξυπνη συσκευή και Εφαρμογή σύνδεσης

Για τη λειτουργία της θερμοκάμερας FLIR ONE PRO, απαιτείται η σύνδεσή της με μια έξυπνη συσκευή smartphone ή tablet. Η επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται μέσω της εφαρμογής FLIR ONE, η οποία είναι διαθέσιμη στο Google Play και στο Apple App Store. Η εφαρμογή αυτή δεν υποστηρίζεται από όλες τις συσκευές (smartphones). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε μια ιδιωτική έξυπνη συσκευή τηλεφώνου και συγκεκριμένα το μοντέλο M5s της υπο - μάρκας POCO της εταιρίας Xiaomi.



Εικόνα 34. Smartphone
Xiaomi Poco M5s



Εικόνα 35. Σύμβολο
εφαρμογής FLIR ONE

4.2 Πειραματική διαδικασία

4.2.1 Λήψη θερμογραφημάτων και Αθλητική δοκιμασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τρία σκέλη. Τα δυο πρώτα είναι λήψη των θερμικών εικόνων και η διαδικασία της αθλητικής δοκιμασίας. Το τρίτο σκέλος είναι η επεξεργασία των δεδομένων και θα αναλυθεί περαιτέρω στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Λήψη θερμογραφημάτων

Η τεχνική των μετρήσεων βασίστηκε στα πρότυπα και της οδηγίες κλινικής θερμογραφίας, της διεθνούς ακαδημίας κλινικής θερμολογίας [124] και φυσικά

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

προσαρμόστηκε ανάλογα, βάσει των υποδομών, του εξοπλισμού και των συνθηκών διενέργειας του πειράματος

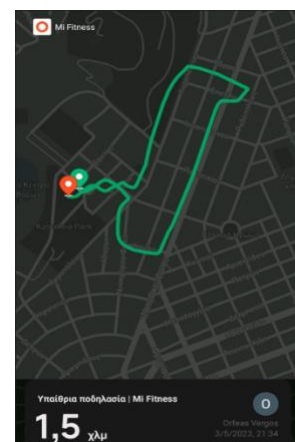
Με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων από το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του σώματος που μπορούσε να απεικονισθεί, σε κάθε μέτρηση πάρθηκαν τρεις λήψεις υπό τρεις διαφορετικές θέσεις της κάμερας σε σχέση με το σώμα του εξεταζόμενου. Ως εκ τούτου κάθε σειρά μετρήσεων αποτελείται από μια απεικόνιση του εμπρόσθιου τμήματος του σώματος, μια της πλάγιας επιφάνειας του σώματος και μια της οπίσθιας επιφάνειάς του.

Πραγματοποιήθηκαν οκτώ επαναλήψεις της αθλητικής δοκιμασίας με σκοπό την συγκέντρωση επαρκούς αριθμού δεδομένων για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Θερμογραφήματα πάρθηκαν ακριβώς πριν και αμέσως μετά την άσκηση για κάθε μια επανάληψη της διαδικασίας.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δωμάτιο με απόλυτο σκοτάδι, χωρίς την ύπαρξη κάποιας πηγής ψύχους ή θερμότητας, ενώ τα παράθυρα και οι πόρτες ήταν κλειστά. Η απόσταση του εξεταζόμενου από κάποιο τοίχο ήταν σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη ή ίση του 1,5 μέτρου και η κάμερα τοποθετημένη σε απόσταση 1,2 μέτρων από το σώμα του για να είναι εφικτή η απεικόνιση από τα πέλματα έως ύψος των ώμων. Η θερμοκρασία του χώρου βρισκόταν πάντοτε εντός του ιδανικού εύρους θερμοκρασιών (18°C – 23°C) και η υγρασία κυμαινόταν από 42 έως 64 (%). Επίσης, η κάμερα, η οποία χρησιμοποιήθηκε καλύπτει σχεδόν όλο το πλήθος των ελάχιστων προδιαγραφών που χρειάζονται. Επιπροσθέτως, τηρήθηκε το πρωτόκολλο το οποίο αφορά τον εξεταζόμενο.

Αθλητική δοκιμασία

Κατά την αθλητική δοκιμασία ο ασκούμενος, ο οποίος ήταν υγιής άνδρας 23 ετών, κλήθηκε να κάνει ποδηλασία σε εξωτερικό χώρο διανύοντας απόσταση 1,5 χιλιομέτρου, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία 7 φορές. Συμπληρωματικά κλήθηκε να επαναλάβει το πείραμα και να διανύσει απόσταση 5,5 χιλιομέτρων για μια μόνο φορά, καταβάλλοντας τη μέγιστη προσπάθεια και στις δυο περιπτώσεις. Η δοκιμασία πραγματοποιήθηκε σε αστικό περιβάλλον και σε διαφορετικές ημέρες. Κατά τη δοκιμασία αυτή ο ασκούμενος φορούσε τη



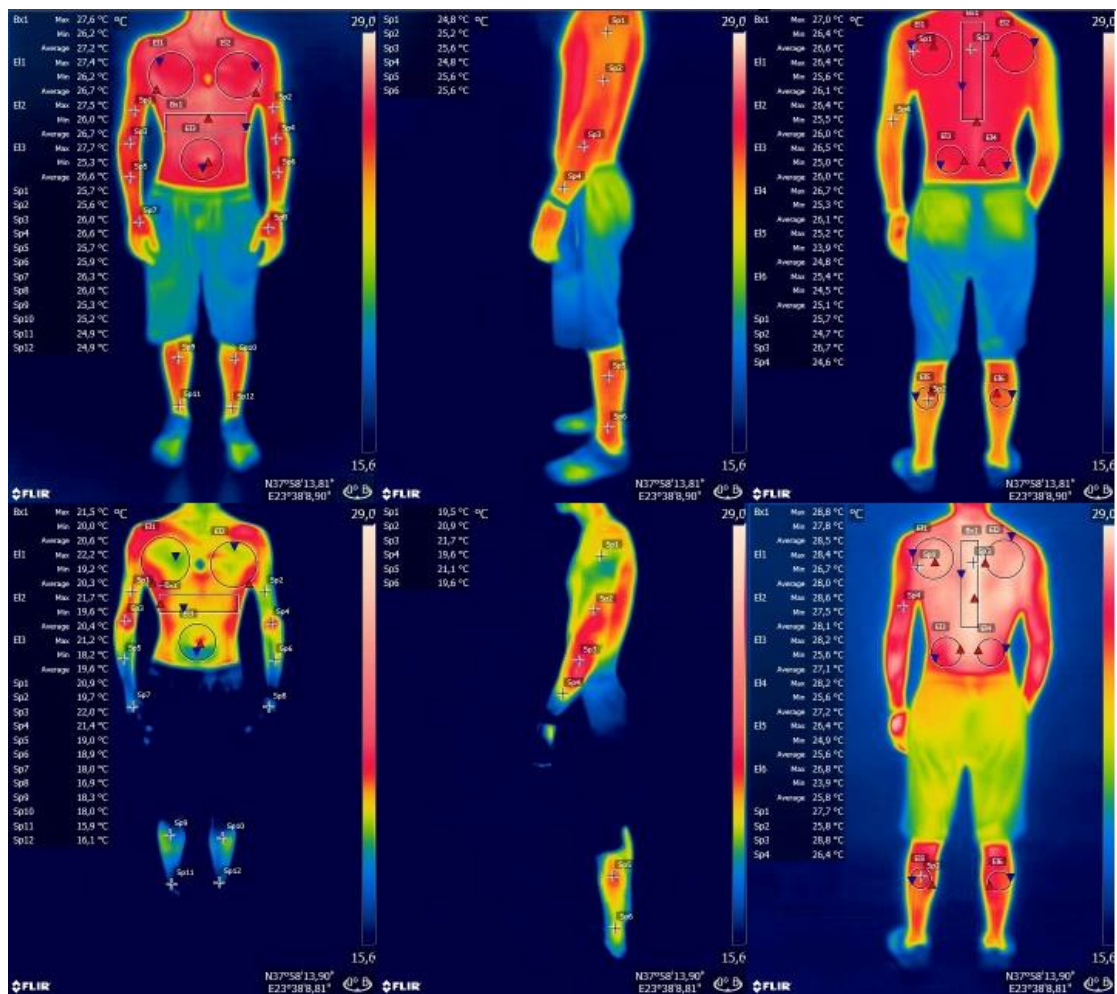
Εικόνα 36. Χάρτης διαδρομής και ένδειξη απόστασης

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

συσκευή ανίχνευσης σωματικής δραστηριότητας, η οποία ήταν συνδεδεμένη με το «smartphone», δίνοντας πληροφορίες για τη διαδρομή, την ταχύτητα και τον καρδιακό ρυθμό σε όλη τη διάρκεια της άσκησης. Επίσης, σε κάθε επανάληψη ο ρουχισμός ήταν ακριβώς ο ίδιος.

4.2.2 Επεξεργασία θερμογραφημάτων και εξαγωγή πληροφοριών

Στο τέλος των πειραματικών διαδικασιών προέκυψαν 48 θερμογραφήματα, τα οποία δέχτηκαν επεξεργασία με σκοπό να επιτευχθεί καλύτερη απεικόνιση, αλλά κυρίως να εξαχθούν τιμές θερμοκρασίας του δέρματος από διάφορες περιοχές του σώματος. Η επεξεργασία των θερμικών εικόνων και η εξαγωγή των πληροφοριών θερμοκρασίας από αυτές έγινε με χρήση της εφαρμογής FLIR Tools, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, τα δεδομένα ελήφθησαν από 33 περιοχές ενδιαφέροντος (ROIs) συνολικά.



