



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΑΛΥΠΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΜΕΣΩ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΣΑΡΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2018

Περίληψη

Τη σημερινή εποχή, η αντιμετώπιση της ανίχνευσης και της παρακολούθησης μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι σημαντικό θέμα για μελέτη. Η ικανότητα ενός υλικού να αποτρέπει την μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως για στρατιωτικούς λόγους, καθώς παρέχει κάλυψη σε ανθρώπους, εγκαταστάσεις και οχήματα, από τον εχθρό τη νύχτα.

Σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός της θερμοκαλυπτικής ικανότητας ορισμένων υλικών. Δηλαδή να οριστεί ο βαθμός στον οποίο κάθε υλικό αποτρέπει την διέλευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Επιπλέον, θα μελετηθεί πώς αυτή η ικανότητα του υλικού, επηρεάζεται από ορισμένες παραμέτρους της μετρητικής διάταξης. Συγκεκριμένα, θα μελετηθούν εννέα διαφορετικά υλικά εκ των οποίων τα πέντε προορίζονται για στρατιωτική χρήση, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα είναι κοινά υλικά που τα συναντάμε συχνά στην καθημερινή ζωή. Σκοπός είναι η εύρεση εκείνου του στρατιωτικού υλικού που έχει τον ψηλότερο βαθμό θερμοκαλυπτικής ικανότητας και κατ' επέκταση προσφέρει την καλύτερη κάλυψη, ενώ τα υπόλοιπα υλικά μελετήθηκαν για ακαδημαϊκούς λόγους.

Η θερμοκαλυπτική ικανότητα των υλικών προσδιορίστηκε με χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας. Ο όρος υπέρυθρη θερμογραφία αναφέρεται στην ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, και την "αποτύπωση" αυτής σε ψηφιακή εικόνα. Για την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε μία υπέρυθρη κάμερα. Συγκρίνοντας την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα με την ακτινοβολία που ανιχνεύει η υπέρυθρη κάμερα, όταν έχουμε τοποθετήσει μπροστά από το μέλαν σώμα το υπό εξέταση υλικό, υπολογίστηκε η θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι τα δύο στρατιωτικά υλικά τα οποία είναι σχετικά ομοιογενή, έχουν 100% θερμοκαλυπτική ικανότητα, τα δύο στρατιωτικά υλικά τα οποία έχουν οπές ή διάκενα, έχουν θερμοκαλυπτική ικανότητα γύρω στο 40%, ενώ η θερμοκαλυπτική ικανότητα του τελευταίου είναι περίπου 44%. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα επηρεάζονται ελαφρώς από την απόσταση μεταξύ του εστιακού φακού της θερμοκάμερας και του θερμοκαλυπτικού υλικού καθώς επίσης και από τη ζώνη θερμοκρασιών του μέλανος σώματος.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντινίδη Ευστάθιο, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, για την πολύτιμη συμβολή και για την υπομονή που έδειξε στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον κ. Τσούκα, της εταιρίας Valpak για την προμήθεια των ειδικών υλικών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία .

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την υποστήριξη την οποία μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα.....	4
Πίνακας Σχημάτων	6
Πίνακας Εικόνων	11
Πίνακας Πινάκων	12
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Ιστορική Ανασκόπηση	14
1.2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.....	15
1.3 Βασικοί Νόμοι Μεταφοράς Θερμότητας με Ακτινοβολία	16
1.4 Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος.....	19
1.5 Εκπεμπότητα	22
1.6 Υπέρυθρη Θερμογραφία.....	24
1.7 Υπέρυθρες Κάμερες	25
1.8 Αρχή Λειτουργίας Υπέρυθρης Θερμοκάμερας	30
1.9 Σφάλμα μετρήσεων.....	36
2. Πειραματική Μεθοδολογία	39
2.1 Πειραματική Διάταξη	39
2.2 Εξοπλισμός	41
2.3 Εξεταζόμενα Υλικά	46
2.4 Μέθοδος Υπολογισμού	51
2.5 Μέθοδοι υπολογισμού εκπεμπότητας	54
2.6 Πειραματική Διαδικασία.....	55
2.7 Επεξεργασία Δεδομένων	57
3. Αποτελέσματα.....	58

3.1 Εξέταση Αναλογίας $s - \epsilon_{ob}$	58
3.2 Θερμογράφημα Μέλανος Σώματος.....	61
3.3 Υλικό ΣΚ1	66
3.4 Υλικό ΣΚ 2	72
3.5 Υλικό ΣΚ 5	78
3.6 Υλικό ΣΚ 3 - Υλικό ΣΚ 4.....	84
3.7 Υλικό ΡG – Υλικό ΦΑ.....	86
3.8 Υλικό ΜΥ.....	89
3.9 Υλικό ΠΣ.....	92
4. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	95
Βιβλιογραφία	98
Παράρτημα	99
Matlab Functions and Scripts.....	99

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1:Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και τις ομάδες που χωρίζεται η υπέρυθρη ζώνη	16
Σχήμα 2:Διαδρομές των ροών της θερμικής ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε ένα σώμα συγκεκριμένου πάχους, [7].....	17
Σχήμα 3:Παραδείγματα μέλανος σώματος, [7]	19
Σχήμα 4:Γραφική παράσταση της φασματική εκπομπής μέλανος σώματος σύμφωνα με τον νόμο του Planck, για διαφορετικές θερμοκρασίες, [8].	20
Σχήμα 5: Μηχανισμός δημιουργίας θερμογραφήματος με έναν ανιχνευτή και γραμμικό σαρωτή : 1,οριζόντιος καθρέφτης, 2,φακός, 3,κάθετο καθρέφτη, 4,σημειακός ανιχνευτής, [7]	27
Σχήμα 6:Υπέρυθρη κάμερα με πλέγμα ανιχνευτών (FPA, Focal Plane Array) : 1,φακός, 2,πλέγμα ανιχνευτών, [7].....	27
Σχήμα 7:(a) Κατασκευή ενός pixel: 1,θερμική μόνωση, 2,μεταλλική ακίδα, 3,σταθεροποιητήστου κυκλώματος ROIC, 4,κύκλωμα ROIC, 5, επιφάνεια αντανάκλασης. (b) Διάγραμμα επεξεργασίας σήματος. (c) Εικόνα από ηλεκτρικό μικροσκόπιο, [9]	29
Σχήμα 8:(a) Θερμογράφημα με μη βαθμονομημένους ανιχνευτές. (b) Χαρακτηριστικές των ανιχνευτών κατά την ενεργοποίηση της θερμοκάμερας. (c) Η κοινή χαρακτηριστική των ανιχνευτών μετά την βαθμονόμηση, [10]	31
Σχήμα 9:Οι ροές θερμότητας που φθάνουν στην θερμοκάμερα, [8].....	33
Σχήμα 10:Μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης της ατμόσφαιρας ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας για διάφορες απόστασης μεταξύ κάμερας αντικειμένου, [8].	35
Σχήμα 11:Παρουσίαση της πειραματικής διάταξης με την υπέρυθρη κάμερα, το μέλαν σώμα και τους σταθεροποιητές.....	40

Σχήμα 12: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης	40
Σχήμα 13: Κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας AGEMA 570.	43
Σχήμα 14: Αισθητήρας θερμοκρασίας σχετικής υγρασίας και φωτός HOBO	44
Σχήμα 15: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος με τις κόκκινες κουκίδες να αποτελούν τα εικονοστοιχεία (pixel) που θα συγκρίνουμε για τις διάφορες τιμές του βαθμού εκπεμπότητας ϵ_{ob}	59
Σχήμα 16: Διάγραμμα της έντασης OS των pixel που επιλέξαμε σε συνάρτηση με τον βαθμό εκπομπής του θερμογραφήματος.	60
Σχήμα 17: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος, $l_{cbb}= 0.8m$. Με πράσινη κουκίδα συμβολίζεται το κέντρο βάρους της πλάκας, με κόκκινη το άνω δεξιό της άκρο.	62
Σχήμα 18: Μετατόπιση που έχει σημειωθεί κατά την λήψη των θερμογραφημάτων του μέλανος σώματος στο x άξονα με μπλε κουκίδες και στο y άξονα με κόκκινες κουκίδες σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα.	63
Σχήμα 19: Περιστροφή που έχει σημειωθεί κατά την λήψη των θερμογραφημάτων του μέλανος σώματος σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα, σε μοίρες.	63
Σχήμα 20: Μέσος όρος των θερμογραφημάτων του μέλανος σώματος στα 0.8m, αριστερά όταν δεν έχουν ευθυγραμμιστεί, δεξιά όταν έχουν ευθυγραμμιστεί.	64
Σχήμα 21: Μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας που έχουν τα αντίστοιχα pixel του εκάστοτε θερμογραφήματος σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα 0.8m, αφού έχουν ευθυγραμμιστεί.	65
Σχήμα 22: Μέσος όρος των θερμογραφημάτων του ΣΚ1 στα 0.4m, αριστερά όταν δεν έχουν ευθυγραμμιστεί, δεξιά όταν έχουν ευθυγραμμιστεί, σε μονάδες C°	66
Σχήμα 23: Αριστερά το θερμογράφημα του μέλανος σώματος και δεξιά το θερμογράφημα του ΣΚ1 με $l_{cm}=0.4$, σε μονάδες OS	67

Σχήμα 24: Περιοχή του μέλανος σώματος με ρixel έντασης άνω των 40 βαθμών Κελσίου από την θερμοκρασία του παραβάλλοντος που έχουμε καταγράψει στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρixel στο υλικό 1, στα 0.4m.	68
Σχήμα 25: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας που υπολογίσουμε για κάθε ρixel για το πρώτο υλικό στα 0.4m.....	68
Σχήμα 26: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες ρixel με εύρος 5 βαθμών Κελσίου, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ1, για $l_{cm} = 0.2, 0.4, 0.6m$	69
Σχήμα 27: Παρουσίαση δύο θερμογραφήματων με διαφορετική l_{cm} , αριστερά $l_{cm} = 0.2m$, στα δεξιά $l_{cm} = 0.6m$	71
Σχήμα 28: Τελικό θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα αριστερά και του ΣΚ2 στα δεξιά με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.....	72
Σχήμα 29: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρixel στο ΣΚ2 με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες °C.....	73
Σχήμα 30: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ2, για $l_{cm}= 0.4m$	74
Σχήμα 31: Θερμογραφήματων του ΣΚ2 για $l_{cm}=0.4m$ αριστερά, για $l_{cm}=0.6m$ δεξιά, σε μονάδες OS	75
Σχήμα 32: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρixel στο ΣΚ2 με $l_{cm}=0.6m$, σε μονάδες °C.....	76
Σχήμα 33: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ2, για $l_{cm}=0.6m$	76
Σχήμα 34: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες ρixel με εύρος 5 °C, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ2, για $l_{cm} = 0.4, 0.6m$	77
Σχήμα 35: Τελικό θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα αριστερά και του ΣΚ5 στα δεξιά με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.....	78

Σχήμα 36: : Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρίχει στο ΣΚ5 με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες °C.	79
Σχήμα 37: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ5, για $l_{cm}= 0.4m$	80
Σχήμα 38: Θερμογραφήματων του ΣΚ5 για $l_{cm}=0.4m$ αριστερά, για $l_{cm}=0.6m$ δεξιά, σε μονάδες OS	81
Σχήμα 39: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρίχει στο ΣΚ5 με $l_{cm}=0.6m$, σε μονάδες °C.....	81
Σχήμα 40: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ5, για $l_{cm}= 0.6m$	82
Σχήμα 41: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες ρίχει με εύρος 5 °C, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ5, για $l_{cm}= 0.4,0.6m$	83
Σχήμα 42: Θερμογράφημα του ΣΚ3 σε μονάδες Κελσίου στα αριστερά και σε μονάδες OS στα δεξιά.....	84
Σχήμα 43: Θερμογράφημα του ΣΚ4 σε μονάδες Κελσίου στα αριστερά και σε μονάδες OS στα δεξιά.....	85
Σχήμα 44: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες °C, για $l_{cm}=0.4m$	86
Σχήμα 45: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες OS, για $l_{cm}=0.4m$	87
Σχήμα 46: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες Κελσίου, για $l_{cm}=0.2m$	88
Σχήμα 47: Θερμογράφημα του ΦΑ σε μονάδες Κελσίου, για $l_{cm}=0.6m$	89
Σχήμα 48: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος για $l_{bb}=0.8m$ στα αριστερά και του ΜΥ για $l_{cm}=0.4m$ στα δεξιά, σε μονάδες OS.	90
Σχήμα 49: Θερμογράφημα του ΜΥ $l_{cm}=0.4m$ σε μονάδες Κελσίου.....	91
Σχήμα 50: Θερμογράφημα του ΠΣ $l_{cm}= 0.4m$ σε μονάδες Κελσίου.....	92
Σχήμα 51: Μέσος όρος των θερμογραφήματων του μέλανος σώματος $l_{bb}=0.8m$, στα αριστερά και του ΠΣ δεξιά στα $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.....	93

Σχήμα 52: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40°C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ριχελ στο ΠΣ με $l_{cm}=0.4\text{m}$, σε μονάδες $^{\circ}\text{C}$ 93

Σχήμα 53: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες ριχελ με εύρος 5°C , σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το υλικό ΠΣ στα 0.4m 94

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, με πολύ μικρές οπές πλήρως ομοιογενώς κατανεμημένες βαμμένο με ανοιχτό πράσινο και μπεζ, κωδικό όνομα ΣΚ1	46
Εικόνα 2: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, ομοιογενώς κομμένο, χρώματος χακί, κωδικό όνομα ΣΚ2.....	46
Εικόνα 3: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, χωρίς καμία οπή και κενό, χρώματος σκούρο πράσινο, κωδικό όνομα ΣΚ3	47
Εικόνα 4: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, χωρίς καμία οπή και κενό, χρώματος ανοιχτού μπεζ, κωδικό όνομα ΣΚ4.....	47
Εικόνα 5: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, σε άσπρο χρώμα, ένα μέρος του είναι ομοιογενώς κομμένο, ενώ το υπόλοιπο είναι ατόφιο, κωδικό όνομα ΣΚ5	48
Εικόνα 6: Ένα ορθογώνιο κομμάτι plexiglass, διαφανές, κωδικό όνομα PG.....	48
Εικόνα 7: Ένα ορθογώνιο φύλλο αλουμινίου, κωδικό όνομα ΦΑ.....	49
Εικόνα 8: Ένα μαύρο κομμάτι ύφασμα από 100% βαμβάκι, κωδικό όνομα ΜΥ	49
Εικόνα 9: Μία πλαστική σακούλα σκουπιδιών, χρώματος σκούρο γκρίζο, κωδικό όνομα ΠΣ ..	50

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Το πεδίο όρασης στον οριζόντιο άξονα Hor FOV και το στιγμιαίο πεδίο όρασης IFOV για διάφορες αποστάσεις (object distance) για τους διαθέσιμους φακούς(lens).	44
Πίνακας 2: Πίνακας ΜΘΙ των εννέα υλικών σε σχέση με την απόσταση που έχουν από την κάμερα.	97
Πίνακας 3: Καταγραφή των m-files που χρησιμοποιήσαμε για τις αναλύσεις μας.	99

1. Εισαγωγή

Η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα μπορεί να ανιχνευτεί και να αξιοποιηθεί για πολλαπλούς σκοπούς. Η ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα αντικείμενο και η αποτύπωση αυτής σε θερμική εικόνα, ονομάζεται θερμογραφία. Μία συσκευή που ανιχνεύει και αποτυπώνει σε θερμική εικόνα την υπέρυθρη ακτινοβολία, που εκπέμπει ένα αντικείμενο είναι υπέρυθρη θερμοκάμερα. Η θερμογραφία έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Στην βιομηχανία αξιοποιείται ως μια εύκολη, γρήγορη αλλά χαμηλής ακριβείας μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου. Συγκεκριμένα, όταν ένα αντικείμενο έχει μία εσωτερική ανομοιογένεια, αυτή επιφέρει στη συγκεκριμένη περιοχή μεταβολή στο βαθμό αγωγής θερμότητας. Το αντικείμενο θερμαίνεται ή ψύχεται σε θερμοκρασία διαφορετική από το περιβάλλον και καθώς το σώμα έρχεται σε θερμοκρασιακή ισορροπία με το περιβάλλον, λαμβάνονται συνεχόμενα θερμογραφήματα από τα οποία γίνεται εμφανές το σημείο ανομοιομορφίας του αντικείμενου, [1]. Ακόμα, η υπέρυθρη θερμογραφία επιτρέπει την παρακολούθηση αντικειμένων όπου με γυμνό μάτι δεν είναι δυνατόν. Αυτό γίνεται εφικτό εγκαθιστώντας στην υπέρυθρη κάμερα ειδικά φίλτρα που της επιτρέπουν την ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος ή συγκεκριμένου εύρους,[2].

Στον τομέα της ιατρικής η υπέρυθρη θερμογραφία επιτρέπει τον εύκολο και γρήγορο εντοπισμό ατόμων με αυξημένη θερμοκρασία (πυρετό). Χαρακτηριστικά έχει χρησιμοποιηθεί σε αεροδρόμια ώστε να περιοριστεί η εξάπλωση του ιού της γρίπης των πτηνών, [3].

Στον στρατιωτικό τομέα, αξιοποιούν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα, για την ανίχνευση στόχων, κυρίως την περίοδο της νύχτας, [4]. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων για την αποτροπή ανίχνευσης της υπέρυθρη ακτινοβολίας, όπως την χρήση ειδικών βαφών για την μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα σώμα, [5]. Χαρακτηριστικά έχουν αναπτυχθεί πύραυλοι που μπορούν να ανιχνεύσουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπουν τα καυσαέρια των ελικοπτέρων. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη και εγκατάσταση ειδικών αναδευτήρων αέρα-καυσαερίου στο σύστημα εξάτμισης των ελικοπτέρων, για να μειωθεί η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων του, [6].

Με την ίδια λογική, θα μελετηθεί η ικανότητα ορισμένων υλικών-υφασμάτων, να εμποδίσουν την μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο βαθμός στον οποίο ένα υλικό εμποδίζει την μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, περιγράφεται με τον όρο θερμοκαλυπτική ικανότητα. Η μελέτη της θερμοκαλυπτικής ικανότητας υλικών-υφασμάτων είναι ενδιαφέρουσα, σε σχέση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για θερμοκάλυψη, διότι ένα υλικό-ύφασμα απαιτεί ελάχιστο χρόνο για εγκατάσταση, δεν απαιτείται αλλαγή του υλικού του περιβλήματος του αντικειμένου, ενώ παράλληλα προσφέρει κάλυψη στο ορατό φως. Για να υπολογιστεί η θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού-υφάσματος μετρήθηκε η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα, και η ακτινοβολία που ανιχνεύει η υπέρυθρη κάμερα, όταν έχει τοποθετηθεί μπροστά από το μέλαν σώμα το υπό εξέταση υλικό-ύφασμα.

