



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ**

**Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία  
σε αθλητές με αναπηρικό αμαξίδιο**

**ZABOΛΑ ΜΑΡΙΑ**

**Αριθμός μητρώου: 48015031**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Δημήτριος Γκλώτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα  
Μηχανικών Βιοϊατρικής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής**

**Αθήνα 03/03/2022**

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Γκλώτσος	Παντελεήμων Ασβεστάς	Σπυρίδων Κωστόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η υπογράφουσα Ζαβόλα Μαρία του Νικήτα, με αριθμό μητρώου 04815031 φοιτήτρια 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

Ο/Η Δηλών/ούσα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας ερευνητικής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη λειτουργίας της Υπέρυθρης Κάμερας και κατ' επέκταση της τεχνικής της Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας, ως μια μη επεμβατική διαδικασία που επιτρέπει την χαρτογράφηση των θερμικών μοτίβων σε μια επιφάνεια. Γίνεται εστίαση στην επιφάνεια του ανθρώπινου δέρματος του οποίου η θερμοκρασία απεικονίζεται στην κάμερα, καθώς από μόνος του ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν είναι ικανός να εντοπίσει το υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας.

Στο κυρίως μέρος αναφέρεται η θεωρία πίσω από την κατασκευή της Υπέρυθρης Κάμερας, η οποία είναι το κύριο εργαλείο της τεχνικής που μελετάται. Αναλύονται οι νόμοι που διέπουν την Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία, η λειτουργία της κάθε επιμέρους διάταξης αλλά και άλλες τεχνικές και εφαρμογές που έχει σε διάφορους κλάδους.

Για να αναλυθεί το πόσο αξιόπιστα απεικονίζει η κάμερα τις μεταβολές θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος, επιλέχθηκε ένα δείγμα αθλητών που κινούνται με αμαξίδιο. Τα άτομα με αυτή την δυσλειτουργία, κλήθηκαν να αποθανατιστούν σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους στο σημείο των ώμων. Πριν από την καθιερωμένη τους προπόνηση, ακριβώς μετά την λήξη της και έπειτα από δέκα λεπτά. Ο ώμος επιλέχθηκε ως σημείο εξέτασης, καθώς τα άτομα με αμαξίδιο τον καταπονούν περισσότερο σε σύγκριση με μια υγιή ομάδα ανθρώπων.

Μετά την συλλογή φωτογραφιών που απεικόνισαν την υπέρυθρη ακτινοβολία των ώμων των αθλητών σε μορφή θερμοκρασίας, αναλύθηκαν τα αποτελέσματα με χρήση τεχνικής ANOVA για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Βρέθηκαν οι διαφορές στις τιμές που συγκεντρώθηκαν καθώς και σε ποιες ακριβώς χρονικές στιγμές υπήρχαν αποκλίσεις στις θερμοκρασίες.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Διπλωματική εργασία, Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία, Θερμική Κάμερα, Υπέρυθρη Ακτινοβολία*

**Keywords:** *Final project, Infrared Thermography, IRT, Thermal Camera, Infrared Radiation*

## Περιεχόμενα

Διάρθρωση εργασίας.....	7
1. Εισαγωγή.....	9
A μέρος – Βασική θεωρία .....	9
1.1. Ιστορική Αναδρομή .....	9
1.2. Η θεωρία πίσω από την υπέρυθρη Θερμογραφία .....	15
1.2.1. Μετάδοση θερμότητας.....	15
1.2.2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .....	16
1.3. Νόμοι που διέπουν την υπέρυθρη ακτινοβολία .....	18
1.3.1. Μέλαν σώμα.....	18
1.3.2. Νόμος του Plank .....	19
1.3.3. Νόμος μετατόπισης του Wien .....	21
1.3.4. Νόμος Stefan-Boltzmann .....	22
1.3.5. Εκπομπή ακτινοβολίας μη μέλανος σώματος .....	23
1.4. Αρχές Θερμογραφίας και Τεχνικές .....	25
1.4.1. Ορισμός Θερμογραφίας (Στην Ιατρική) .....	25
1.4.2. Παθητική Θερμογραφία .....	26
1.4.3. Ενεργητική Θερμογραφία .....	26
1.4.4. Θερμική διέγερση .....	28
1.4.4.1. Οπτικά μέσα .....	28
1.4.4.2. Μηχανικά μέσα .....	34
1.4.4.3. Ηλεκτρομαγνητική διέγερση .....	36
1.5. Εφαρμογές Θερμογραφίας .....	37
1.5.1. Παθητική Θερμογραφία .....	37
1.5.2. Ενεργητική Θερμογραφία .....	38
1.6. Εξοπλισμός Απεικονιστικής Θερμογραφίας.....	40
1.6.1. Υπέρυθρη κάμερα .....	40
1.6.2. Φακός .....	40
1.6.3. Ανιχνευτής.....	40
1.6.4. Laser.....	46
B Μέρος- Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	47
Γ μέρος – Σκοπός και Στόχοι .....	49
2. Προϋποθέσεις για καλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.....	50
2.1. Μέθοδος και Υλικό .....	51
2.1.1. Ερευνητικός σχεδιασμός.....	51
2.2. Διαδικασία Μέτρησης.....	58
2.2.1. Πληθυσμός .....	60

2.2.2. Περιβάλλον .....	60
2.2.3. Συλλογή δεδομένων.....	60
2.3. Αποτελέσματα.....	61
2.4. Συζήτηση .....	64
2.5. Συμπεράσματα .....	68
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	70

## Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από δύο βασικά κεφάλαια. Το κεφάλαιο της εισαγωγής και το ερευνητικό κεφάλαιο. Το εισαγωγικό χωρίζεται σε επτά υπό-κεφάλαια.

- ❖ Αναλυτική ιστορική αναδρομή της Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας. Αναλύεται όλη η διαδρομή προς την χρήση της, από την ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας μέχρι την καθιέρωση της τεχνικής στην ιατρική αλλά και σε άλλους κλάδους. Η αναδρομή αυτή χωρίζεται χρονικά αλλά κυρίως ανά επιστήμονα που συνέβαλε στην εξέλιξη της Θερμογραφίας, ο κάθε ένας με την δική του τεχνική αλλά και θεωρητική ανακάλυψη.
- ❖ Θεωρία πίσω από την Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία. Επεξηγείται η μετάδοση θερμότητας καθώς και η φύση της θερμικής ακτινοβολίας με επίκεντρο την υπέρυθρη ακτινοβολία και τις ιδιότητές της.
- ❖ Νόμοι που διέπουν την υπέρυθρη ακτινοβολία, οι οποίοι έχουν ως κοινό παρονομαστή την θεωρία του μέλανος σώματος. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε για την διευκόλυνση της μελέτης της θερμικής ακτινοβολίας και οδήγησε στην ανάπτυξη των τριών βασικών νόμων του Plank, Stefan-Boltzmann και Wien. Επιπρόσθετα, αναλύθηκε και η θεωρία της εκπομπής μη μέλανος σώματος που εμπεριέχει μέσα της τρεις συντελεστές που σχετίζονται με την συμπεριφορά της ακτινοβολίας ενός σώματος.
- ❖ Ορισμός Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας και ανάλυση αρχών αλλά και οι τεχνικών. Οι βασικές της προσεγγίσεις είναι δυο, παθητική και ενεργητική οι οποίες διαφέρουν ως προς την μέθοδο ελέγχου και στις εφαρμογές που τις συναντάμε. Ακόμη, δίνεται λίγη παραπάνω έκταση στις μεθόδους διέγερσης του εξεταζόμενου στόχου κατά την διαδικασία της ενεργητικής θερμογραφίας.
- ❖ Αναφορά εφαρμογών της Θερμογραφίας, ανάλογα με την προσέγγιση τους (Παθητική και Ενεργητική). Παραθέτονται ονομαστικά οι κλάδοι της Ιατρικής όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική και αντίστοιχα παραδείγματα για κάθε μια εφαρμογή.
- ❖ Από τί αποτελείται η τεχνική της Θερμογραφίας και ανάλυση εξοπλισμού που συνεργάζεται για να εξαχθεί τελικό αποτέλεσμα ένα θερμόγραμμα. Εξηγείται η λειτουργία της κάθε διάταξης και παραθέτονται οι κατηγορίες τους με τελευταία και πιο σημαντική αυτή της συστοιχίας εστιακού επιπέδου η οποία και χρησιμοποιείται στην Υπέρυθρη Κάμερα.
- ❖ Αναφορά προϋποθέσεων για την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της διαδικασίας που μελετάται. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την μέτρηση καθώς η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από φυσικά χαρακτηριστικά περιβάλλοντος αλλά και ανθρώπινες ενέργειες.

Στο **κεφάλαιο 2** επεξηγείται όλη η μέθοδος αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ποια ήταν η πορεία της κάθε συνάντησης, ποιες οι διαδικασίες των μετρήσεων, ο πληθυσμός και ο τρόπος της συλλογής των δεδομένων. Ακολουθεί στατιστική ανάλυση και ερμηνεία των

αποτελεσμάτων καθώς και μελλοντική πρόταση για επόμενες έρευνες. Τέλος, η διπλωματική εργασία αναφέρει τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από όλη την θεωρητική και ερευνητική μελέτη.



## 1. Εισαγωγή

### Α μέρος – Βασική θεωρία

#### 1.1. Ιστορική Αναδρομή

##### Υπέρυθρη Ακτινοβολία

##### *Jean Batista Della Porta(1535-1615)*

Το πρώτο βήμα για την ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας έγινε από τον Jean Batista Della Porta της Νάπολης. Το αντικείμενο μελέτης του ήταν κατά βάση η συμπεριφορά του φωτός. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το ανθρώπινο σώμα έχει την ικανότητα να ανακλά θερμότητα, η οποία μπορεί έτσι να ανιχνευθεί. Το πείραμα περιλάμβανε μια ασημένια επιφάνεια και ένα κερί τοποθετημένο μπροστά της. Καθώς η επιφάνεια αυτή απομακρυνόταν από την αρχική του θέση, η θερμότητα από το κερί μειωνόταν αντίστοιχα.[1]

##### *William Herschel (1738-1822)*



Εικόνα 1- William Herschel, ελαιογραφία από L. Abbot, 1785; Εθνική Πινακοθήκη Πορτρέτων, Λονδίνο

Ο William Herschel πέρασε από διάφορες ενασχολήσεις όπως δάσκαλος μουσικής, ερμηνευτής και συνθέτης και εξασκήθηκε στην θεωρία της μουσικής όπου και σπούδασε στο Robert Smith's Harmonics[2][3]. Από εκεί στράφηκε στο Smith's A Compleat System of Optics το οποίο τον οδήγησε στις τεχνικές κατασκευής τηλεσκοπίων[2]. Ωστόσο είναι γνωστός και για τις είκοσι τέσσερις συμφωνίες που συνέθεσε[4].

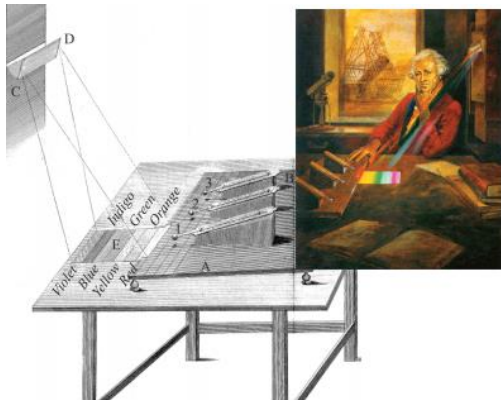
Ξεκινώντας, αποφάσισε να μελετήσει τα μακρινά ουράνια σώματα γενικότερα σαν σύνολο και όχι συγκεκριμένες περιπτώσεις. Για να το κάνει αυτό χρειάστηκε τηλεσκόπια με μεγάλους καθρέφτες για να συγκεντρώσει όσο περισσότερο φως ήταν δυνατό σε σύγκριση με άλλους επιστήμονες. Έτσι έφτιαξε καθρέφτες με μεταλλικούς δίσκους χαλκού, κασσίτερου και αντιμονίου σε διάφορες αναλογίες. Μετά από πολλά πειράματα, και τεχνικά προβλήματα κατέληξε το εν λόγω τηλεσκόπιο να είναι πολύ ανώτερο από αυτό του Γκρήνουιτς. Το 1789 το μεγαλύτερο του τηλεσκόπιο έγινε ένα από τα τεχνικά θαύματα του 18<sup>ου</sup> αιώνα[2].

Το 1781, κατά την τρίτη του έρευνα στον νυχτερινό ουρανό, ένα σώμα που έμοιαζε με αστέρι αποδείχθηκε ότι ήταν ο πλανήτης Ουρανός, ο πρώτος πλανήτης που ανακαλύφθηκε στην αρχαιότητα[4][5]. Για αυτό του απονεμήθηκε το Copley Medal. Μαζί με τον Ουρανό, ανακάλυψε και τα δυο φεγγάρια του: Titania και Oberon το 1787 αλλά και δύο φεγγάρια του Κρόνου.[2]

Μέχρι το 1785 το αντικείμενο μελέτης του ήταν η φύση και η μορφή των νεφελωμάτων και μια θεωρία σχετική με την προέλευση του σύμπαντος. Στη θεωρία αυτή ασχολήθηκε με τις ελκτικές δυνάμεις οι οποίες δημιούργησαν συγκροτήματα αστεριών στον χώρο και τελικά κατάφερε να εξελίξει την στατιστική μελέτη μετρώντας τα αστέρια και ερμηνεύοντας τα δεδομένα αυτά με βάση την έκταση τους στον Γαλαξιακό χώρο[2].

Τα 70 δημοσιευμένα άρθρα του περιλάμβαναν όχι μόνο μελέτες του Ηλιακού συστήματος αλλά και τη ανακάλυψη των υπέρυθρων ακτινών[2].

Αφού το βασικό του αντικείμενο ήταν η μελέτη του γαλαξία με τηλεσκόπιο, το 1800 χρειάστηκε να δημιουργήσει ένα οπτικό φίλτρο για να ελαττώσει την φωτεινότητα της εικόνας του Ηλίου που έφτανε στα μάτια[6][7]. Κατά την έρευνα αυτή δοκίμασε διάφορα δείγματα χρωματισμένου γυαλιού, τα οποία είχαν παρόμοια αποτελέσματα στην φωτεινότητα που κατέφθανε στην εικόνα του τηλεσκοπίου[8]. Κάποια από αυτά τα δείγματα πέρασαν πολύ λίγη από την θερμότητα του Ηλίου, ενώ άλλα πέρασαν υπερβολικά πολύ θερμότητα έτσι ώστε να κινδυνέψει το ανθρώπινο μάτι μόνο μέσα σε λίγα λεπτά παρατήρησης[4][5].



**Εικόνα 2- Πείραμα του William Herschel που οδήγησε στην εύρεση του υπέρυθρου φάσματος**  
 Πηγή: History of infrared detectors, A. ROGALSKI\*

Αυτό τον οδήγησε να εξετάσει το φάσμα του ηλιακού φωτός με ένα πρίσμα, μετρώντας την θερμοκρασία κάθε χρώματος κάτω από αυτό. Ουσιαστικά επανέλαβε το πείραμα του Νεύτωνα αλλά αντί να εστιάζει στην οπτική κατανομή του φάσματος, εστίασε στο φαινόμενο θέρμανσης[2][9]. Χρησιμοποίησε τρία θερμομέτρα για να εξετάσει τα διαφορετικά χρώματα του φάσματος (βιολετί (μωβ) , λουλακί (μπλε-μωβ), πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο) και τις θερμοκρασίες τους[8]. Αρχικά μαύρωσε τον λαμπτήρα ενός γυάλινου θερμομέτρου υδραργύρου με μελάνι για την απορρόφηση της ακτινοβολίας[4]. Τα υπόλοιπα δύο θερμομέτρα ήταν τα αναφορικά σημεία ελέγχου[6]. Τελικά διαπίστωσε ότι η υψηλότερη θερμοκρασία ήταν λίγο πέρα από το κόκκινο. Κάνοντας περεταίρω πειράματα, ο Herschel διαπίστωσε ότι οι «θερμιδικές ακτίνες» όπως τις ονόμασε, ανακλώνται, διαθλούνται και απορροφούνται όπως και το ορατό φώς[5][4].

Είχε γίνει ένα παρόμοιο πείραμα το 1777 από τον Ιταλό ερευνητή Marsilio Landriani (1746–1815), ο οποίος είχε παρατηρήσει την αύξηση της θερμοκρασίας από το βιολετί

προς το κόκκινο. Η διαφορά είναι ότι ο Herschel αναγνώρισε ότι πρέπει να υπάρχει και άλλη περιοχή πέρα από το ορατό φάσμα στην οποία η θερμοκρασία φτάνει τον μέγιστο βαθμό της. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίστηκε από τον Herschel ως «θερμομετρικό φάσμα»[2].

#### *Macedonio Melloni(1798-1854)*

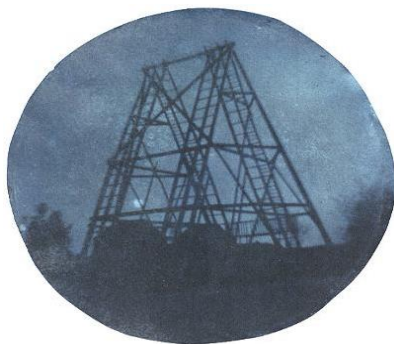
Η εξέλιξη της θερμογραφίας όμως δεν θα μπορούσε να προχωρήσει αν ο Macedonio Melloni δεν είχε διαπιστώσει ότι οι φυσικοί κρύσταλλοι αλατιού που βρίσκονται στους βράχους (NaCl) είναι διαπερατοί στην υπέρυθρη ακτινοβολία[9][10]. Οι κρύσταλλοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν μέχρι την εύρεση των συνθετικών κρυστάλλων την δεκαετία του 1930. Ακολούθησε ακόμη μια μεγάλη ανακάλυψη για την επιστημονική εξέλιξη, αυτή του thermopile που αναφέρεται παρακάτω[4].

#### *Leopoldo Nobili(1784-1835)*

Το 1829 ο Leopoldo Nobili συνεργάτης με τον M.Melloni, δημιούργησε το πρώτο θερμοηλεκτρικό ζεύγος το οποίο μπορούσε να μετρήσει μέχρι και 0,05 °, ενώ το θερμομέτρο του Herschel μέχρι 0,02°. Τί τον οδήγησε σε αυτή την ανακάλυψη;[9]

Το 1821, ο Thomas Johann Seebeck, ένας φυσικός από την Εσθονία, ανακάλυψε ότι ένα χαμηλό ηλεκτρικό ρεύμα ρέει σε ένα κλειστό κύκλωμα δύο ανόμοιων μεταλλικών αγωγών, όταν οι κόμβοι διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες[11][4]. Μέχρι τότε, οι περισσότεροι φυσικοί πίστευαν ότι η ακτινοβολούμενη θερμότητα και το φως ήταν διαφορετικά φαινόμενα. Μετά από αυτή την ανακάλυψη, ξεκίνησε να εξετάζεται περαιτέρω η φύση της θερμότητας. Ο Seebeck δούλεψε με ρεύμα τάξης μερικών μV αλλά λόγω της ανικανότητας μέτρησης μικρών διαφορών θερμοκρασίας σε μικρή τάση τότε, χρειάστηκε το θερμοηλεκτρικό ζεύγος[4].

Χάρη αυτή την βελτίωση του θερμομέτρου, το 1833 ο Macedonio Melloni(1798-1854) συνέδεσε σε σειρά θερμοηλεκτρικά ζεύγη και έφτιαξε την πρώτη **thermopile**, η οποία ήταν σαράντα φορές πιο ευαίσθητη από το μέχρι τότε θερμομέτρο[11][4]. Ήταν ικανή να ανιχνεύσει θερμική ακτινοβολία ατόμου από τρία μέτρα μακριά. Η συσκευή αυτή έγινε τελικά ο ευρύτερος χρησιμοποιούμενος ανιχνευτής υπέρυθρης ακτινοβολίας για τον επόμενο μισό αιώνα[4].

*William Herschel, John Herschel(1792 – 1871)*

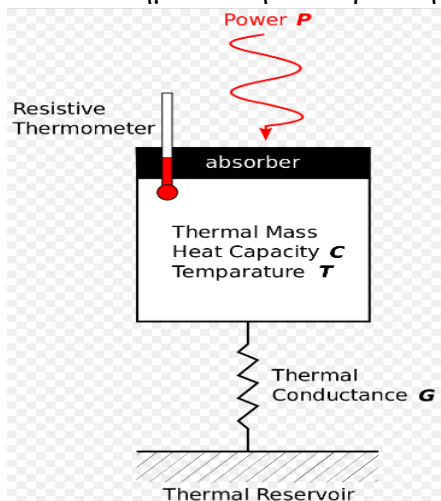
**Εικόνα 3- Πρώτη φωτογραφία που αποτυπώθηκε σε γυάλινο πιάτο.**  
 Πηγή: "John Herschel." Famous Scientists.

Η πρώτη θερμική εικόνα εμφανίστηκε το 1840 από τον γιό του William Herschel, John Herschel. Ο J. Herschel ανακάλυψε ότι οι εικόνες μπορούν να γίνουν μόνιμες και ανθεκτικές με αντίδραση αλογονιδίων αργύρου με θειοθειικό νάτριο (υπό-θειώδες σόδα)[12][13].

Με βάση την διαφορική εξάτμιση που συμβαίνει όταν μια λεπτή στρώση λαδιού εκτίθεται σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο θερμότητας, η θερμική εικόνα μπορεί να δημιουργηθεί από το ανακλώμενο φως που προκύπτει κάθε φορά. Έτσι η εικόνα έγινε ορατή από το ανθρώπινο μάτι[9][13].

*Samuel P. Langley(1834-1906)*

Βασικό σημείο στην ιστορία της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η ανακάλυψη του



**Εικόνα 4- Σχηματική απεικόνιση βολομέτρου.**  
 Πηγή: Tls60 at en.wikipedia

Βολομέτρου από τον Samuel P. Langley[9]. Ο Langley χρησιμοποίησε κομμάτια λευκόχρυσου, ένα κύκλωμα με γέφυρα Wheatstone και ένα γαλβανόμετρο. Ένωσε δυο λεπτές, μαυρισμένες ταινίες λευκόχρυσου έτσι ώστε να σχηματιστούν τα δύο κομμάτια από την γέφυρα Wheatstone. Το ένα σκέλος της γέφυρας ήταν εκτεθειμένο σε υπέρυθρη ακτινοβολία, όπου και ανταποκρίθηκε το γαλβανόμετρο[14][15]. Με αυτή την κατασκευή έγινε δυνατή η μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος μαζί με το υπέρυθρο φάσμα. Μετά από 20 χρόνια εξέλιξης του βολομέτρου, κατάφερε να επεκταθεί η παρατηρούμενη θερμική ακτινοβολία για μήκη κύματος μέχρι και ένα εκατομμυριοστό του μέτρου.[4]

Από το 1900 και μετά, ειδικότερα ανάμεσα από τους δυο Παγκοσμίους πολέμους, υπήρξε αρκετά γρήγορη εξέλιξη στην επιστήμη καθώς αναπτύχθηκαν οι ανιχνευτές φωτονίων, η υπέρυθρη φασματοσκοπία αλλά και οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το χαρακτηριστικό της τελευταίας διάταξης ήταν ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία γινόταν οπτική εικόνα, και μέσω αυτής αναπτύχθηκε η ικανότητα να δει ο άνθρωπος στο σκοτάδι. Μια χρήση του ανιχνευτή ήταν να εντοπίσει αεροπλάνα που μπορεί να βρίσκονταν περίπου ενάμιση χιλιόμετρο μακριά, αλλά και ανθρώπους σε απόσταση τριακοσίων μέτρων. Αυτή τη λειτουργία εκμεταλλεύτηκε σε μεγάλο βαθμό ο Στρατός[4][9].

Το μειονέκτημα του ανιχνευτή ήταν ότι μπορούσε να διακρίνει μόνο κοντινά μήκη κύματος και όχι πιο μακρινά μήκη κύματος εχθρών που πλησιάζουν. Για να εντοπιστούν οι κοντινοί στόχοι έπρεπε να χρησιμοποιηθούν υπέρυθρες δέσμες που θα θέρμαιναν τον αντίπαλο για να εντοπιστεί(ενεργητικά συστήματα). Αυτό θα είχε αντίθετο αποτέλεσμα από το επιθυμητό. Μέχρι τον δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο αναπτύχθηκαν πιο παθητικά συστήματα ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας ανιχνευτές φωτονίων οι οποίοι δεν λειτουργούσαν με δέσμες. Τελικά απαγορεύτηκαν όλες οι συσκευές ανίχνευσης υπέρυθρων από τους στρατιωτικούς κανονισμούς μέχρι και το 1950 όπου οι συσκευές αυτές ήταν διαθέσιμες και για την επιστήμη αλλά και την βιομηχανία[9].

#### *James Daniel Hardy (1904-1985)*

Η σύνδεση θερμότητας και Ιατρικής έγινε περίπου το 1935, όπου ο James Daniel Hardy μελέτησε την θερμότητα που εκπέμπει το σώμα σε Νοσοκομείο της Νέας Υόρκης. Στο άρθρο του με τίτλο "I. An instrument for measuring the radiation and surface temperature of skin" (1934)." , χρησιμοποίησε ένα φορητό ραδιόμετρο για την μέτρηση αλλαγών της εκπεμπόμενης ενέργειας, την οποία και εξέφρασε σε θερμίδες ανά λεπτό ανά τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας του δέρματος. Έτσι, μέσω του τύπου Stefan-Boltzmann υπολόγισε την θερμοκρασία του δέρματος[16].