Εικόνα 37. Θερμογραφήματα πριν (επάνω) και μετά (κάτω) την άσκηση

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Στην πρόσθια απεικόνιση η θερμοκρασία υπολογίστηκε σε δώδεκα σημεία ενδιαφέροντος, τρεις κυκλικές περιοχές ενδιαφέροντος και μια περιοχή ενδιαφέροντος σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Στην πλάγια όψη η θερμοκρασία υπολογίζεται σε έξι σημειακές περιοχές, ενώ στην απεικόνιση της οπίσθιας πλευράς του σώματος η θερμοκρασία έχουν επιλεγεί τέσσερα σημεία ενδιαφέροντος, έξι κυκλικές περιοχές ενδιαφέροντος και μια περιοχή σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Για την απεικόνιση των θερμογραφημάτων, όπως αυτά φαίνονται στην εικόνα 37, έχει επιλεγεί η χρωματική παλέτα «Rainbow», με σκοπό την μέγιστη δυνατή αντίθεση των περιοχών με διαφορετική θερμοκρασία.

4.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν αφορούν κυρίως τις τιμές θερμοκρασίας στις διάφορες περιοχές του σώματος, παρατίθενται όμως παρακάτω και κάποιες πληροφορίες οι οποίες αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία και υγρασία) που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως και κάποια χρήσιμα δεδομένα, τα οποία έχουν ληφθεί από τις μετρήσεις της συσκευής ανίχνευσης δραστηριότητας (activity tracker).

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές θερμοκρασίας (σε βαθμούς °C) τόσο του χώρου μέτρησης όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Επίσης, αναγράφεται η επί τοις % υγρασία του χώρου στον οποίο πάρθηκαν τα θερμογραφήματα τη στιγμή της λήψης τους.

Πίνακας 3. Τιμές θερμοκρασίας (°C) εξωτερικού περιβάλλοντος και τιμές θερμοκρασίας (°C) και υγρασίας (%) χώρου μέτρησης / λήψης θερμογραφημάτων

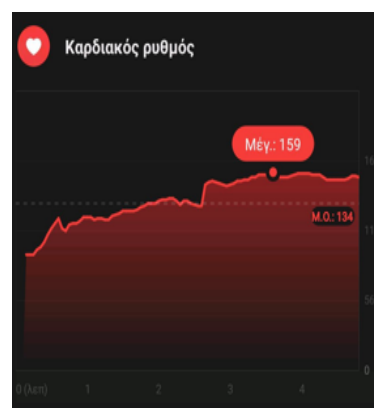
	Θερμοκρασία χώρου μέτρησης	Θερμοκρασία εξωτερικού χώρου	Υγρασία χώρου μέτρησης
Ημέρα 1	21,7	18,2	64 %
Ημέρα 2	20,9	18,5	59 %
Ημέρα 3	21,0	18,1	61 %
Ημέρα 4	21,9	19,4	54 %
Ημέρα 5	23,0	22,0	42 %
Ημέρα 6	22,5	23,8	55 %
Ημέρα 7	21,0	17,9	58 %
Ημέρα 8 (5,5 km)	19,2	17,5	56 %
Μέση τιμή	21,4	19,43	56,13 %
Τυπική Απόκλιση	1,17 %	2,27 %	6,58 %

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Σημαντικό δεδομένο αποτελεί και ο καρδιακός ρυθμός κατά τη διάρκεια της αθλητικής δοκιμασίας, ο οποίος υπολογίστηκε από τη συσκευή ανίχνευσης σωματικής δραστηριότητας, την οποία φορούσε στον καρπό του ο ασκούμενος κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας. Η εξαγωγή των πληροφοριών έγινε από την εφαρμογή (Mi Fitness) σύνδεσης της συσκευής με το «smartphone», το οποίο χρησιμοποιήθηκε. Στον πίνακα που ακολουθεί βρίσκεται ο μέσος όρος των καρδιακών παλμών ανά λεπτό καθώς και η μέγιστη τιμή του κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί πως δεν βρέθηκαν πληροφορίες από τον κατασκευαστή της συσκευής, ούτε από κάποια σχετική μελέτη για την ακρίβειά της στην εν λόγω μέτρησης.

Πίνακας 4. Μέσος όρος και μέγιστη τιμή καρδιακών παλμών ανά λεπτό

	Μέσος όρος καρδιακών παλμών	Μέγιστη τιμή καρδιακών παλμών
Ημέρα 1	125	148
Ημέρα 2	134	159
Ημέρα 3	113	143
Ημέρα 4	128	154
Ημέρα 5	130	153
Ημέρα 6	121	146
Ημέρα 7	127	152
Ημέρα 8 (5,5 km)	135	158
Μέση τιμή	126,63	151,63
Τυπική Απόκλιση	7,15 %	5,63 %



Εικόνα 38. Ενδεικτικό γράφημα καρδιακού ρυθμού

Στον πίνακα 5, βάση των μετρήσεων που έγιναν και των τιμών θερμοκρασίας που προέκυψαν, έχει αποτυπωθεί η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος σε βαθμούς °C πριν και μετά την άσκηση, αλλά και η διαφορά θερμοκρασίας. Η ύπαρξη αρνητικού προσήμου ερυθρού χρώματος σηματοδοτεί την μείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με την αρχική τιμή της, ενώ το πράσινο θετικό πρόσημο σηματοδοτεί την αύξησή της. Στον πίνακα αυτόν παρατηρούμε πως από τις οκτώ συνολικά επαναλήψεις του πειράματος, τις τρεις φορές η θερμοκρασία αυξήθηκε, ενώ τις υπόλοιπες 5 φορές η θερμοκρασία μειώθηκε. Σύμφωνα με τις μετρήσεις δεν ανιχνεύθηκε σταθερή αύξηση ή μείωση της συνολικής θερμοκρασίας της επιφάνειας του σώματος γεγονός που αφενός μπορεί να οφείλεται σε πλήθος παραγόντων και αφετέρου μας οδηγεί στη μελέτη μεμονωμένων περιοχών με σκοπό την εύρεση περισσότερων δεδομένων για την καλύτερη κατανόηση της θερμικής αντίδρασης του οργανισμού στην άσκηση.

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Πίνακας 5. Μέση θερμοκρασία επιφάνειας σώματος σε βαθμούς Κελσίου (°C)

	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ
ΗΜΕΡΑ 1	24,43	20,53	- 3,90
ΗΜΕΡΑ 2	27,18	25,38	- 1,80
ΗΜΕΡΑ 3	25,72	22,34	- 3,38
ΗΜΕΡΑ 4	19,84	23,57	+ 3,73
ΗΜΕΡΑ 5	23,81	21,04	- 2,77
ΗΜΕΡΑ 6	26,56	29,70	+ 3,14
ΗΜΕΡΑ 7	19,51	25,04	+ 5,53
ΗΜΕΡΑ 8 (5,5 km)	29,49	24,37	- 5,12

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 6, στον οποίο παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες, σε βαθμούς Κελσίου, του δέρματος στην πρόσθια επιφάνεια του κορμού, στη ράχη του σώματος, στο δεξί χέρι, στο αριστερό χέρι, στο δεξί πόδι και στο αριστερό πόδι. Επίσης φαίνεται και η διαφορά της αρχικής και τελικής θερμοκρασίας.

Πίνακας 6. Μέση θερμοκρασία διαφόρων τμημάτων του σώματος σε βαθμούς Κελσίου (°C)

		Πρόσθια επιφάνεια κορμού	Ράχη	Δεξί χέρι	Αριστερό χέρι	Δεξί πόδι	Αριστερό πόδι
	Πριν	22,75	27,80	19,83	19,93	20,50	20,63
Ημέρα 1	Μετά	21,98	22,06	21,13	20,43	18,47	18,37
	Διαφορά	-0,775	-5,74	+1,30	+0,50	-2,03	-2,27
	Πριν	29,20	28,28	27,43	27,13	25,00	25,43
Ημέρα 2	Μετά	22,00	29,02	21,90	20,90	20,63	20,60
	Διαφορά	-7,20	+0,74	-5,53	-6,23	-4,37	-4,83
	Πριν	26,8	26,16	25,80	26,03	25,10	24,97
Ημέρα 3	Μετά	20,225	27,78	20,63	20,00	20,00	19,90
	Διαφορά	-6,575	+1,62	-5,16	-6,03	-5,10	-5,07
	Πριν	22,55	20,76	20,96	19,97	17,73	17,87
Ημέρα 4	Μετά	25,90	23,60	25,63	24,80	21,83	21,97
	Διαφορά	+3,35	+2,84	+4,66	+4,83	+4,10	+4,10
	Πριν	22,125	30,50	21,96	21,30	22,67	23,07
Ημέρα 5	Μετά	22,90	19,90	23,66	23,07	19,60	19,60
	Διαφορά	+0,775	-10,60	+1,70	+1,77	-3,07	-3,47
	Πριν	25,95	28,68	25,30	24,63	23,03	23,40
Ημέρα 6	Μετά	30,85	29,72	30,93	30,40	27,23	27,90
	Διαφορά	+4,90	+1,04	+5,63	+5,77	+4,20	+4,50

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

	Πριν	20,975	20,34	19,57	19,07	15,93	16,50
Ημέρα 7	Μετά	19,775	29,24	19,10	18,73	18,73	19,60
	Διαφορά	-1,20	+8,90	-0,47	-0,33	+2,80	+3,10
	Πριν	30,70	30,70	29,93	29,33	27,23	27,03
Ημέρα 8 (5,5 km)	Μετά	18,50	27,90	19,03	18,23	18,00	18,40
	Διαφορά	-12,20	-2,80	-10,90	-11,10	-9,23	-8,63

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ακόμα και την ίδια ημέρα σε άλλα τμήματα του σώματος η θερμοκρασία αυξάνεται και σε άλλα μειώνεται. Παρ όλα αυτά μεταξύ συμμετρικών περιοχών, όπως στη σύγκριση των χεριών, αλλά και των ποδιών (από το ύψος του γονάτου μέχρι το ύψος του αστραγάλου) παρατηρείται παρόμοια αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας.

Παρακάτω, στον πίνακα 7, εξετάζουμε τη θερμοκρασία του δέρματος σε μικρότερες περιοχές και συγκεκριμένα στην περιοχή των ώμων, της ράχης της άκρας χειρός (έξω πλευρά της παλάμης), της κνήμης, του γαστροκνήμιου μυός και της περιοχής του αστραγάλου πριν και μετά την αθλητική δοκιμασία.