Η εργασία ακολουθεί την εξής ροή. Στο πρώτο κεφάλαιο, θα αναλυθούν οι βασικές αρχές και οι φυσικοί νόμοι που πρέπει να κατανοήσει ο αναγνώστης. Συγκεκριμένα, θα αναλυθούν η υπέρυθρη ακτινοβολία, το θεωρητικό μέλαν σώμα και η αρχή λειτουργίας της υπέρυθρης κάμερας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται η πειραματική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και η λογική του πειράματος. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος, μαζί με τον απαραίτητο σχολιασμό τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο, διατυπώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα του πειράματος αλλά και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση του.

1.1 Ιστορική Ανασκόπηση

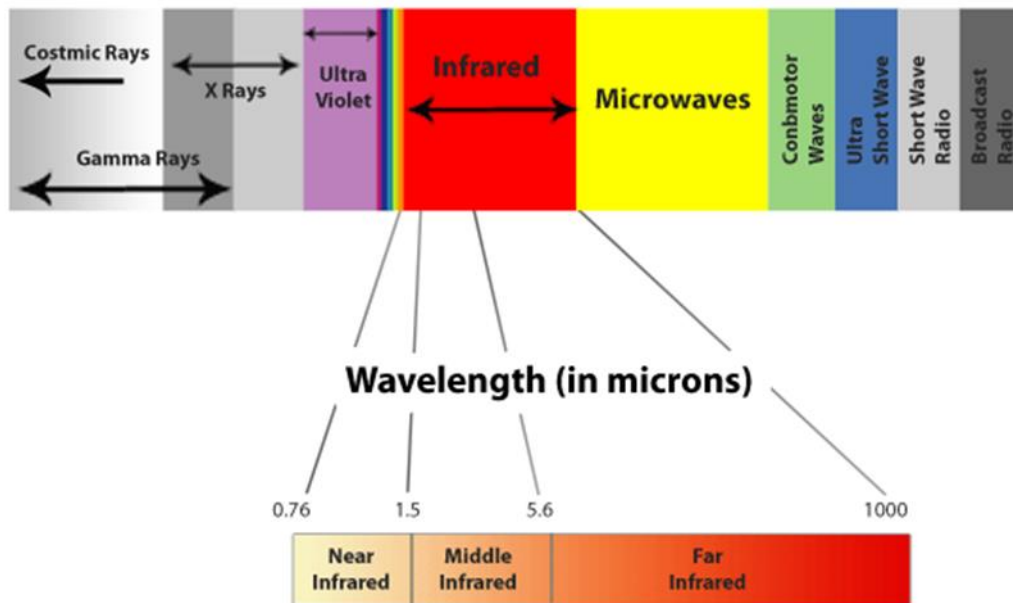
Το πείραμα που πραγματοποίησε ο Frederick William Herschel (1738-1822) το έτος 1800 οδήγησε στην ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο F.W. Herschel ήταν Βρετανός αστρονόμος και συνθέτης, ο οποίος με το πείραμα έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη της έρευνας στο υπέρυθρο φάσμα. Στο πείραμα του παρατήρησε τις θερμαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες σχετίζονται με τις διαφορετικές φασματικές κλίμακες της ακτινοβολίας του ήλιου. Στο πείραμα του, αφού διαίρεσε την ακτινοβολία του ήλιου σε ένα γυάλινο πρίσμα, τοποθέτησε μαύρα δοχεία από ευαίσθητα θερμόμετρα υδραργύρου κατά μήκος του φάσματος που προέκυψε. Η ενέργεια των ακτινών απορροφήθηκε από τα δοχεία και τα θερμόμετρα έδειξαν θερμοκρασίες υψηλότερες από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Μελετώντας τα αποτελέσματα του πειράματός του, ο Herschel παρατήρησε ότι οι μετρήσεις των θερμόμετρων που βρίσκονται

πέρα από το κόκκινο άκρο του ορατού φάσματος ήταν υψηλότερες από εκείνες των θερμόμετρων που βρίσκονται εντός της ορατής περιοχής.

Αρχικά, ο Herchel ονόμασε τις ακτίνες αυτές ως 'αόρατες ακτίνες', αργότερα ονομάστηκαν υπέρυθρες (infrared), το οποίο σημαίνει, υπό του ερυθρού, πιο πέρα από την κόκκινο. Διότι η υπέρυθρη ακτινοβολία στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, ξεκινάει αμέσως μετά το μήκος κύματος, που αντιστοιχεί στην ορατή κόκκινη ακτινοβολία. Περαιτέρω πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από άλλους επιστήμονες, έδειξαν ότι οι υπέρυθρες ακτινοβολίες, διέπονται από τους ίδιους φυσικούς με τις ορατές ακτίνες.

1.2 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίστηκε αυθαίρετα σε ένα αριθμό περιοχών ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τις οποίες ονομάζουμε ζώνες. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει καμία βασική διαφορά μεταξύ των ακτινοβολιών που βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες καθώς όλες διέπονται από τους ίδιους νόμους με τη μόνη διαφορά τους να είναι το μήκος κύματος λ . Στο Σχήμα 1, παρατηρείται ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία συνορεύει με την ορατή ζώνη, ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος της, συνορεύει με την ζώνη των ραδιοκυμάτων και συγκεκριμένα των μικροκυμάτων.



Σχήμα 1:Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και τις ομάδες που χωρίζεται η υπέρυθρη ζώνη

Η υπέρυθρη ζώνη συχνά χωρίζεται σε 3 μικρότερες ζώνες, των οποίων τα όρια τα επιλέγονται αυθαίρετα. Η οποία αποτελείται από την 'near infrared' ζώνη (0.75 - 1.5 μm), την 'middle infrared' ζώνη (1.5 - 5.6 μm) και την 'far infrared' ζώνη (5.6 - 1000 μm). Στο συγκεκριμένο σύγγραμμα, ορίστηκαν ακόμη δύο περιοχές η 'short wave length' ζώνη (2 - 5 μm) και η 'long wave length' ζώνη (7.5 - 14 μm), και ο ρόλος τους θα αναλυθεί αργότερα περαιτέρω.

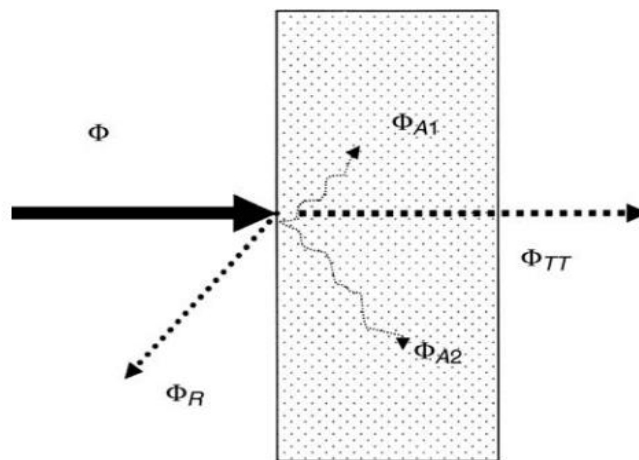
1.3 Βασικοί Νόμοι Μεταφοράς Θερμότητας με Ακτινοβολία

Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 0 βαθμούς Κέλβιν, την απόλυτο μηδέν, κάθε σώμα εκπέμπει θερμότητα ή αλλιώς, θερμική ακτινοβολία. Η θερμική ακτινοβολία είναι ένα είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που συναντάμε συνέχεια στη φύση. Η υπέρυθρη ακτινοβολία λοιπόν αποτελεί ένα μέσο μεταφοράς ενέργεια. Όποτε θα χρειαστεί να παρουσιάσ τους βασικούς νόμους της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία για να την κατανοήσουμε καλύτερα.

Έστω ότι μία ποσότητα θερμικής ακτινοβολίας πέφτει στην επιφάνεια ενός σώματος ορισμένου πάχους, τότε συμβολίζουμε την ροή θερμότητας με Φ (ποσότητα θερμότητας σε μια μονάδα χρόνου) (W), την ροή που απορροφάται από το σώμα με Φ_A (W), την ροή που ανακλάται

από το σώμα με Φ_R (W) και την ροή θερμότητας που μεταδίδεται μέσα από το σώμα με Φ_{TT} (W), βλέπε Σχήμα 2. Αναλόγως του ποσοστού που απορροφάται μεταδίδεται και ανακλάται μπορούμε να εισάγουμε τους ακόλουθους συντελεστές για να χαρακτηρίσουμε το σώμα μας: συντελεστής απορρόφησης A, συντελεστής ανάκλασης R και συντελεστής μετάδοσης TT , οι οποίοι ορίζονται με τους παρακάτω λόγους :

$$A = \frac{\Phi_A}{\Phi}, \quad R = \frac{\Phi_R}{\Phi}, \quad TT = \frac{\Phi_{TT}}{\Phi} \quad (1)$$



Σχήμα 2: Διαδρομές των ροών της θερμικής ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε ένα σώμα συγκεκριμένου πάχους, [7]

Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης ενέργειας , οι παραπάνω συντελεστές πρέπει να αθροίζονται στην μονάδα :

$$A + R + TT = 1 \quad (2)$$

Οι συντελεστές εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που δέχονται, οπότε ορίζουμε τους μονοχρωματικούς συντελεστές απορρόφησης , ανάκλασης και μετάδοσης :

$$A_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda A}}{\Phi_\lambda}, \quad R_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda R}}{\Phi_\lambda}, \quad TT_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda TT}}{\Phi_\lambda} \quad (3)$$

Όπου το άθροισμα των τριών αυτών συντελεστών πρέπει να ισούνται με την μονάδα :

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} + TT_{\lambda} = 1 \quad (4)$$

Για αδιαφανή στοιχεία όπου $TT_{\lambda} = 0$, η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε :

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} = 1 \quad (5)$$

Οι τιμές αυτών των συντελεστών εξαρτώνται από το υλικό που είναι φτιαγμένο το εκάστοτε σώμα, την κατάσταση της επιφάνειας του και από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται.

Τώρα ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, τότε το σώμα όπως έχουμε πει, ακτινοβολεί ενέργεια. Τον λόγο της ακτινοβολούμενης ενέργειας $d\Phi$ (W) που εκπέμπεται από ένα πολύ μικρό στοιχείο μίας επιφάνειας του σώματος, προς το εμβαδόν της επιφάνεια αυτής dF (m^2), ονομάζεται ακτινοβολούμενη έξοδος ή αλλιώς εκπομπή :

$$M(\lambda, T) = \frac{d\Phi(\lambda, T)}{dF}, W m^{-2} \quad (6)$$

Μονοχρωματική εκπομπή αντίστοιχα ονομάζουμε τον λόγο της ακτινοβολούμενης εξόδου προς μήκος κύματος της ακτινοβολίας :

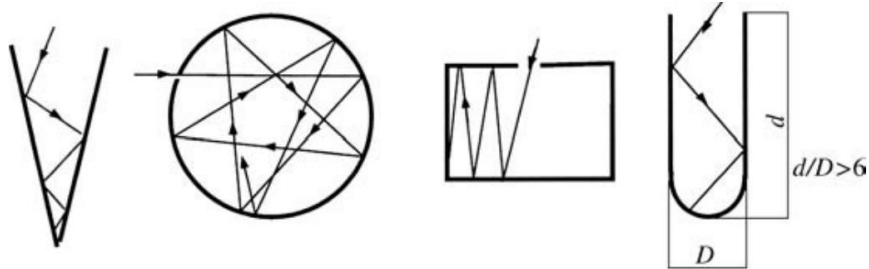
$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{d\lambda}, W m^{-2} \mu m^{-1} \quad (7)$$

1.4 Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος

Έχοντας ορίσει του συντελεστές απορρόφησης ανάκλασης και μετάδοσης της ακτινοβολίας για την επιφάνεια ενός σώματος είναι πολύ εύκολο να ορίσουμε το θεωρητικό μέλαν σώμα. Ως μέλαν σώμα ορίζουμε ένα σώμα το οποίο απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσκρούει πάνω του, για κάθε μήκος κύματος. Οπότε οι συντελεστές παίρνουν τις τιμές που φαίνονται στη σχέση (8).

$$A = 1, \quad R = 0, \quad TT = 0 \quad (8)$$

Η κατασκευή ενός μέλανος σώματος είναι αρκετά απλή, μπορούμε να δημιουργήσουμε μία κοιλότητα μέσα σε ένα σώμα ώστε να μην μπορεί να εισέλθει καθόλου φως εκτός από μία πολύ μικρή οπή. Έτσι όποια ακτινοβολία εισέλθει στην τρύπα ανακλάτε επανειλημμένα μέσα στην κοιλότητα ώσπου να απορροφηθεί η περισσότερη, με ένα πολύ μικρό ποσοστό να έχει διαφύγει. Μερικά παραδείγματα μέλανος σώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Παραδείγματα μέλανος σώματος, [7]

Τώρα το μέλαν σώμα ξεχωρίζει και για τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί. Η φασματική ακτινοβολουμένη έξοδος (εκπομπή) για ένα μέλαν σώμα δίνεται από τον νόμο του Planck:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T} \right) - 1} \right]}, \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \quad (9)$$

όπου c : η ταχύτητα του φωτός $= 3 \cdot 10^8$ m/sec

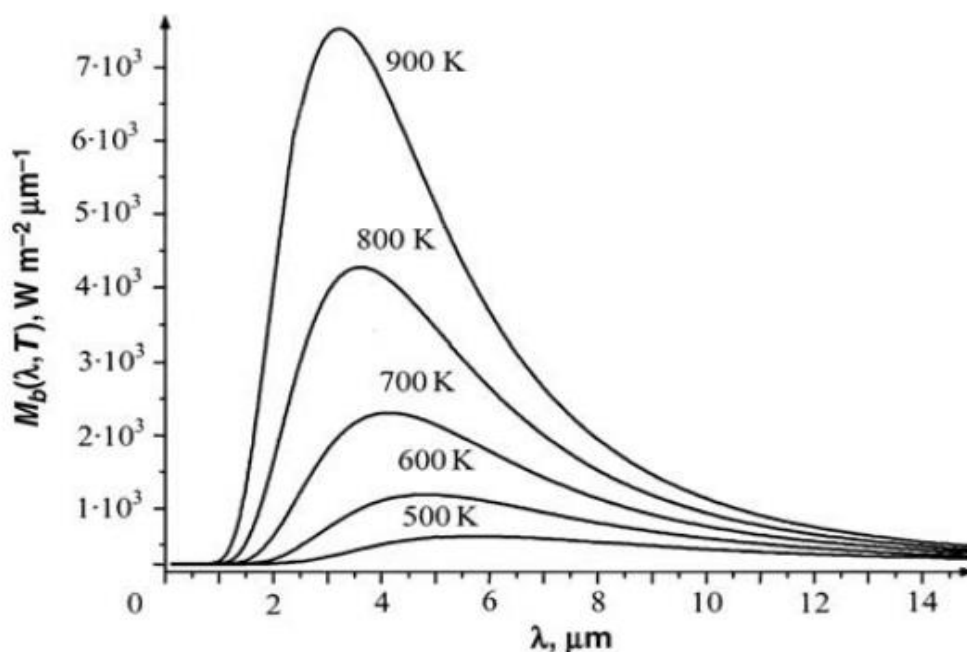
h : η σταθερά του Planck $= 6.6 \cdot 10^{-34}$ J sec

k : η σταθερά του Boltzmann $= 1.4 \cdot 10^{-23}$ J / K

T : η θερμοκρασία του μέλανος σώματος

λ : το μήκος κύματος σε m

Η παραπάνω σχέση μας περιγράφει την φασματική κατανομή της εκπομπής για ένα μέλαν σώμα. Παρακάτω παρουσιάζετε η γραφική παράσταση της τελευταίας σχέσης για διάφορες θερμοκρασίες. Παρατηρούμε ότι η γραφική αναπαράσταση του νόμου του Planck, Σχήμα 4, παράγει μία οικογένεια καμπυλών. Ακολουθώντας οποιαδήποτε καμπύλη, η εκπομπή είναι μηδέν για $\lambda=0$, μετά η εκπομπή αυξάνεται απότομα ως μία μέγιστη τιμή, για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος το οποίο ονομάζουμε λ_{\max} . Τέλος όταν περάσει αυτό το σημείο αυτό η εκπομπή συγκλίνει προς το μηδέν, καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος. Ακόμα παρατηρούμε ότι όσο πιο υψηλή θερμοκρασία, τόσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος στο οποίο πετυχαίνουμε την μέγιστη εκπομπή, δηλαδή μικραίνει η τιμή του λ_{\max} .



Σχήμα 4:Γραφική παράσταση της φασματική εκπομπής μέλανος σώματος σύμφωνα με τον νόμο του Planck, για διαφορετικές θερμοκρασίες, [8].

Μπορούμε για ευκολία να ορίσουμε δύο νέες σταθερές την $c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2$ και την $c_2 = h \cdot c / k$, οπότε μπορούμε να ξαναγράψουμε τον νόμο του Planck ως εξής:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]}, W m^{-2} \mu m^{-1} \quad (10)$$

Ο νόμος του Planck προσδιορίζει την ακτινοβολούμενη έξοδο (εκπομπή) $M_b(\lambda, T)$ ενός μέλανος σώματος για συγκεκριμένο μήκος λ κύματος και θερμοκρασία σώματος T . Πολλές φορές όμως υπάρχει η ανάγκη να καθορίσουμε την θερμοκρασία του μέλανος σώματος T για μία εκπομπή $M_b(\lambda)$ που μετρήσαμε και για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ .

Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε, λύνοντας τον νόμο του Planck ως προς την θερμοκρασία T :

$$T = \frac{c_2}{\ln \left[\frac{c_1 + \lambda^5 \cdot M_b(\lambda)}{\lambda^5 \cdot M_b(\lambda)} \right]} \lambda, K \quad (11)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (11) ως προς το μήκος κύματος λ και εξισώνοντας την με το μηδέν προκύπτει ότι :

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m K \quad (12)$$

Η τελευταία εξίσωση ονομάζεται νόμος μετατόπισης του Wien και καθορίζει το μήκος κύματος λ_{max} , για το οποίο η εκπομπή του μέλανος σώματος φτάνει στο μέγιστο της, για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία T . Παρατηρούμε ότι εάν λύσουμε την παραπάνω σχέση ως προς το λ_{max} και αυξήσουμε την θερμοκρασία T τότε μειώνεται η τιμή του μήκους κύματος για την οποία πετυχαίνουμε την μέγιστη εκπομπή, όπως και είδαμε προηγουμένως στο Σχήμα 4. Το παραπάνω φαινόμενο το παρατηρούμε όταν θερμαίνουμε σε υψηλές θερμοκρασίες ένα μέταλλο, τότε αυτό αρχίζει να 'κοκκινίζει' διότι έχει μειωθεί τόσο το μήκος κύματος για το οποίο πετυχαίνουμε μέγιστη εκπομπή (λ_{max}), που έφθασε κοντά στα σύνορα με την ορατή ζώνη όπου βρίσκουμε το κόκκινο χρώμα. Εάν συνεχίσουμε να αυξάνουμε την θερμοκρασία στο μέταλλο τότε η τιμή λ_{max} θα μειωθεί περαιτέρω με αποτέλεσμα το μέταλλο να φαίνεται πορτοκαλί.