Από το 1939 έως 1942,ο Hardy με δυο ακόμα επιστήμονες δημοσίευσαν άρθρα πάνω στην αίσθηση της θερμότητας και πόνου που προκύπτει από την ενέργεια ακτινοβολίας ενός μαυρισμένου ανθρώπινου δέρματος. Η ιδέα του μέλανος σώματος εισήχθη θεωρητικά το 1860 από τον Γερμανό φυσικό Gustav Robert Kirchhoff(1824-1887),ενσωματώθηκε σαν ιδέα το 1900 από τον Max Plank και τελικά τεκμηριώθηκε περίπου το 1920. Το μέλαν σώμα ορίζεται ως ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσκρούει σε αυτό, σε οποιοδήποτε μήκος κύματος[9][17].

#### *Texas Instruments*

Την δεκαετία 1950 έως 1960, η Texas Instruments, η Hughes Aircraft, και η Honeywell ανέπτυξαν ανιχνευτές που παρήγαγαν σειριακές εικόνες. Αυτές τις ανακαλύψεις τις χρησιμοποίησε κυρίως ο στρατός καθώς είχε περισσότερη πρόσβαση στην τεχνολογία. Συγκεκριμένα το 1947, αναπτύχθηκε η πρώτη συμβατική θερμογραφική κάμερα η οποία χρειαζόταν μια ώρα για την παραγωγή φωτογραφίας. Το μειονέκτημα ήταν η υπερθέρμανση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων της κάμερα, γεγονός το οποίο λύθηκε αργότερα με αγωγούς που είχαν την δυνατότητα να ψύχονται[6].

#### *Honeywel*

Μειονεκτήματα όπως το μέγεθος της υπέρυθρης κάμερας, ο χρόνος ζωής και το κόστος συντήρησης, οδήγησαν στην ανάπτυξη δύο ακόμη τεχνολογιών. Η πρώτη εφαρμόστηκε από την Texas Instruments, η οποία χρησιμοποίησε ανιχνευτές από βάριο, στρόντιο και τιτάνιο(BST). Η διάταξη αυτή δεν κράτησε πολύ λόγω της δεύτερης τεχνολογίας από την Honeywel, η οποία χρησιμοποίησε βολόμετρα κατασκευασμένα αρχικά από οξειδία του βαναδίου(VOx) και αργότερα από άμορφο

πυρίτιο. Η τεχνολογία BST επεκτάθηκε, εκτός του στρατού, σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές, σε εφαρμογές ασφαλείας και άλλες[15][6][4].

Στην αρχή του εικοστού πρώτου αιώνα εμφανίστηκαν και οι κάμερες τρίτης γενιάς και οι τιμές άρχισαν να πέφτουν λόγω του όγκου παραγωγής. Το μέγεθος έγινε μικρότερο και μέχρι το 2006 οι υπέρυθρες κάμερες ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται και στις επιθεωρήσεις κτηρίων[6].

## 1.2. Η θεωρία πίσω από την υπέρυθρη Θερμογραφία

### 1.2.1. Μετάδοση θερμότητας

Αν σε ένα δοχείο με συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων, τοποθετηθεί ένα σώμα με μια άλλη θερμοκρασία και αφαιρεθεί όλος ο αέρας από το δοχείο αυτό, θα παρατηρηθεί ότι υπάρχει μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα στο σώμα. Μετά από κάποιο χρόνο, η θερμοκρασία σώματος θα είναι ίση με αυτή των τοιχωμάτων[25].

Εφόσον υπήρχε κενό αέρος, η μετάδοση θερμότητας δεν έγινε με αγωγή ή συναγωγή καθώς δεν υπήρχε κάποιο μέσο για να γίνει η μετάδοση[19],[23]. Το συμπέρασμα είναι ότι η μετάδοση της θερμότητας που συνέβη έγινε με τον μηχανισμό της ακτινοβολίας.

Ο μηχανισμός για μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία χαρακτηρίζεται ως **θερμική ακτινοβολία**. Κάθε σώμα με συγκεκριμένη θερμοκρασία άνω του μηδενός εκπέμπει ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η θερμική ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα υπό μορφή ακτινοβολίας λόγω της θερμοκρασίας του[19][20]. Τι οδηγεί στην εκπομπή ακτινοβολίας;

- ❖ Αλλαγή τροχιάς ηλεκτρονίων των ατόμων ή μορίων που απαρτίζουν το υλικό[21][22].
- ❖ Η μετακίνηση αυτή μπορεί να είναι είτε περιστροφική είτε δονητική[23].
- ❖ Η κίνηση αυτή οφείλεται στη θερμοκρασία των μορίων αυτών[24].

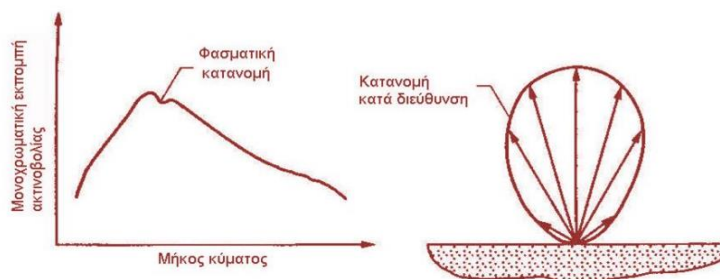
Η κυματική φύση της θερμικής ακτινοβολίας συνεπάγεται ότι το μήκος κύματος και η συχνότητα της ακτινοβολίας συνδέονται με τη σχέση

$$(1) \lambda = \frac{c}{\nu} \quad [24][19]$$

Όπου  $c$  η ταχύτητα διάδοσης μέσα στο συγκεκριμένο μέσο. Αν η ακτινοβολία διαδίδεται στο κενό τότε  $c=c_0$ , δηλαδή ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό ( $=2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

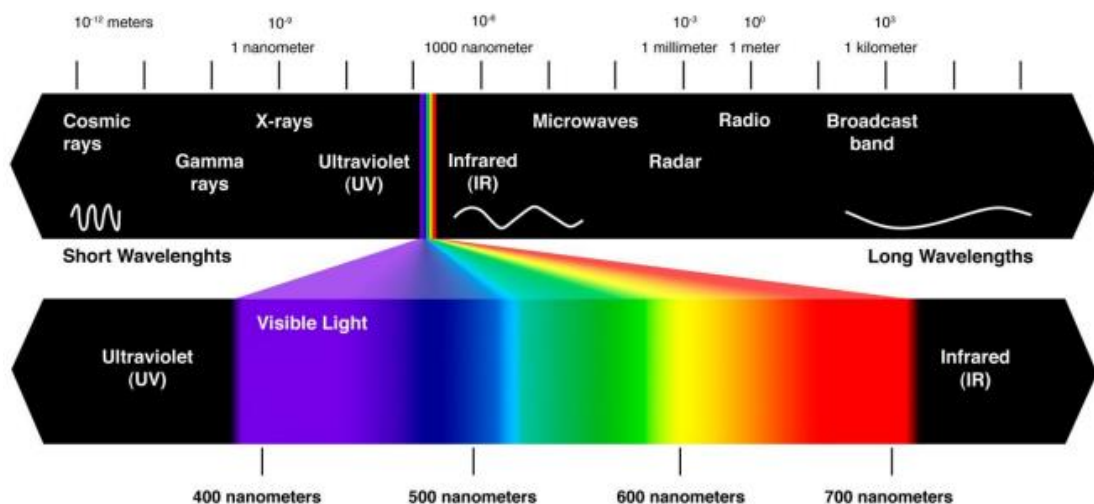
Χαρακτηριστικά θερμικής ακτινοβολίας[19]:

- ❖ Φασματική φύση, λόγω των διαφόρων μηκών κύματος που έχει η ενέργεια
- ❖ Διευθυντικότητα, καθώς η εκπομπή δεν είναι ομοιόμορφη προς όλες τις διευθύνσεις



Εικόνα 5- Φασματική κατανομή και κατανομή κατά διεύθυνση της θερμικής ακτινοβολίας  
 Πηγή:[https://class.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1265/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%AC%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7\\_%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82\\_%CE%BC%CE%B5\\_%CE%91%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1\\_2018.pdf](https://class.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1265/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%AC%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7_%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82_%CE%BC%CE%B5_%CE%91%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1_2018.pdf)

### 1.2.2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Εικόνα 6- Περιοχή του Ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε αντιστοιχία με τις συχνότητες και τα μήκη κύματος. Πηγή: [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3962/1/02\\_chapter\\_2.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3962/1/02_chapter_2.pdf)

Η Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ακτινοβολία ενέργειας. Η ενέργεια αυτή δεν προσαρτάται σε ύλη και οδεύει αυτόνομα ως κύμα, ακόμα και στο κενό. Στην ανθρώπινη καθημερινότητα του σήμερα, ακτινοβολία εκπέμπεται σε όλες σχεδόν τις ανθρώπινες κινήσεις. Είτε κατά την διάρκεια του μαγειρέματος, είτε για μουσική, ή κατά την χρήση κινητού τηλεφώνου και τα λοιπά. Χωρίς αυτήν, η εξελιγμένη ρουτίνα του ανθρώπου δεν θα ήταν η ίδια[18][25].

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιλαμβάνει αρκετές συχνότητες που κυμαίνονται από πολύ χαμηλά κύματα έως πολύ υψηλά, δημιουργώντας έτσι ένα φάσμα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ορίζεται ως το σύνολο ακτινοβολιών με εύρος από τα ραδιοκύματα έως τις ακτίνες  $\gamma$ [26]. Απεικονίζει την ένταση ενός συνδυασμού ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συναρτήσει του μήκους κύματος ή της συχνότητας.

Η διαφορά ανάμεσα σε κάθε ζώνη, είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να παραχθεί και να ανιχνευτεί η αντίστοιχη ακτινοβολία. Σε όλες όμως τις ζώνες, τα κύματα έχουν την ίδια φύση και διαδίδονται με ίση ταχύτητα(φωτός). Η διαφορά είναι μόνο στη συχνότητα και το μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι περιοχές ακτινοβολίας διέπονται από τους ίδιους νόμους[9].

Εστιάζοντας στην υπέρυθρη ακτινοβολία όμως, καθώς αυτή χρησιμοποιείται στην Θερμογραφία, φαίνεται ότι βρίσκεται λίγο πριν το κόκκινο τμήμα του ορατού φάσματος. Άρα η αόρατη ακτινοβολία με συχνότητα πέρα από την περιοχή του φάσματος με ερυθρό χρώμα ορίζεται ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών αλλά και υγρών σωμάτων. Το μήκος κύματος είναι από 1mm έως 700nm και αποτελούν περίπου το 60% της ηλιακής ακτινοβολίας[27][28].



Ιδιότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας[28]:

- ❖ Γίνεται απορρόφηση από σώματα και προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας τους
- ❖ Ικανότητα να περνά μέσα από την ομίχλη και τα σύννεφα
- ❖ Δεν έχουν χημική δράση και δεν προκαλούν φωσφορισμό

Χωρίζεται σε τέσσερις μικρότερες ζώνες[29]:

- ❖ **Near infrared(0,75-3μm)**: ανιχνεύεται από αισθητήρες πυριτίου
- ❖ **Middle infrared(3-6μm)**: ανιχνεύεται από αισθητήρες InGaAs(Indium gallium arsenide)
- ❖ **Far infrared(6-15μm)**: ανιχνεύεται από αισθητήρες InSb(Indium antimonide) HgCdTe(Mercury cadmium telluride) και μερικώς από PbSe(Lead selenide)
- ❖ **Extreme infrared(15-100μm)**: ανιχνεύεται από αισθητήρες dopped πυριτίου

### 1.3. Νόμοι που διέπουν την υπέρυθρη ακτινοβολία

#### 1.3.1. Μέλαν σώμα

Η βάση για τους νόμους που διέπουν κάθε ακτινοβολία του φάσματος, άρα και την υπέρυθρη ακτινοβολία είναι η θεωρία του μέλανος σώματος, η οποία αναπτύχθηκε για να διευκολυνθεί η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα πραγματικά σώματα[30][23].

Το μέλαν σώμα ορίζεται ως ένα ιδανικό σώμα το οποίο είναι ικανό να απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω σε αυτό, άρα και όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς ανάκλαση, διάχυση, αλλά ούτε αφήνει το φως να το διαπεράσει. Άρα συνοψίζοντας, το μέλαν σώμα εκπέμπει την μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του, ενώ αντίστοιχα απορροφά όλη τη ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό[31][32].

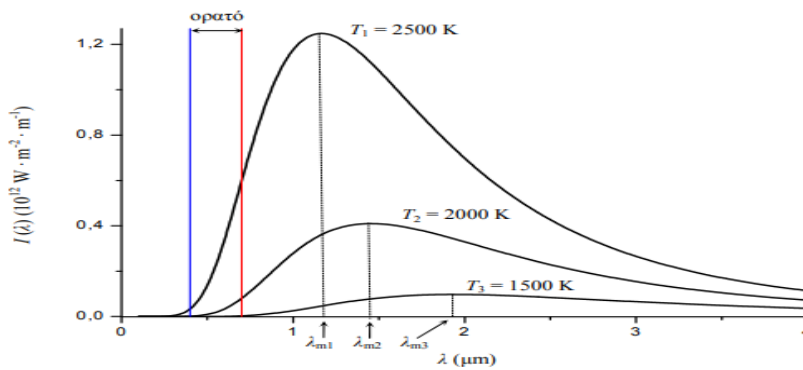
Η έννοια του μέλανος σώματος διαφέρει από την έννοια του μέλανος στην καθημερινότητα. Δηλαδή, δεν μεταφράζεται στο πόσο μαύρη είναι μια επιφάνεια κατά την οπτική ανθρώπινη παρατήρηση, καθώς το ανθρώπινο μάτι διακρίνει την σκοτεινότητα μιας επιφάνειας μόνο στο ορατό φάσμα της ακτινοβολίας. Το μέλαν σώμα λοιπόν που αναλύεται στην παρούσα εργασία αφορά ένα ιδανικό μέλαν σώμα το οποίο είναι μαύρο για θερμική ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος από μηδέν έως το άπειρο.

Στην πράξη, το μέλαν σώμα δεν είναι πραγματικό, αλλά υπάρχουν σώματα που προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του. Για παράδειγμα, για να επιτευχθούν οι ιδιότητες του ιδανικού αυτού σώματος, μπορεί να βαφτεί με κάρβουνο μια επιφάνεια και να δημιουργηθεί κατά προσέγγιση το μαύρο χρώμα του σώματος. Ένας άλλος τρόπος και πιο διαδεδομένος στην επιστημονική κοινότητα περιλαμβάνει ένα σφικτό κουτί το οποίο έχει ένα άνοιγμα στην μια πλευρά. Οποιαδήποτε ακτινοβολία εισέρχεται από την οπή, διασκορπίζεται και απορροφάται από επαναλαμβανόμενες αντανάκλασεις και έτσι φεύγει απειροελάχιστη ποσότητα ακτινοβολίας[9].

Βασικά χαρακτηριστικά του μέλαν σώματος[33]:

- ❖ Το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είναι συνεχές με ένα ευρύ μέγιστο και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία
- ❖ Χαρακτηρίζεται από τρεις βασικούς νόμους που θα αναλυθούν παρακάτω(Plank, Stefan-Boltzmann, Wien)

Η ακτινοβολία μέλανος σώματος κατανέμεται στα διάφορα μήκη κύματος σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της φασματικής κατανομής αφετικής ικανότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Σύμφωνα με τον τύπο (2)  $I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda$ , όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και στην εκπεμπόμενη ένταση  $I(T)$  ενώ η κορυφή της μετατοπίζεται στα μικρότερα μήκη κύματος, δηλαδή στις μεγαλύτερες συχνότητες[34].



Εικόνα 7- Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος  
 Πηγή: [http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis\\_ergasthron/askhsh\\_35.pdf](http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis_ergasthron/askhsh_35.pdf)

Υπάρχουν τρεις σχετικές διατυπώσεις για το μέλαν σώμα και την ακτινοβολία[34].

- ❖ Νόμος Plank
- ❖ Νόμος Wien
- ❖ Νόμος Stefan-Boltzmann

### 1.3.2. Νόμος του Plank

Η ακτινοβολία του μέλανος σώματος δεν μπορούσε να περιγραφεί από τους ήδη υπάρχοντες νόμους, οι οποίοι υποστήριζαν ότι οι ταλαντωτές που είναι υπεύθυνοι για την ακτινοβολία, μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια, ανεξάρτητα από την συχνότητα τους. Ένας από αυτούς τους νόμους ήταν του Reyleigh-Jeans[9].

$$(3) I(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \times kT, [20]$$

Η έκφραση αυτή βασίστηκε στην παραδοχή ότι οι ταλαντωτές της κοιλότητας του μέλανος σώματος, έχουν ένα συνεχές ενεργειακό φάσμα. Η παραδοχή αυτή όμως ίσχυε μόνο για μεγάλα μήκη κύματος και όχι σε μικρότερα, πράγμα που οδήγησε στην λεγόμενη «υπεριώδης καταστροφή»[20][35].

Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από τον Plank, ο οποίος μπόρεσε να περιγράψει τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας για κάθε περιοχή συχνοτήτων μέσω κάποιων υποθέσεων.

Η πρώτη υπόθεση ήταν ότι οι πηγές ακτινοβολίας ήταν άτομα σε ταλάντωση κατά την οποία η ενέργεια κάθε ταλαντωτή έχει μόνο διακριτές τιμές. Η δεύτερη υπόθεση ήταν ότι όταν ένας ταλαντωτής αλλάξει επίπεδο ενέργειας, για παράδειγμα από μια ενέργεια  $E_1$  καταλήξει σε μια άλλη ενέργεια  $E_2$ , τότε η διαφορά αυτών των δύο ενεργειών είναι ίση με  $h \times \nu$ , όπου  $h$  η σταθερά Plank και  $\nu$  η συχνότητα ακτινοβολίας. Κατά την διαδικασία αναπήδησης από την  $E_1$  στην  $E_2$  εκπέμπεται ή απορροφάται ενέργεια, η οποία είναι κβαντισμένη[20][31][36].

Έτσι παίρνει τις τιμές:

$$(4) E_n = n \times h \times f = \frac{n \times h \times c}{\lambda}, [31]$$

Τελικά κατέληξε να περιγράψει την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας από ένα μέλαν σώμα με τον παρακάτω τύπο:

$$(5) W_{\lambda b} = \frac{2 \times \pi \times h \times c^3}{\lambda^5 \times (e^{h \times c / \lambda \times k \times T} - 1)} \times 10^{-6} \left[ \frac{Watt}{m^2} \times \mu m \right], [37]$$

Όπου

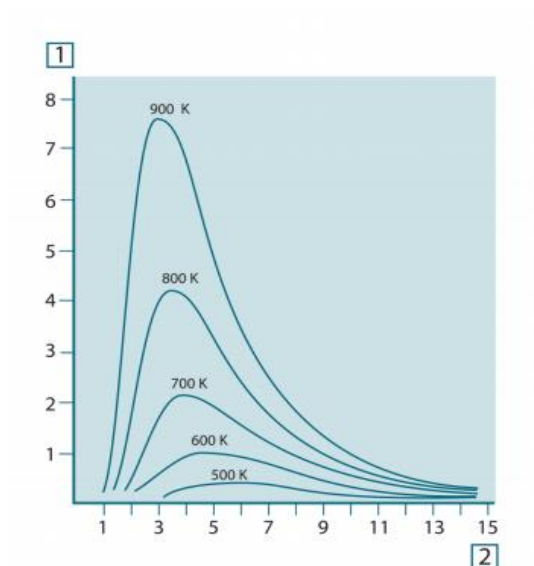
- ✓  $W_{\lambda b}$  η φασματική εκπομπή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε μήκος κύματος  $\lambda$
- ✓  $c$  ταχύτητα του φωτός ( $=3 \times 10^8$  m/s)
- ✓  $h$  σταθερά του Planck ( $=6.6 \times 10^{-34}$  Joule $\times$ sec)
- ✓  $k$  σταθερά του Boltzmann ( $=1.4 \times 10^{-23}$  Joule/K)
- ✓  $T$  απόλυτη θερμοκρασία μέλανος σώματος σε βαθμούς Kelvin
- ✓  $\lambda$  μήκος κύματος σε  $\mu m$

Η παραπάνω εξίσωση, παρόλο που μια από τις υποθέσεις του Planck πήγαινε κόντρα στην κλασική φυσική, ήταν τελικά σύμφωνη με τις πειραματικές καμπύλες της φασματικής κατανομής ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Εκτός από αυτό, η εξίσωση εμπεριέχει και τον νόμο μετατόπισης Wien, αλλά και τον νόμο Stefan-Boltzmann[20][38].

- ❖ Ολοκλήρωση εξίσωσης για όλα τα μήκη κύματος για νόμο Stefan-Boltzmann
- ❖ Παραγωγή ως προς το μήκος κύματος, ίσων με το μηδέν για νόμο Wien

Η γραφική παράσταση του τύπου για διάφορες θερμοκρασίες, δημιουργεί ένα σύνολο καμπυλών, όπου

- ❖ κάθε μια από τις οποίες για  $\lambda=0$  έχει φασματική εκπομπή ίση με το μηδέν,
- ❖ όταν αυξάνεται το μήκος κύματος, αυξάνεται και η εκπομπή έως το  $\lambda_{max}$  και από εκεί αρχίζει να ξαναπλησιάζει το μηδέν σε πολύ μεγάλα μήκη,
- ❖ όσο υψηλότερη η θερμοκρασία, τόσο μικρότερο το μήκος κύματος στο οποίο θα εμφανιστεί το μέγιστο,
- ❖ για την μέγιστη καμπύλη ( $T=5556K$ ) αντιστοιχείται η εκπομπή ακτινοβολίας σώματος με θερμοκρασία ίση με την ενεργό θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου ( $T_H=5762K$ )[36][37][20].



Εικόνα 8- Φασματική εκπομπή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σύμφωνα με τον νόμο του Planck. Πηγή: [https://assets.tequipment.net/assets/1/26/Documents/EX300\\_manual.pdf](https://assets.tequipment.net/assets/1/26/Documents/EX300_manual.pdf)

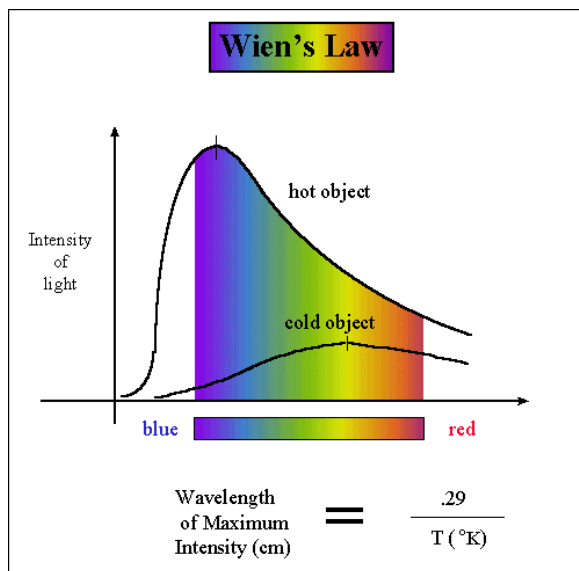
### 1.3.3. Νόμος μετατόπισης του Wien

Σύμφωνα με τον νόμο του Wien, η θερμοκρασία του σώματος συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με το μέγιστο μήκος κύματος, στο οποίο υπάρχει μέγιστη εκπομπή ακτινοβολούμενης ισχύος από το μέλαν σώμα.

$$(6) \lambda_{max} \times T = \text{σταθερά} = 2,898 \times 10^{-3} m \times K, [9][20][23]$$

Από την παραπάνω σχέση εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο υψηλότερη είναι η συχνότητα άρα τόσο μικρότερο το μήκος κύματος στο οποίο υπάρχει η μέγιστη τιμή εκπομπής ακτινοβολίας. Ο νόμος αυτός προέκυψε με μια διαφοροποίηση του νόμου Planck, μηδενίζοντας την παράγωγο, και εκφράζει μαθηματικά ότι τα χρώματα παρουσιάζουν μια ποικιλότητα από κόκκινο σε πορτοκαλί ή κίτρινο με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος που θερμαίνεται[37][9][23][38].

Ωστόσο εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μέγιστη ισχύς για θερμοκρασίες  $T < 3000K$  εκπέμπεται στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, στο οποίο οι μακροσκοπικές πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι όλα τα θερμά σώματα γιατί τα μόρια του εκτελούν διαρκώς θερμική κίνηση. Αναλυτικότερα, ο νόμος του Wien εξηγεί ότι σώματα με διαφορετική θερμοκρασία εκπέμπουν φάσμα που μεγιστοποιείται σε διαφορετικά μήκη κύματος[36][20].



Εικόνα

9-

Νόμος

Wien

Πηγή: [http://hosting.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/wiens\\_law.htm](http://hosting.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/wiens_law.htm)

- ❖ Ένα θερμό σώμα εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία σε μικρά μήκη κύματος και έτσι φαίνεται πιο μπλε χρώμα.
- ❖ Ένα κρύο σώμα εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και έτσι φαίνεται πιο κόκκινο χρώμα.
- ❖ Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες από 500°C, το σώμα αρχίζει να ακτινοβολεί στο σκοτάδι με κόκκινο(700°C), βυσσινί(900°C), πορτοκαλί(1100°C), λευκό(1400°C) και ταυτόχρονα αυξάνεται και η ακτινοβολούμενη ισχύς.