Πίνακας 7. Μέση θερμοκρασία διαφόρων περιοχών του σώματος σε βαθμούς Κελσίου (°C)

		Ωμοι	Ράχη άκρας χειρός	Κνήμη	Γαστροκνήμιος μυς	Περιοχή αστραγάλου
	Πριν	25,10	19,65	19,55	24,83	17,65
Ημέρα 1	Μετά	19,40	18,20	19,40	19,80	16,55
	Διαφορά	-5,70	-1,45	-0,15	-5,03	-1,10
	Πριν	27,10	27,30	25,75	25,73	24,35
Ημέρα 2	Μετά	28,10	19,85	19,20	26,37	16,55
	Διαφορά	+1,00	-7,45	-6,55	+0,63	-7,80
	Πριν	24,80	26,15	25,25	25,17	24,90
Ημέρα 3	Μετά	19,50	17,45	18,15	24,17	16,00
	Διαφορά	-5,30	-8,70	-7,10	-1,00	-8,90
	Πριν	20,10	20,05	18,85	18,07	16,90
Ημέρα 4	Μετά	23,30	22,15	23,45	22,23	20,85
	Διαφορά	+3,20	+2,10	+4,60	+4,17	+3,95
	Πριν	20,00	22,05	19,85	25,87	20,10
Ημέρα 5	Μετά	21,40	23,05	20,30	19,47	19,80

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

	Διαφορά	+1,40	+1,00	+0,45	-6,40	-0,30
	Πριν	27,70	24,40	23,05	27,47	20,75
Ημέρα 6	Μετά	29,90	29,65	29,00	29,57	26,20
	Διαφορά	+2,20	+5,25	+5,95	+2,10	+5,45
	Πριν	20,60	19,10	17,00	17,33	15,10
Ημέρα 7	Μετά	28,40	13,70	17,30	27,20	13,70
	Διαφορά	+7,80	-5,40	+0,30	+9,87	-1,40
	Πριν	29,40	25,50	28,30	28,37	25,05
Ημέρα 8	Μετά	28,60	16,05	17,50	26,37	11,65
	Διαφορά	-0,80	-9,45	-10,8	-2,00	-13,4

Στον πίνακα αυτόν, βάσει των μετρήσεων, φαίνεται πως καμία περιοχή δεν παρουσιάζει σταθερή αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας της σε όλες τις επαναλήψεις της αθλητικής δοκιμασίας, ενώ οι αποκλίσεις είναι και πάλι μεγάλες.

Ωστόσο, μεταξύ των τριών πινάκων (5,6 και 7) υπάρχουν ορισμένα κοινά σημεία. Πιο συγκεκριμένα και στους τρεις πίνακες παρατηρούμε ότι την τέταρτη (Ημέρα 4) και την έκτη ημέρα (Ημέρα 6) η θερμοκρασία σε όλες τις περιοχές του σώματος, οι οποίες μετρήθηκαν, εμφανίζεται αυξημένη σε σχέση με την αρχική τιμή της. Για τις πρώτες επτά ημέρες η δυνηθείσα απόσταση ήταν 1,5 χιλιόμετρο, όπως έχει προαναφερθεί και η μέση ταχύτητα κίνησης του ποδηλάτου, όπως μετρήθηκε από το Mi Smart Band 6, ήταν 19,4 χιλιόμετρα/ώρα, χωρίς μεγάλες διαφορές από μέρα σε μέρα και με μέσο χρόνο εκτέλεσης της άσκησης 4 λεπτά και 38 δευτερόλεπτα.. Παρατηρώντας τα δεδομένα του πίνακα 4, συμπεραίνουμε πως ο καρδιακός ρυθμός δε φαίνεται να σχετίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος την τέταρτη και την έκτη ημέρα. Για την Ημέρα 4, ούτε οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας μπορούν να εξηγήσουν την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά την στην έκτη εκτέλεση του πειράματος έχουμε τη μεγαλύτερη θερμοκρασία, από όλες τις ημέρες, τόσο στον χώρο της μέτρησης, όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Ένα άλλο κοινό μεταξύ των πινάκων 5, 6 και 7 είναι πως την όγδοη ημέρα (Ημέρα 8), κατά την οποία διανύθηκαν 5,5 χιλιόμετρα με μέση ταχύτητα 22 χιλιόμετρα/ ώρα και χρόνο εκτέλεσης 15 λεπτά, η επιφανειακή θερμοκρασία παρουσιάζει πτώση σε όλα τα σημεία μέτρησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δε φαίνεται η πτώση της θερμοκρασίας να σχετίζεται με τον μέσο καρδιακό ρυθμό, αλλά η θερμοκρασία τόσο

του χώρου μέτρησης, όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι η χαμηλότερη όλων των ημερών και οριακή ως προς την βέλτιστη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για τον άνθρωπο.

5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές εξελίξεις

5.1 Συμπεράσματα / σχολιασμός

Από τις μετρήσεις θερμοκρασίας που πραγματοποιήθηκαν και τα δεδομένα, τα οποία συλλέχθηκαν, δε μπορεί να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την αύξηση ή τη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος μετά την αερόβια σωματική άσκηση σε εξωτερικό περιβάλλον.

Η πειραματική αυτή απόπειρα, λόγω της εκτέλεσης της άσκησης σε εξωτερικό χώρο και χωρίς την ύπαρξη εργαστηριακών συνθηκών και περιβάλλοντος αποτέλεσε αναμφίβολα μια πρόκληση. Η πρόκληση αυτή παρά το γεγονός πως τελικά δεν οδήγησε στην απάντηση σχετικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του δέρματος κατά την άσκηση, αποτελεί έναν σταθμό προβληματισμού σχετικά με τις βέλτιστες συνθήκες και προϋποθέσεις οι οποίες πρέπει να πληρούνται σε τέτοιες μετρήσεις.

Το πλήθος των παραγόντων, οι οποίοι καθορίζουν την θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος ύστερα από άσκηση σε εξωτερικό περιβάλλον είναι μεγάλο και δεν έχει αποδειχτεί πειραματικά για όλους, η επίδραση και η βαρύτητα του καθενός. Η θερμική απόκριση του σώματος δεν είναι ίδια σε όλη του την επιφάνεια, αντιθέτως κάθε περιοχή φαίνεται πως έχει διαφορετική θερμική συμπεριφορά, η οποία βάσει των μετρήσεων της παρούσας εργασίας δεν παρουσιάζει ένα σταθερό μοτίβο. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο κάθε οργανισμός ανταποκρίνεται διαφορετικά στο ίδιο ερέθισμα, σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό.

Ως εκ τούτου, για την ύπαρξη σταθερότερων αποτελεσμάτων θα πρέπει να τεθούν επιπλέον προϋποθέσεις με σκοπό να δημιουργηθούν κάποια αναγκαία σημεία αναφοράς μεταξύ των δυο δυναμικών συστημάτων, του περιβάλλοντος και του ανθρώπινου σώματος. Συμπερασματικά, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του σώματος ανέπαφα, έχοντας όπως κάθε τεχνική πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Η μελέτη αντίδρασης του σώματος στην άσκηση και η κατανόηση όλων των μηχανισμών και

των αλληλεπιδράσεων που συνθέτουν το τελικό αποτέλεσμα θα συνεχίσει να αποτελεί μια πρόκληση, ενώ η φλόγα της ελπίδας για περισσότερες απαντήσεις παραμένει άσβεστη.

5.2 Μελλοντικές εξελίξεις

Ύστερα από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την εργασία αυτή και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα καταλήγουμε σε κάποιες σκέψεις σχετικά με παρόμοιες μελλοντικές εφαρμογές και πειραματισμούς, οι οποίοι θα έχουν καλύτερες προϋποθέσεις και θα οδηγήσουν ενδεχομένως σε ασφαλέστερα συμπεράσματα.

Σύμφωνα με άλλες μελέτες διενέργειας παρόμοιων πειραμάτων σε εργαστηριακό περιβάλλον με συνθήκες χαμηλής (10°C) έως και υψηλής θερμοκρασίας (40°C), παρατηρήθηκε μείωση σε κάθε περίπτωση της θερμοκρασίας του δέρματος η οποία δε φάνηκε να σχετίζεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε εξωτερικό περιβάλλον όμως πρέπει να συνυπολογιστεί επίδραση του ανέμου (και της έντασής του) και της ηλιοφάνειας καθώς ο ήλιος αποτελεί μια ισχυρή πηγή θερμότητας.

Μια άλλη παρατήρηση είναι πως στην παρούσα εργασία οι αρχικές τιμές θερμοκρασίας του δέρματος δεν είναι ίδιες όλες τις μέρες, κάτι που ίσως είναι προτιμότερο να αλλάξει σε παρόμοια μελλοντικά πειράματα με την εισαγωγή μιας συγκεκριμένης ρουτίνας πριν την άσκηση η οποία να οδηγεί τη θερμοκρασία του δέρματος σε ένα ορισμένο εύρος.

Επόμενη παρατήρηση είναι η τμηματική φωτογράφιση του σώματος με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση κάθε περιοχής, καθώς στη συνολική επιφάνεια του σώματος η διακύμανση των τιμών θερμοκρασίας είναι μεγάλη.

Επιπροσθέτως, θα ήταν καλό η εξωτερική θερμοκρασία με τη θερμοκρασία του χώρου μέτρησης να έχουν τη μικρότερη δυνατή διαφορά, κάτι το οποίο ισχύει και για τις τιμές της υγρασίας.

Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον να διεξαχθεί ένα παρόμοιο πείραμα με περισσότερα άτομα συγκρίσιμων επιδόσεων και παρόμοιου ποσοστού σωματικού λίπους, ενώ η επιλογή καταλληλότερων ενδυμάτων θα αποτελούσε μια βελτίωση και καλό θα ήταν να επιτρέψει τη μέτρηση της θερμοκρασίας στην περιοχή του τετρακέφαλου, ο οποίος αποτελεί την περισσότερο χρησιμοποιούμενη μυϊκή ομάδα στην ποδηλασία.