Ολοκληρώνοντας τώρα την εξίσωση (10) από $\lambda=0$ έως $\lambda= \infty$ προκύπτει ότι :

$$M_b(T) = \left(\frac{\pi^4 \cdot c_1}{15 \cdot c_2^4} \right) \cdot T^4 = \sigma_0 \cdot T^4, Wm^{-2} \quad (13)$$

όπου $\sigma_0 = (\pi^4 \cdot c_1 / 15 \cdot c_2^4)$

Η σχέση (13) ονομάζεται νόμος του Stefan-Boltzmann και καθορίζει την συνολική εκπομπή του μέλανος σώματος για όλο το εύρος του μήκους κύματος, όταν το σώμα βρίσκεται σε μία θερμοκρασία T και δηλώνει ότι η ολική εκπομπή ενός μέλανος σώματος είναι ανάλογη της θερμοκρασίας υψωμένη στην τετάρτη. Γραφικά, είναι το εμβαδόν κάτω από μία καμπύλη του Planck σταθερής θερμοκρασίας, [7].

1.5 Εκπεμπότητα

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε πώς υπολογίζουμε την ακτινοβολία που εκπέμπει το θεωρητικό μέλαν σώμα. Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα τυχαίο σώμα. Αρχικά πρέπει να ορίσουμε μια νέα σημαντική παράμετρο την εκπεμπότητα, με την οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς μαζί της. Η εκπεμπότητα μίας επιφάνειας, επηρεάζει την ποσότητα της ενέργειας που εκπέμπει. Εάν θέλαμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία μίας επιφάνειας η οποία έχει χαρακτηρισικά μέλανος σώματος τότε θα χρησιμοποιούσαμε τον νόμο του Planck σχέση (9). Όμως κάτω από πραγματικές συνθήκες ο νόμος του Planck αποτελεί μόνο μία εκτίμηση της ακτινοβολουμένης ενέργειας, διότι κανένα σώμα στην φύση δεν αποτελεί τέλειο μέλαν σώμα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι όλα τα φυσικά σώματα έχουν περιορισμένη απορροφητική ικανότητα , οπότε ο νόμος του Planck δεν ισχύει. Οπότε είναι αναγκαίο να ορίσουμε μία νέα παράμετρο η οποία να καθορίζει την εκπομπή μίας επιφάνειας ενός σώματος, σε σχέση με την εκπομπή που θα είχαμε από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία.

Ορίζουμε λοιπόν ότι η ολική εκπεμπότητα ε ενός σώματος, για όλο το φάσμα της ακτινοβολίας, είναι ο λόγος της ολικής ακτινοβολουμένης εξόδου $M(T)$ της επιφάνεια του σώματος, προς την ολική ακτινοβολουμένη έξοδο $M_b(T)$ ενός μέλανος σώμα που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία:

$$\varepsilon = \frac{M(T)}{M_b(T)} \quad (14)$$

Μονοχρωματική εκπεμπότητα ε_λ είναι ο λόγος της μονοχρωματικής εκπομπής $M_\lambda(\lambda, T)$ ενός σώματος σε ένα μήκος κύματος λ , προς την μονοχρωματικά εκπομπή $M_{b\lambda}(\lambda, T)$ ενός μέλανος σώματος στο ίδιο μήκος κύματος και στην ίδια θερμοκρασία:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda(T)}{M_{b\lambda}(T)} \quad (15)$$

Αναλόγως της εκπεμπότητας της επιφάνειας του σώματος, τα σώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

$\varepsilon_b = 1$, $\varepsilon_b(\lambda, T) = 1$, μέλαν σώμα

$0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, όχι μέλαν σώμα

Και τα σώματα που δεν θεωρούνται ως μέλανα σώμα μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω ως εξής:

$0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, $\varepsilon(\lambda, T) = \text{σταθ.}$, $\varepsilon(\alpha) = \text{μεταβλ.}$, γκρίζο σώμα

$0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$, $\varepsilon(\lambda, T) = \text{μεταβλ.}$, $\varepsilon(\alpha) = \text{μεταβλ.}$, όχι γκρίζο σώμα

όπου α είναι η γωνία εκπομπής της ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με τον νόμο του Kirchoff, για κάθε υλικό η εκπεμπότητα και η απορροφητικότητα ενός σώματος είναι ίσες για κάθε θερμοκρασία και μήκος κύματος , οπότε :

$$\varepsilon_\lambda = A_\lambda \quad (16)$$

Για σώματα με πολύ λείες επιφάνειες η εκπεμπότητα τους φθάνει στο 0 διότι η συντελεστής ανάκλασης είναι πολύ υψηλός, οπότε για ένα τέλειο ανακλώμενο σώμα (καθρέφτης) έχουμε $R_\lambda = 1$.

Ακόμα για ένα γκρίζο σώμα , η εξίσωση του Boltzmann γίνεται:

$$M(T) = \varepsilon * \sigma_0 * T^4, W m^{-2} \quad (17)$$

Η σχέση (17) δηλώνει ότι η ολική ακτινοβολούμενη έξοδος ενός γκρίζου σώματος, είναι ίδια με αυτή ενός μέλαν σώματος που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία, μειωμένη όμως κατά ένα ποσοστό $1-\varepsilon$, [7].

1.6 Υπέρυθρη Θερμογραφία

Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ακτινοβολία που τα αντικείμενα γύρο μας εκπέμπουν ώστε να εξάγουμε χρήσιμες πληροφορίες. Συγκεκριμένα σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με την υπέρυθρη θερμογραφία. Γενικά ο όρος θερμογραφία αναφέρεται στο σύνολο των τεχνικών καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός αντικειμένου. Η υπέρυθρη θερμογραφία αφορά την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου, η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, και την “αποτύπωση” αυτής σε θερμική εικόνα (μέσω συστημάτων υπέρυθρης απεικόνισης). Αυτή η απεικόνιση της θερμοκρασίας της επιφάνειας ενός αντικειμένου, ονομάζεται θερμογράφημα. Συνήθως στην υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιούμε υπέρυθρες κάμερες. Η υπέρυθρη κάμερα αποτελεί ένα μέσο ανίχνευσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η υπέρυθρη κάμερα μεταφράζει την υπέρυθρη ακτινοβολία που δέχεται από την επιφάνεια του αντικειμένου σε θερμοκρασία, δίνοντας μας έτσι το θερμογράφημα μίας επιφάνειας ενός αντικειμένου. Η υπέρυθρη θερμογραφία, έχει ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα χρήσης και η ιδιότητα της να ανιχνεύει υπέρυθρη ακτινοβολία θα μας βοηθήσει να δώσουμε απάντηση στο βασικό ερώτημα αυτής της εργασίας.

Οι εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι ιδιαίτερα σημαντικές, δημιουργώντας έτσι την επιτακτική ανάγκη χρήσης υπέρυθρων καμερών, ως μέσο ανίχνευσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας και εξαγωγή θερμογραφημάτων, για την επίλυση διάφορων προβλημάτων. Χρησιμοποιείται στα κτίρια για την αποτύπωση ενεργειακών απωλειών από το κέλυφος τους, τον εντοπισμό υγρασίας και θερμογεφυρών και έλεγχο απόδοσης της μόνωσης. Την χρησιμοποιούμε πολύ συχνά στην βιομηχανία διότι δίνει την δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας σημείων τα οποία δεν μπορούν να προσεγγιστούν με αισθητήρες θερμοκρασίας και συμβάλει στον έλεγχο της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και στην αποφυγή ξαφνικών βλαβών. Ενδεικτικά, με την υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να ελεγχθεί υπό τάση ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, άξονες, έδρανα και γενικότερα τμήματα που περιστρέφονται ή δονούνται, καυστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, λέβητες, φλογοθάλαμοι, καπνοδόχοι, δίκτυο ατμού, δεξαμενές, αεραγωγοί. Γενικά αποτελεί μια γρήγορη φθηνή αλλά όχι πολύ ακριβής, μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου. Ακόμα οι δυνατότητες τις αξιοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς όπως τον εντοπισμό του εχθρού την περίοδο της νύχτας. Μέχρι και στην γεωργία χρησιμοποιείται για το εύκολο και γρήγορο εντοπισμό περιοχών όπου είναι αναγκαία η χρήση φυτοφαρμάκων και λιπάσματος.

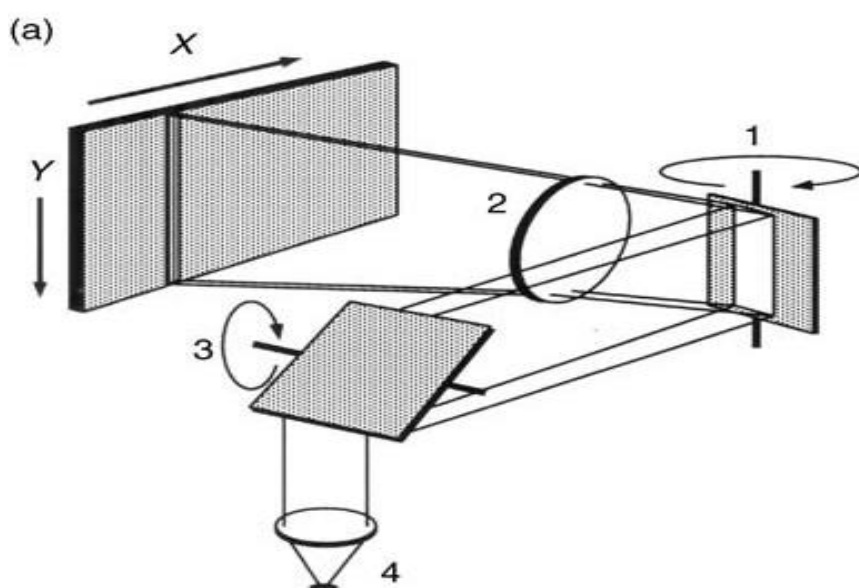
Αυτό που πρέπει να κρατήσουμε από αυτήν την ενότητα είναι, ότι για να εξάγει μια υπέρυθρη κάμερα ένα θερμογράφημα, αρχικά πρέπει να ανιχνεύσει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια του αντικειμένου. Σ αυτήν την ιδιότητα θα στηριχτούμε για να δώσουμε απάντηση στο πρόβλημα μας. Στις παρακάτω ενότητες ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί μια υπέρυθρη κάμερα ή θερμοκάμερα.

1.7 Υπέρυθρες Κάμερες

Οι υπέρυθρες κάμερες όπως μπορούμε να αντιληφθούμε και από το όνομα τους, είναι οι κάμερες που λειτουργούν με την υπέρυθρη ακτινοβολία και μπορούν κατηγοριοποιηθούν βάσει πολλών κριτηρίων. Ένα από αυτά είναι το εύρος του μήκος κύματος στο οποίο λειτουργούν. Υπάρχουν δύο ζώνες μήκους κύματος στις οποίες λειτουργούν οι θερμοκάμερες ,η μία είναι ανάμεσα στα 2 και 5 μm (short-wave band) και η άλλη ανάμεσα στα 7.5 και 14 μm (long-wave band), οπότε έχουμε αντίστοιχα τις short-wave (SW) και long-wave (LW) μηχανές.

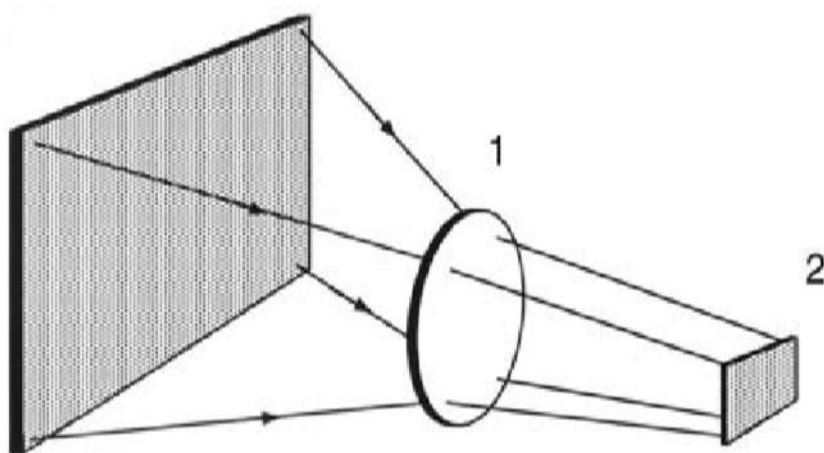
Ακόμη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το τύπο του ανιχνευτή που χρησιμοποιούν. Υπάρχουν κάμερες με ανιχνευτές που χρειάζονται ψύξη, η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ψυγείου ενσωματωμένο στην κάμερα και υπάρχουν ανιχνευτές οι οποίοι δεν χρειάζονται ψύξη και λειτουργούν στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι κατασκευαστές προσφέρουν κάμερες που χρησιμοποιούνται, για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας (measurement IR cameras), αλλά και κάμερες που δείχνουν μόνο έναν κατά προσέγγιση χρωματικό χάρτη του πεδίου θερμοκρασίας (imaging IR cameras), οι οποίες είναι φθηνότερες και χρησιμοποιούνται κυρίως στην φύλαξη των συνόρων ή στην νυχτερινή περιπολία από την αστυνομία .

Οι υπέρυθρες κάμερες, δεν έχουν όλες τον ίδιο αριθμό ανιχνευτών , μερικές έχουν μονάχα έναν ανιχνευτή , άλλες μία γραμμή από ανιχνευτές και οι πιο σύγχρονες έχουν ένα πλέγμα από ανιχνευτές .Οι κάμερες με έναν ανιχνευτή, ή με μια σειρά ανιχνευτών, για να δημιουργήσουν την εικόνα του θερμοκρασιακού πεδίου χρησιμοποιούν ένα οπτικομηχανικό σύστημα σάρωσης κατασκευασμένο από περιστρεφόμενους καθρέφτες και πρίσματα. Έτσι η εικόνα της παρατηρούμενης επιφάνειας κατασκευάζεται σημείο σημείο ή γραμμή γραμμή. Η ακτινοβολία που φτάνει στον ανιχνευτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα ανάλογα με την ακτινοβολούμενη ένταση. Τα σήματα ενισχύονται και μεταδίδονται συγχρόνως με μια κίνηση σάρωσης σε μια οθόνη , όπου η εικόνα πεδίου θερμοκρασίας (θερμογράφημα) δημιουργείται. Αυτή η αρχή λειτουργίας ήταν χρήσιμη για 20 χρόνια μετά από την πρώτη κάμερα.



Σχήμα 5: Μηχανισμός δημιουργίας θερμογραφήματος με έναν ανιχνευτή και γραμμικό σαρωτή : 1,οριζόντιος καθρέφτης, 2,φακός, 3,κάθετο καθρέφτη, 4,σημειακός ανιχνευτής, [7]

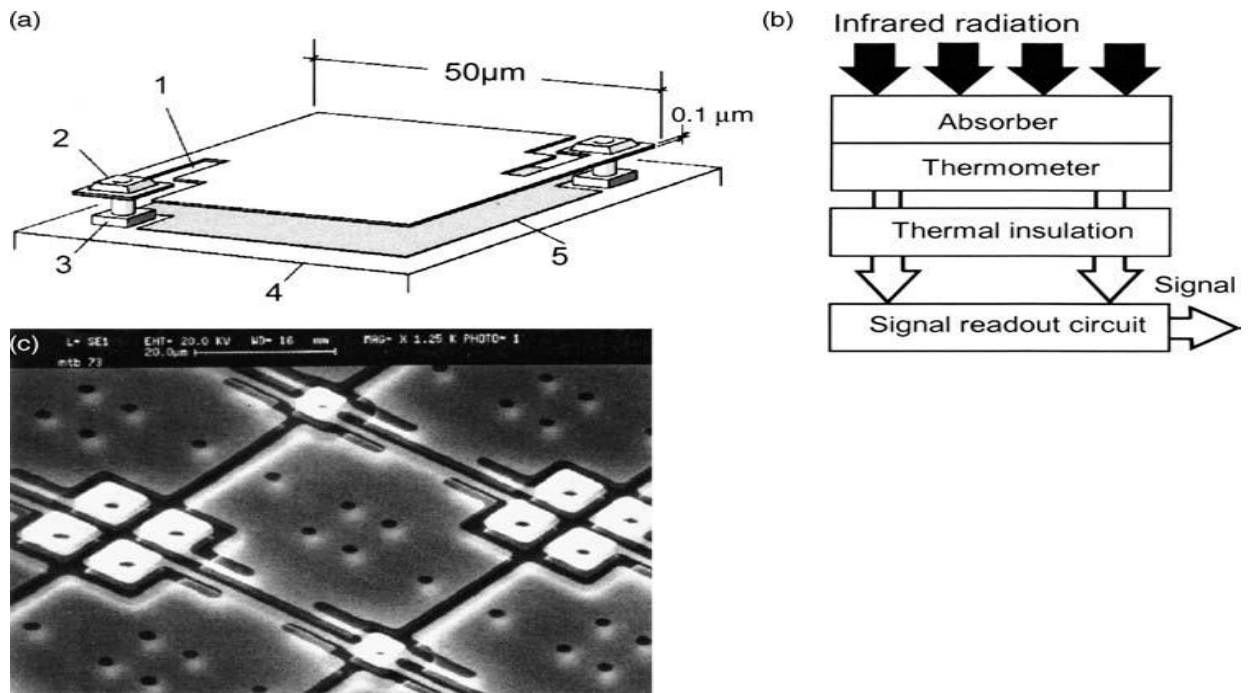
Από το 1993 όμως, οι κάμερες είναι εξοπλισμένες με πλέγματα ανιχνευτών (FPA, Focal Plane Array), Σχήμα 6. Ένα τυπικό 640 *480 πλέγμα είναι κατασκευασμένο από 307.200 μεμονωμένους ανιχνευτές (pixels) με κάθε pixel να ανανεώνεται 25 με 30 φορές το δευτερόλεπτο. Σε αυτές τις κάμερες δεν έχουμε μηχανικά μέρη σάρωσης, το πλέγμα ανιχνευτών 'κοιτάει' σε ένα αντικείμενο μέσω του φακού της κάμερας και στη συνέχεια δημιουργείται το θερμογράφημα στην οθόνη μας.



Σχήμα 6:Υπέρυθρη κάμερα με πλέγμα ανιχνευτών (FPA, Focal Plane Array) : 1,φακός, 2,πλέγμα ανιχνευτών, [7]

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της IR κάμερας ήταν η παρουσίαση το 1997 της πρώτης κάμερας με συστοιχία μικροβολόμετρων, οι οποίοι δεν χρειάζονταν ψύξη. Η εξάλειψη των μηχανικών μερών σάρωσης και της ψύξης βελτίωσαν τις παραμέτρους λειτουργίας της IR κάμερας, η οποία έγινε ελαφρύτερη, πιο αξιόπιστη και πιο γρήγορη στην λειτουργία της.