Συνοπτικά, σε κάθε μήκος κύματος, τα θερμά σώματα ακτινοβολούν περισσότερο από τα κρύα[39].

#### 1.3.4. Νόμος Stefan-Boltzmann

Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, ο ρυθμός ακτινοβολίας ενέργειας ενός μέλανος σώματος, είναι ανάλογος της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του,

$$(7) E_b = \sigma \times T^4 [36][20][23]$$

Όπου

- ❖  $E_b$  η ακτινοβολούμενη θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας ενός μέλανος σώματος
- ❖  $T$  θερμοκρασία προς τον ημισφαιρικό χώρο υπεράνω του μέλανος σώματος
- ❖  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann ( $=56,7 \times 10^{-12} \text{ kW/m}^2 \times \text{K}^4$ )

Η εξίσωση παίρνει και άλλη μορφή για την διευκόλυνση των πράξεων:

$$(8) E_b = 56,7 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4 (\text{kW/m}^2), [38]$$

Γραφικά, η ακτινοβολούμενη θερμοροή, αντιπροσωπεύει την περιοχή κάτω από την καμπύλη Planck για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η εκπομπή ακτινοβολίας από μηδενικό έως μέγιστο μήκος κύματος είναι μόνο το εικοσιπέντε τις εκατό του συνόλου. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει περίπου την ποσότητα της ακτινοβολίας του ηλίου μέσα στο φάσμα του ορατού φωτός[38][9].

### 1.3.5. Εκπομπή ακτινοβολίας μη μέλανος σώματος

Η εκπομπή ακτινοβολίας ενός σώματος εξαρτάται από τέσσερις παραμέτρους[36][37]:

- ❖ Θερμοκρασία
- ❖ Μήκος κύματος εκπομπής
- ❖ Γωνία εκπομπής
- ❖ Επιφάνεια (είδος υλικού, κατασκευή υλικού, χημικές αντιδράσεις με το περιβάλλον)

Η φασματική εκπομπή είναι η πρώτη ιδιότητα της ακτινοβολίας μιας πραγματικής επιφάνειας. Ορίζεται ως το κλάσμα της έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του αντικειμένου(object) ως προς την ακτινοβολία μέλανος σώματος(blackbody) στην ίδια θερμοκρασία. Συμβολίζεται ως  $\epsilon_\lambda$

$$(9) \epsilon_\lambda = \frac{E_{\lambda o}}{E_{\lambda b}}, [9], [23],[37], [38]$$

Η παράμετρος ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με την επιφάνεια που ακτινοβολείται. Για παράδειγμα, η τιμή της για μέλαν σώμα ισούται με μηδέν και για ένα γκρι σώμα η τιμή κυμαίνεται κάτω από το μηδέν[9][37].

Ο συντελεστής εκπομπής(emissivity) παίρνει τιμές από μηδέν έως και ένα. Ανάλογα με την τιμή του, υπάρχουν τέσσερις τύποι ακτινοβολίας. Δηλαδή[9]:

- ❖ Για τον τέλειο ακτινοβολητή (μέλαν σώμα), μηδέν.
- ❖ Για γκρι σώμα, μικρότερο της μονάδας.
- ❖ Για τέλειο ανακλαστήρα (λευκό σώμα), μηδέν.
- ❖ Για μεταβαλλόμενο ακτινοβολητή, μεταβολή ανάλογα το μήκος κύματος.

Έχει αποδειχθεί ότι η ακτινοβόλωση ισχύς ενός πραγματικού σώματος υπολογίζεται με τον τύπο:

$$(10) E = \epsilon_\lambda \times \sigma \times T^4, [20], [9]$$

Όπου

- ❖  $\epsilon_\lambda$  ο συντελεστής φασματικής εκπομπής
- ❖  $\sigma$  η σταθερά Boltzmann ( $=56,7 \times 10^{-12} kW/m^2 \times K^4$ )
- ❖  $T$  η θερμοκρασία πραγματικού σώματος

Όσον αφορά τη γωνία εκπομπής, πειραματικά τη θεωρούμε πάντα κάθετη. Διαφέρει από τη θεωρία μέλανος σώματος γιατί σε αυτή την περίπτωση αναφέραμε ότι το μέλαν σώμα είναι ιδανικό σώμα στο οποίο δεν μας απασχολούν τόσο οι κατευθύνσεις της ακτινοβολίας τη στιγμή της εκπομπής καθώς απορροφάται όλη[20][36].

Αναλυτικότερα, στην συμπεριφορά της ακτινοβολίας σώματος (μη μέλαν σώμα) μας ενδιαφέρει η ανάκλαση, η περατότητα, και η απορρόφηση. Η κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες έχει και έναν συντελεστή[35][9].

Για την ανάκλαση υπάρχει ο συντελεστής φασματικής ανάκλασης  $\rho_\lambda$ , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της ακτινοβολουμένης ισχύος που ανακλάται προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα αντικείμενο. Η ιδιότητα της ανακλαστικότητας εξαρτάται από το μήκος κύματος, και τις δύο γωνίες ανάκλασης και πρόσπτωσης αντίστοιχα. Ονομάζονται στερεές γωνίες, αλλά πειραματικά για λόγους διευκόλυνσης, η στερεά γωνία ανάκλασης δεν υπολογίζεται[9][36][37].

Για την περατότητα, υπάρχει ο συντελεστής φασματικής διάδοσης  $\tau_\lambda$ , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της ακτινοβολουμένης ισχύος που διαδίδεται δια μέσου του αντικειμένου, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Εξαρτάται πολύ από το υλικό του αντικειμένου καθώς άλλη συμπεριφορά υπάρχει σε διαφανή υλικά, άλλη σε αδιαφανή, και άλλη σε ημιδιαφανή. Σε αδιαφανή υλικά ο συντελεστής φασματικής διάδοσης ισούται με μηδέν[9][36][37].

Για την απορρόφηση, υπάρχει ο συντελεστής φασματικής απορρόφησης  $\alpha_\lambda$ , ο οποίος εκφράζει τον λόγο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το αντικείμενο. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το μήκος κύματος, την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία. Βέβαια εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του σώματος που απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία[9][36][37].

Οι συντελεστές αυτοί συνδέονται με τη σχέση:

$$(11) \rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1, [9], [36], [37], [38]$$

Όπου

- ❖  $\rho_\lambda$  συντελεστής φασματικής ανάκλασης
- ❖  $\tau_\lambda$  συντελεστής φασματικής διάδοσης
- ❖  $\alpha_\lambda$  συντελεστής φασματικής απορρόφησης



## 1.4. Αρχές Θερμογραφίας και Τεχνικές

### 1.4.1. Ορισμός Θερμογραφίας (Στην Ιατρική)

Η Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία (Infrared Thermography), είναι μια μη επεμβατική τεχνική, μη καταστρεπτικών μεθόδων που επιτρέπει την χαρτογράφηση των θερμικών μοτίβων στην επιφάνεια αντικειμένων, σωμάτων, ή συστημάτων. Ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν μπορεί να διακρίνει το υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας, οπότε η χαρτογράφηση γίνεται με την καταγραφή των μεταβολών θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας ένα όργανο απεικόνισης υπέρυθρου. Αυτό το όργανο είναι μια υπέρυθρη κάμερα υψηλής ταχύτητας[37][40][41][42][48].

Με άλλα λόγια, είναι μέθοδος η οποία ανιχνεύει την υπέρυθρη ενέργεια που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα ώστε να εμφανίζει την εικόνα κατανομής της. Με τις πληροφορίες που λαμβάνουμε από την τεχνική αυτή μπορούμε να αξιολογήσουμε τις φυσιολογικές αλλαγές που σχετίζονται με τη ροή του αίματος και το νευρικό σύστημα[36][41][43].

Οι δύο πλευρές του ανθρώπινου σώματος (αριστερή και δεξιά) διαφέρουν σε θερμοκρασία, και όχι μόνο. Ωστόσο μια υψηλή θερμική ασυμμετρία μπορεί να μας οδηγήσει στην διάγνωση κάποιας δυσλειτουργίας που μπορεί να έχει ο ανθρώπινος οργανισμός. Η δυσλειτουργία αυτή μπορεί να είναι μια φλεγμονή ή μια λοίμωξη του ασθενούς η οποία με την χαρτογράφηση της θερμοκρασίας του μπορεί να βρεθεί. Αργότερα, μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία αποκατάστασης μέσω κάποιου ιατρικού πλάνου[44][45].

Η Υπέρυθρη Θερμογραφία μπορεί να λειτουργήσει με τρεις τρόπους:

- ❖ Προγνωστικά
- ❖ Διαγνωστικά
- ❖ Αξιολογικά ως προς κάποια θεραπεία

Τις τρεις αυτές λειτουργίες θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο[45][46][47].

Η διαφορά μιας πραγματικής εικόνας με μια υπέρυθρη είναι ότι για την απεικόνιση της χρειάζεται ένα σύνολο ανακλώμενου φωτός. Στην θερμογραφική εικόνα δεν χρησιμοποιείται φως αλλά εκχωρείται ένα χρώμα στις υπέρυθρες περιοχές και δημιουργείται μια απεικόνιση με συγκεκριμένες αποχρώσεις που δεν ταιριάζουν με τις πραγματικές. Το αποτέλεσμα αυτό ονομάζεται θερμογράμμα[9][23][43].

Λόγω της έλλειψης επαφής με το σώμα, καθώς είναι μια μη επεμβατική τεχνική, δεν χαρακτηρίζεται ως μια επώδυνη διαδικασία και αυτό παίζει μεγάλο ρόλο στην ψυχολογία του ασθενή. Όταν κάποιος αισθητήρας έρχεται σε επαφή με το ανθρώπινο δέρμα, μπορεί να προκαλέσει σε κάποιους ένα αίσθημα άγχους και αυτό πολλές φορές οδηγεί σε ανακρίβεια αποτελέσματος. Έτσι με την τεχνική αυτή πετυχαίνουμε μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, με γρήγορη και ανώδυνη διαδικασία[38].

Η Θερμογραφία έχει δυο βασικές προσεγγίσεις, οι οποίες διαφέρουν στην μεθοδολογία ελέγχου και στις εφαρμογές που τις συναντάμε. Αυτές είναι η Παθητική και η Ενεργητική Θερμογραφία[40][42].

#### *1.4.2. Παθητική Θερμογραφία*

Η παθητική Θερμογραφία λειτουργεί με φυσικά υλικά και σώματα τα οποία υπάρχουν ήδη στο περιβάλλον σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Η διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον είναι καθορισμένη και με κατάλληλο εξοπλισμό ανιχνεύεται η θερμική αντίθεση που υπάρχει με αυτή του περιβάλλοντος. Οι διαφορές θερμοκρασίας μέχρι τέσσερις βαθμούς Κελσίου δεν προδιαθέτουν κάποιο πρόβλημα, όμως όταν αυτές ξεπερνάνε τους πέντε βαθμούς τότε αρχίζουν να θεωρούνται ύποπτες. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη διάγνωση σφάλματος, περιλαμβάνει μια υπέρυθρη κάμερα, η οποία καταγράφει τις θερμικές αντιθέσεις, μια διάταξη ελέγχου και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επεξεργασία και παρουσίαση δεδομένων[37][40].

Το να βρεθεί η ήδη υπάρχουσα θερμική διαφορά του αντικείμενου μελέτης από κάποιο σημείο αναφοράς, είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την διάγνωση ανομοιογένειας. Αν αυτή η ανομοιογένεια είναι σε ανθρώπινο σώμα, τότε ο παθητικός θερμικός έλεγχος θα οδηγήσει σε μια διάγνωση φλεγμονής ή ενός εν δυνάμει προβλήματος που μπορεί να προκύψει στον ασθενή. Η διάγνωση γίνεται με σύγκριση θερμοκρασίας μέτρησης και θερμοκρασίας αναφοράς[44].

Αν το αντικείμενο μελέτης δεν είναι ανθρώπινο σώμα, μπορεί να είναι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις κτηρίων. Ο θερμικός έλεγχος ηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή για την ασφάλεια των κτηρίων, καθώς μπορεί να ανιχνεύσει ενδεχόμενες φθορές και δυσλειτουργίες, γεγονός που μπορεί να προλάβει ένα μεγάλο κόστος ζημίας. Οι φθορές αυτές μπορεί να είναι η παρουσία υγρασίας σε περιοχές κάποιου αεροσκάφους, κτηρίου, ή αρχαιολογικού χώρου[9][23].

#### *1.4.3. Ενεργητική Θερμογραφία*

Η διαφορά με την παθητική Θερμογραφία, είναι ότι σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται μια εξωτερική πηγή θέρμανσης, έτσι ώστε να δώσει ερέθισμα στο υπό εξέταση αντικείμενο και στη συνέχεια να βρεθούν οι σχετικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας που προκύπτουν[37][38].

Το γεγονός ότι προκύπτει διακύμανση στη θερμοκρασία, σημαίνει ότι πριν την εξωτερική πηγή θερμότητας δεν υπήρχε κάποια σημαντική επιφανειακή θερμική μεταβολή στις φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος. Δηλαδή υπήρχε θερμική ισορροπία.

Η διαδικασία του θερμικού ερεθίσματος λειτουργεί με την εξωτερική πηγή να εγχύνει θερμότητα στο στόχο. Το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή χωρικής και χρονικής μεταβολής της επιφανειακής θερμότητας και δημιουργία θερμογραφήματος. Σε αυτή τη διαδικασία συνήθως χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας, η θερμογραφική κάμερα, μια μονάδα συγχρονισμού διέγερσης και καταγραφής συνδεδεμένη με την

πηγή, και ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής για την απεικόνιση και επεξεργασία δεδομένων[23][38].

Αν το υπό εξέταση αντικείμενο έχει κάποια ρωγμή, τότε ο ρυθμός διάχυσης θερμότητας δεν μπορεί να είναι ίδιος με ένα αντικείμενο χωρίς μια τέτοια βλάβη, στο οποίο ο ρυθμός θα είναι σταθερός και όχι επιταχυνόμενος ή επιβραδυνόμενος. Έτσι ο ρυθμός διάχυσης θερμότητας σε ένα αντικείμενο είναι καθοριστικός παράγοντας στην εύρεση σφάλματος[9][23].

Κατά την διαδικασία διέγερσης, το ποσό ενέργειας που θα δοθεί στον εξεταζόμενο στόχο πρέπει να είναι ομοιόμορφο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα λόγω θερμοκρασιακών διαφορών που οφείλονται σε διαφορετικά ποσά ενέργειας. Για αυτό το λόγο, στην ενεργητική θερμογραφία, χρησιμοποιούνται διαφορετικές πηγές ενέργειας για να επιτευχθεί το ομοιόμορφο αποτέλεσμα διέγερσης[23][37][48].

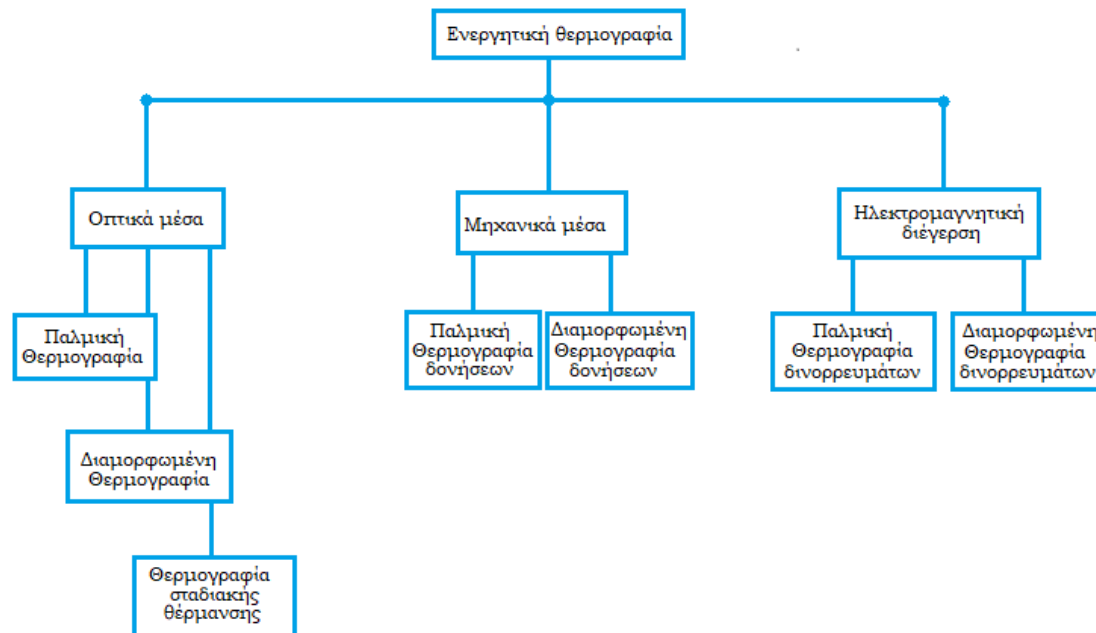
Υπάρχουν δυο κύρια χαρακτηριστικά που παίζουν ρόλο στην διαδικασία της ενεργητικής θερμογραφίας[37]:

- ❖ Είδος εξωτερικής πηγής με την οποία θα γίνει η διέγερση του εξεταζόμενου στόχου
- ❖ Τρόπος διέγερσης εξεταζόμενου στόχου

Με βάση το είδος της εξωτερικής πηγής διέγερσης, διακρίνονται τρεις τεχνικές[37]:

- ❖ Οπτικά μέσα
- ❖ Μηχανικά μέσα
- ❖ Ηλεκτρομαγνητική διέγερση

Ενώ με βάση τον τρόπο διέγερσης, διακρίνονται επτά τεχνικές, οι οποίες χωρίζονται ανάλογα με το είδος της πηγής. Οι τεχνικές φαίνονται σχηματικά παρακάτω.



Εικόνα 10- Είδη διέγερσης Ενεργητικής Θερμογραφίας και οι επιμέρους τεχνικές τους.

#### 1.4.4. Θερμική διέγερση

##### 1.4.4.1. Οπτικά μέσα

###### **A) Παλμική Θερμογραφία (Pulsed Thermography- PT)**

Συνήθως, όταν χρησιμοποιείται ο όρος Ενεργητική Θερμογραφία, συνδυάζεται με την τεχνική της διέγερσης μέσω παλμού, καθώς είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους στην επιστημονική κοινότητα.

Τα πλεονεκτήματα της θερμικής διέγερσης μέσω παλμού είναι η μεγάλη αξιοπιστία αποτελεσμάτων αναλογικά με την ταχύτητα εξέτασης η οποία μπορεί να διαρκέσει από μιλιδευτερόλεπτα (για μικρό πάχος στόχου και μέταλλα, τα οποία είναι θερμικά αγωγά υλικά) έως μερικά δευτερόλεπτα (για μεγάλο πάχος στόχου και πλαστικά, τα οποία είναι υλικά χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας). Η ταχύτητα εξέτασης οφείλεται στην γρήγορη ανάπτυξη θερμότητας της επιφάνειας του αντικείμενου. Σε πρώτη ανάλυση, η απότομη αύξηση αυτή μπορεί να προδιαθέσει για επιμέρους φθορές, όμως η αύξηση αυτή είναι μόνο μερικών βαθμών και δεν μπορεί στην πραγματικότητα να προκαλέσει βλάβη στο αντικείμενο εξέτασης[9][23][37].

Κατά την παλμική θερμογραφία, γίνεται διάχυση ενός παλμού ενέργειας στο εσωτερικό του στόχου, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της επιφάνειας αυτού να αυξάνεται με απότομο ρυθμό αρχικά και να μειώνεται έπειτα σταδιακά με την διάχυση του παλμού[38].

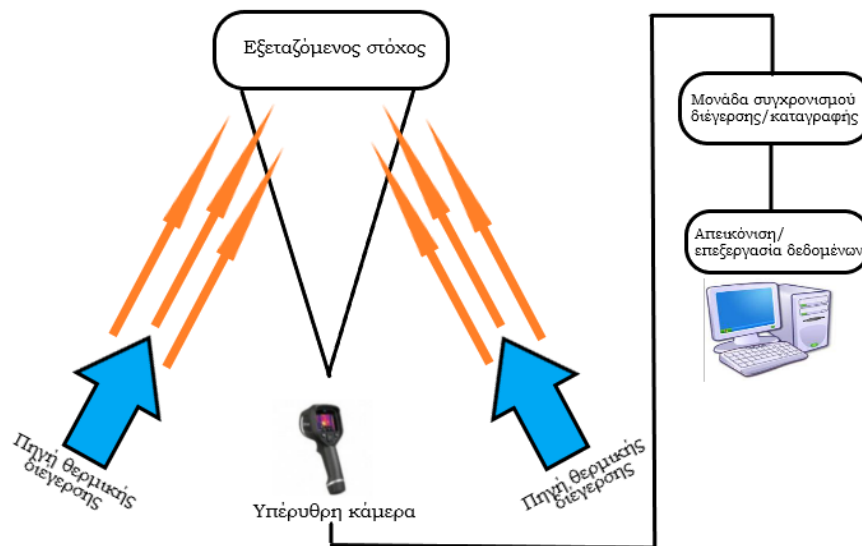
Ο παλμός ενέργειας μπορεί να δημιουργηθεί από[23][40]:

- ❖ Λαμπτήρες αλογόνου (για περισσότερο χρόνο διέγερσης)
- ❖ Δέσμη λέιζερ
- ❖ Ψυχρό ή ζεστό αέρα
- ❖ Δέσμη νερού
- ❖ Λυχνία υπέρυθρου (για μεγάλες επιφάνειες σάρωσης)

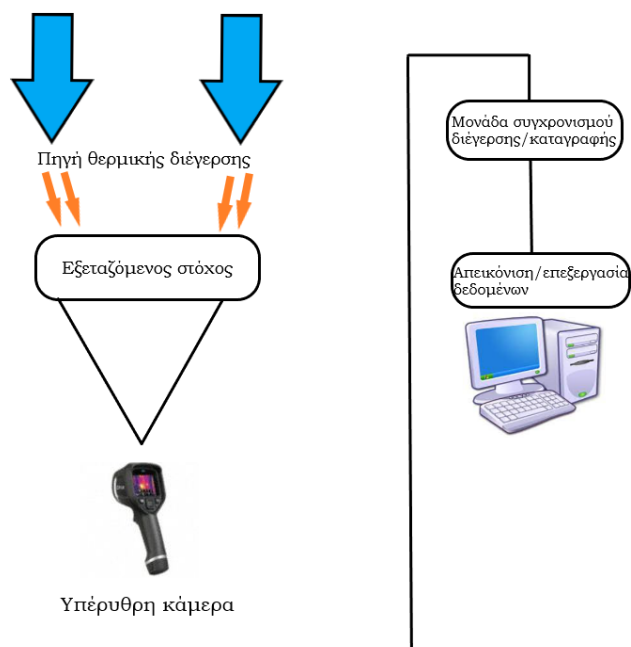
Οι θερμικές εικόνες που δημιουργούνται, συγκεντρώνονται ως μια ακολουθία με σταθερό βήμα καταγραφής κάθε φορά και μελετώνται ως προς την περίοδο αύξησης ή πτώσης της επιφανειακής θερμοκρασίας του αντικείμενου καθ' όλη την διάρκεια της διάχυσης θερμότητας από την εξωτερική πηγή[23][37][38].

Υπάρχουν δύο τρόποι Παλμικής Θερμογραφίας ανάλογα με την θέση της πηγής και της υπέρυθρης κάμερας[23][37]:

- ❖ Εξωτερική πηγή διέγερσης και υπέρυθρη κάμερα: μπροστά από τον στόχο.
- ❖ Εξωτερική πηγή διέγερσης και υπέρυθρη κάμερα: δεξιά και αριστερά του στόχου.



Εικόνα 11- Δύο πηγές θερμικής διέγερσης μπροστά από το αντικείμενο μελέτης.



Εικόνα 12- Δύο πηγές θερμικής διέγερσης εκατέρωθεν του αντικείμενου.

Στον πρώτο τρόπο, η διάταξη τοποθετείται μπροστά από το αντικείμενο μελέτης και ανιχνεύεται η ανάκλαση θερμότητας ενώ στο δεύτερο τρόπο, η διάταξη τοποθετείται εκατέρωθεν του αντικειμένου και ανιχνεύεται η μετάδοση θερμότητας από την πηγή μέσω του δοκιμίου. Και στις δύο περιπτώσεις, εξετάζεται η θερμική αντίθεση που δημιουργείται ανάμεσα από την θερμοκρασία αναφοράς και τη θερμοκρασία από τα ανακτώμενα δεδομένα. Οι θερμικές ιδιότητες του εξεταζόμενου αντικειμένου θα αλλάξουν με την ανίχνευση ατελειών και τελικά θα έχουμε διαφορετική εικόνα χαρακτηριστικών με την αρχική[23][37][38].