Βιβλιογραφία

- [1] Σταματέλου Ευγενία, “ Η συμβολή της άσκησης στην προαγωγή της ψυχικής υγείας και η σημασία της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης”, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας, Αθήνα, Ελλάδα, 2023, [Online] Available at: <https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/4106/UNIWA> [Accessed 05 January 2024].
- [2] Νικόλαος Παγούνης, “Το ανθρώπινο σώμα είναι σχεδιασμένο στο να κινείται”, functionalmovement.gr. [online] Available at: <https://functionalmovement.gr/to-ανθρωπινο-σωμα-ειναι-σχεδιασμενο-σ/~:text=H%20κίνηση%20είναι%20μα%20θε%CE%25B> [Accessed 03 January 2024].
- [3] Jack H. Wilmore, David L. Costill, Φυσιολογία της Άσκησης και του Αθλητισμού. Cyprus: BROKEN HILL PUBLISHERS LTD, 2011
- [4] Gregory N. Ruegsegger, Frank W. Booth, “Health Benefits of Exercise”, Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine, May 15, 2017, doi: 10.1101/cshperspect.a029694, [online] Available at: <https://perspectivesinmedicine.cshlp.org/content/8/7/a029694.full> [Accessed 03 January 2024].
- [5] Beier M, Bombardier CH, Hartoonian N, Motl RW, Kraft GH, “Improved physical fitness correlates with improved cognition in multiple sclerosis”, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, vol. 95, Issue 7, pp. 1328-1334, July 2014. doi: 10.1016/j.apmr.2014.02.017, [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24607835/> [Accessed 05 January 2024].
- [6] Bielak AA, Cherbuin N, Bunce D, Anstey KJ, “Preserved differentiation between physical activity and cognitive performance across young, middle, and older adulthood over 8 years”, The Journals of Gerontology: Series B, vol. 69, Issue 4, pp.523–532, July 2014, doi: 10.1093/geronb/gbu016, [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24607785/> [Accessed 05 January 2024].
- [7] Mattson MP, “Interventions that improve body and brain bioenergetics for Parkinson's disease risk reduction and therapy”, Journal of Parkinson's Disease, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, 2014, doi: 10.3233/JPD-130335, [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24473219/> [Accessed 05 January 2024].
- [8] McKercher C, Sanderson K, Schmidt MD, Otahal P, Patton GC, Dwyer T, Venn AJ, “Physical activity patterns and risk of depression in young adulthood: a 20-year cohort study since childhood”, Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology, vol. 49, pp. 1823–1834, March 2014, doi: 10.1007/s00127-014-0863-7, [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00127-014-0863-7> [Accessed 05 January 2024].
- [9] Marques A, Marconcin P, Werneck AO, Ferrari G, Gouveia ÉR, Kliegel M, Peralta M, Ihle A, “Bidirectional Association between Physical Activity and Dopamine Across Adulthood-A Systematic Review”, Brain Sciences, vol. 11, no. 7, pp. 829, Jun 2021, doi: 10.3390/brainsci11070829, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8301978/> [Accessed 05 January 2024].
- [10] John R. Cameron, James G. Skofronick, Roderick M. Grant, Φυσική του ανθρώπινου σώματος. Αθήνα: ΠΑΡΙΣΙΑΝΟΥ Α.Ε., 2001, pp. 43-45
- [11] Irving P. Herman, Φυσική του ανθρώπινου σώματος. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ Π.Χ. ΠΑΣΧΑΛΙΔΗΣ ΕΠΕ, 2009, pp. 251 - 267

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- [12] Scott K. Powers, Edward T. Howley, Φυσιολογία της άσκησης Θεωρία και Εφαρμογές Ευρωστίας και Απόδοσης, Nicosia Cyprus: BROKEN HILL PUBLISHERS LTD, 2018, pp. 235 – 255, 358 – 386.
- [13] Pham S, Puckett Y, “Physiology, Skeletal Muscle Contraction”, StatPearls Publishing, January 2023, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559006> [Accessed 05 January 2024].
- [14] Sweeney HL, Hammers DW, “Muscle Contraction”, Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, vol. 10, no. 2, February 2018, doi: [10.1101/cshperspect.a023200](https://doi.org/10.1101/cshperspect.a023200), [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29419405/> [Accessed 05 January 2024].
- [15] J. Cuevas, “The Somatic Nervous System”, Biomedical Sciences, pp. 1- 13, 2015, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.05364-2>, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/> [Accessed 05 January 2024].
- [16] Wikipedia, “Νευρικό σύστημα”, [Online] Available at: <https://el.wikipedia.org/wiki/> [Accessed 05 January 2024].
- [17] Laura Williams Bustos, M.S, “Here’s What Muscles a Bike Works and How to Strengthen Each One”, Bicycling, Apr 13, 2023, [Online] Available at: <https://www.bicycling.com/training/a43554055/what-muscles-does-a-bicycle-work/> [Accessed 05 January 2024].
- [18] SIROKO CYCLING COMMUNITY, “ΠΟΙΟΙ ΜΥΕΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΟΔΗΛΑΣΙΑ;”, ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΟΔΗΛΑΣΙΑ, June 2021, [Online] Available at: <https://www.siroko.com/blog/c/el/poioi-myes-chrisimopoiountai-stin-podilasia/> [Accessed 05 January 2024].
- [19] Turpin NA, Costes A, Moretto P, Watier B, “Upper limb and trunk muscle activity patterns during seated and standing cycling”, Journal of Sports Sciences, vol. 35, pp. 557-564, 2016, doi: [10.1080/02640414.2016.1179777](https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1179777), [Online] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2016.1179777> [Accessed 05 January 2024].
- [20] Hug F, Turpin NA, Couturier A, Dorel S, “Consistency of muscle synergies during pedaling across different mechanical constraints”, Journal of Neurophysiology, vol. 106, Issue 1, pp. 91-103, July 2011, doi: [10.1152/jn.01096.2010](https://doi.org/10.1152/jn.01096.2010), [Online] Available at: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jn.01096.2010> [Accessed 05 January 2024].
- [21] Raymond C.H. So, Joseph K.-F. Ng, Gabriel Y.F. Ng, “Muscle recruitment pattern in cycling: a review”, Physical Therapy in Sport, vol. 6, Issue 2, pp. 89-96, May 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2005.02.004>, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/> [Accessed 05 January 2024].
- [22] Wikipedia, “Thermoregulation in humans”, [Online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoregulation_in_humans [Accessed 06 January 2024].
- [23] Osilla EV, Marsidi JL, Shumway KR, Sharma S. Physiology, “Temperature Regulation”, StatPearls Publishing, January 2023, Bookshelf ID: [NBK507838](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/43554055/), [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507838/> [Accessed 06 January 2024].
- [24] González-Alonso J, “Human thermoregulation and the cardiovascular system”, Experimental Physiology, vol. 97, Issue 3, pp. 340-346, March 2012, doi: [10.1113/expphysiol.2011.058701](https://doi.org/10.1113/expphysiol.2011.058701), [Online] Available at: <https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/expphysiol.2011.058701> [Accessed 06 January 2024].
- [25] Grodzinsky, E., Sund Levander, M, “Thermoregulation of the Human Body”,

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Understanding Fever and Body Temperature, Palgrave Macmillan, Cham, pp 49–65, August 2019, Online ISBN 978-3-030-21886-7, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21886-7_5#citeas

[Accessed 06 January 2024].

[26] Sund-Levander M, Forsberg C, Wahren LK, “Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review”, Scand J Caring Sci, Wiley online library, vol. 16, Issue2, pp. 122-128, June 2002, [Online] Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/>

[Accessed 06 January 2024].

[27] Frostburg State University, “Thermoregulatory Physiology”, [Online] Available at: https://www.frostburg.edu/faculty/rkauffman/files/images_preppers_chapters

[Accessed 06 January 2024].

[28] Anatomy and Physiology, OpenStax, “Homeostasis”, part of Rice University, [Online] Available at: <https://openstax.org/books/anatomy-and-physiology/pages/1-5-homeostasis>

[Accessed 06 January 2024].

[29] Greger R, Windhorst U, “Comprehensive Human Physiology

: from cellular mechanism to integration”, Berlin, Heidelberg: Springer; 1996, [Online] Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-60946-6>

[Accessed 06 January 2024].

[30] Mekjavic IB, Eiken O, “Contribution of thermal and nonthermal factors to the regulation of body temperature in humans”, journal of applied physiology, vol. 100, Issue 6, pp. 2065-2072, June 2006, [Online] Available at: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.01118.2005>

[Accessed 06 January 2024].

[31] Tansey EA, Johnson CD, “Recent advances in thermoregulation”, Advances in

Physiology Education, vol. 39, Issue 3, pp. 139-148, September 2015, [Online] Available at: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/advan.00126.2014>

[Accessed 06 January 2024].

[32] Igarashi TL, Fernandes TL, Hernandez AJ, Keutenedjian Mady CE, Albuquerque C, “Behavior of skin temperature during incremental cycling and running indoor exercises”, Heliyon, vol. 8, Issue 10, October 2022, doi: [10.1016/j.heliyon.2022.e10889](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10889), [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022021776#bib15>

[Accessed 10 January 2024].

[33] Zontak A, Sideman S, Verbitsky O, Beyar R, “Dynamic thermography: analysis of hand temperature during exercise”, Annals of Biomedical Engineering, vol. 26, no 6, pp. 988–993, November 1998, doi: [10.1114/1.33](https://doi.org/10.1114/1.33)

, [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1114/1.33>

[Accessed 10 January 2024].