Το μικροβολόμετρο είναι ένας αισθητήρας τύπου βολομέτρου. Ένα βολόμετρο είναι μια συσκευή μέτρησης της ισχύος της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μέσω της θέρμανσης ενός υλικού με ηλεκτρική αντίσταση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Το μικροβολόμετρο χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής στις θερμικές κάμερες. Υπέρυθρη ακτινοβολία χτυπάει το υλικό το οποίο με την σειρά του θερμαίνεται, αλλάζοντας έτσι την ηλεκτρική του αντίσταση. Αυτή η αλλαγή στην αντίσταση μετριέται και μεταφράζεται σε θερμοκρασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ενός θερμογραφήματος. Το μεγάλο πλεονέκτημα του μικροβολόμετρου είναι ότι δεν χρειάζεται ψύξη. Ένα παράδειγμα κατασκευής ενός μικροβολόμετρου (pixel) φαίνεται στο Σχήμα 7. Ο ανιχνευτής (absorber) απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία 7.5-13 μm . Η μικρογέφυρα (microbridge) υποστηρίζεται από δύο μεταλλικές ακίδες που έχουν στερεωθεί στη βάση σιλικόνης, οι ακίδες λειτουργούν επίσης ως σύνδεσμοι του θερμομέτρου με το κύκλωμα ανάγνωσης σήματος (signal readout circuit ROIC).



Σχήμα 7:(a) Κατασκευή ενός pixel: 1,θερμική μόνωση, 2,μεταλλική ακίδα, 3,σταθεροποιητή του κυκλώματος ROIC, 4,κύκλωμα ROIC, 5, επιφάνεια αντανάκλασης. (b) Διάγραμμα επεξεργασίας σήματος. (c) Εικόνα από ηλεκτρικό μικροσκόπιο, [9]

Η μικρογέφυρα (microbridge) περιέχει ένα λεπτό (0,1 mm) στρώμα εξευγενισμένου συνθετικού άμορφου πυριτίου με πρόσμιξη υδρογόνου. Αυτό το στρώμα λειτουργεί ως θερμόμετρο το οποίο δεν απορροφά σημαντικά την ακτινοβολία. Η ακτινοβολία απορροφάται από ένα πολύ λεπτό (8 nm) φιλμ νιτριδίου του τιτανίου. Ένα στρώμα θερμικής μόνωσης απομονώνει το θερμόμετρο από το ROIC. Ο ρόλος του ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος πάνω στην επιφάνεια του ROIC είναι να αντανακλά την υπέρυθη ακτινοβολία που διείσδυσε μέσα από τη μικρογέφυρα πίσω στο θερμόμετρο, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή ενός ισχυρότερου σήματος. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών που χρησιμοποιούνται για το στοιχείο ανιχνευτή σε μικροβολόμετρο, τα δύο συνηθέστερα είναι το άμορφο πυρίτιο και το οξείδιο βαναδίου.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως το μεγάλο πλεονέκτημα του μικροβολόμετρου είναι ότι δεν χρειάζεται ψύξη, επιπλέον είναι μικρά και ελαφριά. Για εφαρμογές που απαιτούν σχετικά μικρές διακυμάνσεις, οι φυσικές διαστάσεις της κάμερας είναι ακόμη μικρότερες. Έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και είναι πιο φθηνοί σε σχέση με τους ανιχνευτές που χρειάζονται ψύξη. Παρόλα αυτά έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Είναι λιγότερο ευαίσθητοι και έχουν χαμηλότερη ακρίβεια από τους ψυχομένους ανιχνευτές.

Ακόμη μία παράμετρος που χαρακτηρίζει το θερμογράφημα που εξάγει μία υπέρυθη κάμερα είναι το πεδίο όρασης FOV (field of view). Αυτή η παράμετρος καθορίζει την περιοχή που

μπορεί να παρατηρηθεί σε μία απόσταση d , επομένως αυτή η παράμετρος καθορίζει την χωρική (γεωμετρική) ανάλυση μίας θερμοκάμερας. Το πεδίο της όρασης ορίζεται σε μέτρα και καθορίζει την ανάλυση στον οριζόντιο (H) και στον κάθετο (V) άξονα. Άλλη μία παράμετρος που καθορίζει την χωρική ανάλυση της κάμερας είναι το στιγμιαίο οπτικό πεδίο IFOV (instantaneous field of view), το οποίο καθορίζει το οπτικό πεδίο ενός μεμονωμένου ανιχνευτή (pixel), με άλλα λόγια, IFOV είναι η περιοχή που ένα pixel 'βλέπει' μέσα από την κάμερα και καθορίζει το ελάχιστο εμβαδόν που μπορεί αυτή να μετρήσει.

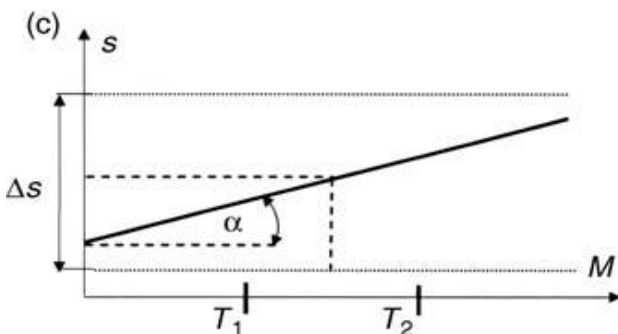
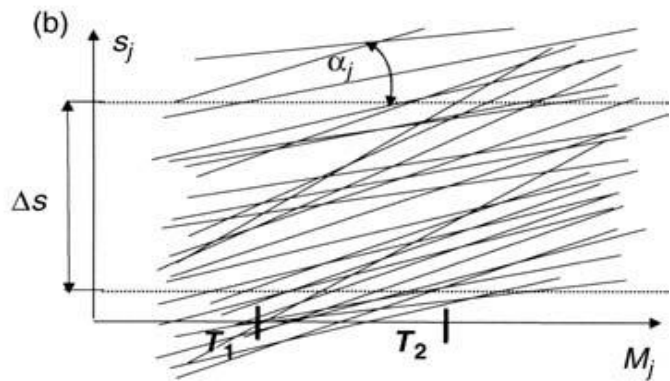
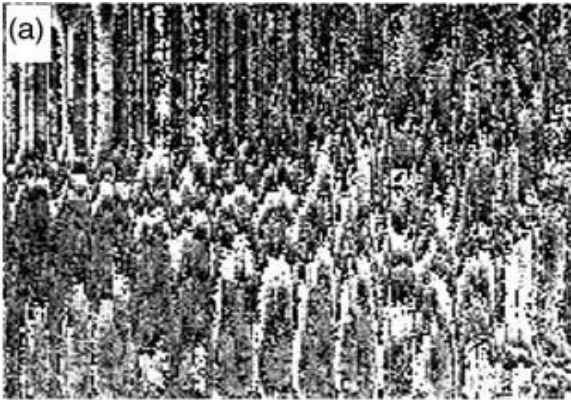
Ενδεικτικά στοιχεία της κάμερας που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμα μας, είναι ότι το όνομα της είναι AGEMA 570, έχει μια συστοιχία 320*240 ανιχνευτών (pixels) τύπου μικροβολόμετρο και λειτουργεί σε μήκη κύματος 7.5-13 μm (LW). Να σημειώσουμε ότι ο φακός που είναι ενσωματωμένος και που χρησιμοποιούμε είναι ο 24*18. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά της κάμερας μας. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιάσουμε την λογική με την οποία η θερμοκάμερα μεταφράζει την υπέρυθη ακτινοβολία σε θερμοκρασία,[7].

1.8 Αρχή Λειτουργίας Υπέρυθρης Θερμοκάμερας

Όπως είπαμε στην προηγούμενη ενότητα οι σύγχρονες υπέρυθρες κάμερες έχουν μια συστοιχία από ανιχνευτές. Μία συστοιχία ανιχνευτών αποτελείται από εκατοντάδες χιλιάδες ανιχνευτές, με κάθε ένας από αυτούς έχει διαφορετική χαρακτηριστική συνάρτηση επεξεργασίας, σχέση (18).

$$s_j = f(M_j) \quad (18)$$

Το S_j είναι το εξαγόμενο σήμα του ανιχνευτή και M_j είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται ο αισθητήρας. Το εύρος των χαρακτηριστικών επεξεργασίας εξαρτάται από τον τύπο της συστοιχίας. Όταν ανοίξουμε την κάμερα, οι ανιχνευτές δεν είναι βαθμονομημένοι. Αυτή την κατάσταση γίνεται εμφανής από το θερμογράφημα, Σχήμα 8(α).



Σχήμα 8:(a) Θερμογράφημα με μη βαθμονομημένους ανιχνευτές. (b) Χαρακτηριστικές των ανιχνευτών κατά την ενεργοποίηση της θερμοκάμερας. (c) Η κοινή χαρακτηριστική των ανιχνευτών μετά την βαθμονόμηση, [10]

Αυτή την κατάσταση γίνεται εμφανής από το θερμογράφημα, Σχήμα 8(a). Το καταγεγραμμένο θερμογράφημα ανταποκρίνεται σε μια σειρά από στατικές χαρακτηριστικές επεξεργασίας των ανιχνευτών, όπου φαίνονται στο Σχήμα 8(b). Για να πάρουμε μία σωστή μέτρηση, οι ανιχνευτές πρέπει να βαθμονομηθούν στην ίδια χαρακτηριστική εισόδου εξόδου. Αυτή η βαθμονόμηση πραγματοποιείται κάθε φορά που ενεργοποιούμε την κάμερα μας αυτόματα, και πραγματοποιείται σε τρία βήματα.

1)Ρυθμίζονται τα κατακόρυφα εύρη (άξονας S_j) όλων το χαρακτηριστικών στο ίδιο διάστημα Δs , ανταποκρινόμενοι στο εύρος του μετασχηματιστή A/D (αναλογικό σε ψηφιακό σήμα).

2)Ακολουθεί εξίσωση των κλίσεων α_j των χαρακτηριστικών

3)Διόρθωση όλων των χαρακτηριστικών στην ίδια , έτσι ώστε το μέσο του εύρους θερμοκρασιών μέσα στο οποίο πραγματοποιούμε τις μετρήσεις μας T_1 - T_2 να ανταποκρίνεται στο μέσο του διαστήματος του Δs , Σχήμα 8(c).

Η κάμερα μας στη συνέχεια αντιστοιχεί τις τιμές του σήματος s που δέχεται από τον τώρα βαθμονομημένο ανιχνευτή, σε θερμοκρασίες T σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που θα εξηγήσουμε αργότερα.

Πέρα από την αυτόματη βαθμονόμηση των ανιχνευτών που μόλις περιγράφηκε , ολόκληρη η κάμερα σαν τελικό προϊόν, στέλνεται από τον κατασκευαστή σε ένα εργαστήριο βαθμονόμησης.

Ο υπολογισμός των θερμοκρασιών με υπέρυθρη κάμερα βασίζεται στην υπέρυθρη ακτινοβολία των σωμάτων. Στο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού είναι αναγκαίο να λάβουμε υπόψη μας όλες τις παρακάτω ροές θερμότητας που φθάνουν σε έναν υπέρυθρο ανιχνευτή.

1)ροή ϕ_{ob} που εκπέμπεται απο το υπό εξέταση σώμα, σχέση (19)

2)ροή ϕ_{refl} που εκπέμπεται από το περιβάλλον και ανακλάται από το σώμα μας, σχέση (20)

3)ροή ϕ_{atm} που εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα, σχέση (21)

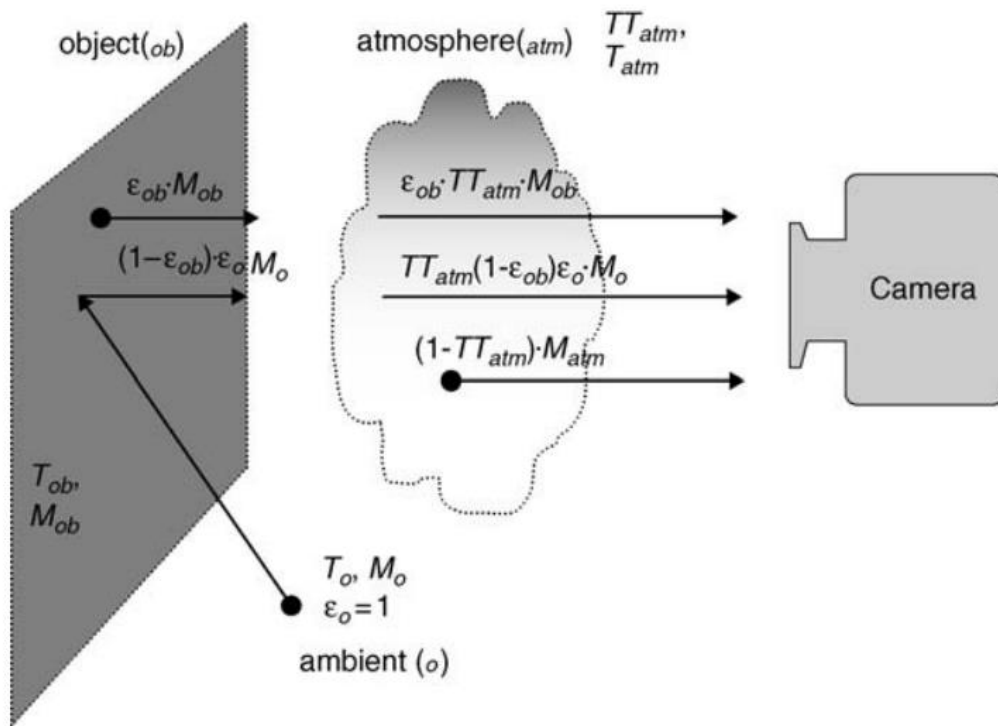
4)ροή που εκπέμπεται από τα εξαρτήματα της μηχανής μας (την θεωρούμε αμελητέα)

Οι παραπάνω ροές θερμότητας γίνονται εμφανής στο Σχήμα 9 και μπορούν να εκφραστούν ως εξής :

$$\phi_{ob} = \epsilon_{ob}(T_{ob}) \cdot T T_{atm}(T_{atm}) \cdot M_{ob}(T_{ob}) \quad (19)$$

$$\phi_{refl} = [1 - \epsilon_{ob}(T_o)] \cdot \epsilon_o(T_o) \cdot T T_{atm}(T_{atm}) \cdot M_o(T_o) \quad (20)$$

$$\phi_{atm} = [1 - T T_{atm}(T_{atm})] \cdot M_{atm}(T_{atm}) \quad (21)$$



Σχήμα 9: Οι ροές θερμότητας που φθάνουν στην θερμοκάμερα, [8].

όπου : ϵ_{ob} είναι η εκπεμπότητα της επιφάνειας του αντικειμένου, ϵ_o είναι η εκπεμπότητα της ατμόσφαιρας, M_{atm}, M_{ob}, M_o , είναι οι εκπομπές της ατμόσφαιρας, του αντικειμένου και του περιβάλλοντος αντίστοιχα, T_{atm}, T_{ob}, T_o , είναι οι θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας, του αντικειμένου και του περιβάλλοντος αντίστοιχα.

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε το σήμα που θα εξάγει ο ανιχνευτής της κάμερας μπορεί να περιγραφεί από την σχέση (22).

$$s = \epsilon_{ob} \cdot T T_{atm} \cdot s_{ob} + (1 - \epsilon_{ob}) \cdot s_o + (1 - T T_{atm}) \cdot s_o \quad (22)$$

όπου s είναι το σήμα του ανιχνευτή που αντιστοιχεί στη συνολική ακτινοβολία που φθάνει στην κάμερα. Με s_{ob} και s_o περιγράφουμε τα σήματα που αντιστοιχούν στις ακτινοβολούμενες εξόδους αντίστοιχα του αντικειμένου και του περιβάλλοντος.

Το σήμα s_o μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$s_o = \frac{R}{e^{\left(\frac{B}{T_o}\right)} - F} \quad (23)$$

όπου R, B, F είναι σταθερές που σχετίζονται με την βαθμονόμηση των χαρακτηριστικών της κάμερας και T_o η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (22)-(23) μπορούμε να υπολογίσουμε το σήμα του ανιχνευτή, που αντιστοιχεί στην ακτινοβολούμενη έξοδο που εκπέμπει το αντικείμενο μας (s_{ob}). Η εξίσωση (24) αποτελεί την σημαντικότερη εξίσωση με την οποία θα ασχοληθούμε στην εργασία μας και αποτελεί την βάση λειτουργίας του αλγορίθμου της θερμοκάμερας.

$$s_{ob} = s \cdot \frac{1}{\varepsilon_{ob} \cdot TT_{atm}} - \left[\frac{1 - \varepsilon_{ob}}{\varepsilon_{ob}} \cdot \frac{R}{\exp(B/T_o) - F} + \frac{1 - TT_{atm}}{\varepsilon_{ob} \cdot TT_{atm}} \cdot \frac{R}{\exp(B/T_o) - F} \right] \quad (24)$$

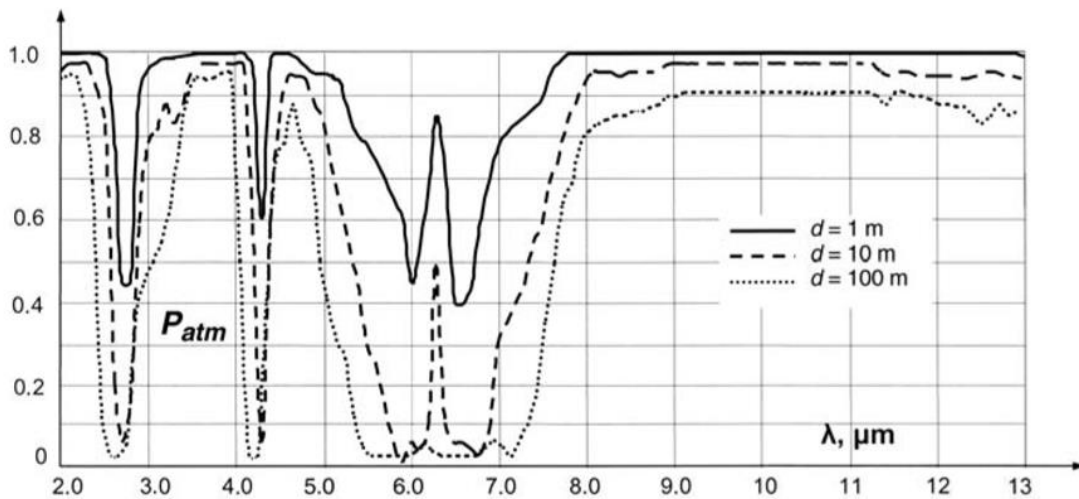
Προσοχή, είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσουμε την σχέση (24), διότι αυτή η σχέση μας περιγράφει τι υπολογίζει η κάμερα μας, άρα και τι δεδομένα μας δίνει για να δουλέψουμε. Η σχέση (24) λέει, ότι η κάμερα μας δέχεται ροή θερμότητας (ακτινοβολία), από τις πηγές που περιγράψαμε στο Σχήμα 9, και παράγεται το σήμα s από τους ανιχνευτές. Έχοντας εισάγει τον βαθμό εκπομπής του αντικειμένου ε_{ob} , την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_o και τις κατάλληλες παραμέτρους, τις οποίες θα αναφέρουμε αμέσως μετά, για να υπολογιστεί ο συντελεστής μετάδοσης της ατμόσφαιρας TT_{atm} . Μπορεί η κάμερα να υπολογίσει το σήμα που αντιστοιχεί στην εκπομπή του αντικείμενου που μελετάει s_{ob} . Μπορούμε να πούμε ότι υπολογίζει το σήμα που θα προέκυπτε από τον αισθητήρα, εάν ο αισθητήρας δεχόταν μόνο την ακτινοβολία του αντικειμένου.