Ο Νόμος του Fourier χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία διάχυσης θερμότητας στο εσωτερικό του στόχου και να βρεθούν οι μεταβολές που έχουν δημιουργηθεί στη θερμοκρασία[38].

$$(12) T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi\kappa t}} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa a t}\right), [23]$$

Όπου

- ❖  $T_0$  η αρχική θερμοκρασία σε Kelvin
- ❖  $Q$  το ποσό ενέργειας που απορροφάται από την επιφάνεια σε Joule/m<sup>2</sup>
- ❖  $e$  ο συντελεστής θερμικής αδράνειας του σώματος σε περιβάλλον θερμικής διάχυσης σε  $Ws^{1/2} \times m^{-2} \times K^{-1}$
- ❖  $z$  η μεταβολή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος
- ❖  $a$  ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του σώματος

Ένας άλλος χρήσιμος τύπος για εύρεση θερμικής αντίθεσης είναι:

$$(13) C(t) = \frac{T_a(t) - T_a(t_0)}{T_v(t) - T_v(t_0)}, [23]$$

Όπου

- ❖  $T_a$  θερμοκρασία σε περιοχή με ατέλεια
- ❖  $T_v$  θερμοκρασία σε περιοχή χωρίς ατέλεια
- ❖  $t_0$  αρχικός χρόνος
- ❖  $t$  τρέχων χρόνος θερμικής διαδικασίας

Ο τύπος αυτός αφορά την σύγκριση δύο περιοχών, μιας υγιούς επιφάνειας και μίας επιφάνειας ελέγχου με πιθανή ατέλεια. Άρα οι τιμές αναφοράς είναι αυτές της υγιούς επιφάνειας[23].

Σαφώς υπάρχουν και μειονεκτήματα της Παλμικής Θερμογραφίας, όμως με την εξέλιξη της τεχνολογίας θεωρούνται αμελητέα σε σχέση με τα πλεονεκτήματα της.

Το πρώτο μειονέκτημα της τεχνικής παλμού, είναι κοινό με όλες της τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας. Το ποσό ενέργειας που θα προβεί σε εκπομπή πρέπει να είναι ομοιόμορφο, έτσι ώστε να έχουμε σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος και να μην επηρεαστεί το ζητούμενο αποτέλεσμα. Με την εφαρμογή εξελιγμένων διατάξεων, το μειονέκτημα αυτό δεν επηρεάζει ουσιαστικά την μέτρηση καθώς

συνδυάζονται διαφορετικές πηγές ενέργειας έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη σταθερή συνθήκη μέτρησης[23].

Το δεύτερο μειονέκτημα αφορά τις αναπόφευκτες αντανάκλασεις που δημιουργούνται από το περιβάλλον και με την σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες της επιφάνειας του εξεταζόμενου στόχου, ως προς την θερμοκρασία του[49].

Ένα άλλο μειονέκτημα που επηρεάζει και το αντικείμενο εξέτασης είναι το γεγονός ότι οι διάφορες διαμορφώσεις της θερμοκρασίας πρέπει να καλύπτουν τον θόρυβο της υπέρυθρης κάμερας. Έτσι, η παλμική θερμογραφία δεν χρησιμοποιείται για αδύναμα θερμικά σήματα[37].

Εφαρμογές παλμικού θερμογραφικού ελέγχου[9][23][37][38][40]:

- ❖ Εξέταση κελυφών αεροσκαφών για πιθανές φθορές, ρωγμές ή αποκολλήσεις
- ❖ Εύρεση ποσοστού υγρασίας σε δομικά υλικά
- ❖ Εύρεση διαβρώσεων σε μέταλλα
- ❖ Εξέταση έργων τέχνης και αρχαιολογικών χώρων για πιθανές φθορές
- ❖ Εύρεση λεπτομερειών φθοράς, όπως βάθος και μέγεθος ατέλειας

## **B) Διαμορφωμένη Θερμογραφία (Modulated Thermography/lock in Thermography)**

Η τεχνική αυτή έχει ίδια χαρακτηριστικά διάταξης με αυτή της Θερμογραφίας Παλμού, με την διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται περισσότερος χρόνος εξέτασης λόγω της περιοδικότητας των αρχικών θερμικών κυμάτων που εκπέμπονται από την εξωτερική πηγή[23][37][38].

Στην Παλμική Θερμογραφία, ο παλμός θερμικής διέγερσης είναι στιγμιαίος και απότομος, ενώ στην Διαμορφωμένη Θερμογραφία υπάρχει μια περιοδικότητα του παλμού. Πιο αναλυτικά, ο αρχικός παλμός της θερμικής διέγερσης γίνεται με περιοδικό ρυθμό μεταβαλλόμενης συχνότητας. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο βαθύτερα γίνεται η διάχυση θερμότητας για να βρεθούν πιθανές ατέλειες[37][40].

Η Διαμορφωμένη Θερμογραφία έχει το χαρακτηριστικό όνομα «lock-in», ο οποίος αναφέρεται στο "κλείδωμα" της συχνότητας ανά περίοδο θερμικού κύματος έτσι ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση του σήματος εισόδου και σήματος εξόδου. Το σήμα εισόδου περιγράφει τα χαρακτηριστικά του θερμικού κύματος το οποίο διαχέεται στο αντικείμενο-στόχο, ενώ το σήμα εξόδου, τα χαρακτηριστικά που εκπέμπονται από την επιφάνεια του στόχου μετά την διάχυση, ανά περίοδο. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει της καταγραφή θερμοκρασιακής κατανομής στην επιφάνεια του εξεταζόμενου αντικειμένου και επεξεργασία δεδομένων όπως πλάτος και φάσης σήματος[48][50][51].

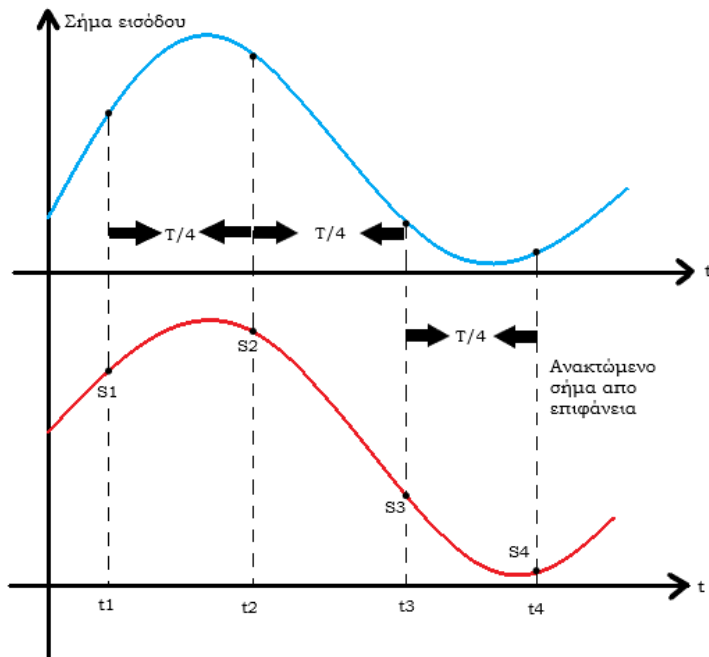
Η τελική εικόνα για το πώς διαμορφώθηκε η θερμοκρασία της επιφάνειας του αντικειμένου, προκύπτει από την σύγκριση πολλών περιόδων εκπομπής θερμικών κυμάτων, δηλαδή γίνεται εύρεση μέσω τιμών οι οποίες μετέπειτα ερευνώνται ως προς τις διαφορές. Η συχνότητα εκπομπής θερμικών κυμάτων είναι μεταβαλλόμενη, και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ανάλογα με το μέγεθος της, είναι εφικτή η εξέταση σε βάθος του στόχου. Όταν έχουν επιτευχθεί ποικίλα βάθη, είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας ακολουθίας θερμογραφημάτων διαφορετικής συχνότητας ανά περίοδο ώστε να μελετηθούν, γεγονός που καθυστερεί αρκετά την διαδικασία σε σχέση με την τεχνική παλμού[51][52][53].

Υπάρχει ένας ακόμα περιορισμός, ο οποίος οδηγεί σε περεταίρω καθυστέρηση της διαδικασίας. Το αντικείμενο προς μελέτη, μετά από κάθε περιοδική διέγερση, είναι απαραίτητο να επανέλθει σε θερμική ισορροπία ώστε να υπάρχει ακριβές τελικό αποτέλεσμα, κυρίως λόγω της διαφορετικής γωνιακής συχνότητας που ορίζεται για να επιτευχθούν διαφορετικά βάθη στο δείγμα[23][48][51].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα όμως της τεχνικής είναι το πόσο άμεσα μπορούν να βρεθούν χαρακτηριστικά των θερμικών κυμάτων, όπως η φάση και το πλάτος[23][52].

Αυτά τα δύο μεγέθη συνδέονται μέσω μιας πειραματικής διαδικασίας η οποία λειτουργεί με περιοδικά κύματα ημιτονοειδούς μορφής και ορίζονται τέσσερα ισαπέχοντα σημεία στα δύο σήματα, εξόδου και εισόδου. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των σημείων αυτών είναι εφικτό να παρθούν πληροφορίες για το πλάτος και την φάση του κάθε σήματος, καθώς στο σήμα εισόδου υπάρχει ίδια συχνότητα  $\omega$  με το σήμα εξόδου όμως θα έχει ένα πλάτος  $A$  και μια φάση  $\varphi$ [23][48][51][53].





Εικόνα 13- Μέθοδος τεσσάρων ισαπέχοντων σημείων στο σήμα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, σε ημιτονοειδές σήμα

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα σήματα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, με την μπλε κυματομορφή να απεικονίζει το σήμα που εκπέμπεται από την εξωτερική πηγή θερμότητας και η κόκκινη, το σήμα που εκπέμπεται από την επιφάνεια που ακτινοβολείται και φτάνει στην διάταξη της υπέρυθρης κάμερας.

Συγκρίνοντας τις συντεταγμένες των τεσσάρων αυτών σημείων, μπορούν να βρεθούν οι διαφοροποιήσεις της φάσης και του πλάτους των σημάτων από τους παρακάτω τύπους:

$$(14) A = \sqrt{(S1 - S3)^2 - (S2 - S4)^2}, [23][51][53]$$

Όπου

- ❖  $A$  το πλάτος
- ❖  $S_i$  τα σημεία που έχουν οριστεί για την σύγκριση σε χρόνο  $t_i = T/4$

Και για την φάση:

$$(15) \varphi = \tan^{-1} \frac{(S1 - S3)}{(S2 - S4)}, [23][51][53]$$

Ορίζοντας τα σημεία σε τέσσερα σημεία της κυματομορφής, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η περίοδος του σήματος έχει χωριστεί σε τέσσερις επιμέρους περιόδους:

- ❖  $t_1$
- ❖  $t_2=t_1+T/4$
- ❖  $t_3=t_1+T/2$
- ❖  $t_4=t_1+3\times T/4$

Αν παρθούν στοιχεία από περισσότερες περιόδους του σήματος, τότε βελτιώνεται το SNR, δηλαδή η αναλογία σήματος και θορύβου στο σήμα[51].

### Γ) Θερμογραφία σταδιακής θέρμανσης(Step heating Thermography)

Κατά την Θερμογραφία σταδιακής θέρμανσης χρησιμοποιείται συνεχής παλμός, για θερμική διέγερση και παρατηρείται η εξέλιξη της ως προς την θερμοκρασία της επιφάνειας του δοκιμίου. Ο συνεχής παλμός αυτός μπορεί να διαρκέσει από λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά, ώστε μέσα σε αυτό το χρονικό περιθώριο να εξεταστεί το πως ανταποκρίνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας του εξεταζόμενου στόχου, στον παλμό διέγερσης. Ο όρος θερμική διέγερση, στην ενεργητική θερμογραφία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω περιέχει και τη θέρμανση αλλά και σε άλλες περιπτώσεις ψύξη του αντικειμένου[23][38][40][54].

Ο παλμός που εκπέμπεται από την πηγή διέγερσης είναι συνεχής αλλά χαρακτηρίζεται από χαμηλή ένταση. Η τεχνική αυτή έχει παρόμοια λογική με την Παλμική Θερμογραφία, η οποία και χρησιμοποιείται περισσότερο, όμως η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός, ότι εδώ εξετάζονται οι διαφορές κατά την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του αντικειμένου και όχι μετέπειτα από αυτήν[54].

Κατά την εξέταση του συνεχούς παλμού, παρατηρείται το πως εξομοιώνει το φορτίο αυτό η επιφάνεια του αντικειμένου-στόχου. Αν στο εσωτερικό του, υπάρχει κάποιου είδους ατέλεια, η γραμμική συμπεριφορά της θερμοκρασίας ανάλογα με το χρόνο θα αλλάξει μορφή[40].

#### 1.4.4.2. Μηχανικά μέσα

##### Α) Παλμική Θερμογραφία Δονήσεων(Pulsed Vibrothermography- PVT)

Η τεχνική αυτή ανήκει στην διέγερση με μηχανικά μέσα, και όχι με οπτικά όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Συχνά εκτός από μηχανικά μέσα χρησιμοποιούνται και υπέρηχοι, γι' αυτό η Παλμική Θερμογραφία Δονήσεων ονομάζεται και Θερμογραφία Υπερήχων. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται στην Διαμορφωμένη Θερμογραφία δονήσεων που θα αναλυθεί παρακάτω[51].

Κατά την περίοδο της διέγερσης, προκαλούνται κάποιες μηχανικές δονήσεις οι οποίες, σε αντίθεση με τα οπτικά μέσα, εισέρχονται κατευθείαν στο εσωτερικό του αντικειμένου που εξετάζεται και όχι στην επιφάνεια του. Αν υπάρχει κάποια βλάβη στο εσωτερικό του στόχου, θα δημιουργηθεί θερμότητα λόγω τριβής με το μηχανικό μέσο από το οποίο ξεκίνησε η διέγερση[23][55].

Ο αρχικός παλμός μηχανικής ενέργειας, είναι σύντομος καθώς διαρκεί πολύ λίγο, της τάξης του ενός δευτερολέπτου. Η συχνότητα κυμαίνεται έως πενήντα κιλό-Χερτζ, και η μεταφερόμενη ενέργεια από πεντακόσια έως τρεις χιλιάδες Τζάουλ[51].

Τα μηχανικά κύματα ως εξωτερική πηγή διέγερσης, παρόλο που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως, ικανότητα ανίχνευσης υποεπιφανειακών ατελειών ευκολότερα, λόγω της διάχυσης κατευθείαν στο εσωτερικό του αντικειμένου, παρουσιάζει και μειονεκτήματα τα οποία μπορεί να προκαλέσουν περεταίρω φθορά στην ήδη υπάρχουσα. Αυτή η φθορά, μπορεί να δημιουργηθεί λόγω της μεγάλης εξάρτησης που έχει η πίεση που ασκείται από την πηγή μηχανικού κύματος στο αντικείμενο που εξετάζεται. Για να υπάρχει ένα επιτυχές αποτέλεσμα, το αρχικό μηχανικό κύμα είναι καλό να διαδοθεί μέσω κάποιου υλικού, καθώς δεν είναι επαρκής η διάδοση του στον αέρα, με ομοιόμορφο τρόπο για να υπάρχει η σωστή ποσότητα ενέργειας και να βρεθούν οι πιθανές ρωγμές χωρίς επιπλέον βλάβες[51][52][55].

## **B) Διαμορφωμένη Θερμογραφία Δονήσεων(Lock-in Vibrothermography)**

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται υπερηχητικά κύματα με συγκεκριμένο πλάτος και συχνότητα. Τα κύματα αυτά εισχωρούν κατευθείαν στο εσωτερικό του εξεταζόμενου στόχου όπως και στην Παλμική Θερμογραφία Δονήσεων. Έτσι είναι δυνατόν να βρεθούν βλάβες στην υπό-επιφανειακή περιοχή γρηγορότερα από ότι στις άλλες περιπτώσεις[37][51].

Η συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι χαμηλή, για να αποφευχθεί κάποια επιπλέον φθορά στο στόχο λόγω της πίεσης του κύματος. Η εκπεμπόμενη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμικά κύματα που στοχεύουν άμεσα την ζητούμενη βλάβη[56].

Το διαμορφωμένο πλάτος που ορίζεται στην εξωτερική πηγή διέγερσης, οδηγεί στην μη σταθερή συχνότητα εκπομπής υπερηχητικών κυμάτων με αποτέλεσμα να δημιουργεί μια ανακρίβεια στα αποτελέσματα. Για αυτόν το λόγο προτιμάται η διαμορφωμένη συχνότητα και όχι το διαμορφωμένο πλάτος, έτσι ώστε να επιτευχθεί σωστά ο έλεγχος σε κάθε περίπτωση εφαρμογής[51].

Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της διαδικασίας αυτής συμπίπτουν με αυτή της Παλμικής Θερμογραφίας Δονήσεων.

#### 1.4.4.3. Ηλεκτρομαγνητική διέγερση

##### **Α) Παλμική Θερμογραφία Διννορευμάτων ή Θερμογραφία επαγωγικής θέρμανσης (Eddy Current Thermography)**

Χαρακτηρίζεται ως Θερμογραφία Διννορευμάτων αλλά και Επαγωγική Θερμογραφία, και είναι από τις πιο σύγχρονες τεχνικές Ενεργητικής Θερμογραφίας[23][51].

Η λειτουργία της τεχνικής αυτής βασίζεται στο διαμορφωμένο βάθος διέγερσης από την εξωτερική μηχανική πηγή θέρμανσης. Το βάθος αυτό καθορίζεται μέσω της συχνότητας με την οποία θα συμβεί η διαδικασία, και το αντικείμενο μελέτης θερμαίνεται με έναν σύντομο παλμό, ο οποίος ενεργοποιεί το πηνίο για μικρό χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να βρεθούν εσωτερικές ατέλειες με βάση τις μεταβολές θερμοκρασίας της επιφάνειας του αντικειμένου[23].

Η εξωτερική πηγή παράγει διννορευμάτα μέσω ηλεκτρομαγνητικών πηνίων τα οποία τελικά μετατρέπονται σε θερμότητα με τη διαρροή τους σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Αν υπάρχει κάποια εσωτερική φθορά, η ροή της θερμότητας στο εσωτερικό του στόχου θα διαστρεβλωθεί και θα γίνει εντοπισμός βλάβης, για παράδειγμα ένα κενό σημείο, μια ρηγμάτωση ή κάποια αποκόλληση[51][57].

Στην περίπτωση της Επαγωγικής Θερμογραφίας, όπως και στις τεχνικές με οπτικά μέσα, μπορούν να βρεθούν βλάβες στην υποεπιφανειακή περιοχή του αντικειμένου[23][37].

Παράμετροι όπως η μαγνητική διαπερατότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της μεθόδου και στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων[51].

##### **Β) Διαμορφωμένη Θερμογραφία Διννορευμάτων (Lock-in Eddy Current Thermography)**

Η διαφορά της Διαμορφωμένης Θερμογραφίας Διννορευμάτων από την Παλμική, είναι όπως και στις άλλες περιπτώσεις Ενεργητικής Θερμογραφίας, ο τρόπος διέγερσης του αντικειμένου που μελετάται[51].

Σε αυτή την περίπτωση, ο αρχικός παλμός έχει την μορφή περιοδικής διάδοσης διννορευμάτων. Οι διαφορές μεταξύ των δύο τρόπων διέγερσης έχουν αναφερθεί παραπάνω.

## 1.5. Εφαρμογές Θερμογραφίας

### 1.5.1. Παθητική Θερμογραφία

-Η κύρια εφαρμογή της Παθητικής Θερμογραφίας δραστηριοποιείται στον τομέα της Ιατρικής, με τον οποίο και θα ασχοληθούμε στην παρούσα Διπλωματική εργασία.

Η Θερμογραφία χρησιμοποιείται στον τομέα της Ιατρικής την τελευταία εικοσαετία και λειτουργεί εντοπίζοντας δυσλειτουργίες στο ανθρώπινο σώμα με τρόπο μη επεμβατικό και με σύντομο χρόνο εξέτασης που περιλαμβάνει μια υπέρυθρη κάμερα[46][47].

Η τεχνική της είναι η ικανή να λειτουργήσει ως προληπτικό εργαλείο διάγνωσης παθήσεων που αφορούν την ανθρώπινη ανατομία και έχει τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών από όλα τα μέρη του σώματος, έχοντας τελικά αρκετά δεδομένα για την εξαγωγή συμπεράσματος. Επίσης, χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την επιτυχία μιας θεραπείας που έχει δοθεί στον ασθενή.

Κύριες εφαρμογές[46][47][58][59]:

- ❖ Διαγνωστική Ιατρική
- ❖ Κτηνιατρική
- ❖ Καρδιοχειρουργική
- ❖ Φυσικοθεραπεία- Ρευματολογία – Χειροπρακτική

Παραδείγματα[59]:

- ❖ Φλεγμονές και Οιδήματα
- ❖ Δερματικά προβλήματα, όπως εγκαύματα
- ❖ Γαστροεντερικές διαταραχές
- ❖ Θυρεοειδής
- ❖ Αγγειακές και αρτηριακές Παθήσεις
- ❖ Αρθρίτιδα και κακώσεις σπονδυλικής στήλης
- ❖ Χρόνιος πόνος
- ❖ Καρκίνος του Μαστού
- ❖ Αθλητικοί τραυματισμοί, όπως κακώσεις, θλάσεις, διαστρέμματα
- ❖ Μυοσκελετικοί πόνοι όπως δυσκοκλήλη και δυσκοπάθεια
- ❖ Νευρολογικοί πόνοι, όπως πονοκέφαλος και νευραλγία
- ❖ Νεοπλασματικές μεταστάσεις και αντίστοιχες χημειοθεραπείες

Εκτός από τον τομέα της ιατρικής, η παθητική θερμογραφία χρησιμοποιείται και για επιθεωρήσεις ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Είναι η μεγαλύτερη εφαρμογή της Θερμογραφίας και χρησιμοποιείται σε όλες τις βιομηχανικές περιοχές παγκοσμίως[9][23][42].

Η βασική της χρήση είναι για προληπτική συντήρηση των εγκαταστάσεων, χωρίς να διαταράσσεται η κανονική τους λειτουργία, με αποτέλεσμα η διαδικασία παραγωγής να μην διακόπτεται[9].

Κύριες εφαρμογές[38][40][51][53]:

- ❖ Παρακολούθηση βιομηχανικών διεργασιών
- ❖ Εξέταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού
- ❖ Εξέταση μηχανολογικού εξοπλισμού
- ❖ Κτηριακή Θερμογραφία

Παραδείγματα[9][23][37][40]:

- ❖ Εντοπισμός θερμικών γεφυρών
- ❖ Εντοπισμός περιοχών και καλωδιώσεων με κακή μόνωση
- ❖ Εντοπισμός περιοχών με υγρασία άνω του φυσιολογικού
- ❖ Συνδέσεις ηλεκτρικών κινητήρων
- ❖ Έλεγχος θερμοκρασίας διακοπών
- ❖ Έλεγχος κυκλωμάτων

Μια ακόμη εφαρμογή της Παθητικής Θερμογραφίας είναι στη διάταξη των αεροσκαφών. Ένα βασικό παράδειγμα είναι ο έλεγχος υγρασίας και πάγου στα πτερύγια ελέγχου μετά την προσγείωση του αεροσκάφους[40].

Μια κοινή εφαρμογή της Παθητικής με την Ενεργητική Θερμογραφία είναι ο έλεγχος υγρασίας σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς.

Άλλες εφαρμογές[4][9][23][60]:

- ❖ Διαστημική τεχνολογία: έλεγχος εκπεμπόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας από πλανήτες, γαλαξίες, κομήτες.
- ❖ Αστυνομία- Στρατός: Ανίχνευση κινδύνου την νύχτα
- ❖ Πυροσβεστική: Ανίχνευση εγκλωβισμένων ανθρώπων
- ❖ Περιβαλλοντικές εφαρμογές: Έλεγχος διαρροών λιπαντικών, χημικών ουσιών

### *1.5.2. Ενεργητική Θερμογραφία*

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εφαρμογή για έλεγχο ασφάλειας αεροσκαφών είναι κοινή και για την Ενεργητική Θερμογραφία. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση μεγάλων αεροδιαστημικών εξαρτημάτων και εφαρμόζεται σε διάφορα υλικά όπως αλουμίνιο, σύνθετα και υβριδικά υλικά, και άλλα[40].

Παραδείγματα [23][40][51][52]:

- ❖ Βασικές και δευτερεύουσες δομές αεροσκαφών και ελικοπτέρων
- ❖ Ανταλλακτικά κινητήρων
- ❖ Διαβρώσεις και ρωγμές
- ❖ Φθορά από κρούση που δεν είναι ορατή με την πρώτη ματιά
- ❖ Κενά και σύνθλιψη στον πυρήνα

Ο έλεγχος έργων τέχνης είναι μια εφαρμογή της Ενεργητικής Θερμογραφίας και συγκεκριμένα με τις τεχνικές Παλμικής και Διαμορφωμένης Θερμογραφίας[51].

Παραδείγματα[23][51][61]:

- ❖ Εύρεση ατελειών και φθορών σε κάδρο ζωγραφικής
- ❖ Εύρεση ατελειών και λαθών κτίσματος σε μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς
- ❖ Εύρεση ρωγμών και ρηγματώσεων σε τοιχογραφίες
- ❖ Εύρεση αποκολλήσεων και αποσαθρώσεων σε τοιχογραφίες
- ❖ Εύρεση κρυμμένων σχεδίων και γραμμάτων

Από την οπτική της Ιατρικής, η Ενεργητική θερμογραφία χρησιμοποιείται στην Πλαστική Χειρουργική με τους παρακάτω τρόπους[62].