[34] Torii M, Yamasaki M, Sasaki T, Nakayama H, “Fall in skin temperature of exercising man”, Physical Fitness Laboratory, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan, vol. 26 (1), pp. 29 – 32, 1992, doi: [10.1136/bjism.26.1.29](https://doi.org/10.1136/bjism.26.1.29)

, [Online] Available at: <https://bjism.bmj.com/content/26/1/29>

[Accessed 10 January 2024].

[35] Merla A, Mattei PA, Di Donato L, Romani GL, “Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise”, Annals of Biomedical Engineering, vol. 38(1), pp. 158–163, October 2009, doi: [10.1007/s10439-009-9809-8](https://doi.org/10.1007/s10439-009-9809-8), [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10439-009-9809-8>

[Accessed 10 January 2024].

[36] Arfaoui, A., Bertucci, W.M., Letellier, T., & Polidori, G, “Thermoregulation during incremental exercise in masters cycling”, Journal of Science and Cycling, vol.3 (1), pp. 33-41, 2014, [Online]

Available at: <https://jsc-journal.com/index.php/JSC/article/view/66/223>
[Accessed 10 January 2024].

[37] Priego Quesada, J.I., Salvador Palmer, R., Cibrián Ortiz de Anda, R.M., “Physics Principles of the Infrared Thermography and Human Thermoregulation”, Application of Infrared Thermography in Sports Science. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Springer, pp 25–48, 2017, Online ISBN 978-3-319-47410-6, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-47410-6_2#citeas
[Accessed 20 January 2024].

[38] Ιμβριώτη Δ., Εκπαιδευτικός ΠΕ70, Δρ Εκπαίδευσης στις Φυσικές Επιστήμες, “Adigital scenario about Temperature and Heat concepts taking advantage of the microkosmos model”, Open Education, The Journal for Open and Distance Education and Educational Technology, vol. 14, no. 2, 2018, [Online] Available at: <https://ejournals.e-publishing.ekt.gr/index.php/openjournal/article/view/19008/16756>
[Accessed 20 January 2024].

[39] Shahsafi A, Roney P, Zhou Y, Zhang Z, Xiao Y, Wan C, Wambold R, Salman J, Yu Z, Li J, Sadowski JT, Comin R, Ramanathan S, Kats MA, “Temperature-independent thermal radiation”, Proc Natl Acad Sci U S A, vol. 116, no. 52, December 2019, doi: 10.1073/pnas.1911244116, [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31848248/>
[Accessed 20 January 2024].

[40] Cramer MN, Jay O, “ Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress”, AUTONOMIC NEUROSCIENCE Basic & Clinical, vol. 196, pp. 3 – 13, April 2016, doi : 10.1016/j.autneu.2016.03.001, [Online] Available at: <https://www.autonomicneuroscience.com/article>
[Accessed 20 January 2024].

[41] Vardasca R, Simoes R, “Current issues in medical thermography”, In: Topics in medical image processing and computational vision, Springer, Berlin, vol. 8, pp 223–237, March 2013, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-0726-9_12#citeas
[Accessed 20 January 2024].

[42] Hardy JD, “THE RADIATION OF HEAT FROM THE HUMAN BODY: III. The Human Skin as a Black-Body Radiator”, vol. 13, no. 4, pp. 615 – 620, July 1934, doi: 10.1172/JCI100609 [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC436017/>
[Accessed 20 January 2024].

[43] Percuoco R, “Plain Radiographic Imaging”, Clinical Imaging (Third Edition), Mosby, pp. 1 – 43, 2014, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>
[Accessed 23 January 2024].

[44] S.W. Lewis, K.F. Lim, “Spectroscopy: Basic Principles”, Encyclopedia of Forensic Sciences, pp. 635 – 640, 2013, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123821652002567>
[Accessed 23 January 2024].

[45] Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ., “Φυσική Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών”, Γ΄ τάξη Γενικού Λυκείου, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ», Κεφ. 2, Ηλεκτρομαγνητικά κύματα, pp. 55 – 58, 1999, [Online] Available at: http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2728/Fysiki-G-Lykeiou-ThSp_html-apli/index2_6.html
[Accessed 23 January 2024].

[46] Penner, M.H, “Basic Principles of Spectroscopy”, In: Nielsen, S.S. (eds) Food Analysis. Food Science Text Series, Springer, pp 79–88, June 2017, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45776-5_6#citeas
[Accessed 23 January 2024].

[47] ΠΕΛΛΗΣ ΣΤΕΡΓΙΟΣ, “ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΗΧΟ”, Η Βιβλιοθήκη της Φυσικής, Απρίλιος 2012, [Online] Available at: https://physiclessons.blogspot.com/2012/04/blog-post_5810.html
[Accessed 24 January 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[48] Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr, “ΦΥΣΙΚΗ ΓΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ”, Ογδοη αμερικανική έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2013

[49] EUGENE HECHT, “ΟΠΤΙΚΗ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ”, Εκδόσεις GUTENBERG, Αθήνα, 2018

[50] Infrared – Infrared Radiation, InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, GERMANY, [Online] Available at: <https://www.infratec.eu/sensor-division/service-support/glossary/infrared-radiation>

[Accessed 24 January 2024].

[51] B. F. Jones, "A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine," in IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 17, no. 6, pp. 1019-1027, Dec. 1998, doi: 10.1109/42.746635, [Online] Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/746635> [Accessed 24 January 2024].

[52] Astarita T, Carlomagno GM, “Infrared thermography for thermo-fluid-dynamics” Springer, Berlin, 2012, [Online] Available at: <https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=eo0hfG5HFgwC&oi> [Accessed 24 January 2024].

[53] Vollmer M, Möllmann K-P, “Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications”, Wiley, Weinheim, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2>, [Online] Available at: <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-030-63416-2>

[Accessed 24 January 2024].

[54] Hu, L., Delichatsios, M, “Thermal Radiation”, In: Manzello, S. (eds), Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires, Springer, Cham, pp 1–8, December 2018, [Online] Available at: <https://link.springer.com/referenceworkentry/>

[Accessed 30 January 2024].

[55] Bagavathiappan S, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T, Raj B, Karunanithi R, Panicker TM, Korath MP, Jagadeesan K, “Infrared thermal imaging for detection of peripheral vascular disorders”, Journal of Medical Physics, vol.34, no. (1), pp.43-47, Jan 2009, doi: 10.4103/0971-6203.48720, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2804148/#CIT3>

[Accessed 30 January 2024].

[56] Stewart, Ken, “blackbody radiation”, Encyclopedia Britannica, 19 January 2024, [Online] Available at: <https://www.britannica.com/science/blackbody-radiation>

[Accessed 30 January 2024].

[57] Γεωργίας Χ. Αθανασούλη, “Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΑΔΙΑΦΑΝΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ”, Διδακτορική Διατριβή, Φυσικό Τμήμα Πανεπιστημίου Πατρών, 1984, [Online] Available at: [file:///C:/Users/orfve/Downloads/Nimertis_Athanasouli\(phys\).pdf](file:///C:/Users/orfve/Downloads/Nimertis_Athanasouli(phys).pdf) [Accessed 30 January 2024].

[58] Del Bene VE, Temperature. In: Walker HK, Hall WD, Hurst JW, editors, “Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations”, 3rd edition, Boston: Butterworths, 1990, Chapter 218, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK331/#:~:text=Normal%20body%20temperature%20is%20considered,0.25%20to%200.5%C2%B0C.>

[Accessed 30 January 2024].

[59] Michael Fowler, David M. Hanson, Erica Harvey, Robert Sweeney, Theresa Julia Zielinski, “Planck's Quantum Theory”, LibreTexts CHEMISTRY, [Online] Available at: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_\(Chang\)/11%3A_Quantum_Mechanics_and_Atomic_Structure/11.02%3A_Planck's_Quantum_Theory](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_(Chang)/11%3A_Quantum_Mechanics_and_Atomic_Structure/11.02%3A_Planck's_Quantum_Theory)

[Accessed 02 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[60] Togawa T, “Non-contact skin emissivity: measurement from reflectance using step change in ambient radiation temperature”, *Clin Phys Physiol Meas*, vol.10, no. 1, pp. 39-48, February 1989, doi: [10.1088/0143-0815/10/1/004](https://doi.org/10.1088/0143-0815/10/1/004), [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2714059/> [Accessed 02 February 2024].

[61] Steketee J, “Spectral emissivity of skin and pericardium”, *Phys Med Biol*, vol.18, issue 5, pp. 686-694, September 1973, doi: [10.1088/0031-9155/18/5/307](https://doi.org/10.1088/0031-9155/18/5/307), [Online] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4758213/>

[Accessed 02 February 2024].

[62] Jagdish Mehra, Helmut Rechenberg, “The Historical Development of Quantum Theory”, Springer-Verlag, New York Inc, 1982, volume 1, chapter 1, pp. 24. [ISBN 0-387-90642-8](#), [ISBN 3-540-90642-8](#)

[63] J J O'Connor and E F Robertson, “Max Karl Ernst Ludwig Planck”, School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland, October 2003, [Online] Available at: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Planck/>

[Accessed 02 February 2024].

[64] Roger H. Stuewer, “Max Planck German physicist”, *Britannica*, Last Updated: Dec 22, 2023, [Online] Available at: <https://www.britannica.com/biography/Max-Planck/Later-life> [Accessed 02 February 2024].

[65] “ Το μέλαν σώμα και η ακτινοβολία του -Η γένεση μιας επαναστατικής θεωρίας”, physics4u, Άρθρο, Απρίλιος 2002, [Online] Available at: <https://www.physics4u.gr/articles/2002/blackbody.html> [Accessed 03 February 2024].

[66] Ν ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ Ι, “Max Planck”, Εφημερίδα: ΤΟ ΒΗΜΑ, 24.11.2008, [Online] Available at: <https://www.tovima.gr/2008/11/24/opinions/max-planck/>

[Accessed 03 February 2024].

[67] The Editors of Encyclopedia Britannica, “quantum physics”, *Article History*, Last Updated: Jan 14, 2024, [Online] Available at: <https://www.britannica.com/science/quantum> [Accessed 03 February 2024].