Μία πολύ σημαντική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι όσο αυξάνονται οι παράμετροι TT_{atm} , T_o και η ε_{ob} τόσο μικραίνει και ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (24), έχοντας σαν συνέπεια την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων λόγω της μείωσης της επίδρασης των σταθερών βαθμονόμησης R, B, F . Για αυτό τον λόγο στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε θα επιδιώξαμε όσο το δυνατόν υψηλότερες τιμές για αυτές τις τρεις παραμέτρους.

Μάλιστα εάν $TT_{atm} = \varepsilon_{ob} = 1$, τότε ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (24) μηδενίζεται και το $s_{ob} = s$, πράγμα που σημαίνει ότι η το σήμα που παράγει ο ανιχνευτής ανήκει εξ' ολοκλήρου στην α-

κτινοβολία του αντικείμενου και η ακτινοβολία που εκπέμπει το περιβάλλον και η ατμόσφαιρα, δεν επηρεάζουν την μέτρηση. Δεύτερον στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή που υπολογίζεται για το s_{ob} διέπεται και από μεγαλύτερη ακρίβεια, διότι δεν παίρνουν μέρος στον υπολογισμό οι σταθερές βαθμονόμησης R,B,F οι οποίες εισάγουν αναπόφευκτα σφάλμα. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα περιγράψουμε πως μπορούμε να αξιοποιήσουμε αυτό το δεδομένο για να υπολογίσουμε τη θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο συντελεστής τ_{atm} , ο οποίος σχετίζεται με την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, παίζει σημαντικό ρόλο. Η απορρόφηση αυτή είναι αποτέλεσμα των σωματιδίων νερού (H_2O), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του όζοντος (O_3). Οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στην ατμόσφαιρα ποικίλουν ανάλογα τον καιρό, την εποχή και γεωγραφική τοποθεσία. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως υπάρχουν ζώνες μήκους κύματος όπου η απορρόφηση της ατμόσφαιρα είναι πολύ μικρή και όπου μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ακριβείς μετρήσεις τις οποίες αποκαλούμε ατμοσφαιρικά παράθυρα. Στο Σχήμα 10 μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιοχές όπου η απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας είναι χαμηλή, η μία είναι στα 3-4.2 μm και η δεύτερη στα 7.5-13 μm .



Σχήμα 10: Μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης της ατμόσφαιρας ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας για διάφορες απόστασης μεταξύ κάμερας αντικειμένου, [8].

Αυτές τις δύο ζώνες τιμών τις έχουμε ονομάσει στη σελίδα 16. Ο συντελεστής μετάδοσης της ατμόσφαιρας είναι εξίσωση τριών μεταβλητών που καλούμαστε να εισάγουμε στο σύστημα.

Της σχετικής υγρασίας $\omega\%$, απόστασης κάμερας αντικειμένου d , και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (T_{atm}), σχέση (21).

$$TT_{atm} = f(\omega\%, d, T_{atm}) \quad (25)$$

Η εξίσωση αυτή στην πραγματικότητα είναι πολύ περίπλοκη και η ολοκληρωμένη μορφή της είναι κατοχυρωμένη από τον εκάστοτε κατασκευαστή της κάμερας. Τέλος, η θερμοκρασία του σώματος που εξετάζει η θερμοκάμερα μας, υπολογίζεται βάση της εξίσωσης (26) και εξαρτάται από πέντε παραμέτρους που έχουμε ήδη αναφέρει παραπάνω $\epsilon_{ob}, \omega\%, d, T_{atm}, T_o$. Γίνεται φανερό ότι υπολογισμός της θερμοκρασίας του αντικειμένου θα έχει πάντα σφάλμα, αφού εξαρτάται από τις σταθερές βαθμονόμησης R, B, F που όπως φαίνεται δεν γίνεται να απλοποιηθούν, [7].

$$T_{ob} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{s_{ob}} + F\right)} \quad (26)$$

1.9 Σφάλμα μετρήσεων

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιάσουμε τις πηγές σφάλματος κατά την λήψη ενός θερμογραφήματος. Αρχικά για να μπορούμε να μιλήσουμε για το σφάλμα στην υπέρυθρη θερμογραφία πρέπει να ορίσουμε κάποιες βασικές έννοιες. Ορίζουμε ως απόλυτο σφάλμα μίας μέτρησης ότι είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής που μετρήσαμε y' και την πραγματικής τιμής y :

$$\Delta y = y' - y \quad (27)$$

Το σχετικό σφάλμα μίας μέτρησης το ορίζουμε ως τον λόγο του απόλυτου σφάλματος Δy προς την πραγματική τιμή y :

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} \quad (28)$$

Τώρα σε αναλύσεις σφαλμάτων σε πειράματα όπου έχουμε πολλές επαναλήψεις, χρειάζεται να κάνουμε μία διάκριση ανάμεσα στα συστηματικά και στα τυχαία σφάλματα. Το συστηματικό σφάλμα μπορούμε να το ορίσουμε ως την διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής μίας ποσότητας που υπολογίστηκε για άπειρο αριθμό μετρήσεων κάτω από τις ίδιες συνθήκες και της πραγματικής τιμής. Ενώ το τυχαίο σφάλμα ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ μίας μέτρησης και της μέσης τιμής που υπολογίστηκε για άπειρο αριθμό μετρήσεων κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Από τα παραπάνω μπορούμε να καταλάβουμε ότι το απόλυτο σφάλμα μίας μέτρησης στην υπέρυθη θερμογραφία είναι διαφορά μεταξύ της τιμής T_c που υπολογίστηκε από την κάμερα για ένα εικονοστοιχείο (pixel) της συστοιχίας των ανιχνευτών και της πραγματικής θερμοκρασίας T_R της επιφάνειας :

$$\Delta T_{ob} = T_c - T_R \quad (29)$$

Ενώ το σχετικό σφάλμα μίας μέτρησης στην υπέρυθη θερμογραφία είναι ο λόγος μεταξύ του απόλυτου σφάλματος ΔT_{ob} και της πραγματικής θερμοκρασίας T_R :

$$\delta T_{ob} = \frac{\Delta T_{ob}}{T_R} \quad (30)$$

Στην περίπτωση της υπέρυθρης θερμογραφίας, συστηματικές αλληλεπιδράσεις επηρεάζουν σοβαρά την ακρίβεια του υπολογισμού της θερμοκρασίας. Παρακάτω παραθέτουμε πηγές που εισάγουν συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις μας.

1)Λανθασμένος υπολογισμός του συντελεστή εκπεμπότητας ϵ_{ob} και/ή λάθος υπολογισμός της T_{atm}, T_o, ω, d

2)επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος (απευθείας ή ανακλώμενη από το αντικείμενο) που φθάνει στον ανιχνευτή.

3) Λανθασμένος υπολογισμός του συντελεστή μετάδοσης της ατμόσφαιρας και της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας

4)Ήχος του ανιχνευτή

5)Ήχος από τα ηλεκτρονικά εξοπλισμό

6)Περιορισμένη ανάλυση και μη γραμμικότητα του μετατροπέα A/D

7)Περιορισμένο εύρος του μήκους κύματος που έχει ο ανιχνευτής

Ήχος ονομάζεται η θερμότητα που φθάνει στο ανιχνευτή, με πηγή όμως την ίδια την κάμερα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αντικειμένων με διαφορετική εκπεμπότητα που βρίσκονται μέσα σε ένα θερμογράφημα τόσο πιο εύκολο είναι να διακρίνουμε την επίδραση που έχει ο λανθασμένος υπολογισμός της εκπεμπότητας. Πρέπει να σημειωθεί, ότι επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος αυξάνεται όταν ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου ϵ_{ob} μειώνεται. Αυτό το φαινόμενο είναι ακόμα πιο εμφανές όταν $T_o \geq T_{ob}$. Ακόμα μεγαλύτερο σφάλμα υπάρχει όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε εξωτερικό χώρο λόγω της ακτινοβολίας του ήλιου, που καθιστά την μέτρηση αδύνατη εκτός και αν το αντικείμενο μας είναι σε υψηλή θερμοκρασία. Τα πράγματα γίνονται πιο περίπλοκα όταν αντικείμενο αντανακλά ακτινοβολία του ουρανού, των γύρο κτιρίων και του εδάφους. Η επίδραση της ακτινοβολίας ατμόσφαιρας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν η απόσταση κάμερας αντικειμένου δεν ξεπερνά ορισμένα μέτρα, [7] .

2. Πειραματική Μεθοδολογία

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν όλες οι βασικές έννοιες και οι φυσικοί νόμοι που θα χρησιμοποιηθούν για να απαντηθεί το πρόβλημα μας, ο υπολογισμός δηλαδή της θερμοκαλυπτικής ικανότητας. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το πείραμα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος θα επεξηγηθούν όλες οι επιλογές και οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν και θα αναλυθεί η λογική στην οποία βασίζεται το πείραμα μας.

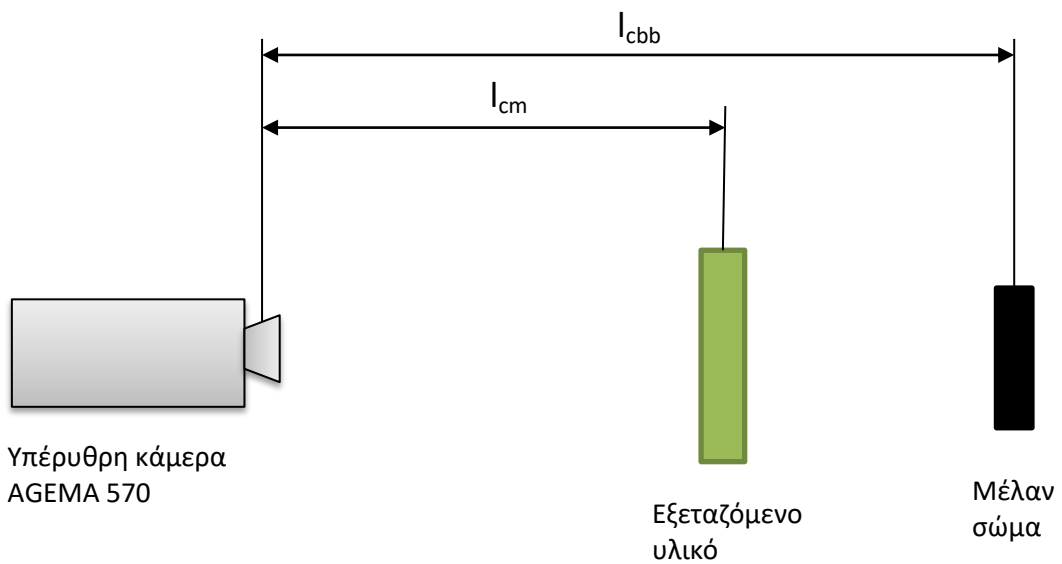
Όπως έχει αναφερθεί στην Περίληψη, στόχος του πειράματός μας είναι να υπολογιστεί η θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού. Για να τον υπολογισμό της, απαιτείται μία πηγή που να εκπέμπει έντονα υπέρυθρη ακτινοβολία και ένας ανιχνευτής που μετράει την υπέρυθρη ακτινοβολία που φθάνει σε αυτόν. Αρχικά μετριέται η υπέρυθρη ακτινοβολία που φθάνει στον ανιχνευτή από την πηγή. Μετά τοποθετείται το υλικό προς εξέταση ανάμεσα στην πηγή και στο ανιχνευτή και ξανά μετριέται η ακτινοβολία που φθάνει στο ανιχνευτή. Συγκρίνοντας τις δύο μετρήσεις υπολογίζεται την θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού.

2.1 Πειραματική Διάταξη

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστεί η διάταξη του πειράματός και στην ενότητα που ακολουθεί θα επεξηγηθεί ο ρόλος κάθε αντικειμένου. Το πείραμα αποτελείται από τα εξής στοιχεία, μια θερμαντική αντίσταση για την παραγωγή θερμότητας, μια μαύρη μεταλλική πλάκα που παίζει το ρόλο του μέλανος σώματος, τα υλικά που θέλουμε να εξετάσουμε, την υπέρυθρη κάμερα AGEMA 570 με τον τρίποδα της και δύο σταθεροποιητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να κρατήσουν σε σταθερή θέση το υπό εξέταση υλικό και μία μαύρη μεταλλική πλάκα. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 11, όπου στο βάθος παρατηρείται το μέλαν σώμα (μαύρη πλάκα) σταθεροποιημένο, ενώ ακολουθεί ο σταθεροποιητής που τοποθετούμε τα υλικά και τέλος την κάμερα με τον τρίποδα της.



Σχήμα 11: Παρουσίαση της πειραματικής διάταξης με την υπέρυθρη κάμερα, το μέλαν σώμα και τους σταθεροποιητές



Σχήμα 12: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης

Επιπλέον στο Σχήμα 12 φαίνεται ότι υπάρχουν δύο μεταβαλλόμενες παράμετροι, η απόσταση κάμερας-εξεταζόμενου υλικού που συμβολίζεται με ως I_{cm} και η απόσταση κάμερας-μέλανος σώματος που συμβολίζεται ως I_{cbb} . Από τις δύο μεταβλητές την απόσταση κάμερας-μέλανος σώματος (I_{cbb}) μένει σταθερή στα 0.8 μέτρα ενώ η απόσταση κάμερας-εξεταζόμενου υλικού (I_{cm}) μεταβάλλεται ανάμεσα σε τρεις τιμές, στα 0.2,0.4 και 0.6 μέτρα.

Η κάμερα τοποθετείται σε απόσταση 0.8 μέτρων μακριά από το μέλαν σώμα και αυτό γιατί από τις διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, αποφασίστηκε ότι για το συγκεκριμένο εμβαδόν της πλάκας και τη συγκεκριμένη απόσταση, πετυχαίνεται η επιθυμητή ανάλυση για το μέλαν σώμα. Όπως έχει αναφερθεί στη σελίδα 29 καθώς αλλάζει η απόσταση d , αλλάζει και το πεδίο όρασης (FOV) και το στιγμιαίο οπτικό πεδίο (IFOV). Για την συγκεκριμένη τιμή του I_{cbb} , το μέλαν σώμα 'τεμαχίζεται' σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό εικονοστοιχείων, δίνοντας μια καλή ευκρίνεια. Παράλληλα παρατηρείται ένα μέρος του περιβάλλοντος φόντου ενώ υπάρχει αρκετά μεγάλη απόσταση μεταξύ κάμερα και μέλαν σώματος για να δοκιμαστεί η τοποθέτηση του υπό εξέταση υλικού σε διάφορες θέσης και αποστάσεις.

2.2 Εξοπλισμός

Στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα μας όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην προηγούμενη ενότητα, περιλαμβάνεται η κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας AGEMA 570, ο τρίποδα της, ένα θερμόμετρο υψηλής ακρίβειας, ένας αισθητήρας υγρασίας HOBO, μια αντίσταση για την παραγωγή θερμότητας, μια μαύρη μεταλλική πλάκα, τα υλικά που θέλουμε να εξετάσουμε και δύο σταθεροποιητές. Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε στα κύρια μέρη του εξοπλισμού.

Αρχικά, η κάμερα που θα χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα για την λήψη των θερμογραφημάτων είναι η AGEMA 570 (Σχήμα 13). Το βασικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό της, είναι ότι έχει μια συστοιχία ανιχνευτών (FPA) 320*240, δηλαδή 76,800 ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιεί είναι μικροβολόμετρα, οι οποίοι έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η IR κάμερα λειτουργεί σε μήκη κύματος 7.5-13 μ m (LW), με το συγκεκριμένο εύρος να είναι μέσα

στο φάσμα υψηλής μετάδοσης της ατμόσφαιρας που αναφέρθηκε. Μπορεί να λειτουργήσει σε δύο εύρη θερμοκρασίας αντικειμένου, -20°C - 500°C και στα 1500°C και πάνω εάν επιλεγεί η επιλογή υψηλής θερμοκρασίας.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο ενσωματωμένος φακός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο $24^{\circ}\times 18^{\circ}$. Με αυτό το δεδομένο μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο όρασης (FOV) της κάμερας σε διάφορες αποστάσεις. Η οριζόντια διάσταση του πεδίου όρασης είναι $H=d*\sin(24)$, ενώ η κατακόρυφη διάσταση υπολογίζεται ως εξής $V=d*\sin(18)$. Στον Πίνακα 1, καταγράφεται το πεδίο της όρασης της κάμερας στον οριζόντιο άξονα HorFOV και το στιγμιαίο πεδίο όρασης IFOV για διάφορες αποστάσεις d για τους διαθέσιμους φακούς της κάμερας μας.

Ακόμα ένα στοιχείο που αναγράφεται στο εγχειρίδιο της κάμερας AGEMA 570 είναι η ακρίβεια μέτρησης. Συγκεκριμένα αναγράφεται στο εγχειρίδιο της κάμερας ότι οι μετρήσεις τις έχουν ακρίβεια $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ή $\pm 2\%$ του εύρους, οπότε για μία μέτρηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μεγαλύτερο από τα δύο σφάλματα. Με άλλα λόγια για μία μέτρηση η οποία κυμαίνεται ανάμεσα 0 - 100°C πρέπει η ακρίβεια να είναι της τάξης του $\pm 2^{\circ}\text{C}$, ενώ αν οι θερμοκρασίες κυμαίνονται ανάμεσα στους 100 - 500°C τότε πρέπει να θεωρηθεί ότι η κάμερα έχει ακρίβεια $\pm 2\%$ του εύρους.

Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παρερμηνευθεί η παράμετρος της ακρίβειας. Αρχικά, η ακρίβεια καθορίζεται από την ποιότητα της βαθμονόμησης που έχει δεχτεί η συστοιχία των ανιχνευτών. Όσο καλύτερη είναι η βαθμονόμηση, δηλαδή όσο πιο κοντά σε ένα κοινό σχήμα φέραμε τις διάφορες χαρακτηριστικές των ανιχνευτών, τόσο μειώνεται το σφάλμα στις μετρήσεις μας. Επιπλέον, η ακρίβεια επηρεάζεται από την βαθμονόμηση που έχει πραγματοποιηθεί από τον κατασκευαστή. Οι παράμετροι (R,B,F) των χαρακτηριστικών των ανιχνευτών, οι οποίοι καθορίζονται κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης, εισάγουν αναπόφευκτα ένα ποσοστό σφάλματος στις μετρήσεις μας. Η παράμετρος ακρίβεια μέτρησης λοιπόν, αναφέρεται σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ιδανικά σχεδιασμένο περιβάλλον κάτω από ιδανικές συνθήκες. Άρα το σφάλμα που εισάγεται στις μετρήσεις μας είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από αυτό που σημειώνεται.