Παραδείγματα[62]:

- ❖ Εύρεση βάθους πληγής και διάτρητα σημεία
- ❖ Ανακατασκευή φθοράς στο σώμα με τεχνική “flap surgery”, κατά την οποία μετακινείται υγιής ιστός από ένα μέρος του σώματος σε ένα άλλο.
- ❖ Μετεγχειρητικός έλεγχος
- ❖ Διάγνωση συνδρόμου καρπιαίου σωλήνα

Άλλες εφαρμογές[9][23][37][40]:

- ❖ Εξέταση επιφανειών σε κελύφη αεροσκαφών
- ❖ Εντοπισμός διαφορετικών τύπων φθοράς σε σύνθετα υλικά
- ❖ Παρακολούθηση φαινομένων διάβρωσης και συγκολλήσεων σε μεταλλικά υλικά
- ❖ Εντοπισμός υγρασίας σε δομικά υλικά
- ❖ Εκτίμηση θερμικών ιδιοτήτων υλικών
- ❖ Μέτρηση πάχους επιφανειακών επικαλύψεων
- ❖ Υπό-επιφανειακές φθορές και έλεγχος δομικής ακεραιότητας σιδηροτροχιών

## 1.6. Εξοπλισμός Απεικονιστικής Θερμογραφίας

### 1.6.1. Υπέρυθρη κάμερα

Μια Υπέρυθρη κάμερα, χωρίζεται σε βασικά κομμάτια, των οποίων οι λειτουργίες συνδυάζονται και το αποτέλεσμα είναι ένα θερμόγραμμα. Το αποτέλεσμα αυτό αναλόγως με την εφαρμογή, μας βοηθάει να εξάγουμε συμπεράσματα για πολλές εφαρμογές σε αρκετούς κλάδους.

### 1.6.2. Φακός

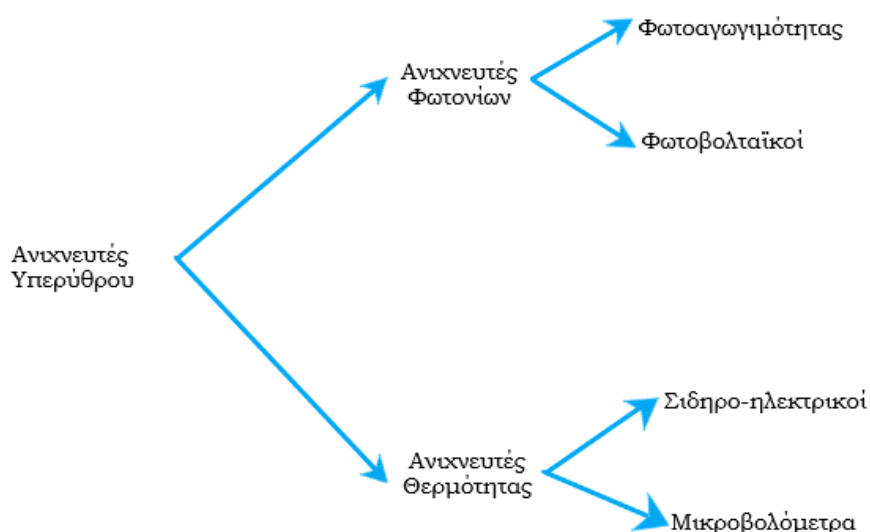
Ο φακός μιας Υπέρυθρης Κάμερας είναι συνήθως κατασκευασμένος με βάση το Γερμάνιο, και περιλαμβάνει μια επίστρωση άνθρακα για περισσότερη ασφάλεια, όπως και περίβλημα που προστατεύει από νερό και υψηλή θερμοκρασία. Το Γερμάνιο είναι στοιχείο με χαρακτηριστικά μετάλλου, το οποίο αφήνει την υπέρυθη ακτινοβολία να περάσει και ανακλά το ορατό φως[40].

Μια παράμετρος της λειτουργίας του φακού, βασική για την καλή λειτουργία του συστήματος είναι το πόση ένταση φωτός θα περάσει από τον φακό για να ανιχνευθεί από την υπόλοιπη διάταξη. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται 'f' και συνδυάζεται άμεσα με την ευαισθησία της κάμερας. Όσο αυξάνεται η παράμετρος 'f', τόσο χαμηλώνει η ευαισθησία της κάμερας, για αυτό πρέπει να μένει σχετικά χαμηλά[63].

### 1.6.3. Ανιχνευτής

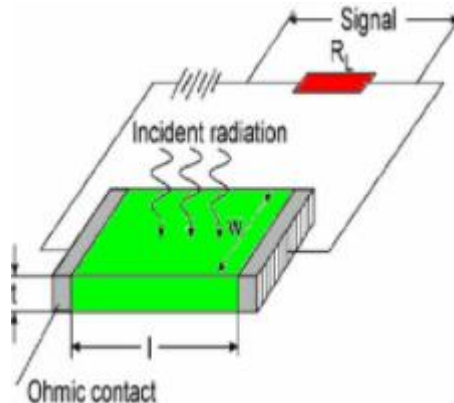
Οι ανιχνευτές υπέρυθρου έχουν μια κοινή αρχή, με βάση την οποία τα υπέρυθρα φωτόνια μετατρέπονται μέσω του ανιχνευτή σε ηλεκτρικά σήματα[64].

Μια υπέρυθη κάμερα μπορεί να περιέχει ανιχνευτή φωτονίων ή θερμικό ανιχνευτή, όπου και στις δύο περιπτώσεις γίνεται ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η υπέρυθη ακτινοβολία αποτελείται από μια ροή φωτονίων που συνοδεύεται από μια ενέργεια  $E=h \times \nu = (h \times c) / \lambda$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του υπέρυθρου φωτονίου σε μικρόμετρα[65].



Εικόνα 14- Κατηγορίες Ανιχνευτών Υπερύθρου.



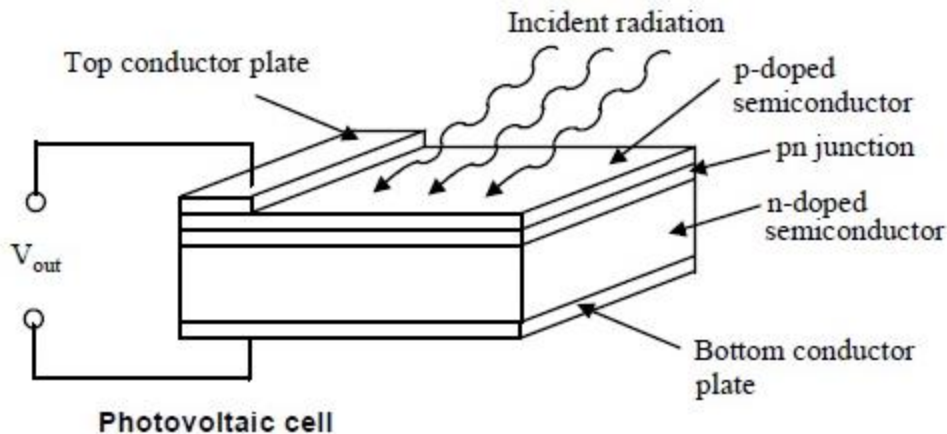
Ανιχνευτές Φωτοαγωγιμότητας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται, διεγείρει τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους με αποτέλεσμα αυτά να ανεβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται η αύξηση φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος προς τον ανιχνευτή και δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών. Τελικά με την αύξηση των φορέων, αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού(ημιαγωγός) και με την σειρά του, αυξάνεται και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Ως εκ τούτου υπάρχει και μια μετρήσιμη αλλαγή και στην πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης φορτίου[65][66][67]. Ο τύπος που εκφράζει την απόκριση του ανιχνευτή είναι ο παρακάτω:

$$(16) R = \frac{\eta \times q \times R \times E \times \tau \times (\mu_n + \mu_p)}{E_{ph} \times L} \left( \frac{V}{W} \right), [65]$$

Όπου

- ❖  $R$ , η απόκριση του ανιχνευτή σε Volt/Watt.
- ❖  $\eta$ , η κβαντική απόδοση σε electrons/photon.
- ❖  $q$ , σταθερά που εκφράζει το φορτίο ενός ηλεκτρονίου και είναι ίση με  $1.602176634 \times 10^{-19}$  Coulomb.
- ❖  $R$ , η αντίσταση του ανιχνευτή.
- ❖  $\tau$ , ο χρόνος ζωής ενός φώτο-διεγερμένου ηλεκτρονίου.
- ❖  $\mu_n$  και  $\mu_p$ , η κινητικότητα των ηλεκτρονίων και των οπών στο υλικό σε Volt/cm<sup>2</sup>\*min.

Φωτοβολταϊκοί ανιχνευτές

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται, πολώνει τα ηλεκτρικά φορτία του υλικού και δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους πόλους του. Έτσι ο ανιχνευτής παράγει τάση ανάλογη με την προσπίπτουσα ένταση ακτινοβολίας και μετατρέπει την ενέργεια αυτή σε ηλεκτρική.

Η διάταξη είναι ουσιαστικά μια διόδος, η οποία αποτελείται από μια σύνδεση “pn” ανάμεσα από κατάλληλα φορτισμένους ημιαγωγούς. Τα φωτόνια που εισέρχονται στην διάταξη, περνούν από το p-αγωγίμο στρώμα και απορροφώνται από το n-αγωγίμο στρώμα της διόδου με αποτέλεσμα την κίνηση ηλεκτρονίων και οπών[65][68][69].

Η τάση του κυκλώματος εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$(17) V = V_0 \times \ln(I_r), [69]$$

Όπου,

- ❖  $V_0$  η μετρούμενη τάση ανοιχτού κυκλώματος σε Volt
- ❖  $V$ , η τάση εξόδου σε Volt
- ❖  $I_r$ , η ένταση ακτινοβολίας σε  $\text{Watt/m}^2$

Θερμικοί Ανιχνευτές

Η λειτουργία των θερμικών ανιχνευτών διαφέρει από αυτούς των φωτονίων. Στην περίπτωση αυτή, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται και φτάνει στον ανιχνευτή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας της διάταξης. Η αύξηση αυτή ανιχνεύεται συνήθως από ένα βολόμετρο, του οποίου η αντίσταση θα αλλάζει όσο αλλάζει και η θερμοκρασία.

Τελικά θα δημιουργηθεί το ηλεκτρικό σήμα, πολώνοντας το κύκλωμα ώστε να έχει μια σταθερή τιμή στην τάση και το ρεύμα. Έτσι το ρεύμα θα μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα.

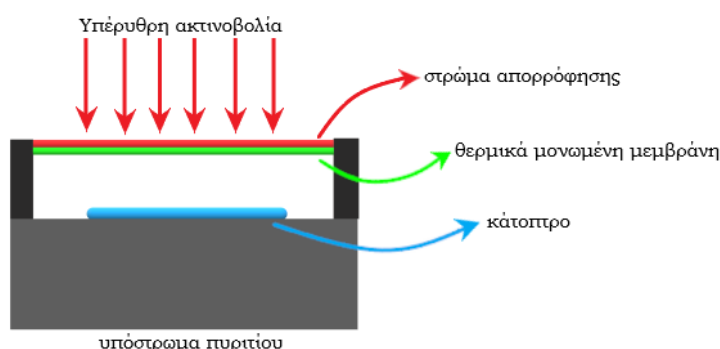
Όπως και οι ανιχνευτές φωτονίων, έτσι και οι θερμικοί ανιχνευτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στους σίδηρο-ηλεκτρικούς και στα μικρό-βολόμετρα[49][65][66][67].

### Σίδηρο-ηλεκτρικοί Ανιχνευτές

Τα υλικά αυτά επηρεάζονται από την φάση του σιδηροηλεκτρισμού και έχουν την ικανότητα να πολώνονται χωρίς να χρειάζεται εξωτερικό ηλεκτρικό φορτίο και τάση. Με άλλα λόγια, το υλικό δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες και η σχέση πόλωσης και ηλεκτρικού πεδίου είναι μη γραμμική. Συνήθως το υλικό κατασκευής τους είναι τιτανικό βάριο στροντίου(BST)

Η λειτουργία τους βασίζεται στις σιδηροηλεκτρικές περιοχές του υλικού, των οποίων η πόλωση μηδενίζεται λόγω της τυχαίας κατεύθυνσης των παροχών, με αποτέλεσμα τον μηδενισμό της συνολικής πόλωσης. Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο, οι παράλληλες πολώσεις αυξάνουν σε μεγεθος ενώ οι αντίθετες μικραίνουν έτσι ώστε όλες οι περιοχές να γίνουν παράλληλες και να αποτελούν μια μόνο περιοχή. Αυτή η διαδικασία εκφράζεται με μία οριακή τιμή πόλωσης με την αύξηση του πεδίου[49][65].

### Μικροβολόμετρα



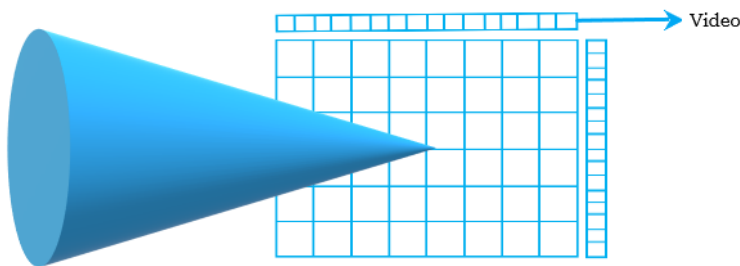
Η διάταξη αυτή εντάσσεται σε μια κατηγορία συγκεκριμένου τύπου αντίστασης και χρησιμοποιείται ως αισθητήρας για την υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα πιο διαδεδομένα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα μικροβολόμετρα είναι οξειδίο βαναδίου(VOx) και άμορφο πυρίτιο(a-Si).

Το βασικότερο κομμάτι της διάταξης είναι μια θερμικά μονωμένη μεμβράνη, η οποία απορροφά την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα εξεταζόμενο αντικείμενο ή σώμα. Η μεμβράνη αυτή, έχει ενσωματωμένη μια λεπτή στρώση με αντίσταση, εξαρτώμενη από την θερμοκρασία η οποία λειτουργεί ως αισθητήρας. Με την απορρόφηση της ακτινοβολίας αλλά και την θερμική μόνωση, υπάρχει μια άνοδος θερμοκρασίας στην μεμβράνη με αποτέλεσμα να αλλάζει η ηλεκτρική αντίσταση και μετατρέπεται σε σήμα.

Τα μικροβολόμετρα φαίνεται να υπερτερούν σε πλεονεκτήματα σε σχέση με τους σιδηροηλεκτρικούς ανιχνευτές λόγω της υψηλότερης ευαισθησίας και χωρικής ανάλυσης. Επίσης οι σιδηροηλεκτρικοί ανιχνευτές εμφανίζουν συχνά το φαινόμενο του μαύρου δαχτυλιδιού στην απεικόνιση, δείχνοντας λανθασμένη κάθοδο θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση της Υπέρυθρης κάμερας που μελετά αυτή η διπλωματική εργασία, χρησιμοποιείται ένας θερμικός ανιχνευτής ο οποίος συνοδεύεται από ένα σύστημα ψύξης, που έχει τον ρόλο προστασίας από την άνοδο θερμοκρασίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας όμως, καθιερώθηκε η χρήση του συστήματος ‘συστοιχίας εστιακού επιπέδου’, λεγόμενο και ως ‘focal plane array’, το οποίο δεν χρειάζεται να συνοδεύεται από σύνθετα μηχανικά συστήματα, όπως σε παλαιότερες εκδόσεις ανιχνευτών. Η διάταξη αυτή ανήκει στην κατηγορία των βολομέτρων[67][70].

### Συστοιχία εστιακού επιπέδου- Focal plane array



Η τεχνολογία *Focal plane array* έχει καθιερωθεί τις τελευταίες δεκαετίες καθώς χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, από στρατιωτικές έως ιατρικές χρήσεις[71][72]. Οι εφαρμογές συμπίπτουν με τις προαναφερόμενες στο κεφάλαιο με τις τεχνικές θερμογραφίας, καθώς η συστοιχία εστιακού επιπέδου είναι η βάση λειτουργίας μιας υπέρυθρης κάμερας.

Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν κάποια βασικά χαρακτηριστικά τα οποία υποστηρίζει η παραπάνω τεχνολογία. Μεγάλο μέγεθος εικονοστοιχείων, υψηλή ποιότητα αισθητήρα και γρήγορη επεξεργασία είναι κάποια από αυτά[71].

Το χαρακτηριστικό της συστοιχίας εστιακού επιπέδου είναι η ταυτόχρονη λήψη όλων των στοιχείων μιας εικόνας μέσω μιας σειράς ανιχνευτών που διαθέτει[49]. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι ανιχνευτές είναι συνδεδεμένοι σε μια μορφή συστοιχίας, και κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε έναν ανιχνευτή με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η σάρωση όλου του αντικειμένου που εξετάζεται και να γίνεται ‘on-chip’ επεξεργασία[73][82]. Με τον όρο ‘on-chip’, εννοείται η ολοκλήρωση μιας διαδικασίας στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα[74].

Η ικανότητα της επεξεργασίας στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα, μπορεί να επιταχύνει την διαδικασία της απεικόνισης, όμως έχει και μειονεκτήματα[74][75]. Ένα από αυτά

είναι η μείωση της απόδοσης κυκλώματος λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του. Στην περίπτωση της τεχνολογίας focal plane array (FPA) βέβαια, δεν χρειάζεται ψύξη από άλλη διάταξη και έτσι δεν επηρεάζεται σημαντικά το θερμικό φορτίο[75].

Στην υπέρυθρη κάμερα που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα έρευνα, η συστοιχία εστιακού επιπέδου αποτελείται από ανιχνευτές συστοιχίας βολομέτρων[9]. Παρ' όλα αυτά, μια συστοιχία εστιακού επιπέδου μπορεί να αποτελείται και από άλλα είδη ανιχνευτών ανάλογα με την αρχιτεκτονική της[76]. Κάποια παραδείγματα είναι τα παρακάτω:

- ❖ Ανιχνευτές φράγματος Schottky (Schottky-barrier)  
Συνήθως αποτελούνται από Πυριτιούχο Λευκόχρυσο (PtSi) ή από Πυριτιούχο Γάλλιο (GaSi) και είναι από τις λίγες τεχνολογίες που έχουν περάσει σε πρακτική εφαρμογή[23][72]. Μάλιστα υπάρχουν και διάφορες διατάξεις από PtSi που φθάνουν στην ανάλυση όπως αυτήν της τηλεόρασης με 1024 x 1024 σειρά στοιχείων[72].
- ❖ Ανιχνευτές υπερπλέγματος (Superlattice)  
Έχουν τις τεχνικές προδιαγραφές για να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που αφορούν υπέρυθρη ακτινοβολία, όπως ο σχεδιασμός μικρού "Band gap". Ο όρος "Band gap" αφορά ένα ενεργειακό κενό στο οποίο δεν υπάρχει κάποια ηλεκτρονική κατάσταση[77]. Συνήθως αποτελούνται από Αρσενίδιο του Γαλλίου (GaAs) ή Αρσενικό Αργίλιο του Γαλλίου (GaAlAs)[23][78].
- ❖ Ενδογενείς ανιχνευτές (intrinsic detectors)  
Συνήθως αποτελούνται από Γερμάνιο (Ge(i)) και κατά την λειτουργία τους απαιτούν ψύξη με υγρό άζωτο για τον έλεγχο θορύβου που μπορεί να προκύψει από την θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων[79].
- ❖ Συστοιχίες μικροβολομέτρων  
Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή στην Υπέρυθρη θερμογραφία. Έχει μέγεθος 320 x 240 εικονοστοιχεία και λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου[23].

Η τεχνολογία των FPA παρουσιάζει βασικά πλεονεκτήματα, που χάρις αυτών χρησιμοποιούνται στις περισσότερες προαναφερόμενες εφαρμογές σήμερα.

Πλεονεκτήματα[23][80]:

- ✓ Δυνατότητα καταγραφής αρκετά υψηλών θερμοκρασιών, λόγω της εύκολης ψύξης των εξαρτημάτων.
- ✓ Επειδή απαιτούνται λίγες κινούμενες διατάξεις στην τεχνολογία FPA, παρέχεται μεγάλη αξιοπιστία μετρήσεων.
- ✓ Χαμηλό κόστος.

- ✓ Καλύτερη ανάλυση εικόνας από παλαιότερες τεχνολογίες, αλλά χαμηλότερη από τις κοινές φωτογραφικές μηχανές.

#### *1.6.4. Laser*

Κατά την λήψη φωτογραφίας μέσω υπέρυθρης κάμερας, εμφανίζεται μια κουκίδα λέιζερ από το εστιακό επίπεδο που βοηθά στην σταθεροποίηση και εστίαση της εικόνας[9]. Το λέιζερ αυτό είναι κατασκευασμένο συνήθως από ένα υλικό ημιαγωγού Aluminium gallium indium phosphide, και εκπέμπει φως με μήκη κύματος 0.63-0.76  $\mu\text{m}$ [81].

## Β Μέρος- Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Η Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία, έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές αξιολογώντας την αξιοπιστία της Υπέρυθρης Κάμερας ως ένα εργαλείο αξιολόγησης, ποσοτικοποίησης και απεικόνισης της θερμοκρασίας του σώματος.

Οι συγγραφείς *I Rossignoli, P J Benito και A J Herrero* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*Spinal Cord*» με τίτλο «*Reliability of infrared thermography in skin temperature evaluation of wheelchair users*» εξέτασαν την αξιοπιστία της Υπέρυθρης Θερμογραφίας σε χρήστες αναπηρικών αμαξιδίων ερμηνεύοντας τις θερμοκρασίες του δέρματος του άνω μέρους του σώματος. Μετρήθηκαν εικοσιτέσσερις άνθρωποι, δύο διαφορετικές ημέρες και το αποτέλεσμα ήταν ότι η θερμοκρασία εξαρτάται άμεσα από το μέρος του σώματος το οποίο μετρήθηκε, καθώς θα πρέπει να εξετάζονται και άλλοι παράμετροι την στιγμή της μέτρησης, όπως ροή αίματος, σωματικό λίπος, ορμονικές αλλαγές.

Οι συγγραφείς *Alex de Andrade Fernandes, Eduardo Mendonca Pimenta, Danilo Gomes Moreira, Joao Carlos Bouzas Marins και Emerson Silami Garcia* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*MOJ Orthopedics & Rheumatology*» με τίτλο «*Application of Infrared Thermography in the Assessment of Muscle Damage in Elite Soccer Athletes*» αξιολόγησαν το εσωτερικό φορτίου αθλητών ποδοσφαίρου έτσι ώστε να υπάρχει διαχείριση του προπονητικού φόρτου και να πραγματοποιείται πρόληψη μυϊκών τραυματισμών. Μετρήθηκε μια ομάδα αθλητών πριν την αρχή ενός ποδοσφαιρικού αγώνα, ακριβώς μετά το πέρας αυτού, είκοσι τέσσερις ώρες μετά και σαράντα οκτώ ώρες μετά. Παρατηρήθηκαν ανισότητες στην θερμοκρασία των ποδιών πριν και μετά τον αγώνα της τάξης των δύο έως δυόμισι βαθμών. Αυτή η αύξηση αποδόθηκε την φλεγμονώδη απόκριση του σώματος καθώς η κινάση κρεατίνης ήταν αυξημένη εξίσου.

Οι συγγραφείς *Isabel Rossignoli, Ismael Fernández-Cuevas, Pedro J. Benito και Azael J. Herrero* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*Infrared Physics & Technology*» με τίτλο «*Relationship between shoulder pain and skin temperature measured by infrared thermography in a wheelchair propulsion test*» ανέλυσαν την θερμοκρασία του δέρματος πριν, μετά και ένα λεπτό μετά από έντονη ώθηση αμαξιδίου από τους χρήστες του. Επιπρόσθετα αξιολογήθηκε η σχέση μεταξύ πόνου των ώμων και την ασυμμετρία θερμοκρασίας που δημιουργήθηκε από τις μετρήσεις. Μετρήθηκαν δώδεκα αθλητές αμαξιδίου και το αποτέλεσμα ήταν μείωση θερμοκρασίας μετά την ώθηση και σημαντική αύξηση αφού πέρασαν τα δέκα λεπτά. Η επεξήγηση των αποτελεσμάτων για την μικρή πτώση της θερμοκρασίας ήταν η σύντομη έντονη ώθηση των τριάντα δευτερολέπτων, τα οποία δεν είναι αρκετά για να ανταποκριθεί το σύστημα θερμορύθμισης. Όσον αφορά τον πόνο στους ώμους, δεν βρέθηκε συσχέτιση με τις μετρήσεις.

Οι συγγραφείς *Eduardo Borba Neves, Tiago Rafael Moreira, Rui Jorge Lemos, José Vilaça-Alves, Claudio Rosa και Victor Machado Reis* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*Research on Biomedical Engineering*» με τίτλο «*The influence of*

*subcutaneous fat in the skin temperature variation rate during exercise*» μελέτησαν την επίδραση του ποσοστού υποδόριου λίπους στον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας του δέρματος κατά την διάρκεια της άσκησης. Μετρήθηκαν δέκα επτά εθελοντές χωρισμένοι σε δύο ομάδες ανάλογα με το ποσοστό λίπους μετά από κάθε σετ ασκήσεων χεριών (σύνολο σετ: 3). Παρατηρήθηκαν διαφορές μόνο μεταξύ των δύο ομάδων και όχι σε εθελοντές της ίδιας ομάδας. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα, ότι το λίπος είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την θερμοκρασία του σώματος και σε κατάσταση ηρεμίας αλλά και σε άσκησης.