[68] Zhang, Y., Li, Q., & Zhou, H, “Chapter 1 -Theoretical Foundation and Basic Properties of Thermal Radiation”, *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*, pp. 1–43, Academic Press, 2016, doi:10.1016/b978-0-12-800966-6.00001-6, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128009666000016?via%3Dihub> [Accessed 03 February 2024].

[69] Mehra, J., Rechenberg, H, “The Historical Development of Quantum Theory”, Germany, Springer, New York, pp. 24 – 59, December 2000, [Online] Available at: https://www.google.gr/books/edition/The_Historical_Development_of_Quantum_Th/W5kyppVPyesC?hl=en&gbpv=0

[Accessed 03 February 2024].

[70] Planck M., “On the law of distribution of energy in the normal spectrum”, *Annalen der Physik* vol.4, pp. 553. January 1901, [Online] Available at: <http://bourabai.ru/articles/planck/planck1901.pdf> [Accessed 03 February 2024].

[71] Physics History Network, “Wien, W. (Wilhelm)”, *American Institute of Physics – AIP*, [Online] Available at: <https://history.aip.org/phn/11811011.html>

[Accessed 03 February 2024].

[72] David W. Ball, “Wien’s Displacement Law as a Function of Frequency”, *Journal of Chemical Education*, vol. 90, no.9, pp. 1250 – 1252, 2013, doi: [10.1021/ed400113z](https://doi.org/10.1021/ed400113z), [Online] Available at: https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ed400113z?casa_token=q_GIMEDtR5sAAAAA%3AFh2wnuVrkj23iFITDyMM2qTmAimhbCFX2ZI7n8hAgzHBqg2QKWHtloWQcomz7aXXeUaCVco7CqDQ [Accessed 03 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[73] Stewart, S. M, “Spectral Peaks and Wien’s Displacement Law”, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 26 no 4, pp. 689–692, October–December 2012, doi:10.2514/1.t3789, [Online] Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.T3789>

[Accessed 03 February 2024].

[74] John Crepeau, “Josef Stefan: His life and legacy in the thermal sciences”,

Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 31, Issue 7, pp. 795-803, July 2007, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177706001361>

[Accessed 03 February 2024].

[75] Tyndall, John, “On luminous [i.e., visible] and obscure [i.e., infrared] radiation”. Philosophical Magazine, 4th series, vol. 28, pp. 329–341, November 1864, [Online] Available at: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951000614117o&view=1up&seq=357>

[Accessed 03 February 2024].

[76] Physics textbook of Adolph Wüllner, “Estimation of the temperature that corresponded to the platinum filament's color”, 1875, in German, vol. 3, Leipzig, Germany, B.G. Teubner, p. 215, [Online] Available at: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b4062759&view=1up&seq=231>

[Accessed 03 February 2024].

[77] Wisniak, Jaime, “The Heat Radiation Law: From Newton to Stefan”, Indian Journal of Chemical Technology, vol. 9, pp. 545-555, [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/236233799_The_Heat_Radiation_Law_From_Newton_to_Stefan

[Accessed 03 February 2024].

[78] Boltzmann L, “Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie - Derivation of Stefan's law, concerning the dependence of thermal radiation on temperature, from the electromagnetic theory of light”, in German, Annalen der Physik, WILEY, Online Library, vol. 258, Issue 6, pp. 145-304, 1884, [Online] Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18842580616>

[Accessed 03 February 2024].

[79] X. Maldague, “NDT Techniques: Thermographic”, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, pp. 6036-6039, 2001, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0080431526010652>

[Accessed 03 February 2024].

[80] Χατζηαθανασίου Β, Καδή Σ, “ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ”, Ενότητα 7: Ακτινοβολία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ΑΝΟΙΚΤΑ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ, 2014-2015, [Online] Available at: https://opencourses.auth.gr/modules/document/file.php/OCRS421/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%AC%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/Enothta7_Radiation_opencourses.pdf

[Accessed 04 February 2024].

[81] Planck Max, “The theory of heat radiation”, Authorised Translation

by Morton Masius, PHILADELPHIA, COPYRIGHT, 1914, BY P. BLAKISTON'S SON & Co, 1012 WALNUT STREET, pp. 59 – 68, [Online] Available at: <https://archive.org/details/theoryofheatradi00planrich/page/xii/mode/2up?ref=ol>

[Accessed 03 February 2024].

[82] Meseguer, J., Pérez-Grande, I., & Sanz-Andrés, A, “Thermal radiation heat transfer”, pp. 73-86, December 2012, doi: 10.1533/9780857096081.73, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845699963500058>

[Accessed 03 February 2024].

[83] Turito, “Infrared Radiation – Definition, Characteristics, Uses”, Aug 13, 2022, [Online] Available at: <https://www.turito.com/blog/physics/infrared-radiation>

[Accessed 07 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[84] Electricity – Magnetism, “Infrared Waves”, Built with GeneratePress, 2024, [Online] Available at: <https://www.electricity-magnetism.org/infrared-waves-2/>
[Accessed 07 February 2024].

[85] Shams Tebrez Alam, “Infrared Radiation: Electromagnetic Waves, Definition and Properties”, Collegedunia, Dec 18, 2023, [Online] Available at: <https://collegedunia.com/exams/infrared-radiation-physics-articleid-946#characteristics>

[Accessed 07 February 2024].

[86] Yoshihide Sugimoto, Jozef van der Ha, Benny Rievers, “Thermal Radiation Model for the Rosetta Spacecraft”, AIAA 2010-7659, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, August 2010, [Online] Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2010-7659>
[Accessed 07 February 2024].

[87] Baudouy, B (Saclay), “Heat Transfer and Cooling Techniques at Low Temperature”, CAS - CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators, pp.329-352, January 2015, doi: [10.5170/CERN-2014-005.329](https://doi.org/10.5170/CERN-2014-005.329), [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/271532101_Heat_Transfer_and_Cooling_Techniques_at_Low_Temperature

[Accessed 07 February 2024].

[88] Jonathan Trout, “What Is Infrared Thermography? - Explaining infrared thermography and how to use it in preventive maintenance”, Noria Corporation, [Online] Available at: <https://www.reliableplant.com/infrared-thermography-31572>

[Accessed 07 February 2024].

[89] Kaczmarek, M., Nowakowski, A, “Active IR-Thermal Imaging in Medicine”, Journal of Nondestructive Evaluation (Springer), vol. 35, 19, January 2016, doi: [10.1007/s10921-016-0335-y](https://doi.org/10.1007/s10921-016-0335-y), [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-016-0335-y#citeas>
[Accessed 09 February 2024].

[90] Hannah Eliza John, Vachara Niumsawatt, Warren Matthew Rozen, Iain S. Whitaker, “Clinical applications of dynamic infrared thermography in plastic surgery: a systematic review”, vol. 5, no. 2, April 2016, [Online] Available at: <https://gs.amegroups.org/article/view/9009/html>
[Accessed 09 February 2024].

[91] Kesztyüs D, Brucher S, Wilson C, Kesztyüs T, “Use of Infrared Thermography in Medical Diagnosis”, Screening, and Disease Monitoring: A Scoping Review, Medicina, vol. 59, no. 12, p. 2139, December 2023, doi: [10.3390/medicina59122139](https://doi.org/10.3390/medicina59122139), [Online] Available at: <https://www.mdpi.com/1648-9144/59/12/2139#B3-medicina-59-02139>

[Accessed 09 February 2024].

[92] Laurent Seuront, Terence P T Ng, Justin A Lathlean, “A review of the thermal biology and ecology of molluscs, and of the use of infrared thermography in molluscan research”, Journal of Molluscan Studies, vol. 84, Issue 3, August 2018, pp. 203–232, [Online] Available at: <https://academic.oup.com/mollus/article/84/3/203/5052156>

[Accessed 14 February 2024].

[93] Grodzinsky E, Sund Levander M, “History of the Thermometer”, Understanding Fever and Body Temperature, vol. 23, pp. 23–35, August 2019. doi: [10.1007/978-3-030-21886-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21886-7_3), PMID: PMC7120475, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7120475/>
[Accessed 14 February 2024].

[94] E.F.J. Ring, “The historical development of temperature measurement in medicine”, Infrared Physics & Technology, vol. 49, Issue 3, pp. 297-301, 2007, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449506000958>

[Accessed 14 February 2024].

[95] E. F. J. Ring, “The historical development of thermometry and thermal imaging in medicine”, Journal of Medical Engineering & Technology, vol. 30, no.4, pp. 192-198, doi: [10.1080/03091900600711332](https://doi.org/10.1080/03091900600711332), [Online] Available at:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03091900600711332?scroll=top&needAccess=true>
[Accessed 14 February 2024].

[96] Vollmer, M. and Möllmann, K.-P., “Fundamentals of Infrared Thermal Imaging”, In Infrared Thermal Imaging, Chapter 1, pp. 1 – 106, Wiley online library, November 2017, [Online] Available at: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9783527693306.ch1?saml_referrer
[Accessed 14 February 2024].

[97] User’s manual, ThermoCAM™ EX300, FLIR systems, “History of infrared technology”, pp. 109 – 112, [Online] Available at: https://assets.tequipment.net/assets/1/26/Documents/EX300_manual.pdf
[Accessed 14 February 2024].

[98] Ring, F., “The Herschel Heritage to Medical Thermography”, Journal of Imaging, vol. 2, no. 2, p. 13, 2016, [Online] Available at: <https://www.mdpi.com/2313-433X/2/2/13>
[Accessed 14 February 2024].

[99] T., S., “The Bolometer”, Nature, vol. 25, pp. 14–16, November 1881, [Online] Available at: <https://www.nature.com/articles/025014a0#citeas>

[Accessed 14 February 2024].

[100] Angelos Plastropoulos, Ndidiamaka Adiuaku, Nicolas P. Avdelidis, Clemente Ibarra-Castanedo, Xavier P. V. Maldague, Pierre Servais, “A short review on infrared thermography: history, philosophy, approaches, standards, and application examples”, Proc. SPIE 12536, Thermosense: Thermal Infrared Applications XLV, June 2023, doi: 10.1117/12.2664586, [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/371514033_A_short_review_on_infrared_thermography_history_philosophy_approaches_standards_and_application_examples

[Accessed 16 February 2024].