Μία ακόμη παράμετρος που αναγράφεται στο εγχειρίδιο της κάμερας και μπορεί εύκολα να παρερμηνευτεί είναι θερμική ευαισθησία, όπου συχνά συσχετίζεται με την ακρίβεια του θερμογραφήματος που υπολογίζει η κάμερα. Στην πραγματικότητα η συγκεκριμένη παράμετρος αναφέρεται κυρίως για λόγους marketing, ενώ δεν μπορεί να περιγράψει το πραγματικό

σφάλμα των μετρήσεων. Αυτή η παράμετρος έχει επιρροή στην ποιότητα του θερμογραφήματος, διότι εγγυάται καλύτερη ομοιομορφία των σημάτων τα οποία προέρχονται από τους ανιχνευτές, αλλά η αναγραφόμενη τιμή αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες, χωρίς καμία εξωτερική πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας και με τις παραμέτρους (e_{ob} , T_{atm} , T_o , ω , d) να έχουν εισαχθεί με μηδενικό σφάλμα, συνθήκες οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, [11].

Το θερμόμετρο ακριβείας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, δηλαδή της θερμοκρασίας του δωματίου όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα και την θερμοκρασία της μαύρης πλάκας ανά περιόδους. Στο Σχήμα 14 φαίνεται ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για να παρθούν οι μετρήσεις της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας του χώρου.



Σχήμα 13: Κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας AGEMA 570.

Object distance:	0.3m	0.5m	2m	3m	10m	30m	100m
12x9° lens							
Hor FOV			0.42*	0.63	2.1	6.3	21 (m)
IFOV			1.3	2.0	6.6	20	66 (mm)
24x18° lens							
Hor FOV		0.22*	0.85	1.3	4.2	12	42 (m)
IFOV		0.66	2.6	4.0	13	40	130 (mm)
45x34° lens							
Hor FOV	0.22*	0.41	1.7	2.5	8.3	25	83 (m)
IFOV	0.8	1.3	5.3	7.8	26	78	260 (mm)

*At close focus

Πίνακας 1: Το πεδίο όρασης στον οριζόντιο άξονα Hor FOV και το στιγμιαίο πεδίο όρασης IFOV για διάφορες αποστάσεις (object distance) για τους διαθέσιμους φακούς(lens).



Σχήμα 14: Αισθητήρας θερμοκρασίας σχετικής υγρασίας και φωτός HOBO

Από την στιγμή που στοχεύετε να μετρηθεί η θερμοκαλυπτική ικανότητα κάποιων υλικών, δηλαδή ο βαθμός στον οποίον το υλικό εμποδίζει την διέλευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, απαιτείται μία πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τον ρόλο της πηγής μπορεί να τον παίξει ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, με θερμοκρασία άνω των 0 βαθμών Kelvin. Όμως το αντικείμενο

χρειάζεται να εκπέμπει ιδιαίτερα έντονα, τόσο έντονα ώστε να ξεχωρίζει από το γύρω περιβάλλον του και να μειώνει δραματικά την επίδραση του τελευταίου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η ολική ακτινοβολούμενη έξοδος ή εκπομπή του μέλαν σώματος αυξάνεται με την ανύψωση της θερμοκρασίας, οπότε η εκπομπή του αντικειμένου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα η επιφάνεια του αντικειμένου πρέπει να έχει και υψηλό βαθμό εκπεμπότητας ώστε να ακτινοβολεί στο μέγιστο των δυνατοτήτων του. Τέτοια χαρακτηριστικά συναντάμε στο μέλαν σώμα, που όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η εκπεμπότητά του είναι τέλεια ($\epsilon_b=1$). Βέβαια στην φύση είναι αδύνατο να βρεθεί ένα τέλει μέλαν σώμα και γι αυτό θα πρέπει να το προσομοιώσουμε.

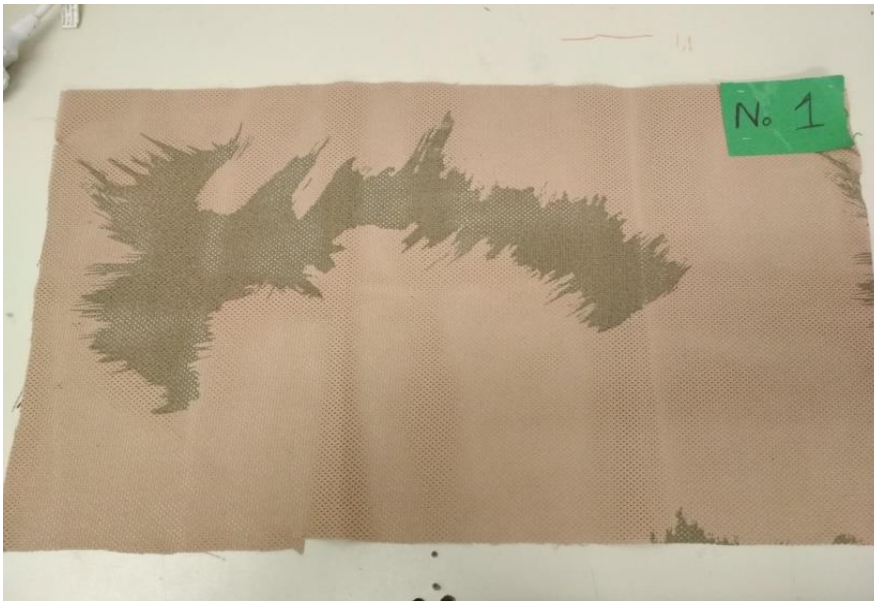
Ως μέλαν σώμα για το πείραμα, επιλέχθηκε μια μαύρη μεταλλική πλάκα η οποία προέρχεται από το κουτί ενός πύργου υπολογιστή. Αφότου αφαιρέθηκε η μεταλλική πλάκα από τον πύργο, έγινε η αφαίρεση υλικού έτσι ώστε να παραμείνει μόνο το ομογενές μέρος της με εμβαδόν 0.04m^2 . Στη συνέχεια κολλήθηκε η θερμοαντίσταση στο κέντρο της πλάκας καλύπτοντας συγχρόνως το πίσω μέρος της πλάκας με μόνωση ώστε να περιοριστεί η απώλεια θερμότητας από το πίσω μέρος της, εξασφαλίζοντας έτσι την απαιτούμενη αύξηση της θερμοκρασίας.

Η συγκεκριμένη επιλογή την έγινε κυρίως για δύο λόγους. Αρχικά η πλάκα ήταν βαμμένη με μαύρο χρώμα το οποίο έχει πάρα πολύ υψηλό συντελεστή εκπεμπότητας, περίπου 0.98, το οποίο είναι πάρα πολύ κοντά στον βαθμό εκπομπής του θεωρητικού μέλανος σώματος. Επομένως η συγκεκριμένη πλάκα προσομοιάζει αρκετά καλά ένα μέλαν σώμα. Δεύτερον, επειδή η πλάκα είναι μεταλλική, επιτρέπεται η γρήγορη διάχυση της θερμότητας μέσα από αυτήν αποτρέποντας έτσι το κίνδυνο της υπερθέρμανσης κάποιου μεμονωμένου σημείου της πλάκας, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια του πειράματος και την γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη την έκταση της.

Την θερμοαντίσταση όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω χρειάζεται έτσι ώστε με την αύξηση της θερμοκρασίας της μαύρης πλάκας, να αυξηθεί και η ακτινοβολούμενη έξοδος της. Η θερμοαντίσταση τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος της μαύρης πλάκας και στη συνέχεια καλύφθηκε όλη η επιφάνεια με μόνωση για να φθάσει η πλάκα στην κατάλληλη θερμοκρασία. Τα εξεταζόμενα υλικά παρουσιάζονται στην επόμενη ακριβώς ενότητα.

2.3 Εξεταζόμενα Υλικά

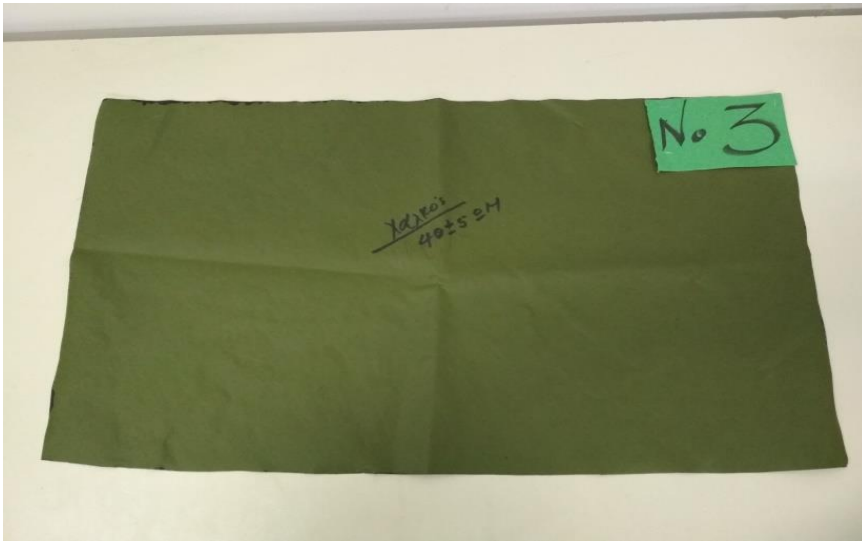
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζουμε όλα τα υλικά που εξετάσουμε. Συγκεκριμένα από την Εικόνα 1 έως την Εικόνα 9, καταγράφουμε τα υλικά που θα μελετήσουμε, ενώ σε κάθε λεζάντα περιγράφουμε το κάθε υλικό και του προσδίδουμε ένα κωδικό όνομα.



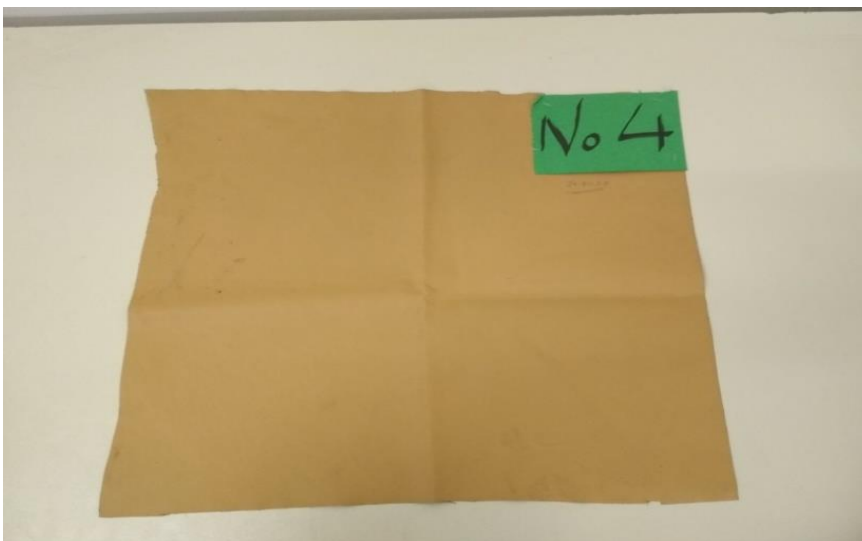
Εικόνα 1: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, με πολύ μικρές σπές πλήρως ομοιογενώς κατανεμημένες βαμμένο με ανοιχτό πράσινο και μπεζ, κωδικό όνομα ΣΚ1



Εικόνα 2: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, ομοιογενώς κομμένο, χρώματος χακί, κωδικό όνομα ΣΚ2



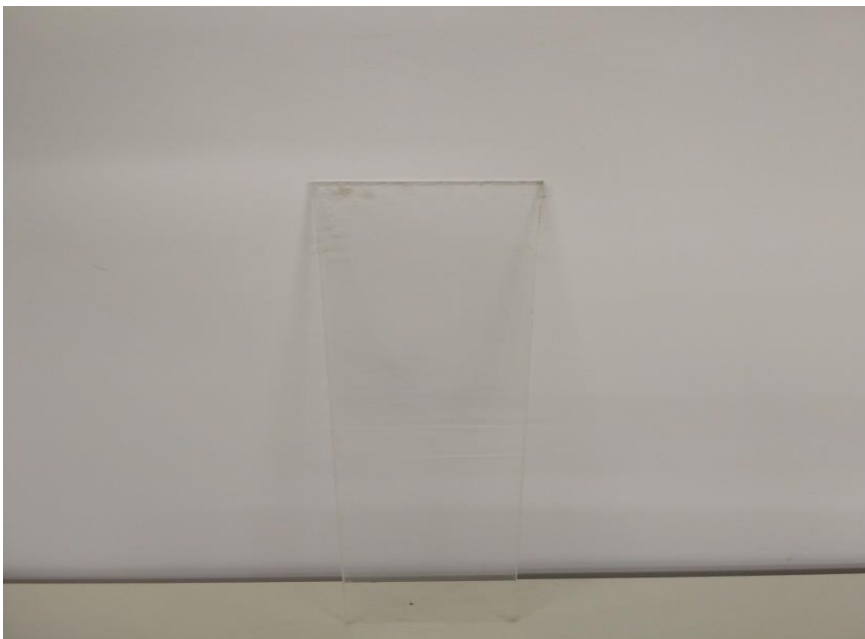
Εικόνα 3: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, χωρίς καμία οπή και κενό, χρώματος σκούρο πράσινο, κωδικό όνομα ΣΚ3



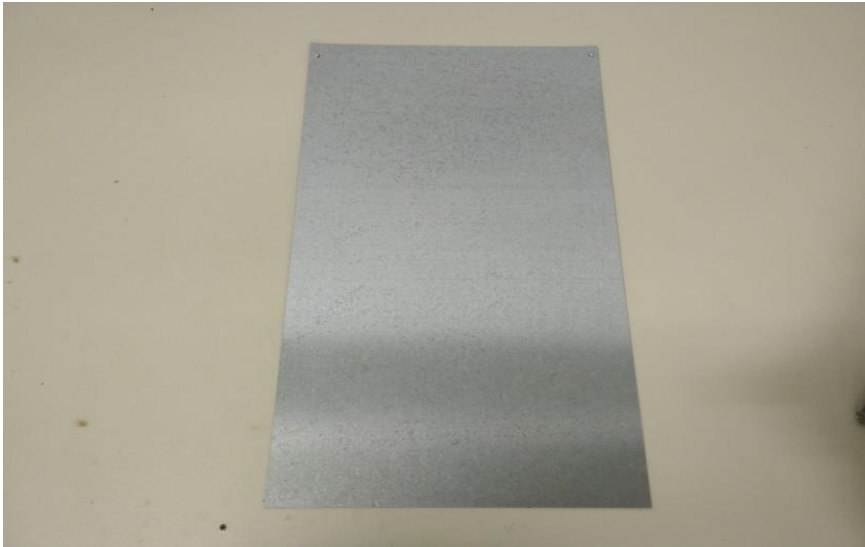
Εικόνα 4: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, χωρίς καμία οπή και κενό, χρώματος ανοιχτού μπλεζ, κωδικό όνομα ΣΚ4



Εικόνα 5: Στρατιωτικού τύπου κάλυμμα, σε άσπρο χρώμα, ένα μέρος του είναι ομοιογενώς κομμένο, ενώ το υπόλοιπο είναι ατόφιο, κωδικό όνομα ΣΚ5



Εικόνα 6: Ένα ορθογώνιο κομμάτι plexiglass, διαφανές, κωδικό όνομα PG



Εικόνα 7: Ένα ορθογώνιο φύλλο αλουμινίου, κωδικό όνομα ΦΑ



Εικόνα 8: Ένα μαύρο κομμάτι ύφασμα από 100% βαμβάκι, κωδικό όνομα ΜΥ



Εικόνα 9: Μία πλαστική σακούλα σκουπιδιών, χρώματος σκούρο γκρίζο, κωδικό όνομα ΠΣ

2.4 Μέθοδος Υπολογισμού Θερμοκαλυπτικής Ικανότητας

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα περιγραφεί η θεωρία πίσω από το πείραμα. Η λογική του πειράματος είναι η εξής. Η μαύρη πλάκα θερμαίνεται ώστε να εκπέμπει έντονα υπέρυθρη ακτινοβολία σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο. Στην αρχή λαμβάνεται το θερμογράφημα της μαύρης πλάκα όταν είναι μόνη της. Μετά ξανά λαμβάνεται το θερμικό αποτύπωμα, έχοντας τοποθετηθεί μπροστά από το μέλαν σώμα το υπό εξέταση υλικό. Συγκρίνοντας το αρχικό και το τελικό θερμογράφημα εξάγεται η θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού που μελετείται.

Ωστόσο ένα θερμογράφημα δεν πληροφορεί για το ποσό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που αντιλαμβάνονται οι αισθητήρες. Ένα θερμογράφημα περιγράφει την θερμοκρασία του της επιφάνειας του σώματος. Παρόλο αυτά, η υπέρυθρη κάμερα βασίζεται στην υπέρυθρη ακτινοβολία για να εξάγει ένα θερμογράφημα. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί πως χρησιμοποιείται η υπέρυθρη κάμερα για τον υπολογισμό της θερμοκαλυπτικής ικανότητας ενός υλικού.

Αρχικά, η θερμοκαλυπτική ικανότητα την συμβολίζουμε ως ΘI . Για να υπολογιστεί η θερμοκαλυπτική ικανότητα των υλικών λοιπόν χρειάζονται δύο τιμές: Την συνολική ακτινοβολία α_1 που φθάνει στην κάμερα όταν το μέλαν σώμα είναι μόνο του και την συνολική ακτινοβολία, α_2 που φθάνει στην κάμερα όταν το υλικό τοποθετείται μπροστά από το μέλαν σώμα. Αυτές οι δύο τιμές μπορούν να αντικατασταθούν με το σήμα του ανιχνευτή που αντιστοιχεί στις δύο ακτινοβολίες. Αντί για α_1 εισάγεται η τιμή s_1 και αντί α_2 το σήμα ανιχνευτή που αντιστοιχεί σε αυτή την ακτινοβολία, δηλαδή s_2 . Η διαίρεση της δεύτερης τιμής με την πρώτη δίνει τον συντελεστή μετάδοσης του υλικού, ενώ διαφορά του λόγου από την μονάδα δίνει την θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού.

$$\Theta I = 1 - (s_2 / s_1) \quad (31)$$

Γίνεται φανερό ότι δεν χρειάζεται η καταγραφή των θερμοκρασιών στις οποίες βρίσκονται οι διάφορες περιοχές της πλάκας, αλλά πρέπει με κάποιο τρόπο να καταγραφθεί η υπέρυθρη ακτινοβολία που αισθάνονται οι αισθητήρες της κάμερας.