Οι συγγραφείς *Pawel Bartuzi* και *Danuta Roman-Liu* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*» με τίτλο «*The Influence of Fatigue on Muscle Temperature*» είχαν ως σκοπό την αξιολόγηση της μυϊκής κόπωσης εθελοντών κατά τη διάρκεια μέτριας προσπάθειας κίνησης μέσω της Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας. Μετρήθηκαν δέκα άνδρες σε τρεις διαφορετικές συνθήκες κίνησης πέντε λεπτών η κάθε μία. Οι συνθήκες κίνησης διέφεραν ως προς το φορτίο που ασκήθηκε στο χέρι του κάθε εθελοντή. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι όσο αυξανόταν το φορτίο, τόσο επηρεάστηκε και η θερμοκρασία του δέρματος.

Οι συγγραφείς *Jan Novotny*, *Silvie Rybarova*, *Dan Zacha*, *Martina Bernacikova* και *Wael Awad Ramadan* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*Acta of Bioengineering and Biomechanics*» με τίτλο «*The influence of breast-stroke swimming on the muscle activity of young men in thermographic imaging*» αξιολόγησαν την ενεργειακή μεταβολή σε κάποια μέρη του άνω μέρους του σώματος κατά τη διάρκεια κολύμβησης. Μετρήθηκαν είκοσι πέντε άτομα πριν, αμέσως μετά και δέκα πέντε λεπτά μετά την προπόνηση. Η θερμοκρασία του νερού επηρέασε την θερμοκρασία του δέρματος, καθώς δεν υπήρξε σημαντική αύξηση μετά την προπόνηση. Η μοναδική σημαντική αύξηση ήταν στην περιοχή των ώμων λόγω του είδους κολύμβησης που πραγματοποιήθηκε.

Οι συγγραφείς *Ana Carolina Côrte*, *André Pedrinelli*, *Antonio Marttos*, *Ivan Furlan Grava Souza* και *Joaquim Grava* στη δημοσίευσή τους στο περιοδικό «*BMJ Open Sport — Exercise Medicine*» με τίτλο «*Infrared thermography study as a complementary method of screening and prevention of muscle injuries: pilot study*» αξιολόγησαν την Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία ως συμπληρωματική μέθοδο για πρόληψη μυϊκών τραυματισμών σε επαγγελματίες ποδοσφαιριστές. Μετρήθηκαν είκοσι οκτώ άτομα με ταξινόμηση ως προς την σοβαρότητα και το είδος του τραυματισμού τους και εφαρμόστηκε θερμική απεικόνιση σαράντα οκτώ ώρες μετά τον αγώνα. Σε όσα άτομα υπήρχε διαφορά πάνω από 0,4 βαθμούς κελσίου, θεωρήθηκε μη φυσιολογική και χρειάστηκε παραπάνω προληπτικές μετρήσεις. Το αποτέλεσμα ήταν μείωση των τραυματισμών σε σχέση με προηγούμενη χρονιά που ερμηνεύθηκε από τις θερμικές ανταποκρίσεις.



## Γ μέρος – Σκοπός και Στόχοι

Ο στόχος της παρούσας έρευνας είναι να αξιολογηθεί η Υπέρυθρη Κάμερα ως όργανο απεικόνισης θερμοκρασίας σε σημεία του σώματος αθλητών με κινητικά προβλήματα.

Οι αθλητές με αμαξίδιο, εξαρτώνται άμεσα από τα πάνω άκρα τους για κάθε καθημερινή τους κίνηση, και κατ' επέκταση και στην άθλησή τους. Έτσι, είναι φυσικό να δηλώνουν συχνή ενόχληση στο σημείο των ώμων και το γεγονός αυτό να δυσκολεύει τη συμμετοχή τους σε αθλήματα, όπως και σε άλλες καθημερινές δραστηριότητες[84]. Επιλέχθηκε η θερμοκρασία, ως ένα κριτήριο καταπόνησης του σώματος καθώς υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ εκπεμπόμενης θερμότητας του σώματος με την έντονη κόπωση αλλά και την πιθανότητα τραυματισμού του[85].

Επιλέχθηκαν τρεις χρονικοί περίοδοι μέτρησης θερμοκρασίας, για να συγκριθούν οι μέσες τιμές και να βρεθεί η διαφορά τους. Η μελέτη διαφορών ή μη των μετρήσεων θα οδηγήσει σε συμπέρασμα αναφορικά με την καταπόνηση των μυών στο σημείο των ώμων, καθώς και η πιθανότητα παρουσίασης φλεγμονής σε αυτό.

Επίσης, σαν συμπληρωματική πληροφορία, δόθηκαν ερωτηματολόγια με την δυσκολία που αντιμετωπίζουν σε καθημερινές δραστηριότητες οι αθλητές σε αναπηρικό αμαξίδιο. Το ερωτηματολόγιο περιέχει τον δείκτη πόνου ώμων των χρηστών αναπηρικού αμαξιδίου.

## 2. Προϋποθέσεις για καλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων

Η θερμοκρασία του σώματος είναι αποτέλεσμα της εκπεμπόμενης θερμότητας που δημιουργείται από την κυκλοφορία του αίματος στα αγγεία και στα όργανα[83]. Παρ' όλο που είναι μια εσωτερική επεξεργασία του σώματος, επηρεάζεται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες.

### Περιβάλλον

Η φυσιολογική επιφανειακή θερμοκρασία του σώματος μπορεί να επηρεαστεί από φυσικά χαρακτηριστικά των συνθηκών περιβάλλοντος, όπως υγρασία και αέρας τα οποία επηρεάζουν την υγρασία της επιφάνειας του δέρματος και κατ' επέκταση την θερμοκρασία του[86]. Αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σημαντικά χαμηλότερη ή υψηλότερη από αυτή του σώματος τότε ο οργανισμός «δουλεύει» με ομοιοστατικό μηχανισμό, ώστε να κρατήσει την εσωτερική του θερμοκρασία σταθερή[87].

Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη από αυτή του σώματος, η ροή του αίματος αυξάνεται και τα αιμοφόρα αγγεία διαστέλλονται, με αποτέλεσμα την έκκριση ιδρώτα στο δέρμα και έπειτα την εξάτμιση του. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του δέρματος μεταβάλλεται[88].

Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από αυτή του σώματος, οι μύες συστέλλονται και ξεκινούν οι σπασμοί ώστε να ακτινοβοληθεί θερμότητα. Η θερμοκρασία του δέρματος μεταβάλλεται[88].

### Άλλοι παράγοντες

Οι υπόλοιποι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την θερμοκρασία του σώματος εξαρτώνται από ενέργειες του ανθρώπου.

- ❖ Αλκοολούχα ποτά ή κάπνισμα
- ❖ Καλλυντικές ή φαρμακευτικές κρέμες
- ❖ Κατανάλωση υπερβολικής ποσότητας φαγητού ή καφέ
- ❖ Ένδυση με πολύ στενά ρούχα
- ❖ Απόσταση μέτρησης\*
- ❖ Σταθεροποίηση εικόνας

Η απόσταση μέτρησης από την κάμερα μέχρι το αντικείμενο-στόχο διαφέρει ανάλογα το μέγεθος και το ύψος του. Ανάλογα με τον φακό της κάμερας (Field of View), οι αποστάσεις μέτρησης αλλάζουν, καθώς ένας ευρυγώνιος φακός μειώνει την απόσταση μεταξύ της κάμερας και του στόχου. Η ευρεία γωνία μπορεί επίσης να παραμορφώσει την περιφέρεια της εικόνας[83].

Με βάση το πρωτόκολλο μέτρησης με Θερμική Κάμερα στην ιατρική, η διάταξη πρέπει να είναι σταθεροποιημένη σε κάποια ειδική βάση, για να μην υπάρχει ανθρώπινο σφάλμα λόγω ασταθούς χεριού[83].

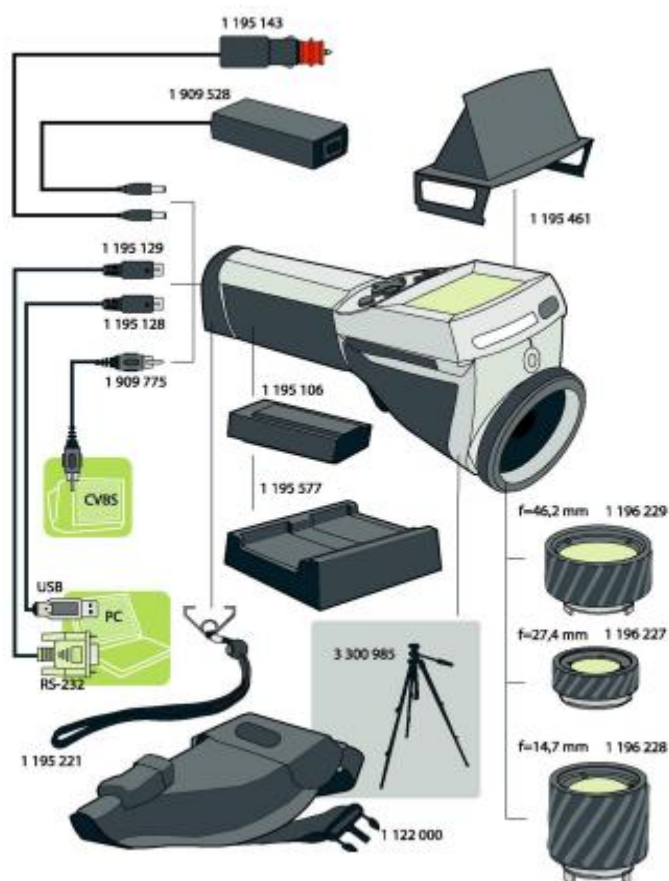
## 2.1. Μέθοδος και Υλικό

### 2.1.1. Ερευνητικός σχεδιασμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα ήταν η θερμοκάμερα χειρός ThermaCAM™ EX300 της Flir Systems και ένα θερμόμετρο για μέτρηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της Υπέρυθρης Κάμερας/

Πίνακας 1

ThermaCAM™ EX300	
Τύπος ανιχνευτή	Συστοιχία εστιακού επιπέδου (Focal plane array)
Υπέρυθρο φάσμα	320 x 240 εικονοστοιχία FPA
Εύρος φάσματος	7.5–13 μm
Ακρίβεια	± 2 °C / ± 3.6 °F or ± 2 % ανάγνωσης
Αποτελεσματικότητα απεικόνισης στην εκπομπή θερμότητας σώματος	0.97
Οπτικό πεδίο	23
Εστίαση φακού	27



Εικόνα 15 – Σφαιρική εικόνα της Θερμικής Κάμερας E300

Στην εικόνα 15 φαίνεται η Θερμική Κάμερα ThermoCam™ EX300, με τους τρεις διαθέσιμους φακούς, διαθέσιμα καλώδια για συνδεσιμότητα, μπαταρία και φορτιστή με σύνδεση σε ηλεκτρικό ρεύμα για επαναφόρτιση.

Πριν από την εκκίνηση της διαδικασίας χρειάστηκε η έγκριση της «Επιτροπής Ηθικής και Δεοντολογίας της Έρευνας» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Χρειάστηκε να γίνει συμπλήρωση αίτησης που θα περιέγραφε αναλυτικά όλη την έρευνα και τις μετρήσεις που επρόκειτο να συμβούν. Δημιουργήθηκαν έντυπα συγκατάθεσης και ενημέρωσης των υποκειμένων της μελέτης, καθώς και ένα έντυπο καταγγελιών σε περίπτωση που κάποιος από τους εθελοντές βιώσει κάτι που τον ενοχλήσει.

Έντυπο Ενημέρωσης για την Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία**Το παρόν Έντυπο έχει σκοπό:**

- ❖ Ενημέρωση των αθλητών/τριών για τις προϋποθέσεις που ενδείκνυνται ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια των μετρήσεων.
- ❖ Ενημέρωση του ερευνητή για τυχόν φάρμακα ή θεραπείες που απαιτούνται για τον/την αθλητή/αθλήτρια την ημέρα της μέτρησης.
- ❖ Ενημέρωση για την διαδικασία μέτρησης.

**Την ημέρα των μετρήσεων θα πρέπει να αποφευχθούν:**

1. Αλκοολούχα ποτά ή Κάπνισμα
2. Καλλυντικές ή φαρμακευτικές κρέμες στο υπό εξέταση σημείο του σώματος
3. Κατανάλωση υπερβολικής ποσότητας φαγητού ή καφέ
4. Ενδυση με πολύ στενά ρούχα.
5. Υπερβολική έκθεση στον ήλιο

\*Συμπλήρωση φαρμάκων που καταναλώνονται υποχρεωτικά την ημέρα της μέτρησης:

\*Συμπλήρωση υποχρεωτικής θεραπείας τις προηγούμενες 6 ώρες (πχ. Μασάζ, κρυοθεραπεία κτλ.):

**Ενημέρωση διαδικασίας**Ερωτηματολόγιο για αξιολόγηση του πόνου στους ώμους:

Θα δοθεί ένα ερωτηματολόγιο με διάφορες καθημερινές δραστηριότητες, και θα συμπληρωθεί ατομικά με βάση τον πόνο στους ώμους των αθλητών/τριών σε μια κλίμακα 0-10.

Πριν ξεκινήσει η προπόνηση:

1. 10 λεπτά σε θέση ηρεμίας ώστε να σταθεροποιηθεί η ροή του αίματος στο σώμα και κατ' επέκταση η θερμοκρασία του δέρματος.
2. Μετά τα δέκα λεπτά θα χρειαστεί να σηκωθεί το μανίκι της μπλούζας κάθε ατόμου ή να αφαιρεθεί η μπλούζα.
3. Θα ληφθούν τρεις φωτογραφίες στο σημείο των ώμων: πρόσθια όψη, πλάγια όψη, οπίσθια όψη, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρη εικόνα για την θερμοκρασία του δέρματος γύρω από τους ώμους.

Διέως μετά την προπόνηση:

1. Θα χρειαστεί να σηκωθεί το μανίκι της μπλούζας κάθε ατόμου ή να αφαιρεθεί η μπλούζα.
2. Θα ληφθούν τρεις φωτογραφίες στο σημείο των ώμων, όπως στην προηγούμενη φάση.

Δέκα λεπτά μετά το πέρας της προπόνησης:

1. Θα χρειαστεί να σηκωθεί το μανίκι της μπλούζας κάθε ατόμου ή να αφαιρεθεί η μπλούζα.
2. Θα ληφθούν τρεις φωτογραφίες στο σημείο των ώμων, όπως στις προηγούμενες φάσεις.

Εικόνα 16 Έντυπο Ενημέρωσης

**ΕΝΤΥΠΟ ΣΥΓΚΑΤΑΘΕΣΗΣ ΑΘΛΗΤΗ ΚΑΤΟΠΙΝ ΕΝΗΜΕΡΩΣΗΣ**

Όνοματεπώνυμο Ερευνήτριας	Ζαβόλα Μαρία
Εκπαιδευτικό Ίδρυμα	Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τηλέφωνο επικοινωνίας	+30 695 500 8438
Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο	maria.n.zavola@gmail.com
Όνοματεπώνυμο Επιβλέποντα Καθηγήτριά	Γκλώτσος Δημήτριος
Τηλέφωνο επικοινωνίας	+30 210 538 5375
Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο	dimglo@uniwa.gr

- ❖ Σας προσκαλώ να συμμετάσχετε σε έρευνα που διεξάγεται στο πλαίσιο της **προπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας του Π.Α.Δ.Α με τίτλο «Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία σε άτομα με αναπηρικό αμαξίδιο».**
- ❖ Η έρευνα πραγματοποιείται υπό την επίβλεψη του κ. **Δημήτριου Γκλώτσου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**
- ❖ Η ερευνητική πρόταση έχει εγκριθεί με την υπ' αριθμ.....απόφαση της Επιτροπής Ερευνητικής Δεοντολογίας-Βιοηθικής του Π.Α.Δ.Α.

**1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ:** Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να συγκριθεί ο πόνος στους ώμους μέσω ενός δείκτη Wheelchair User's Shoulder Pain Index(WUSPI), με την επιφανειακή θερμοκρασία του δέρματος στο σημείο αυτό.

**2. ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ:** Με τη σύγκριση του ερωτηματολογίου που θα σας δοθεί για να αξιολογηθεί ο πόνος στους ώμους, και με τις φωτογραφίες μέσω υπέρυθρης κάμερας, αναμένουμε να υπάρχει μια συσχέτιση όσο αφορά την επιφανειακή θερμοκρασία του σώματος. (άνοδος θερμοκρασίας). Όποιο αποτέλεσμα προκύψει θα αποτελέσει τιμή αναφοράς για μελλοντικές έρευνες άλλων ερευνητών.

**3. ΑΡΝΗΣΗ / ΑΠΟΣΥΡΣΗ:** Η συμμετοχή σας είναι καθαρά εθελοντική. Αν δεν επιθυμείτε να λάβετε μέρος ή θέλετε να αποσυρθείτε από την έρευνα οποιαδήποτε στιγμή, δε θα υπάρξει καμία επίπτωση στις υπηρεσίες που λαμβάνετε αυτή τη στιγμή.

**4. ΑΝΩΝΥΜΙΑ / ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ:** Οποιοσδήποτε πληροφορίες αποκτηθούν σχετικά με την παρούσα έρευνα και οι οποίες θα μπορούσαν να σας ταυτοποιήσουν προσωπικά, θα παραμείνουν απόρρητες και θα αποκαλυφθούν μόνο με την άδειά σας ή όπως προβλέπεται από τον νόμο. Οι πληροφορίες εκείνες που σας ταυτοποιούν προσωπικά, θα διατηρηθούν ξεχωριστά από τα υπόλοιπα δεδομένα που σας αφορούν.

Τα δεδομένα θα φυλάσσονται με ευθύνη του ερευνητή. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα της έρευνας δημοσιευτούν ή παρουσιαστούν σε συνέδρια δεν θα συμπεριληφθούν πληροφορίες που θα αποκαλύπτουν την ταυτότητά σας. Σε περίπτωση που φωτογραφίες σας, χρησιμοποιηθούν για εκπαιδευτικούς σκοπούς, η ταυτότητά σας θα προστατεύεται ή θα συγκαλύπτεται.

- Θα γίνει χρήση ψευδωνυμοποίησης των δεδομένων της μελέτης για την αποφυγή ταυτοποίησης των συμμετεχόντων στη μελέτη από τρίτους.

Εικόνα 17- Έντυπο Συγκατάθεσης Κατόπιν Ενημέρωσης

- Θα δοθεί σε κάθε συμμετέχοντα στην έρευνα ένας μοναδικός κωδικός και θα χρησιμοποιηθεί αυτός αντί για το ονοματεπώνυμό, ενώ το πρωτότυπο αρκείο με το ονοματεπώνυμο θα διατηρείται ασφαλές σε φυσικό και ηλεκτρονικό αρκείο.
- Θα προστατευτούν με ειδικό κωδικό τα αρκεία που περιέχουν προσωπικά δεδομένα, ώστε η πρόσβαση σε αυτά να είναι ελεγχόμενη.

**5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ:** Τα αποτελέσματα της έρευνας, η οποία διεξάγεται για καθαρά επιστημονικούς λόγους και δεν υπάρχει εκμετάλλευση, ενδεχομένως να δημοσιευθούν σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων. Κάθε ένας από εσάς έχει το δικαίωμα, εάν το επιθυμεί, να ενημερωθεί για τα ατομικά αποτελέσματα του, καθώς και για τα αποτελέσματα της έρευνας συνολικά.

**6. ΟΦΕΛΟΣ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΩΝ:** Δεν θα έχετε κάποιο οικονομικό όφελος από τη συμμετοχή σας στην παρούσα έρευνα.

Δηλώνω ότι:

- Διάβασα και κατανόησα το έντυπο ενημέρωσης για την έρευνα με τίτλο «Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία σε άτομα με αναπηρικό αμαξίδιο», που διεξάγεται από φοιτήτρια του τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.
- Μου δόθηκε το δικαίωμα να κάνω διευκρινιστικές ερωτήσεις.
- Μου δόθηκε το δικαίωμα να αποφασίσω αν θα συμμετάσχω ή όχι.
- Η συμμετοχή μου είναι εντελώς εθελοντική.
- Έχω δικαίωμα να διατηρήσω την ανωνυμία μου.
- Έχω δικαίωμα να διακόψω όποτε θελήσω, χωρίς να έχω την υποχρέωση να εξηγήσω τους λόγους για τους οποίους θα το κάνω.

Ονοματεπώνυμο συμμετέχοντα

Υπογραφή

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ημερομηνία

\_\_\_\_\_

**Αν έχετε οποιοδήποτε ερωτήσεις ή ανησυχίες σε σχέση με την έρευνα, μη διστάσετε να επικοινωνήσετε με τον ερευνητή.**  
**Ευχαριστώ εκ των προτέρων για τη συμμετοχή σας στην έρευνα!**

Εικόνα 18- Έντυπο Συγκατάθεσης Κατόπιν Ενημέρωσης

**Ερωτηματολόγιο Δείκτη Πόνου στους Ωμους σε Χρήστες Αναπηρικού Αμαξιδίου***(Συμπληρώστε από 0-10, το επίπεδο πόνου στις παρακάτω δραστηριότητες)*

	<b>Πόνος</b>
<b>Κίνηση ατόμου</b>	
Από κρεβάτι σε αμαξίδιο	
Από αυτοκίνητο σε αμαξίδιο	
Από μπανιέρα σε αμαξίδιο	
Φόρτωση αμαξιδίου σε αυτοκίνητο	
<b>Κίνηση αμαξιδίου</b>	
Ωθηση σε εσωτερικό χώρο > 10 λεπτά	
Ανηφορική κλίση	
Ανώμαλο έδαφος	
<b>Αυτοεξυπηρέτηση</b>	
Ωθηση αντικειμένου πάνω από το κεφάλι	
Ένδυση με παντελόνι	
Ένδυση με μπλούζα	
Πλύσιμο στα μαλλιά	
Πλύσιμο στην πλάτη	
<b>Γενικές δραστηριότητες</b>	
Δραστηριότητες σχολείου/δουλειάς	
Οδήγηση	
Δουλειές σπιτιού	
Υπνος	

Εικόνα 19- Δείκτης Πόνου Ωμων



## ΕΝΤΥΠΟ ΚΑΤΑΓΓΕΛΙΩΝ

Για οποιαδήποτε καταγγελία σχετικά με τη διεξαγωγή της έρευνας μπορείτε να απευθυνθείτε στην Επιτροπή Ηθικής και Δεοντολογίας της Έρευνας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής ([ethics@uniwa.gr](mailto:ethics@uniwa.gr)).

Για οποιαδήποτε καταγγελία σχετικά με τη διαχείριση των προσωπικών σας δεδομένων μπορείτε να απευθυνθείτε και στον Υπεύθυνο Προστασίας Προσωπικών Δεδομένων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κ. Αγιοπετρίτη Ιωάννη ([agior@uniwa.gr](mailto:agior@uniwa.gr)). Σε περίπτωση μη επίλυσης του προβλήματός σας μπορείτε να απευθυνθείτε στην Αρχή Προστασίας Προσωπικών Δεδομένων, συμπληρώνοντας το σχετικό έντυπο που βρίσκεται στην ιστοσελίδα αυτής ([complaints@dpa.gr](mailto:complaints@dpa.gr)).

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΓΓΕΛΙΑΣ

Όνοματεπώνυμο

Διεύθυνση Κατοικίας

Ημερομηνία

Υπογραφή

V2

Εικόνα 20- Έντυπο Καταγγελιών

## 2.2. Διαδικασία Μέτρησης

Η πρώτη συνάντηση περιλάμβανε μια πρώτη γνωριμία της ερευνήτριας με τα μέλη του συλλόγου και τους αθλητές. Έγινε μια προφορική ενημέρωση του σκοπού και της διαδικασίας των μετρήσεων που θα ακολουθήσουν στους εθελοντές ώστε να είναι εξοικειωμένοι με την έρευνα που θα ακολουθήσει στην επόμενη συνάντηση.

Αμέσως μετά μοιράστηκε η γραπτή ενημέρωση έντυπης μορφής στους αθλητές, όπου αναγράφονται:

- ❖ Προϋποθέσεις για την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων
- ❖ Συμπλήρωση από τους αθλητές τυχόν θεραπειές ή φάρμακα την ημέρα των μετρήσεων
- ❖ Μεθοδολογία μετρήσεων

Ακολούθησε η παροχή γραπτής αίτησης συναίνεσης έντυπης μορφής, όπου επεξηγούνται:

- ❖ Σκοπός της έρευνας
- ❖ Αναμενόμενα οφέλη
- ❖ Δυνατότητα απόσυρσης από την έρευνα
- ❖ Πολιτική προστασίας προσωπικών δεδομένων
- ❖ Διαχείριση αποτελεσμάτων

Τέλος δόθηκε το ερωτηματολόγιο όπου αναγράφονται καθημερινές δραστηριότητες ενός χρήστη αναπηρικού αμαξιδίου και συμπληρώθηκαν σε μια κλίμακα 0-10, το αίσθημα πόνου που νιώθουν σε κάθε μια από αυτές. Η κλίμακα αυτή, αποτέλεσε ένα επιπλέον στοιχείο για την κόπωση που μπορεί να ένιωθαν οι αθλητές. Παράγοντας που μπορεί να επηρέασε την μέτρηση.