[101] Botsaris P, Tsanakas I.(John), “Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements”, 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia, June 2010, [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/228410709_Infrared_Thermography_as_an_Estimator_Technique_of_a_Photovoltaic_Module_Performance_via_Operating_Temperature_Measurements

[Accessed 16 February 2024].

[102] Meola C, Boccardi S, Carlomagno G, “Nondestructive Testing With Infrared Thermography”, Chapter 4, Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials, Woodhead Publishing, pp. 85-125, 2017, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781782421719000048>

[Accessed 16 February 2024].

[103] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes FG, “Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing”, Sensors, vol. 14, no. 7, pp. 12305-12348, [Online] Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12305#FD2>

[Accessed 16 February 2024].

[104] Ibarra-Castanedo, Clemente & Tarpani, José & Maldague, Xavier, “Nondestructive testing with thermography”, European Journal of Physics, vol. 34, issue 6, pp. 91-109, 2013, doi:10.1088/0143-0807/34/6/S91, [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/259558221_Nondestructive_testing_with_thermography

[Accessed 16 February 2024].

[105] Herraiz, Á. H., Marugán, A. P., Márquez, F. P. G., “A review on condition monitoring system for solar plants based on thermography”, Chapter 7, Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets, Editor(s): Mayorkinos Papaelias, Fausto Pedro García Márquez, Alexander Karyotakis, Butterworth-Heinemann, pp. 103-118, 2020, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081010945000071?via%3Dihub>

[Accessed 17 February 2024].

[106] Badghaish A A and Fleming D C, “Non-destructive inspection of composites using step heating thermography”, Journal of Composite Materials, vol. 42, Issue 3, pp. 1337 – 1357, July 2008, [Online] Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998308092202> [Accessed 17 February 2024].

[107] Nakul KUMAR, Dr. R. Justin JOSEYPHUS, “Eddy Current Thermography as A Tool for Detecting the Location and Dimension of Edge Defects in CrMo Steel Plate”, The e-Journal of Nondestructive Testing, [Online] Available at: https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Eddy_Current_Thermography_as_A_Tool_for_Detecting_the_Location_and_Dimension_of_Edge_Defects_in_CrMo_Steel_Plate.pdf [Accessed 17 February 2024].

[108] Gernot Riegert, Thomas Zweschper, Gerd Busse, “Lockin thermography with eddy current excitation”, Quantitative InfraRed Thermography Journal, vol. 1, Issue 1, pp. 21-32, DOI: 10.3166/qirt.1.21-32, 2004, [Online] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3166/qirt.1.21-32>

[Accessed 17 February 2024].

[109] L. D. Favro, Xiaoyan Han, Zhong Ouyang, Gang Sun, Hua Sui, R. L. Thomas, “Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse”, Review of Scientific Instrument,; vol. 71, Issue 6, pp. 2418–2421, June 2000, [Online] Available at: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/71/6/2418/351211/Infrared-imaging-of-defects-heated-by-a-sonic?redirectedFrom=fulltext>

[Accessed 17 February 2024].

[110] Hou, F.; Zhang, Y.; Zhou, Y.; Zhang, M.; Lv, B.; Wu, J, “Review on Infrared Imaging Technology”, Sustainability, vol. 14, no. 18, p. 11161, September 2022, [Online] Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11161>

[Accessed 18 February 2024].

[111] Markus Tarin, “What is NETD in a thermal camera?”, MoviTHERM – Advanced Thermography solutions, [Online] Available at: [https://movitherm.com/knowledgebase/netd-thermal-camera/#:~:text=NETD%20explained&text=The%20expression%20stands%20for%20E2%80%9CNoise.milli%2DKelvin%20\(mK\).](https://movitherm.com/knowledgebase/netd-thermal-camera/#:~:text=NETD%20explained&text=The%20expression%20stands%20for%20E2%80%9CNoise.milli%2DKelvin%20(mK).)

[Accessed 18 February 2024].

[112] MKS Instruments Handbook, Principles & Applications in Photonics Technologies by The Office of the CTO, “Thermal Imaging”, [Online] Available at: <https://www.newport.com/n/thermal-imaging#detectors>

[Accessed 18 February 2024].

[113] Teledyne Princeton Instruments, “Field of View and Angular Field of View”, [Online] Available at: <https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/field-of-view-and-angular-field-of-view>

[Accessed 18 February 2024].

[114] Markus Tarin, “Thermal Infrared Imaging in IR Cameras - Explained!”, MoviTHERM – Advanced Thermography solutions, [Online] Available at: <https://movitherm.com/knowledgebase/thermal-infrared-imaging-explained/>

[Accessed 18 February 2024].

[115] FLIR Systems, “THE ULTIMATE INFRARED HANDBOOK FOR R&D PROFESSIONALS”, A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry, Published by FLIR AB, , [Online] Available at: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_EN.pdf [Accessed 18 February 2024].

[116] Rogalski, A., “Infrared Detectors”, 2nd Edition, CRC Press, November 2010, [Online] Available at: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b10319/infrared-detectors-antonio-rogalski> [Accessed 18 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[117] Vollmer, M. and Möllmann, K.-P., “Fundamentals of Infrared Thermal Imaging”, In Infrared Thermal Imaging, Chapter 2, pp. 107 - 228, Wiley online library, November 2017, [Online] Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9783527693306.ch2> [Accessed 20 February 2024].

[118] Kirk J Havens, Edward J. Sharp, “Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild”, Chapter 8 - Imager Selection, pp. 121 – 141, 2016, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128033845000087> [Accessed 20 February 2024].

[119] PULSAR, “WHAT ARE THE COMPONENTS OF A THERMAL IMAGER?”, [Online] Available at: <https://www.pulsar-nv.com/glo/support/thermal-imaging-technologies/what-are-the-components-of-a-thermal-imager/2374/>

[Accessed 20 February 2024].

[120] Wikipedia, “Thermal imaging camera”, [Online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_imaging_camera#:~:text=A%20thermal%20imaging%20camera%20consists.%2C%20ruggedized%2C%20and%20waterproof%20housing.

[Accessed 20 February 2024].

[121] Howell KJ, Smith RE, “Guidelines for specifying and testing a thermal camera for medical applications”, Thermology international 2009, vol. 19, no.1 pp. 5-14, [Online] Available at: http://www.uhlen.at/thermology-international/archive/abstract%201-1_09.html

[Accessed 20 February 2024].

[122] Pereira, C.B., Yu, X., Dahlmanns, S., Blazek, V., Leonhardt, S., Teichmann, D, “Infrared Thermography”, In: Abreu de Souza, M., Remigio Gamba, H., Pedrini, H. (eds) Multi-Modality Imaging, Springer, Cham, pp. 1–30, November 2018, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98974-7_1#citeas

[Accessed 20 February 2024].

[123] Jones, B. F, “A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine”, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 17, no. 6, pp. 1019-1027, Dec. 1998, doi: 10.1109/42.746635, [Online] Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/746635>

[Accessed 20 February 2024].

[124] International Association of Certified Thermographers, “CLINICAL THERMOGRAPHY STANDARDS & GUIDELINES”, International Academy of Clinical Thermology Quality Assurance Guidelines, Standards and Protocols in Clinical Thermographic Imaging, 2015, [Online] Available at: <https://iactthermography.org/standards/medical-infrared-imaging/#:~:text=The%20temperature%20of%20the%20room%20should%20not%20vary%20more%20than.interact%20with%20radiant%20infrared%20energy.>

[Accessed 20 February 2024].

[125] Teledyne FLIR, “Picking a Thermal Color Palette”, WEDNESDAY, APRIL 14, 2021, [Online] Available at: <https://www.flir.com/discover/industrial/picking-a-thermal-color-palette/>

[Accessed 20 February 2024].

[126] Sarawade, A. A., & Charniya, N. N, “Infrared Thermography and its Applications: A Review”, 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, pp. 280-285, 2018, doi:10.1109/cesys.2018.8723875, [Online] Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8723875>

[Accessed 22 February 2024].

[127] F. Al-Obaidy, F. Yazdani and F. Mohammadi, “Fault detection using thermal image based on soft computing methods: Comparative study”, Microelectronics Reliability, vol. 71, pp. 56-64, 2017, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271417300367> [Accessed 22 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[128] C. R. Wagh and V. B. Baru, “Detection of Faulty Region on Printed Circuit Board with IR Thermography”, International Journal of Scientific and Engineering Research, vol. 4, issue 11, pp. 1-4, November 2013, [Online] Available at: <https://www.ijser.org/paper/Detection-of-Faulty-Region-on-Printed-Circuit-Board-With-IR-Thermography.html>

[Accessed 22 February 2024].

[129] FLIR, “Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications”, An informative guide for the use of thermal imaging cameras for inspecting buildings, solar panels and windmills, [Online] Available at: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf

[Accessed 22 February 2024].

[130] S. Bagavathiappan, B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring - A review”, Infrared Physics & Technology, vol. 60, pp. 35-55, September 2013, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449513000327>

[Accessed 22 February 2024].

[131] R. Gade and T. B. Moeslund, “Thermal cameras and applications: a survey”, Machine Vision and Applications, vol. 25, no. 1, pp. 245-262, November 2013, [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00138-013-0570-5#citeas>

[Accessed 22 February 2024].

[132] FLIR, “Thermal imaging for Security & Surveillance”, [Online] Available at: http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/Comm_sec/SS_0032_EN.pdf [Accessed 22 February 2024].

[133] R. Vadivambal, D. S. Jayas, “Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry - A Review”, Food and Bioprocess Technology, vol. 4, pp. 186-199, February 2011, [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-010-0333-5#citeas>

[Accessed 22 February 2024].