Όπως αναφέρθηκε όμως, η κάμερα μπορεί να δώσει το σήμα που αντιστοιχεί στην εκπομπή (ακτινοβολούμενη έξοδο) του αντικειμένου που κοιτάει s_{ob} . Σύμφωνα με την εξίσωση (24),

όταν ο συντελεστής μετάδοσης T_{atm} είναι μονάδα και η εκπεμπότητα του υλικού ϵ_{ob} είναι πολύ κοντά στην μονάδα, τότε η εξίσωση απλοποιείται στην εξής μορφή :

$$s_{ob} = s / \epsilon_{ob} \quad (32)$$

Όπως παρατηρείται λοιπόν στη συγκεκριμένη περίπτωση η συνολική ακτινοβολία που φθάνει και αντιλαμβάνεται η θερμοκάμερα μετατρέποντάς την σε ένα σήμα s , είναι γραμμικώς ανάλογη της εκπεμπότητας του αντικειμένου ϵ_{ob} , όπου στην προκειμένη περίπτωση το αντικείμενο είναι το μέλαν σώμα. Έτσι εάν διαιρεθεί το s_{ob2} με το s_{ob1} , η παράμετρος ϵ_{ob} απλοποιείται με αποτέλεσμα ο λόγος s_{ob2}/s_{ob1} να είναι ίσος με τον λόγο s_2/s_1 . Τελικώς η σχέση (31) μετατρέπεται στην σχέση (33).

$$\Theta I = 1 - (s_{ob2} / s_{ob1}) \quad (33)$$

Άρα η θερμοκαλυπτική ικανότητα είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση τα σήματα s_{ob} . Το s_{ob} είναι το σήμα του ανιχνευτή που αντιστοιχεί στην εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας του αντικειμένου. Υπενθυμίζεται ότι αυτό το μέγεθος υπολογίζεται από τον αλγόριθμο της κάμερας με την σχέση (24), ο οποίος στη συνέχεια το χρησιμοποιεί ο για να υπολογίσει την θερμοκρασία του αντικειμένου με την χρήση της σχέσης (26).

Γίνεται φανερό ότι για να υπολογίσουμε την θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού χρειάζεται το μέγεθος s_{ob} , ενώ η θερμοκάμερα παρέχει τις θερμοκρασίες. Η εταιρία που μας προμήθευσε την κάμερα, μας εξόπλισε και με ένα λογισμικό το οποίο περιέχει τον αλγόριθμο της κάμερας. Το λογισμικό ονομάζεται ResearchIR. Αυτό το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα, εισάγοντας το θερμογράφημα, να εξάγει τις τιμές s_{ob} για κάθε pixel. Το αρχείο που δημιουργεί η θερμοκάμερα, καθώς τραβάμε το θερμογράφημα, περιέχει το σήμα του κάθε ανιχνευτή s . Αυτό το σήμα s όπως αναφέρθηκε, αντιστοιχεί στη συνολική ακτινοβολία που δέχτηκε ο κάθε ανιχνευτής. Αυτές τις τιμές χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος της κάμερας και μέσα από την σχέση (24) υπολογίζει την s_{ob} για κάθε pixel. Στη συνέχεια μέσω της σχέσης (26) υπολογίζεται και η θερμοκρασία για κάθε pixel. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως κάθε θερμογράφημα που τραβάμε, εκτός από την τιμή s κάθε εικονοστοιχείου, περιέχει και τις τιμές όλων των παραμέτρων με τις οποίες πραγματοποιείται το θερμογράφημα, όπως τις σταθερές βαθμονόμησης R.B.F και τις εισαγόμενες παραμέτρους $\epsilon_{ob}, \omega\%, d, T_{atm}$.

Ο υπολογισμός της θερμοκαλυπτικής ικανότητας σύμφωνα με την σχέση (33), γίνεται ανεξαρτήτως από την παράμετρο της εκπεμπότητας και του συντελεστή μετάδοσης της ατμόσφαιρας και εξαρτάται μόνο από την υπέρυθρη ακτινοβολία που δέχεται η κάμερα. Η σχέση (32) όπως ειπώθηκε βασίζεται στην αναλογία του s με το ε_{ob} . Είναι επομένως αναγκαίο να επαληθευτεί ότι η σχέση (32) ισχύει κάτω από τις συνθήκες που περιγράφηκαν. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί μία μέθοδος επαλήθευσης της.

Παρόλο που δεν είναι αναγκαίο να υπολογιστούν αυτές οι παράμετροι για τον ορισμό της θερμοκαλυπτικής ικανότητας ενός υλικού, η καταγραφή τους έγινε κανονικά. Ο λόγος για τον οποίο χρειάζονται είναι ότι με αυτές μπορεί να εξαχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η θερμοκρασία του μέλανος σώματος, πράγμα μεγάλης χρησιμότητας. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες παράμετροι βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της υπέρυθρης θερμογραφίας αλλά και στην εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπληρωματικών συμπερασμάτων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κάμερα δουλεύει σε μήκη κύματος 7.5-13 μ m και η απόσταση από το μέλαν σώμα είναι μικρότερη από το 1 μέτρο. Επομένως σύμφωνα με το Σχήμα 10, ο συντελεστής μετάδοσης της ατμόσφαιρας είναι $\tau_{atm}=1$, ενώ η εκπεμπότητα του μέλανος σώματος ε_{ob} ή ε_{bb} είναι πάρα πολύ υψηλή, $\varepsilon_{ob}=0.98$ (ο τρόπος υπολογισμού θα δοθεί παρακάτω). Κατά συνέπεια η θερμοκαλυπτική ικανότητα των υλικών θα υπολογιστεί από την σχέση (33).

Γίνεται πλέον εμφανές ότι χρειάζεται να οριστεί μια μονάδα που να περιγράφει το σήμα που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία του αντικειμένου s_{ob} . Η μονάδα στην οποία μετριέται το σήμα s_{ob} είναι η [OS] object signal, μια μη-βαθμονομημένη μονάδα μέτρησης, η οποία χρησιμοποιείται για την σύγκριση των επιπέδων ακτινοβολίας που δέχεται ο αισθητήρας.

2.5 Μέθοδοι υπολογισμού εκπεμπότητας

Όταν η εκπεμπότητα του σώματος είναι άγνωστη μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω διαδικασίες που στηρίζονται στην εξής λογική. Όταν γνωρίζω ακριβώς την θερμοκρασία του σώματος ή ενός σημείου του σώματος και κρατώντας σταθερές όλες τις άλλες παραμέτρους, μπορώ να μεταβάλω την παράμετρο ϵ_{ob} ώσπου η θερμοκρασία που εξάγει η κάμερα να συμφωνεί με την ένδειξη του θερμομέτρου για το ίδιο σημείο.

Μία προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της εκπεμπότητας ενός σώματος είναι η εξής:

- Πάνω στην επιφάνεια του σώματος κολλιέται ένα κομμάτι υλικού υψηλής και γνωστής εκπεμπότητας και που χαρακτηρίζεται από υψηλή αγωγιμότητα .
- Ολόκληρο το σώμα θερμαίνεται σε θερμοκρασία τουλάχιστον 40 βαθμούς πάνω από αυτήν του περιβάλλοντος .
- Στη συνέχεια με την κάμερα μετριέται η θερμοκρασία του υλικού με την γνωστή εκπεμπότητα.
- Τέλος μετακινώντας το σημείο μέτρησης μακριά από το υλικό που κολλήσαμε με την γνωστή εκπεμπότητα αλλάζουμε την παράμετρο της εκπεμπότητας στην κάμερα ώστε η θερμοκρασία που μας δείχνει είναι ίδια με αυτή του υλικού γνωστής εκπεμπότητας.

Μία άλλη μέθοδος παρόμοια με την πάνω αλλά λιγότερη ακριβής είναι η εξής:

- Το σώμα θερμαίνεται σε μία θερμοκρασία μεγαλύτερη τουλάχιστον κατά 40 βαθμούς πάνω από αυτή του περιβάλλοντος και περιμένουμε ώστε να έρθει σε σχετική ισορροπία με την γύρω ατμόσφαιρα.
- Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα θερμόμετρο για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του σώματος.
- Τέλος μεταβάλλεται η παράμετρο της εκπεμπότητας της κάμερας ώστε η τιμή της θερμοκρασίας που υπολογίζει το θερμόμετρο να είναι ίδια με εκείνη της κάμερας.

Αυτήν είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση της εκπεμπότητας του υπό εξέταση σώματος της παρούσας εργασίας.

2.6 Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφούν οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν, βήμα προς βήμα, κατά την διεξαγωγή του πειράματος μας.

Αρχικά συνδέουμε την αντίσταση στην πρίζα και θερμαίνουμε την μεταλλική πλάκα ώστε να ξεπεράσει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τουλάχιστον 40 βαθμούς °C. Όπως είπαμε αυξάνουμε την θερμοκρασία της μαύρης πλάκας σε αυτή την τιμή για να εκπέμπει έντονα υπέρυθη ακτινοβολία και για να ξεχωρίζει από το γύρο περιβάλλον. Μειώνοντας έτσι τον ήχο από το περιβάλλον. Παρέχουμε θερμότητα στην πλάκα μέχρι να πετύχουμε θερμοκρασιακή ισορροπία, δηλαδή μέχρι η θερμοκρασία της μεταλλικής πλάκας να σταματήσει να αυξάνεται περαιτέρω και να απάγει όση θερμότητα δέχεται από την αντίσταση. Για να καταλάβουμε πότε η πλάκα έχει έρθει σε θερμοκρασιακή ισορροπία επαναβαθμονομούμε την θερμοκάμερα και βλέπουμε μέσα από αυτήν, αν μας δείχνει υψηλότερη θερμοκρασία από την προηγούμενη χρονική μέτρηση τότε ακόμα δεν έχει έρθει σε θερμοκρασιακή ισορροπία.

Αφότου βάλουμε την αντίσταση στην πρίζα περιμένουμε γύρω στα 10 λεπτά για να φτάσει η συγκεκριμένη πλάκα σε θερμοκρασιακή ισορροπία. Ενεργοποιούμε την κάμερα και εισάγουμε τις απαραίτητες παραμέτρους που μας ζητάει, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την οποία περνούμε από τον θερμομέτρο υψηλής ακρίβειας το οποίο έχουμε ήδη ενεργοποίηση για να συγκλίνει και εκείνος στην τελική του τιμή, την απόσταση που έχει ο πομπός από τον δέκτη που είναι όπως έχουμε αναφέρει είναι $l_{cbb} = 0.8 \text{ m}$, και την σχετική υγρασία.

Για την συγκεκριμένη παράμετρο τα δεδομένα πάρθηκαν μέσω ενός αισθητήρα HOBO της σχετικής υγρασίας για 5 ημέρες και εξήχθηκε ο μέσος όρος, ο εισήχθηκε στην κάμερα. Φυσικά η σχετική υγρασία του χώρου κατά την οποία έγιναν οι μετρήσεις είναι διαφορετική από αυτήν που εισήχθηκε, αλλά το σφάλμα που προκύπτει από την αυτή την διαφορά είναι μηδαμινό. Αυτό συμβαίνει επειδή η απόσταση l_{cbb} είναι τόσο μικρή που ο συντελεστής μετάδοσης της ατμόσφαιρας που υπολογίζει ο αλγόριθμος της κάμερας και για τον οποίο ζητάει την παράμετρο της σχετικής υγρασίας εκφυλίζεται στην μονάδα. Επομένως έχουμε τέλεια μετάδοση και σχεδόν μηδενική απορρόφηση από την ατμόσφαιρα, $TT_{atm}=1$.

Τέλος εισάγεται η παράμετρος της εκπεμπότητας ϵ_{ob} στην οποία παίρνει την τιμή 0.98, διότι αυτή είναι η τιμή της εκπεμπότητας της μαύρης μπογιάς. Η εκπεμπότητα της πλάκας επαληθεύτηκε εκτελώντας την διαδικασία η οποία έχει αναφερθεί ήδη στην προηγούμενη ενότητα.

Έχοντας μια καλή εκτίμηση της εκπεμπότητας ϵ_{ob} μπορούμε να προχωρήσουμε στην λήψη θερμογραφήματων. Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο αφού γνωρίζουμε ότι ο βαθμός εκπομπής και ο συντελεστής μετάδοσης της ατμόσφαιρας είναι σχεδόν μονάδες, ο ακριβής προσδιορισμός τους δεν είναι αναγκαίος, αλλά επιτρέπει μια καλή μετάφραση της συνολικής ακτινοβολίας που δέχεται η κάμερα σε θερμοκρασία της πλάκας.

Έχοντας λοιπόν εισάγει τις παραμέτρους όπως ειπώθηκε, μπορούμε να αρχίσουμε και παίρνουμε τα θερμογραφήματα. Για κάθε κατάσταση καταγράφονται δέκα θερμογραφήματα ενώ μετά από κάθε λήψη η κάμερα επαναβαθμονομείται. Αυτό συμβαίνει γιατί παίρνοντας τον μέσο όρο από δέκα θερμογραφήματα, μειώνεται το σφάλμα που εισάγουν οι σταθερές βαθμονόμησης R,B,F, και αυξάνεται έτσι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων .

Στην αρχή βαθμονομείται η κάμερα μας (calibration), πατώντας το κατάλληλο κουμπί και καταγράφεται ένα θερμογράφημα του μέλανος σώματος. Έπειτα πατάμε το κουμπί της βαθμονόμησης ξανά και καταγράφουμε ακόμα μία φορά το μέλαν σώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να παρθούν δέκα λήψεις του μέλανος σώματος. Μετά σταθεροποιούμε το υπό εξέταση υλικό 0.4 μέτρα από την θερμοκάμερα, $l_{cm} = 0.4$, και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία άλλες δέκα φορές, αποκτώντας έτσι δέκα θερμογραφήματα με το υπό εξέταση υλικού μπροστά από το μέλαν σώμα. Στη συνέχεια αν αλλάξει η απόσταση του υλικού από την κάμερα l_{cm} , ξαναπαίρνουμε άλλες δέκα λήψεις με τον τρόπο που περιγράφηκε.

Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή για κάθε υλικό ξεχωριστά. Για ορισμένα υλικά δεν εκτελούνται όλα τα βήματα διότι το αποτέλεσμα που δίνουν είναι προφανές από την αρχή. Όποτε δεν χρειάζεται η περεταίρω ανάλυση σε διαφορετικές θέσεις από την κάμερα γιατί γνωρίζουμε εκ των προτέρων τι αποτέλεσμα θα προκύψει.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε φορά που πατιέται το κουμπί της κάμερας για την λήψη ενός θερμογραφήματος, η κάμερα μετατοπίζεται ελαφρός, με αποτέλεσμα τα θερμογραφήματα που έχουμε, να μην είναι απόλυτος ευθυγραμμισμένα. Αναπτύχθηκε λοιπόν ένας κώδικας που να υπολογίζει την μετατόπιση αυτή αλλά και να ευθυγραμμίζει τα θερμογραφήματα μεταξύ τους. Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιαστεί ενδεικτικά ένα παράδειγμα της μετατόπιση της θερμοκάμερας.

2.7 Επεξεργασία Δεδομένων

Αφού έχουμε όλα τα θερμογραφήματα που χρειαζόμαστε προχωράμε στην εισαγωγή τους στον υπολογιστή μέσω της αποσπώμενης κάρτας μνήμης που διαθέτει η κάμερα μας.

Στη συνέχεια τα αρχεία αυτά διαβάζονται με το λογισμικό ResearchIR το οποίο παρέχει ο ίδιος κατασκευαστής της κάμερας. Τα αρχεία στο συγκεκριμένο στάδιο έχουν κατάληξη .IMG. Το συγκεκριμένο λογισμικό περιέχει τον αλγόριθμο με τον οποίο η IR camera υπολογίζει το s_{ob} και δίνει την δυνατότητα να υπολογισμού του s_{ob} για άλλες τιμές εκπομπής του υλικού και για διαφορετικούς συντελεστές τ_{atm} . Η συγκεκριμένη ιδιότητα του λογισμικού θα φανεί εξαιρετικά χρήσιμη στη συνέχεια. Το λογισμικό ResearchIR μπορεί να διαβάσει τα συγκεκριμένα αρχεία .IMG και να εξάγει τις μετρήσεις μας σε μορφή αρχείου .csv (comma separated values) σε διάφορους τύπους μονάδων όπως Celsius, Kelvin, Fahrenheit και OS (object signal). Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε δύο μορφές, Celsius και OS, οπότε για κάθε θερμογράφημα μέσω του λογισμικού, λαμβάνονται πίσω δύο αρχεία τύπου .csv τα οποία περιέχουν τις μετρήσεις στους δύο προαναφερθέντες τύπους μονάδων.

Στη συνέχεια διαβάζονται τα αρχεία .csv με το Matlab μετατρέποντας τα δεδομένα σε πίνακες δεδομένων με διαστάσεις φυσικά 320×240 , όσοι και οι ανιχνευτές – pixel της κάμερας. Αναλύοντας τους συγκεκριμένους πίνακες θα γίνει και η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

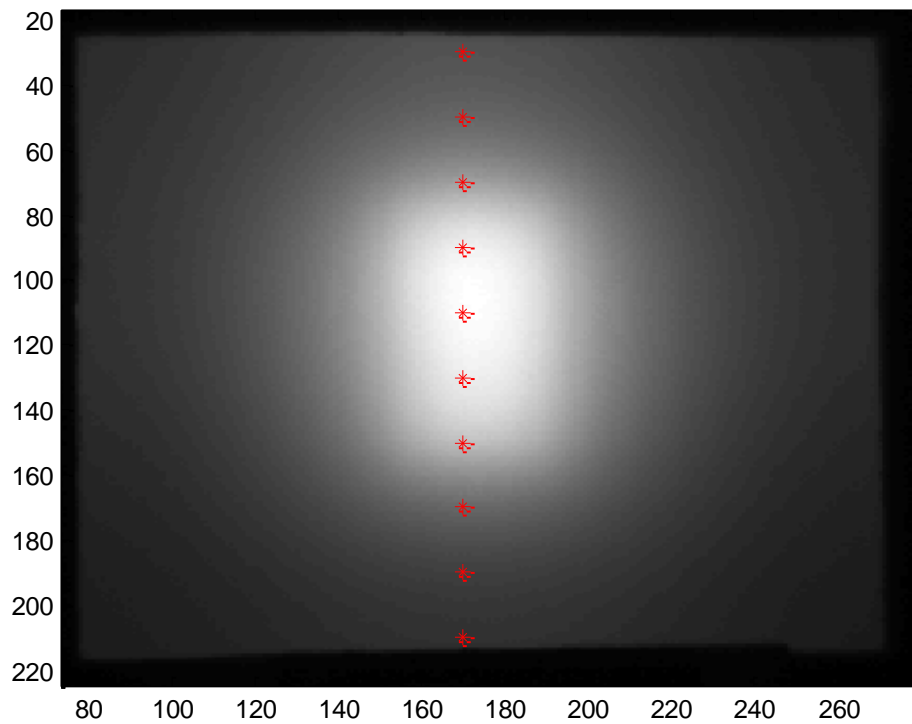
Με τα δεδομένα στους πίνακες του Matlab μπορεί να προχωρήσει η ευθυγράμμισή τους. Πραγματοποιούμε αυτή την ενέργεια κατά την διάρκεια της λήψης των θερμογραφημάτων η κάμερα δέχεται μικρομετατοπίσεις οι οποίες μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, οπότε είναι αναγκαίο να εξαλειφθούν. Αφού έχουμε ευθυγραμμίσει τους πίνακες προχωράμε στον υπολογισμό του μέσου όρου για κάθε δέκα πίνακες τιμών. Έτσι καταλήγουμε να έχουμε τους δύο τελικούς πίνακες κάθε υλικού τόσο στους βαθμούς Κελσίου όσο και στις μονάδες OS για κάθε l_{cm} . Φτάνοντας σε αυτό το σημείο μπορεί να επιτέλους να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της θερμοκαλυπτικής ικανότητας για κάθε ένα από τα υλικά, μέσω των αλγόριθμων που αναπτύχθηκαν και να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.