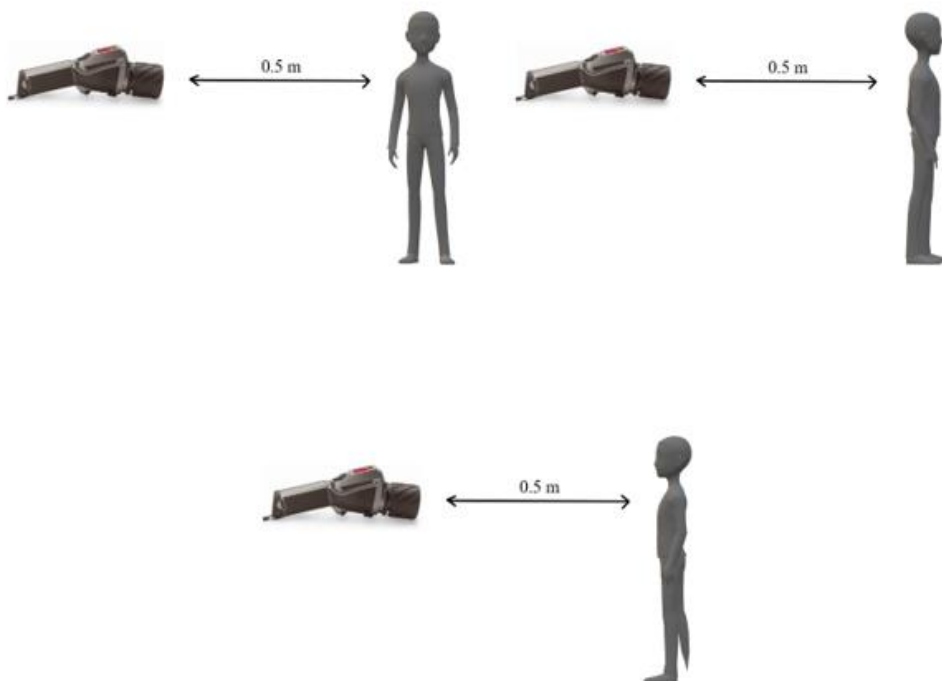
Η δεύτερη συνάντηση ήταν το κυρίως μέρος της έρευνας, καθώς πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις όπως επεξηγήθηκαν στην προηγούμενη συγκέντρωση ερευνήτριας και αθλητών.

### **Πριν την προπόνηση:**

Χρειάστηκε ένα θερμόμετρο όπου μετρήθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς ήταν βασικός παράγοντας στη θερμοκρασία του σώματος των αθλητών. Η θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν περίπου δεκαοκτώ βαθμοί Κελσίου (18-19°C), οι οποίοι θεωρήθηκαν και φυσιολογικοί, με βάση το εγχειρίδιο χρήσης της κάμερας.

Βγήκαν τρεις φωτογραφίες στο σημείο των ώμων κάθε αθλητή. Μια από πρόσθια όψη, μια από πλάγια και μια από οπίσθια όψη για να υπάρχει πλήρη εικόνα για την θερμοκρασία του σημείου. Πριν από την διαδικασία της λήψης φωτογραφιών ζητήθηκε από τον κάθε αθλητή να είναι σε κατάσταση ηρεμίας για τουλάχιστον δέκα λεπτά για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του. Η απόσταση μέτρησης ήταν περίπου πενήντα εκατοστά για να προσαρμοστεί ακριβώς όλο το σημείο των ώμων με βάση την εστίαση του φακού της κάμερας.

Έπειτα από δέκα λεπτά ηρεμίας, οι συμμετέχοντες χρειάστηκε να σηκώσουν το μανίκι της μπλούζας τους ή να αφαιρέσουν την μπλούζα τους ώστε να γίνει εφικτή η εξ αποστάσεως μέτρηση της κατανομής θερμοκρασίας στην περιοχή των ώμων.



Εικόνα 21 – Οι τρεις γωνίες λήψης του πειραματικού μέρους. Πλαϊνή, οπίσθια και εμπρόσθια.

Πίνακας 2 – Πίνακας από το εγχειρίδιο χρήστη της κάμερας ThermaCam E300

D --->	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	m
HFOV	0.26	0.53	1.05	2.63	5.26	13.14	26.28	52.55	m
VFOV	0.20	0.39	0.79	1.97	3.94	9.85	19.71	39.42	m
IFOV	0.82	1.64	3.28	8.21	16.42	41.06	82.12	164.23	mm

Ο παραπάνω πίνακας, ορίζει το μήκος που πρέπει να έχει το άτομο που υπόκειται στην μέτρηση με την Θερμική κάμερα ανάλογα με το οπτικό πεδίο και την εστίαση του φακού.

Όπου:

- ❖ D, απόσταση από την κάμερα στο μετρούμενο άτομο
- ❖ HFOV, οριζόντιο οπτικό πεδίο
- ❖ VFOV, κάθετο οπτικό πεδίο
- ❖ IFOV, οπτικό πεδίο του ανιχνευτή

Επιλέχθηκε η απόσταση 0.5 μέτρα από την κάμερα στο άτομο, διότι τα οπτικά πεδία ταιριάζουν με αυτά του φακού της κάμερας που χρησιμοποιήθηκε. Στην παρούσα έρευνα, εξετάστηκε μόνο το οριζόντιο οπτικό πεδίο, το οποίο ήταν τα είκοσι τρία εκατοστά. Η βέλτιστη τιμή κοντά σε αυτό το μέγεθος ήταν το μισό μέτρο.

**Μετρήσεις- Μετά την προπόνηση:**

Μετά την προπόνηση, η οποία είχε διάρκεια περίπου μία ώρα, οι αθλητές σήκωσαν ξανά το μανίκι της μπλούζας ή αφαίρεσαν την μπλούζα ώστε να γίνει η λήψη των φωτογραφιών.

Η λήψη των φωτογραφιών διήρκησε μερικά μόνο δευτερόλεπτα για κάθε αθλητή, όπως σε μια κοινή φωτογραφική μηχανή.

*2.2.1. Πληθυσμός*

Μετρήθηκαν έξι εθελοντές του αθλητικού συλλόγου ΑΣ Καστελλάνοι του Νομού Αττικής στην περιοχή της Μεταμόρφωσης. Και τα έξι άτομα που μετρήθηκαν ήταν άνδρες. Το προφίλ των συμμετεχόντων ήταν ενήλικες αθλητές με αναπηρικό αμαξίδιο, οι οποίοι προπονούνται συστηματικά μέσω του συλλόγου. Ο μέσος όρος ηλικίας ήταν τα 28,67 έτη. Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου δείγματος ήταν:

- ✓ Ηλικία άνω των 18 χρονών.
- ✓ Χρήστες αναπηρικού αμαξιδίου.

Η ερευνητική ομάδα αποτελούνταν από την φοιτήτρια Ζαβόλα Μαρία.

*2.2.2. Περιβάλλον*

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον χώρο προπόνησης των αθλητών. Οι εθελοντές προπονούνται σε εξωτερικό γήπεδο στην περιοχή της Μεταμόρφωσης.

*2.2.3. Συλλογή δεδομένων*

Συλλέχθηκαν δυο τύποι δεδομένων, αυτή της ηλεκτρονικής μορφής και έντυπης μορφής. Η ηλεκτρονική μορφή αφορούσε την συλλογή φωτογραφιών μέσω της Υπέρυθρης Κάμερας όπου απομονώθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα θερμοκρασίας του δέρματος των αθλητών και αναλύθηκαν με στατιστική ανάλυση ANOVA. Όλα τα δεδομένα θα διαγραφούν αμέσως μετά την παρουσίαση της Διπλωματικής Εργασίας.

Η έντυπη μορφή αφορά τα ερωτηματολόγια που δόθηκαν στους αθλητές στην πρώτη συνάντηση και συλλέχθηκαν στην δεύτερη, συμπληρωμένα κατάλληλα. Όλα τα δεδομένα θα διαγραφούν αμέσως μετά την παρουσίαση της Διπλωματικής Εργασίας σε καταστροφέα εγγράφων.

## 2.3. Αποτελέσματα

Η στατιστική ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα έρευνα έγινε μέσω μιας μεθόδου πειραματικού σχεδιασμού κατά την οποία πραγματοποιείται έλεγχος υποθέσεων με στόχο να ανιχνευθούν οι σημαντικές διαφορές στις μέσες τιμές περισσότερων από δύο πληθυσμών. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Ανάλυση Διακύμανσης ή Διασποράς (ANOVA). Η ανάλυση της διασποράς (ANOVA) είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου σημαντικότητας (test of significance), ή άλλως, ελέγχου υποθέσεων αναφορικά με την σύγκριση των μέσων τιμών τριών ή περισσότερων πληθυσμών.

Υπάρχουν δυο τύποι ANOVA, κατά έναν και κατά δυο παράγοντες. Σε αυτή την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη περίπτωση. Υπάρχει μια ανεξάρτητη μεταβλητή, οι τιμές της οποίας ορίζουν τους πληθυσμούς. Οι υποθέσεις που ελέγχει η στατιστική μέθοδος είναι δύο. Η Μηδενική και η Εναλλακτική, με αντίστοιχους τύπους  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  και  $H_1: \mu_i \neq \mu_j, i, j = 1, 2, \dots, k$ . Η μηδενική υπόθεση εξετάζει αν οι μέσες τιμές διαφέρουν, και η εναλλακτική υπόθεση ισχύει αν έστω και ένα ζευγάρι τιμών διαφέρει.

Η στατιστική του ελέγχου είναι η F-statistic (F-ratio). Η ύπαρξη έστω και μιας διαφοράς ερμηνεύεται ότι ο παράγοντας επηρεάζει σημαντικά την ποσοτική μεταβλητή.

Η στατιστική του ελέγχου F είναι ο λόγος των δύο εκτιμήσεων διασποράς, δηλαδή:

$$(18) F = \frac{\text{εκτίμηση της διασποράς μεταξύ ομάδων}}{\text{εκτίμηση της διασποράς μέσα στις ομάδες}}$$

Η εκτίμηση της διασποράς εντός των ομάδων είναι μια αμερόληπτη εκτίμηση της διασποράς ανεξάρτητα από το εάν η μηδενική υπόθεση ισχύει. Αντίθετα, η εκτίμηση της διασποράς μεταξύ των ομάδων είναι αμερόληπτη μόνο αν η μηδενική υπόθεση είναι αληθινή και τότε έχει περίπου την ίδια τιμή με εκείνη της διασποράς εντός των ομάδων και συνεπώς η τιμή της F αναμένεται κοντά στο 1.0.

Για να γίνει σωστός στατιστικός έλεγχος υπάρχει μια βασική παραδοχή που πρέπει να συμφωνεί με τις τιμές του πειράματος. Η παραδοχή αυτή είναι εκείνη της σφαιρικότητας, η οποία αναφέρεται στην ισότητα των διακυμάνσεων των διαφορών μεταξύ των πειραματικών επιπέδων. Δηλαδή, οι τρεις διακυμάνσεις των μέσων τιμών των χρονικών περιόδων του πειράματος να είναι περίπου ίσες. Αυτή η παραδοχή ελέγχεται με το τεστ του Mauchly. Έτσι, έχουμε τα εξής δεδομένα:

- Αν  $p < 0.05$ , τότε η σφαιρικότητα παραβιάζεται.
- Αν  $p > 0.05$ , τότε η σφαιρικότητα ικανοποιείται

Σε περίπτωση παραβίασης υπάρχουν κάποιες εκτιμήσεις σφαιρικότητας και είναι τρεις:

- Greenhouse-Geisser Estimate
- Huynh- Feldt Estimate
- Lower-bound Estimate

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η προϋπόθεση σφαιρικότητας Mauchly των μετρήσεων που λήφθηκαν.

**Πίνακας 3**

**Τεστ σφαιρικότητας κατά Mauchly**

Measure: MEASURE\_1

Επίδραση εντός της ομάδας	Mauchly's W	Approx. Chi-Square	Df	Sig.	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Lower-bound
factor1	.924	.317	2	.853	.929	1.000	.500

Με βάση τις τιμές του πίνακα, παρατηρείται η τιμή 0,853 η οποία είναι μεγαλύτερη από 0,050 άρα η σφαιρικότητα ικανοποιείται, έτσι μπορεί να αναλυθεί το κύριο μέρος της στατιστικής μελέτης.

Καταγράφηκαν τρεις τιμές θερμοκρασίας ώμων για κάθε μια από τις τρεις χρονικές περιόδους που ορίστηκαν στην έρευνα (πριν την προπόνηση, μετά την προπόνηση, δέκα λεπτά μετά την προπόνηση). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας του ώμου κάθε ατόμου από τις τρεις διαφορετικές γωνίες (πρόσθια όψη, πλάγια όψη, οπίσθια όψη). Παρακάτω φαίνονται οι τιμές που συλλέχθηκαν και οι αντίστοιχες μέσες τιμές.

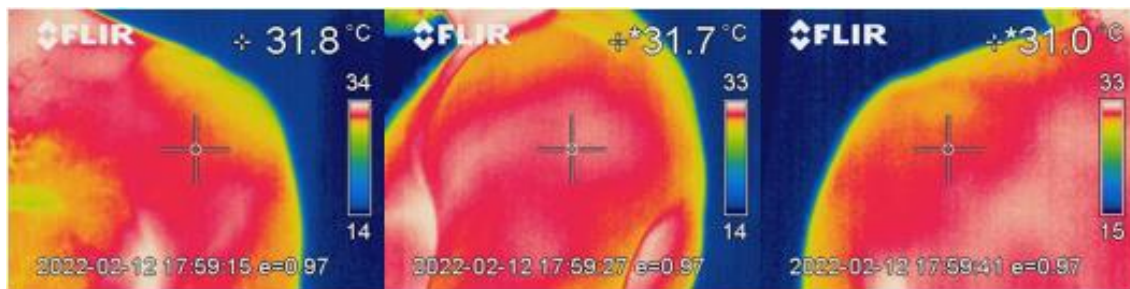
**Πίνακας 4**

a/a	name	sex	Age	T1 (side view)	T1 (back view)	T1 (front view)	Mean1	T2 (side view)	T2 (back view)	T2 (front view)	Mean 2	T3 (side view)	T3 (back view)	T3 (front view)	Mean3
1	A	M	24	29.9	30.4	30.7	30.30	30.2	29.5	30.5	30.06	33.1	31.9	32.1	32.36
2	B	M	25	31.8	31.0	31.8	31.53	32.5	31.7	33.3	32.50	32.6	32.3	33.3	32.73
3	C	M	29	32.2	31.5	33.3	32.30	31.1	29.5	32.3	30.96	32.0	31.6	32.2	31.93
4	D	M	35	30.3	29.8	30.2	30.10	30.5	30.4	29.9	30.26	30.4	30.4	29.8	30.20
5	E	M	31	29.7	30.6	30.7	30.30	30.2	30.7	30.6	30.50	30.1	30.7	30.5	30.43
6	F	M	28	30.1	29.9	30.2	30.07	30.2	29.8	30.5	30.17	30.1	29.9	30.4	30.13

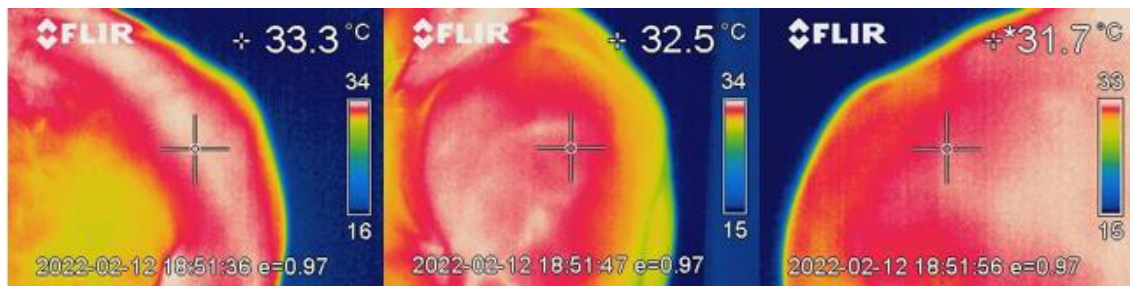
Ορίστηκαν όλα τα μεγέθη μέσω του προγράμματος SPSS ως εξής:

- ❖ a/a, T1s, T1b, T1f, Mean1, T2s, T2b, T2f, Mean2, T3s, T3b, T3f, Mean3 με μορφή scale.
- ❖ name, sex με μορφή Nominal.

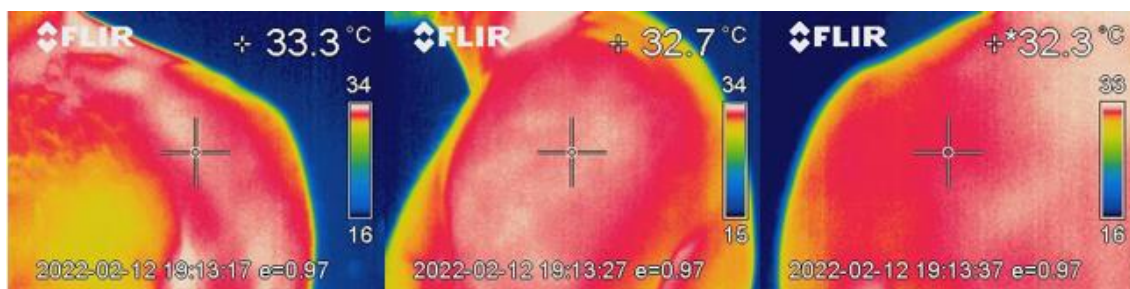
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ένα δείγμα απεικόνισης θερμοκρασίας πριν, μετά και δέκα λεπτά μετά την προπόνηση.



Εικόνα 22 -Απεικόνιση θερμοκρασίας στην περιοχή των ώμων πριν την προπόνηση.



Εικόνα 23 – Απεικόνιση θερμοκρασίας στην περιοχή των ώμων μετά την προπόνηση.



Εικόνα 24 – Απεικόνιση θερμοκρασίας στην περιοχή των ώμων δέκα λεπτά μετά την προπόνηση.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός επαναλαμβανόμενων μετρήσεων κατά ένα παράγοντα, την θερμοκρασία και μεταβλητό μέγεθος τον χρόνο.

Πίνακας 5

Descriptive Statistics			
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	N
MOT1	30.7667	.92727	6
MOT2	30.8083	.88287	6
MOT3	31.2967	1.17483	6

Στον παραπάνω πίνακα υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν. Τα αποτελέσματα δείχνουν να μην υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις μέσες τιμές.

## Πίνακας 6

## Συγκρίσεις κατά ζεύγη

Measure: MEASURE\_1

(I) factor1	(J) factor1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. <sup>a</sup>	95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup>	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	-.042	.320	1.000	-1.172	1.088
	3	-.530	.373	.643	-1.847	.787
2	1	.042	.320	1.000	-1.088	1.172
	3	-.488	.409	.857	-1.933	.956
3	1	.530	.373	.643	-.787	1.847
	2	.488	.409	.857	-.956	1.933

Στον παραπάνω πίνακα απεικονίζονται οι συγκρίσεις των τιμών ανά χρονική περίοδο. Από τις τιμές που φαίνονται με μπλε σκίαση, βγαίνει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει σημαντικότητα σε κάποια από τις χρονικές περιόδους, καθώς καμία τιμή δεν είναι μικρότερη του 0,05, όπως ορίζει η στατιστική ανάλυση ANOVA.

Σε περίπτωση που υπήρχε σημαντικότητα σε κάποια από τις συγκρίσεις, δηλαδή μια τιμή μικρότερη από 0,05 τότε η μέθοδος που επιλέχθηκε θα πραγματοποιούσε ανάλυση στην οποία θα βρισκόταν η χρονική περίοδος με σημαντική διαφορά. Τελικά ισχύει η Μηδενική Υπόθεση.

## 2.4. Συζήτηση

Με βάση τις μετρήσεις θερμοκρασιών που λήφθηκαν από τους αθλητές, παρατηρήθηκε αύξηση **0.22%** μεταξύ των χρονικών στιγμών πριν και μετά την προπόνηση, και αύξηση **1.49%** στις τιμές από την λήξη της προπόνησης και δέκα λεπτών μετά το πέρας αυτής.

Παρ' όλη την αύξηση του ποσοστού θερμοκρασίας ανάμεσα στις χρονικές περιόδους των μετρήσεων, δεν βρέθηκε σημαντική διαφορά στις μέσες τιμές. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρέασαν τα αποτελέσματα. Παραδείγματος χάριν, βρέθηκε αύξηση τιμών θερμοκρασίας ανάμεσα στην στιγμή μετά την προπόνηση και μετά από δέκα λεπτά της λήξης της. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός, ότι μετά την λήξη οι αθλητές δεν ήταν σε πλήρη ηρεμία καθώς μπήκαν στην διαδικασία ντυσίματος και προετοιμασίας για να αποχωρήσουν από τον χώρο προπόνησης. Επιπρόσθετα, το διάστημα των δέκα λεπτών μπορεί να μην ήταν αρκετό για να ανταποκριθεί το σώμα σε φυσιολογική θερμοκρασία σώματος όπως την αρχική.

Η ύπαρξη μη σημαντικότητας στην διαφορά τιμών, δεν είναι απαραίτητα μη επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς μια μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να προδιέθετε κάποια πιθανότητα φλεγμονής στο σημείο των ώμων. Αυτό όμως δεν είναι δεδομένο γιατί η παρουσίαση φλεγμονής σε πολλές περιπτώσεις δεν εμφανίζεται σε διάστημα δέκα λεπτών και χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να εξετασθεί η πιθανότητα.



Αναμενόταν μεγαλύτερη αύξηση στις τιμές θερμοκρασίας αμέσως μετά την προπόνηση σε σύγκριση με την επόμενη μέτρηση, διότι θεωρητικά το σώμα είναι σε μεγαλύτερη εκπομπή θερμότητας κατά την διάρκεια της κίνησης. Παρ' όλο που το σώμα χρειάζεται αιμάτωση για την διεκπεραίωση του μηχανικού έργου, η φλεγμονώδης αντίδραση κατά τη διάρκεια αυτού επιφέρει μεγαλύτερα ερεθίσματα θερμότητας γι' αυτό και η μεγιστοποίηση μπορεί να επιτεύχθηκε μετά το πέρας των δέκα λεπτών.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα δύο, υπάρχουν παράμετροι που επηρεάζουν την θερμοκρασία του σώματος, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος,

Τα ερωτηματολόγια που δόθηκαν στους εθελοντές αφορούσαν τον δείκτη πόνου ώμου χρηστών με αναπηρικό αμαξίδιο και δόθηκε για επιπλέον πληροφορία για την καθημερινή κόπωση των ατόμων σε κοινές δραστηριότητες. Ο μέσος όρος δυσκολίας εκπλήρωσης των δραστηριοτήτων ήταν 4.49. Η τιμή αυτή θεωρήθηκε φυσιολογική καθώς τα άτομα ήταν χρήστες αμαξιδίου πάνω από τρία χρόνια, κατά μέσο όρο και όλες οι δραστηριότητες έχουν πάρει μια μορφή συνήθειας. Τελικά, η γενική κόπωση δεν θεωρήθηκε κριτήριο που μας βοηθά να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα.

Η παρούσα έρευνα ήταν μια σχετικά πολύπλοκη διαδικασία καθώς κάθε κομμάτι εξαρτήθηκε από εξωτερικούς παράγοντες. Οι μετρήσεις καθυστέρησαν χρονικά για προληπτικούς λόγους προστασίας των αθλητών ΑΜΕΑ αλλά και της ερευνήτριας από τον ιό COVID-19. Μετά το πέρας του μεγάλου κινδύνου, υπήρξε καθυστέρηση και στην λήψη έγκρισης της έρευνας από την «Επιτροπή Ηθικής και Δεοντολογίας της Έρευνας» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η τελευταία δυσκολία ήταν αυτή των καιρικών συνθηκών, που δεν ευνόησαν τους αθλητές να είναι συνεπείς στις προπονήσεις.

Όλες οι κινήσεις και οι διαδικασίες τις έρευνας όφειλαν να είναι όσο το δυνατόν πιο συμβατές προς τους εθελοντές ώστε να μην δυσκολευτούν ή νιώσουν οποιαδήποτε δυσαρέσκεια. Υπήρξε απόλυτος σεβασμός απέναντι στις κινητικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν καθημερινά τα άτομα με αμαξίδιο, και δόθηκε ο απαιτούμενος χρόνος για να νιώσουν έτοιμοι για την ημέρα της μέτρησης. Οι αθλητές ήταν πλήρως συνεργάσιμοι με την ερευνήτρια και δεν παρουσιάστηκε κανένα εμπόδιο κατά την διάρκεια της συλλογής δεδομένων.