[134] Diakides NA, Diakides M, Lupo JC, Paul JL, Balcerak R, “Advances in medical infrared imaging”, Medical infrared imaging, CRC Press, Boca Raton, pp 1–13, 2008, [Online] Available at: [https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=z-EsDmgYF4YC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Diakides+NA,+Diakides+M,+Lupo+JC,+Paul+JL,+Balcerak+R+\(2008\)+Advances+in+medical+infrared+imaging.+In:+Diakides+NA,+Bronzino+JD+\(eds\)+Medical+infrared+imaging,+CRC+Press,+Boca+Raton,+pp+1%E2%80%9313&ots=YmpjwY-Zga&sig=3OquYM2HNjf3VjoZebIkWeFbDfY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=z-EsDmgYF4YC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Diakides+NA,+Diakides+M,+Lupo+JC,+Paul+JL,+Balcerak+R+(2008)+Advances+in+medical+infrared+imaging.+In:+Diakides+NA,+Bronzino+JD+(eds)+Medical+infrared+imaging,+CRC+Press,+Boca+Raton,+pp+1%E2%80%9313&ots=YmpjwY-Zga&sig=3OquYM2HNjf3VjoZebIkWeFbDfY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[Accessed 22 February 2024].

[135] Eddie Y.K. Ng, Mahnaz Etehadtavakol, “Application of Infrared to Biomedical Sciences”, Book Series : Series in BioEngineering, Publisher: Springer Singapore, 2017, [Online] Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-3147-2>

[Accessed 22 February 2024].

[136] Jose Ignacio Priego Quesada, “Application of Infrared Thermography in Sports Science”, Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-47410-6, [Online] Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-47410-6>

[Accessed 22 February 2024].

[137] Sawka MN, Cheuvront SN, Kenefick RW, “High skin temperature and hypohydration impair aerobic performance”, Experimental Physiology, vol. 97, issue 3, pp. 327–332, March 2012, doi:10.1113/expphysiol.2011.061002, [Online] Available at: <https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/expphysiol.2011.061002>

[Accessed 22 February 2024].

[138] Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC, “A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat”, Journal of Thermal Biology, vol. 43 pp. 7–12, July 2014, doi:10.1016/j.jtherbio.2014.04.002, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456514000540?via%3Dihub>

[Accessed 22 February 2024].

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

[139] Northeast Thermography Medical Imaging Center, “Benefits of Medical Thermography”, [Online] Available at: <https://medthermography.com/thermography/advantages-of-thermography/> [Accessed 22 February 2024].

[140] TECHNOMAX Middle East Engineering LLC, “Infrared Thermography Testing & Analysis”, [Online] Available at: <https://www.technomaxme.com/services/infrared-thermography-testing/> [Accessed 22 February 2024].

[141] Hildebrandt C, Raschner C, Ammer K, “An overview of recent application of medical infrared thermography in sports medicine in Austria”, Sensors (Basel), vol. 10, issue 5, pp. 4700-15, doi: 10.3390/s100504700, [Online] Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292141/> [Accessed 22 February 2024].

[142] Vollmer, M. and Möllmann, K.-P., “Fundamentals of Infrared Thermal Imaging”, In Infrared Thermal Imaging, pp. 393 - 764, Wiley online library, November 2017, [Online] Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527693306>

[Accessed 22 February 2024].

[143] Chudecka M, Lubkowska A, “Temperature changes of selected body’s surfaces of handball players in the course of training estimated by thermovision, and the study of the impact of physiological and morphological factors on the skin temperature”, Journal of Thermal Biology, vol. 35, issue 8, pp. 379-385, December 2010, [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456510000859> [Accessed 22 February 2024].

[144] Smith CJ, Havenith G , “Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia”, European Journal of Applied Physiology, vol. 111, pp. 1391–1404, 2011, doi:10.1007/s00421-010-1744-8, [Online] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00421-010-1744-8> [Accessed 22 February 2024].

[145] SCOTT, “SCOTT SUB CROSS 30 MEN BIKE, [Online] Available at: <https://www.scott-sports.com/global/en/product/scott-sub-cross-30-men-bike> [Accessed 22 February 2024].

[146] Manufactures & Suppliers, “Ta298 Indoor Outdoor Two Temperatures Display LCD Digital Hydrometer Thermometer”, Product Details, [Online] Available at: <https://current-sensor.en.made-in-china.com/product/evsEMgTBCprq/China-Ta298-Indoor-Outdoor-Two-Temperatures-Display-LCD-Digital-Hydrometer-Thermometer.html> [Accessed 22 February 2024].

[147] Mi Smart Band 6, Specifications, [Online] Available at: <https://www.mi.com/global/product/mi-smart-band-6/specs/> [Accessed 22 February 2024].

Πηγές εικόνων

Εικόνα 1. Δομή σκελετικού μυός, <http://www.balletly.gr/2021/05/blog-post.html>

Εικόνα 2. Σωματικό νευρικό σύστημα, <https://www.simplypsychology.org/somatic-nervous-system.html>

Εικόνα 3. Μύες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της πεταλιάς, <https://www.datasport.com/en/essentials/figuring-out-the-correct-pedal-stroke/>

Εικόνα 4. Μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας – θερμορύθμιση, Jack H. Wilmore, David L. Costill, Φυσιολογία της Άσκησης και του Αθλητισμού. Cyprus: BROKEN HILL PUBLISHERS LTD, 2011

Εικόνα 5. Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, <https://classnotes.ng/lesson/electromagnetic-waves-physics-sss3/>

Εικόνα 6. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και τα είδη της ακτινοβολίας, https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum

Εικόνα 7. Είδος ακτινοβολίας και απεικόνιση, <https://www.intechopen.com/chapters/28453>

Εικόνα 8. Φασματική (α) και Κατευθυντική (β) κατανομή ακτινοβολία ιδανικού και πραγματικού σώματος, https://www.researchgate.net/figure/Fundamentals-of-thermal-radiation-from-a-surface-a-Spectral-distribution-of-blackbody_fig6_332459395

Εικόνα 9. Μέλαν σώμα, <https://tikz.net/blackbody/>

Εικόνα 10. Φασματική ισχύς εκπομπής του μέλανος σώματος συναρτήσει του μήκους κύματος για διάφορες θερμοκρασίες, <https://howthingswork.org/physics-qm-black-body-radiation/>

Εικόνα 11. Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με το υλικό μιας επιφάνειας, https://www.researchgate.net/figure/Schematic-showing-the-absorption-transmission-and-reflection-of-infrared-radiation-by_fig3_295404661

Εικόνα 12. Max Planck, <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/max-planck>

Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση του νόμου μετατόπισης του Wien, https://space.fandom.com/wiki/Wien%27s_displacement_law

Εικόνα 14. Μπρούτζινη προτομή του αρχαίου ιατρού και πατέρα της ιατρικής Ιπποκράτη, το αγαλματίδιο βρίσκεται στην κατοχή του συγγραφέα της παρούσης διπλωματικής και φωτογραφήθηκε από αυτόν.

Εικόνα 15. Ο William Herschel και το πείραμα που οδήγησε στην ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας, <https://www.sciencephoto.com/media/1001639/view/william-herschel-german-born-english-astronomer>

Εικόνα 16. Το πρώτο θερμογράφημα, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03091900600711332>

Εικόνα 17. Προτότυπο σύστημα υπέρυθρης θερμογραφίας Pyroscan, 1942, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1079404209043070>

Εικόνα 18. Bofors/Philips κάμερα υπέρυθρου 1975, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1079404209043070>

Εικόνα 19. FLIR T540, https://www.flir.eu/products/t540_science/?vertical=rd%20science&segment=solutions

Εικόνα 20. Flir One Gen 3, <https://www.pcmag.com/reviews/flir-one-gen-3>

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΩΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Εικόνα 21. Παθητική θερμογραφία,

https://www.researchgate.net/publication/371514033_A_short_review_on_infrared_thermography_history_philosophy_approaches_standards_and_application_examples

Εικόνα 22. Τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας, <https://workswell-thermal-camera.com/workswell-active-thermoinspector/>

Εικόνα 23. Πειραματική διάταξη για παθητική (πάνω) και ενεργητική (κάτω) θερμογραφία,

https://www.researchgate.net/publication/259558221_Nondestructive_testing_with_thermography#pdf14

Εικόνα 24. Διάγραμμα βασικών τμημάτων θερμοκάμερας,

https://www.researchgate.net/figure/Simplified-block-diagram-of-an-infrared-camera-11_fig7_322601448

Εικόνα 25. Ανιχνευτής τύπου μικροβολομέτρου, https://www.researchgate.net/figure/Bridge-structure-of-a-single-microbolometer-pixel-Moreno-et-al-2012_fig1_292188068

Εικόνα 26. Σχηματικό γράφημα Ανιχνευτή φωτονίων τύπου quantum well IR photodetector (QWIP) στα αριστερά (a) και σχηματικό γράφημα λειτουργίας της ζώνης αγωγιμότητας του ανιχνευτή QWIP υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου στα δεξιά (b), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402620319203>

Εικόνα 27. Διάφορες χρωματικές παλέτες: (α) WHITE HOT, (β) IRONBOW, (γ) LAVA, (δ) ARCTIC, (ε) RAINBOW HC, (ζ) ISOTHERMS, <https://www.flir.com/discover/industrial/picking-a-thermal-color-palette/>

Εικόνα 28. Θερμογραφήματα κατά τη διάρκεια της άσκησης, <https://link.springer.com/article/10.1114/1.33>

Εικόνα 29. Θερμογράφημα δρομέα πριν την έναρξη της κούρσας,

<https://sportaerztezeitung.com/rubriken/therapie/9722/infrared-thermography/>

Εικόνες 30, 31, 32, 33. Έχουν ληφθεί από τον συγγραφέα

Εικόνα 34. Smartphone Xiaomi Poco M5s, <https://ichehol.ru/catalog/detail/xiaomi-poco-m5s-6-128gb-grey/#gallery-1>

Εικόνα 35. Σύμβολο εφαρμογής FLIR ONE,

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.flir.flirone&hl=el&pli=1>

Εικόνες 36, 37, 38. Έχουν ληφθεί από τον συγγραφέα