Με βάση τα παραπάνω, αλλά και όλη την εμπειρία της παρούσας έρευνας, διαμορφώνονται τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά της μεθόδου Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας. Το πρώτο πλεονέκτημα είναι το ότι η μέθοδος της Θερμογραφίας είναι μη επεμβατική. Είναι πολύ σημαντικό, ο άνθρωπος που υπόκειται σε αυτή την διαδικασία να γνωρίζει ότι κανένα όργανο, ακτινοβολία ή συχνότητα δεν θα επέμβει στο σώμα του και αυτό οδηγεί σε αίσθημα ασφάλειας προς την μέθοδο. Η ψυχολογία του ατόμου παίζει βασικό ρόλο και στην ακρίβεια του αποτελέσματος, λόγω ηρεμίας του σώματος την ώρα της μέτρησης. Η μη επεμβατικότητα μπορεί να συσχετιστεί και με την γρήγορη ανταπόκριση της Υπέρυθρης Κάμερας στη συλλογή δεδομένων. Ο υπολογισμός και η απεικόνιση της θερμοκρασίας του δέρματος κρατάει

μόλις μερικά δευτερόλεπτα, γεγονός το οποίο βοηθάει και τον/την ερευνητή/τρια αλλά και τον εξεταζόμενο. Ο χρόνος της διαδικασίας μπορεί να παρομοιαστεί με αυτόν για το τράβηγμα μιας φωτογραφίας. Τελικά έχουμε μια αλυσίδα πλεονεκτημάτων με αρχή της της μη επεμβατικότητας που οδηγεί στην καλή συνεργασία με την ψυχολογία του ατόμου, και αυτή με την σειρά της σε μικρό χρόνο συλλογής δεδομένων.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, με βάση αυτή αλλά και τις προηγούμενες μελέτες είναι ότι πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την θερμοκρασία του δέρματος, οπότε επηρεάζεται και το αποτέλεσμα της διαδικασίας. Πρέπει κάθε φορά, πριν από κάθε μέτρηση να λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράμετροι όπως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η μυϊκή κόπωση, η διατροφή, οι συνήθειες, η ώρα, ιστορικό παθήσεων και άλλα.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην παρούσα έρευνα δεν θεωρήθηκε ότι επηρέασε τις τιμές της θερμοκρασίας του σώματος γιατί ήταν γύρω στους δεκαοκτώ βαθμούς, και με βάση το πρωτόκολλο μέτρησης θερμοκρασίας του σώματος με την συγκεκριμένη τεχνική, θεωρείται ιδανική[83]. Η μυϊκή κόπωση των μυών, είναι μια παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος, γι' αυτό με την βοήθεια του ερωτηματολογίου για τον δείκτη πόνου ώμων που συμπληρώθηκε, ο μέσος όρος σε μια κλίμακα από μηδέν έως δέκα, ήταν κάτω από την βάση οπότε θεωρήθηκε ότι η κόπωση στο συγκεκριμένο δείγμα δεν επηρέασε σημαντικά τις τιμές της θερμοκρασίας των ώμων.

Το δέρμα διαθέτει μηχανισμούς οι οποίοι συμμετέχουν στην ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος και στη σταθερή σύσταση της υγρασίας του. Στο δέρμα υπάρχουν οι ιδρωτοποιοί αδένες χάρη στους οποίους γίνεται η χημική ανταλλαγή και ακολουθεί η εφίδρωση και η συμβολή των νευρικών απολήξεων στην αναγνώριση της θερμοκρασίας και του πόνου. Για να έχει το δέρμα τη σωστή σύσταση για να ρυθμιστεί και η θερμοκρασία του, πρέπει η διατροφή του ατόμου να έχει τις απαραίτητες βιταμίνες και επαρκή υγρασία ώστε να διατηρηθεί σωστά ο μηχανισμός αυτός. Δυστυχώς η παράμετρος αυτή δεν ήταν δυνατό να ληφθεί υπόψιν καθώς θα έπρεπε να υπήρχε μακροπρόθεσμη παρακολούθηση σε αυτό τον τομέα ώστε να βγει ένα συμπέρασμα ικανό να στηρίξει μια υπόθεση για τον επηρεασμό της θερμοκρασίας του σώματος.

Επίσης μακροπρόθεσμη παρακολούθηση θα ήθελε και η κατανάλωση φαρμακευτικής αγωγής των ατόμων. Το δείγμα της παρούσας έρευνας δεν πείστηκε να αναφέρει τι φαρμακευτική αγωγή ακολουθεί και επιπλέον δεν υπήρχε και αρκετός διαθέσιμος χρόνος για να ερωτηθούν. Το ιστορικό παθήσεων είναι μια παράμετρος που σίγουρα επηρεάζει την εκπομπή θερμότητας του σώματος, ειδικά αν αυτό είναι πρόσφατο. Το δείγμα και οι διαδικασία μέτρησης είχε αρκετή χρονική πίεση για να μην κουραστούν οι εθελοντές και έτσι δεν πραγματοποιήθηκε κάποια έρευνα στο τι πάθηση μπορεί να έχει περάσει ο κάθε ένας από αυτούς. Όμως είναι μια σημαντική παράμετρος της θερμότητας που εκπέμπει ο παθών μυς λόγω αυξημένης ροής αίματος στο συγκεκριμένο σημείο και ίσως κάποιας φλεγμονής.

Τέλος, το φως της ημέρας είναι άλλος ένας βασικός παράγοντας αύξησης θερμοκρασίας, οπότε στην πράξη επιλέχθηκε χώρος μέτρησης, ο οποίος είχε σκίαση για να αποφευχθεί ο επηρεασμός από την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλίου. Οι ακτίνες του φυσικά υπάρχουν και σε σημείο με σκιά αλλά είναι σε μικρότερο ποσοστό, και έτσι δεν συμπεριλήφθηκε στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Μελλοντικά, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα πρωτόκολλο με βάση το οποίο η κάθε παράμετρος που επηρεάζει την μέτρηση να έχει μια τιμή σημαντικότητας, η οποία θα ενσωματωθεί αυτόματα στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ακρίβειας, οπότε το επόμενο βήμα θα ήταν να βρεθεί μηχανισμός μέσω του οποίου βελτιστοποιείται η ευκολία διεξαγωγής μετρήσεων με το παραπάνω πρωτόκολλο με την λιγότερη δυνατή αλλοίωση ακρίβειας.

## 2.5. Συμπεράσματα

Οι δύο βασικές χρήσεις της Υπέρυθρης Απεικονιστικής Θερμογραφίας που σχετίζονται με την παρούσα έρευνα είναι με την κάμερα να λειτουργεί ως προγνωστικό εργαλείο τραυματισμών του μυ, και ως συμπληρωματικό όργανο για την παρακολούθηση μυϊκής θεραπείας.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να συμβάλουν στις έρευνες που διεξάγονται πάνω στις δύο αυτές χρήσεις τις Υπέρυθρης Κάμερας είναι τα παρακάτω:

- ❖ Η αξιοπιστία της μέτρησης μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικούς παράγοντες οι οποίοι πάντα πρέπει να ενσωματώνονται στη διάγνωση ενός συμπεράσματος.
- ❖ Η ακρίβεια της μέτρησης είναι αρκετά υψηλή στην συλλογή αποτελέσματος, καθώς, το προϊόν που λαμβάνεται είναι εικόνα με χαρτογράφηση θερμοκρασίας για κάθε σημείο του σώματος, και όχι απλά η θερμοκρασία αυτού.
- ❖ Η αύξηση θερμοκρασίας ακριβώς μετά την προπόνηση δεν αναμένεται πάντα να είναι μεγαλύτερη καθώς η αύξηση ροής αίματος για την διεκπεραίωση του μηχανικού έργου και κατ' επέκταση η φλεγμονώδης αντίδραση του σώματος μπορεί να προκαλέσει επιμέρους ερεθίσματα για θερμογένεση.
- ❖ Εν συνεχεία του προηγούμενου συμπεράσματος, η φλεγμονώδης αντίδραση μπορεί να πλησιάζει στην κορύφωση της με την πάροδο του χρόνου. Τα δέκα λεπτά ίσως δεν ήταν αρκετά για να προλάβει το σώμα να επανέλθει σε αρχική θερμοκρασία
- ❖ Η αύξηση θερμοκρασίας μετά την λήξη της προπόνησης ποικίλει σε άτομο χωρίς φλεγμονή από άτομο με ήδη υπάρχουσα, ή σε άτομο που έχει προδιάθεση για φλεγμονή. Η ταχύτητα αύξησης θερμοκρασίας σε υγιή και μη υγιή μυ σίγουρα διαφέρει, γι' αυτό η έρευνα χρειάζεται περισσότερο και ποικίλο δείγμα για να διεξαχθεί ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα.

Με βάση τα παραπάνω, η συμβολή της παρούσας έρευνας μπορεί να συμβάλει με τα παρακάτω στοιχεία:

- Μεγαλύτερο δείγμα αθλητών βοηθάει στην διεξαγωγή ακριβέστερου συμπεράσματος.
- Η μακροπρόθεσμη παρακολούθηση φόρτου προπόνησης συγκριτικά με την θερμοκρασία του μυ θα συνέβαλε στην καλύτερη αξιολόγηση αύξησης και μείωσης θερμοκρασιών.
- Τα δέκα λεπτά μετά την λήξη της προπόνησης δεν είναι αρκετά για την αξιολόγηση προδιάθεσης τραυματισμού του εξεταζόμενου μυ, διότι η παρακολούθηση θερμοκρασίας ακόμη και μια ή δυο μέρες μετά ίσως είναι καθοριστική για σωστότερη διάγνωση τραυματισμού.
- Η Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία έχει σημαντικές προοπτικές για να συμβάλει και στις δυο προαναφερόμενες χρήσεις της Υπέρυθρης Κάμερας, όμως η αξιοπιστία της είναι αναμφίβολη λόγω των πολλών παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη. Χρειάζεται αρκετή και πολύπλευρη παρακολούθηση του εξεταζόμενου ατόμου για να διεξαχθεί μια ακριβής

διάγνωση προβλήματος ώστε να χρησιμοποιηθεί για σχεδιασμό κάποιας θεραπείας.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Francis J. Ring, (2014), ‘‘ Pioneering progress in infrared imaging in medicine’’, Quantitative InfraRed Thermography Journal, 11:1, 57-65
- [2]<https://www.britannica.com/biography/William-Herschel/Theory-of-the-evolution-of-stars>
- [3] E. Scott Barr, (1961), ‘‘The infrared pioneers- I. Sir William Herschel’’, Infrared Phys. 1,1
- [4] A. Rogalski, (2012), ‘‘History of infrared detectors’’, Opto-Electronics Review volume 20, pages279–308
- [5] E F J Ring, (2000), ‘‘The discovery of infrared radiation in 1800’’, The Imaging Science Journal, 48:1, 1-8
- [6]<https://www.nachi.org/history-ir.html>
- [7] Vasileios K.Tsolkas, Stilianos A.Tirekoglou, (2008), ‘‘Distribution Network Transformers Measurement Of Temperature Operation’’, Master’s thesis, National Technical University Of Athens, Electrical and Computer Engineering
- [8] <https://elith.gr/yperythris-aktinovolias/>
- [9] User’s Manual, ThermaCAM™ EX300, Flir Systems
- [10][https://todayinsci.com/M/Melloni\\_Macedonio/MelloniMacedonio-RadiantHeat.htm](https://todayinsci.com/M/Melloni_Macedonio/MelloniMacedonio-RadiantHeat.htm)
- [11] E.ScottBarr, (1962), ‘‘Infrared Physics: The Infrared Pioneers—II. Macedonio Melloni’’, Vol. 2, pp. 67-73
- [12] <https://www.famousscientists.org/john-herschel/>
- [13]<https://artsandculture.google.com/exhibit/the-invention-of-photography/fAJij3PkQZd1Lw>
- [14] Simoens F., (2014), ‘‘THz Bolometer Detectors. In: Perenzoni M., Paul D. (eds) Physics and Applications of Terahertz Radiation’’, Springer Series in Optical Sciences, vol 173. Springer, Dordrecht, 978-94-007-3837-9
- [15] Antoni Rogalski, (2002), ‘‘Infrared detectors: an overview. Infrared Physics & Technology’’, Volume 43, Issues 3–5, Pages 187-210
- [16] Hardy, J. D, (1934), ‘‘The radiation of heat from the human body: I. An instrument for measuring the radiation and surface temperature of the skin.’’, The Journal of clinical investigation, 13(4), 593-604.

[17]

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%BB%CE%B1%CE%BD\\_%CF%83%CF%8E%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%BB%CE%B1%CE%BD_%CF%83%CF%8E%CE%BC%CE%B1)

[18] Ακτινοβολία. Βικιπαίδεια; 2020.

[19] N. Siakavellas, (2010), ‘‘ Heat Transfer by Radiation’’, University of Patra, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics

[20] [http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis\\_ergasthrion/askhsh\\_35.pdf](http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis_ergasthrion/askhsh_35.pdf)

[21] Zwinkels J., (2015), ‘‘Light, Electromagnetic Spectrum. In: Luo R. (eds) Encyclopedia of Color Science and Technology.’’, Springer, 978-3-642-27851-8

[22] Richard L. P. Custer (Arup Fire USA), ‘‘ SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition’’, National Fire Protection Association, pages 1-76, 087765-451-4

[23] Maria Kouli, Eleni Heilakou, Panagiotis Theodorakeas, Vasiliki Dritsa, Nikolaos P. Avlelidis, ‘‘ Non-Destructive and Spectroscopic Materials Testing Methods: Theory, Techniques and Applications’’, Kallipos, 978-960-603-498-5

[24] Dafni Konstantinou-Rafail, (2018), ‘‘ Adipose Tissue Detection and Analysis System from Thermal Images’’, Master’s thesis, National Technical University of Patras, Electrical and Computer Engineering

[25] Butcher, G. Tour of the Electromagnetic Spectrum; National Aeronautics and Space Administration, 2010.

[26] Zamanian, A.; Hardiman, C. Electromagnetic Radiation and Human Health: A Review of Sources and Effects. HUMAN HEALTH 7.

[27] <https://www.ea.gr/ep/mobile/emr/yperythro.html>[28] <https://docplayer.gr/47651733-1-5-yperythri-aktinovolgia.html>[29] <https://instrumentation.com/PDFS/EvolutionThermalImagingCameras.pdf>

[30] Zwinkels, J. Light, Electromagnetic Spectrum; 2015; pp 1–8.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_204-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1).

[31] The Light Quantum Theory [http://esperia.iesl.forth.gr/~kafesaki/Modern-Physics/lectures/modern\\_physics2.html](http://esperia.iesl.forth.gr/~kafesaki/Modern-Physics/lectures/modern_physics2.html) (accessed 2021 -07 -16).

[32] Black Body. Wikipedia; 2021.

[33] Chapter 1: Thermal Radiation <https://docplayer.gr/4499621-Kefalaio-1-thermiki-aktinovolgia.html> (accessed 2021 -07 -16).[34] [http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis\\_ergasthrion/askhsh\\_35.pdf](http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis_ergasthrion/askhsh_35.pdf)

- [35] “The Ultraviolet Catastrophe.” Accessed November 6, 2021.  
<http://vergil.chemistry.gatech.edu/notes/quantrev/node3.html>.
- [36]  
[http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF1-%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF1-%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1.pdf)
- [37]  
<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/16306/1/DT2012-0096.pdf>, Accessed 11/6/2021, 4:31:07 PM
- [38] Usamentiaga, R.; Venegas, P.; Guerediaga, J.; Vega, L.; Molleda, J.; Bulnes, F. G. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors* 2014, 14 (7), 12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>.
- [39] “Wien’s Law.” Accessed November 6, 2021.  
[http://hosting.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/wiens\\_law.htm](http://hosting.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/wiens_law.htm).
- [40] Ibarra-Castanedo, C.; Maldague, X. P. V. Infrared Thermography. In *Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems*; Czichos, H., Ed.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2013; pp 175–220. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3_10).
- [41] Vardasca, R.; Magalhaes, C.; Silva, P.; Abreu, P.; Mendes, J.; Restivo, M. T. Biomedical Musculoskeletal Applications of Infrared Thermal Imaging on Arm and Forearm: A Systematic Review. *Journal of Thermal Biology* 2019, 82, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.04.008>.
- [42] Rao, D S Prakash. “Infrared Thermography and Its Applications in Civil Engineering,” n.d., 10.
- [43]  
[https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/11888/3/Nemertes\\_Dafnis%28ECE%29.pdf](https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/11888/3/Nemertes_Dafnis%28ECE%29.pdf), Accessed 11/8/2021.
- [44] Rossignoli, I.; Benito, P. J.; Herrero, A. J. Reliability of Infrared Thermography in Skin Temperature Evaluation of Wheelchair Users. *Spinal Cord* 2015, 53 (3), 243–248. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.212>.
- [45] Infrared Thermography and the Sports Injury Practice. <https://www.dynamicchiropractic.com/mpacms/dc/article.php?id=43160>, (accessed 2021 -11 -08).



- [46] “Χατζηκοσμίδης Κυριάκος | Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία στην Φυσικοθεραπεία.” Accessed November 8, 2021. <https://xatzikosmidis.gr/uperithri-apeikonistiki-thermografia-stin-fusikotherapia/>.
- [47] “Ιατρική θερμογραφία | Sigmahellas.” Accessed November 8, 2021. <https://www.sigmahellas.gr/el/industrial/health-safety/medical-thermography/>.
- [48] Liu, B.; Zhang, H.; Fernandes, H.; Maldague, X. Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP. *Sensors* 2016, 16 (5), 743. <https://doi.org/10.3390/s16050743>.
- [49] Gade, R.; Moeslund, T. B. Thermal Cameras and Applications: A Survey. *Machine Vision and Applications* 2014, 25 (1), 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>.
- [50] MoviTHERM. “What Is Lock-In Thermography?” Accessed November 10, 2021. <https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-lock-in-thermography/>.
- [51] “Template - 01\_chapter\_2.Pdf.” Accessed November 11, 2021. [https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/6170/2/01\\_chapter\\_2.pdf](https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/6170/2/01_chapter_2.pdf).
- [52] Gleiter, A, G Riegert, Th Zweschper, and G Busse. “Ultrasound Lock-in Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging.” *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 49, no. 5 (May 2007): 272–74. <https://doi.org/10.1784/insi.2007.49.5.272>.
- [53] Ida, Nathan, and Norbert Meyendorf, eds. *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. Cham: Springer International Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7>.
- [54] Osiander, Robert, and Jane W.M. Spicer. “Time-Resolved Infrared Radiometry with Step Heating. A Review.” *Revue Générale de Thermique* 37, no. 8 (September 1998): 680–92. [https://doi.org/10.1016/S0035-3159\(98\)80046-9](https://doi.org/10.1016/S0035-3159(98)80046-9).
- [55] Mendioroz, A., R. Celorrio, and A. Salazar. “Ultrasound Excited Thermography: An Efficient Tool for the Characterization of Vertical Cracks” 28, no. 11 (October 2017): 112001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa825a>.
- [56] Rantala, J., D. Wu, and G. Busse. “Lock-In Vibrothermography Applied for Nondestructive Evaluation of Polymer Materials.” *Materials Science Forum* 210–213 (May 1996): 433–38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.210-213.433>.
- [57] Abidin, Ilham Mukriz Zainal. “Eddy Current Thermography: Advances in NDT Fusion Technology for Future Industrial Application,” n.d., 7.

[58] Ring, Francis J. “Pioneering Progress in Infrared Imaging in Medicine.” *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 11, no. 1 (January 2, 2014): 57–65. <https://doi.org/10.1080/17686733.2014.892667>.

[59] nathan. Υπέρυθρη Απεικονιστική Θερμογραφία στην Ιατρική <https://www.medical-lasers.eu/el/blog/%CE%AC%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1/%CF%85%CF%80%CE%AD%CF%81%CF%85%CE%B8%CF%81%CE%B7-%CE%B1%CF%80%CE%B5%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B9%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE>

[60] Szajewska, A. “Development of the Thermal Imaging Camera (TIC) Technology.” *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 172 (January 1, 2017): 1067–72. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.164>.

[61] John, Hannah Eliza, Vachara Niumsawatt, Warren Matthew Rozen, and Iain S. Whitaker. “Clinical Applications of Dynamic Infrared Thermography in Plastic Surgery: A Systematic Review.” *Gland Surgery* 5, no. 2 (April 2016): 122–32. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2227-684X.2015.11.07>.

[62] Theodorakeas, P, E Cheilakou, E Ftikou, and M Kouli. “Passive and Active Infrared Thermography: An Overview of Applications for the Inspection of Mosaic Structures.” *Journal of Physics: Conference Series* 655 (November 16, 2015): 012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012061>.

[63] FLIR: Cooled versus uncooled cameras for long range surveillance. Technical note (2011). FLIR Commercial Vision Systems B.V.

[64] Institute of Semiconductor Physics, 45, prospect Nauky, 03028, Kyiv, Ukraine, e-mail: sizov@dep38.semicond.kiev.ua, and F. F. Sizov. “Infrared Detectors: Outlook and Means.” *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* 3, no. 1 (January 6, 2000): 52–58. <https://doi.org/10.15407/spqeo3.01.052>.

[65] Diakides, Mary, Joseph D. Bronzino, and Donald R. Peterson. *Medical Infrared Imaging: Principles and Practices*. CRC Press, 2012.

[66] <https://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/detector.pdf>, Accessed 12/5/2021, 4:29:43 PM

[67] Rogalski, Antoni. “Infrared Detectors: Status and Trends.” *Progress in Quantum Electronics* 27, no. 2 (January 1, 2003): 59–210. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00024-1).

[68] Sivaranjith. “Photovoltaic Detectors.” *Instrumentation and Control Engineering (blog)*, January 1, 2019. <https://automationforum.co/photovoltaic-detectors/>.

[69] Areej. “What Are Photovoltaic Sensors ?” Instrumentation and Control Engineering (blog), March 29, 2018. <https://automationforum.co/what-are-photovoltaic-sensors/>.

[70] Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems. “Microbolometers - Fraunhofer IMS.” Accessed December 5, 2021. [https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business\\_Units\\_and\\_Core\\_Competencies/IR-Imagers/Technologies/Microbolometers.html](https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business_Units_and_Core_Competencies/IR-Imagers/Technologies/Microbolometers.html).

[71] Kenneth I. Schultz, Michael W. Kelly, Justin J. Baker, Megan H. Blackwell, Matthew G. Brown, Curtis B. Colonero, Christopher L. David, Brian M. Tyrrell, James R. Wey, (2014), “ Digital-Pixel Focal Plane Array Technology”, LINCOLN LABORATORY JOURNAL, VOLUME 20, NUMBER 2

[72] Antoni Rogalsk, (2003), “ Progress in Quantum Electronics”, Volume 27, Issues 2–3, Pages 59-210

[73] Euaggelos Pavlopoulos, (2016), Thesis on “ Technical Manual of Thermal Infrared Testing”, Department of Mechanical Engineering, Higher Education Institution of Pireaus

[74]<http://ericfossum.com/Publications/Papers/On%20chip%20focal%20plane%20image%20processing%20SAIT.pdf>

[75] Nicholas A. Diakides, Joseph D. Bronzino, (2007), “ Medical Infrared Imaging”, CRC Press Taylor and Francis Group, 978-0-8493-9027-2

[76] Rogalski, A. Progress in Focal Plane Array Technologies. Progress in Quantum Electronics 2012, 36 (2–3), 342–473.

[77] Band Gap. Wikipedia; 2021.

[78] Ting, D. Z.-Y.; Soibel, A.; Höglund, L.; Nguyen, J.; Hill, C. J.; Khoshakhlagh, A.; Gunapala, S. D. Chapter 1 - Type-II Superlattice Infrared Detectors. In Semiconductors and Semimetals; Gunapala, S. D., Rhiger, D. R., Jagadish, C., Eds.; Advances in Infrared Photodetectors; Elsevier, 2011; Vol. 84, pp 1–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381337-4.00001-2>

[79][https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM199/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%A1%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%B1%CF%82%20%28%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%B3%CE%B7%CF%84%CE%BF%CF%8D%20%CE%A0.%20%CE%9C%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B7%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B7%2C%20%CE%91%CE%A0%CE%98%29/KEFALAIO-4\\_DETECTORS.pdf](https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM199/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%A1%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%B1%CF%82%20%28%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%B3%CE%B7%CF%84%CE%BF%CF%8D%20%CE%A0.%20%CE%9C%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B7%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B7%2C%20%CE%91%CE%A0%CE%98%29/KEFALAIO-4_DETECTORS.pdf)

[80] Nicolaos D. Stergiou, Ilias S. Nikolaou, (2009), ‘‘Temperature Measurements of Aerial Distribution Substations Using Thermal Imaging’’, Master Thesis, National Technical University of Athens, Electrical and Computer Engineering

[81] Aluminium Gallium Indium Phosphide. Wikipedia; 2021.

[82]

<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/16306/1/DT2012-0096.pdf>, Accessed 11/6/2021, 4:31:07 PM

[83] Ring, E. F. J.; Ammer, K. The Technique of Infra Red Imaging in Medicine. *Thermology International* 2000, 10, 7–14. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1143-4ch1>.

[84] Rossignoli, I., P. J. Benito, and A. J. Herrero. ‘‘Reliability of Infrared Thermography in Skin Temperature Evaluation of Wheelchair Users.’’ *Spinal Cord* 53, no. 3 (March 2015): 243–48. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.212>.

[85] Rossignoli, Isabel, Ismael Fernández-Cuevas, Pedro J. Benito, and Azael J. Herrero. ‘‘Relationship between Shoulder Pain and Skin Temperature Measured by Infrared Thermography in a Wheelchair Propulsion Test.’’ *Infrared Physics & Technology* 76 (February 1, 2016): 251–58. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.02.007>.

[86] Nadel, Ethan R. ‘‘Factors Affecting the Regulation of Body Temperature during Exercise.’’ *Journal of Thermal Biology* 8, no. 1 (January 1, 1983): 165–69. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(83\)90097-9](https://doi.org/10.1016/0306-4565(83)90097-9).

[87] ‘‘Ομοιόσταση.’’ In *Βικιπαίδεια*, April 7, 2021. <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9F%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%8C%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7&oldid=8780988>.

[88] *Thpanorama* - Κάνε τον εαυτό σου καλύτερα σήμερα! ‘‘Τι είναι η ομοιόσταση; / Βιολογία.’’ Accessed January 26, 2022. <https://el.thpanorama.com/articles/biologa/qu-es-la-homeostasis.html>.