3. Αποτελέσματα

Στον παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκα στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα σχολιαστούν και θα αιτιολογηθούν. Αλλά πρώτα, θα επαληθευτεί η αρχή στην οποία βασιστήκαμε, για τον υπολογισμό της θερμοκαλυπτικής ικανότητας αυτών των υλικών. Θα επαληθευτεί η αναλογία μεταξύ του σήματος που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία που φθάνει την κάμερα μας (s) και της εκπεμπότητας του υλικού (ϵ_{ob}) που εξετάστηκε, βλέπε σχέση (32). Έχοντας αποδείξει ότι ισχύει η σχέση (32), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (33) με την οποία υπολογίζεται η θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού.

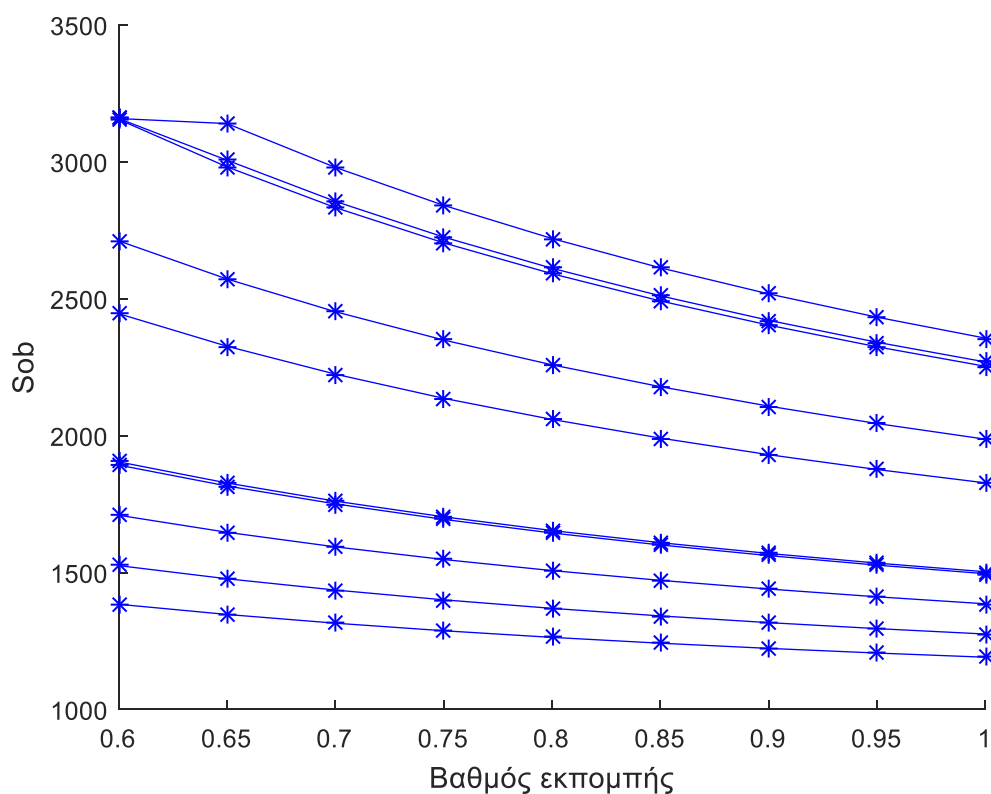
3.1 Εξέταση Αναλογίας $s - \epsilon_{ob}$

Στην παρούσα ενότητα εξετάστηκε, αν όντως υπάρχει γραμμική αναλογία μεταξύ του s και του βαθμού εκπομπής ϵ_{ob} , όταν $TT_{atm}=1$ και $\epsilon_{ob} \approx 1$. Επιχειρήθηκε δηλαδή επαλήθευση της σχέσης (32). Από τη σχέση (32) βγαίνει το εξής συμπέρασμα. Για να ισχύει εξίσωση (32) πρέπει είτε να δείξουμε την γραμμική αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών $s - \epsilon_{ob}$ είτε να δείξουμε ότι το s_{ob} είναι γραμμικά αντιστρόφως ανάλογο του ϵ_{ob} . Εμείς θα δείξουμε ότι ισχύει το δεύτερο. Για να το πετύχουμε αρχικά εξάγουμε το ίδιο θερμογράφημα μεταβάλλοντας την παράμετρο του βαθμού εκπεμπότητας ϵ_{ob} . Συγκεκριμένα εξάγαμε το θερμογράφημα για τιμές του ϵ_{ob} από 1 έως 0.6 ενώ κρατώντας παράλληλα σταθερό το $TT_{atm}=1$. Μετά επιλέχτηκαν ορισμένα εικονοστοιχεία του θερμογραφήματος, βλέπε Σχήμα 15, και καταγράφηκε η τιμή s_{ob} που έχουν. Υπενθυμίζεται ότι την τιμή s_{ob} υπολογίζεται από το λογισμικό μέσω της σχέσης (24). Είναι κατανοητό ότι η τιμή s_{ob} ενός pixel μεταβάλλεται με την αλλαγή της τιμής ϵ_{ob} .



Σχήμα 15: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος με τις κόκκινες κουκίδες να αποτελούν τα εικονοστοιχεία (pixel) που θα συγκρίνουμε για τις διάφορες τιμές του βαθμού εκπεμπότητας ϵ_{ob} .

Άρα ένα pixel, σε συγκεκριμένη θέση του θερμογραφήματος, θα έχει διαφορετική τιμή s_{ob} για κάθε τιμή του ϵ_{ob} που επιλέχθηκε. Αυτή η σχέση μεταξύ της s_{ob} , που υπολογίζει το λογισμικό και του ϵ_{ob} φαίνεται στο Σχήμα 16. Κάθε γραμμή αναπαριστά την μεταβολή αυτή για κάθε ένα από τα επιλεγμένα σημεία. Δηλαδή για δέκα σημεία, υπάρχουν δέκα γραμμές.



Σχήμα 16: Διάγραμμα της έντασης OS των pixel που επιλέξαμε σε συνάρτηση με τον βαθμό εκπομπής του θερμογραφήματος.

Υπενθυμίζεται ότι με s_{ob} συμβολίζεται το σήμα που παράγει ο ανιχνευτής λόγω της ακτινοβολίας του αντικειμένου. Υπολογίζεται από τον αλγόριθμο της κάμερας, και η μονάδα του είναι η OS. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η μεταβολή του s_{ob} , σε μονάδες OS που υπολογίζει το λογισμικό της κάμερας, για ένα σταθερό σημείο είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον βαθμό εκπομπής. Η συμπεριφορά αυτή του s_{ob} είναι λογική, διότι μειώνοντας τον βαθμό εκπεμπότητας του αντικειμένου, ενώ η ακτινοβολία που φθάνει στην κάμερα παραμένει σταθερή, σημαίνει ότι το αντικείμενο βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία και άρα εκπέμπει εντονότερα. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα μπορούμε να το εξάγουμε και παρατηρώντας την εξίσωση (24).

Αλλά αυτό που μας ενδιαφέρει, είναι η περιοχή όπου $\epsilon_{ob} \geq 0.9$. Στη συγκεκριμένη περιοχή το s_{ob} είναι γραμμικά αντιστρόφως ανάλογο του ϵ_{ob} για κάθε γραμμή-σημείο της πλάκας. Οπότε επαληθεύεται η αρχή ότι για $T_{atm}=1$ και $\epsilon_{ob} \approx 1$, το s είναι γραμμικώς ανάλογο του ϵ_{ob} . Άρα ισχύει η σχέση (32).

Ακόμα μια παρατήρηση που εξάγεται από το διάγραμμα, Σχήμα 16 και επαληθεύεται από την εξίσωση (24), είναι ότι παρουσιάζεται μη γραμμικότητα σε χαμηλούς βαθμούς εκπομπής. Αυ-

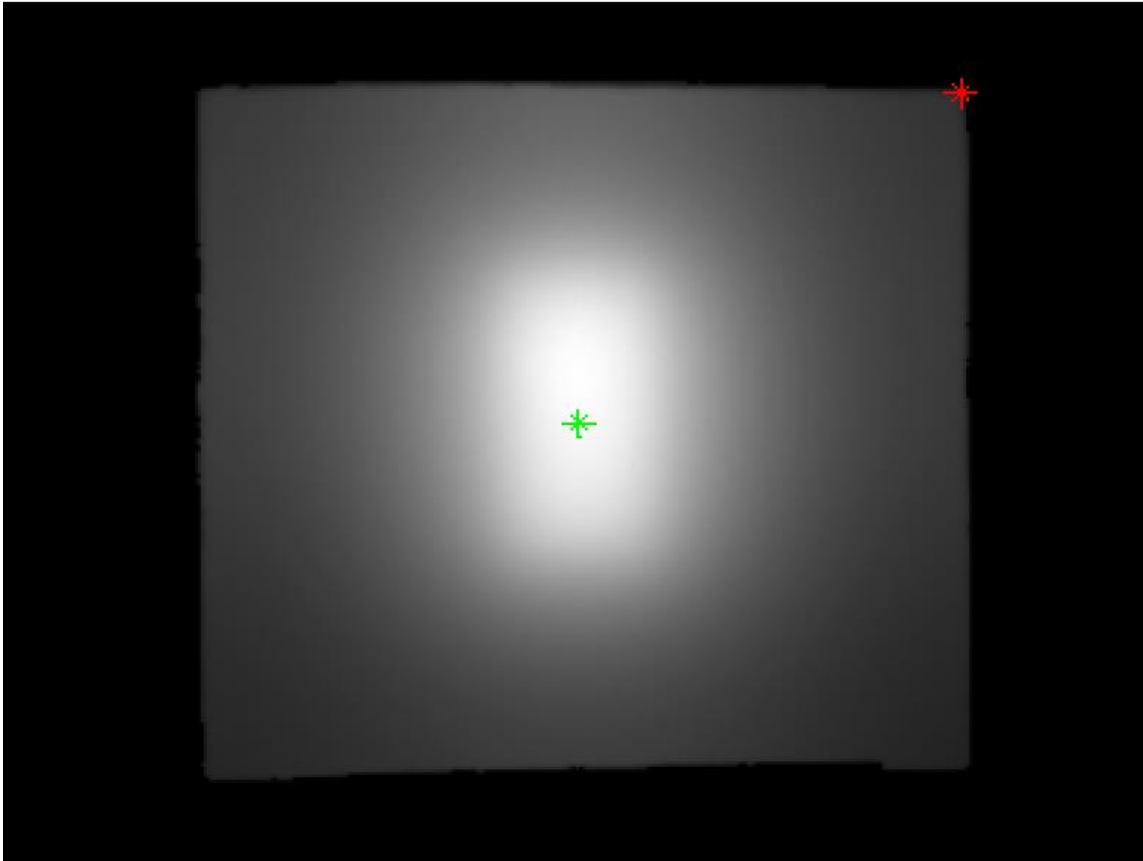
τό συμβαίνει γιατί καθώς μειώνεται ο βαθμός εκπομπής του αντικειμένου, τόσο αυξάνεται η επίδραση του δεύτερου όρου της εξίσωσης (24). Άρα η εξίσωση (24) μπορεί να θεωρηθεί γραμμική μόνο για υψηλούς βαθμούς εκπομπής και όταν υπάρχει καλή μετάδοση από την ατμόσφαιρα. Στο πείραμα της παρούσας εργασίας υπάρχει σχεδόν τέλεια ατμοσφαιρική μετάδοση και πολύ υψηλή εκπεμπότητα, της τάξης $\epsilon_{ob} = 0.98$, οπότε η σχέση με την οποία υπολογίζεται η θερμοκαλυπτική ικανότητα παίρνει την μορφή της εξίσωσης (33).

3.2 Θερμογράφημα Μέλανος Σώματος

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην ενότητα της Πειραματικής Διαδικασίας, πρέπει να πάρουμε το θερμογράφημα του μέλανος σώματος δέκα φορές. Το ένα θερμογράφημα εξάγεται μέσω του λογισμικού ResearchIR και σε μονάδες και Celsius σε μονάδες OS. Οπότε δημιουργούνται δύο σετ των δέκα πινάκων, στα οποία εφαρμόζεται ευθυγράμμιση. Τέλος, υπολογίζεται ο μέσος όρος τους αποκτώντας έτσι τα τελικά θερμογραφήματα για το μέλαν σώμα για δύο τύπους μονάδων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις.

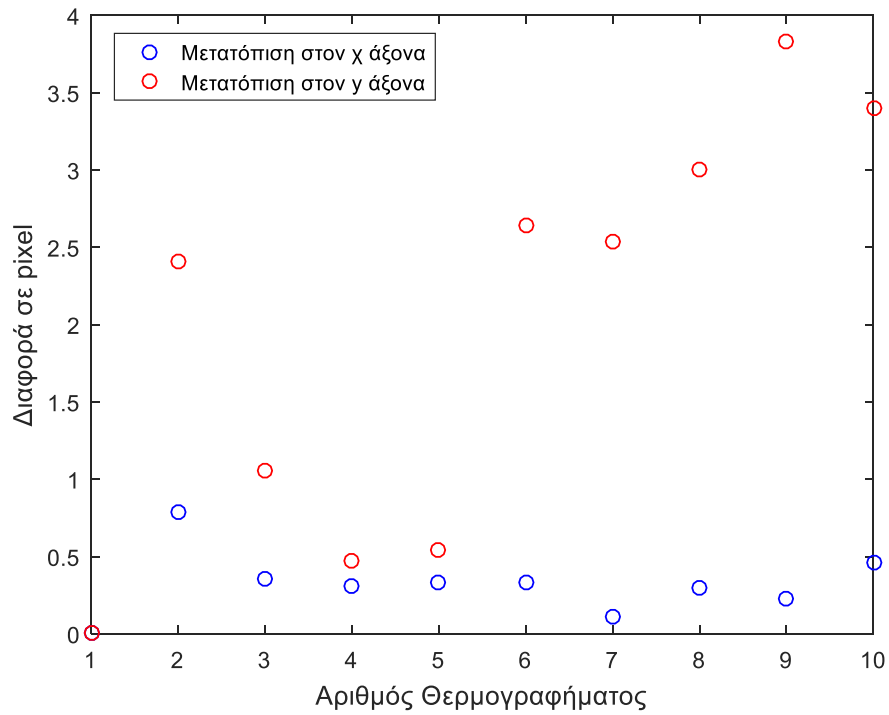
Η ευθυγράμμιση πραγματοποιείται διότι όπως αναφέρθηκε κατά την διάρκεια λήψης των θερμογραφήματων, η κάμερα μετατοπίζεται ελαφρά. Πρέπει λοιπόν να υπολογιστεί η μετατόπιση που δέχεται η κάμερα για να κριθεί εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα. Για να υπολογιστεί η μετατόπιση που δέχεται η κάμερα κατά την διάρκεια λήψης των θερμογραφήματων ακολουθήθηκε η εξής μέθοδος. Αρχικά εντοπίζεται το κέντρο βάρους της μαύρης πλάκας και το άνω δεξιό άκρο της, για κάθε ένα από τα δέκα θερμογραφήματα που λήφθηκαν για το μέλαν σώμα. Έχοντας την θέση του κέντρου βάρους κάθε εικόνας, τις συγκρίνουμε με αυτήν του πρώτου θερμογραφήματος. Έτσι, υπολογίζεται η μετατόπιση που είχε η κάμερα στον x, y άξονα και με την βοήθεια του άνω δεξιού άκρου μπορεί να βρεθεί η περιστροφή γύρω από το κέντρο βάρους.

Στο Σχήμα 17, φαίνεται το θερμογράφημα του μέλανος σώματος με τη πράσινη κουκίδα να αναπαριστά το κέντρο βάρους του και με την κόκκινη το άνω δεξιό του άκρο, για $l_{cbb} = 0.8m$.

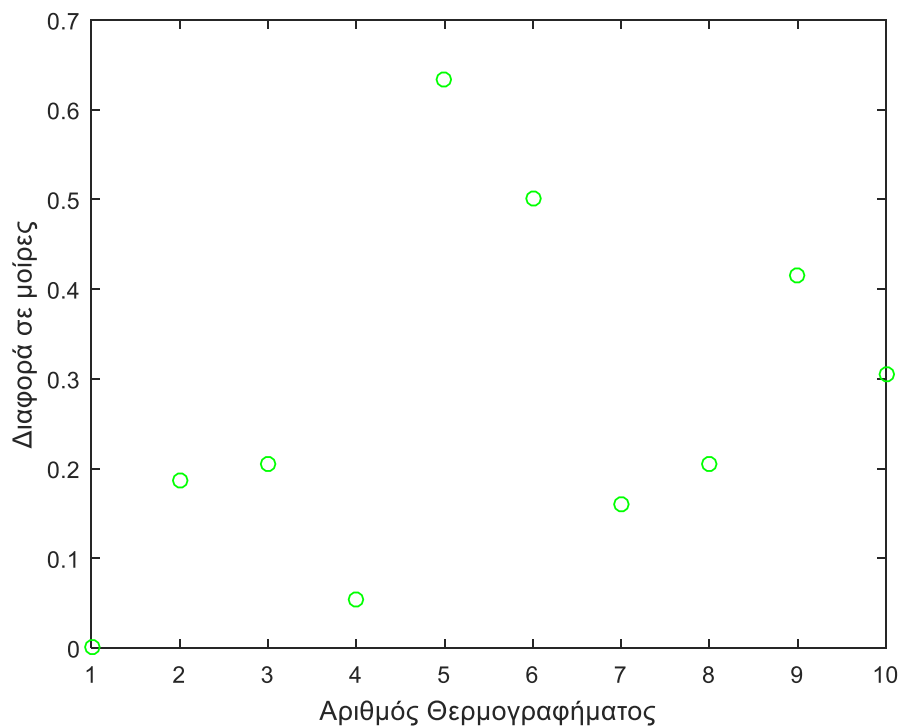


Σχήμα 17: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος, $l_{cbb} = 0.8m$. Με πράσινη κουκίδα συμβολίζεται το κέντρο βάρους της πλάκας, με κόκκινη το άνω δεξιό της άκρο.

Συγκρίνοντας τη θέση στην οποία βρίσκεται το κέντρο βάρους της πλάκας κάθε θερμογραφήματος, με αυτή του πρώτου, προκύπτει το Σχήμα 18. Όπου παρατηρείται ότι η μετατόπιση στον γ άξονα είναι σημαντική και παρουσιάζεται μη αμελητέο σφάλμα, γεγονός που κάνει την ευθυγράμμιση των θερμογραφημάτων επιτακτική. Αντίθετα η μετατόπιση στο χ άξονα και η περιστροφή γύρω από το κέντρο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 19, δεν είναι σημαντική. Με την ευθυγράμμιση των θερμογραφημάτων τα σφάλματα που εισάγονται από αυτές τις τρεις παραμέτρους θα μειωθούν σημαντικά αλλά όχι ολοκληρωτικά.

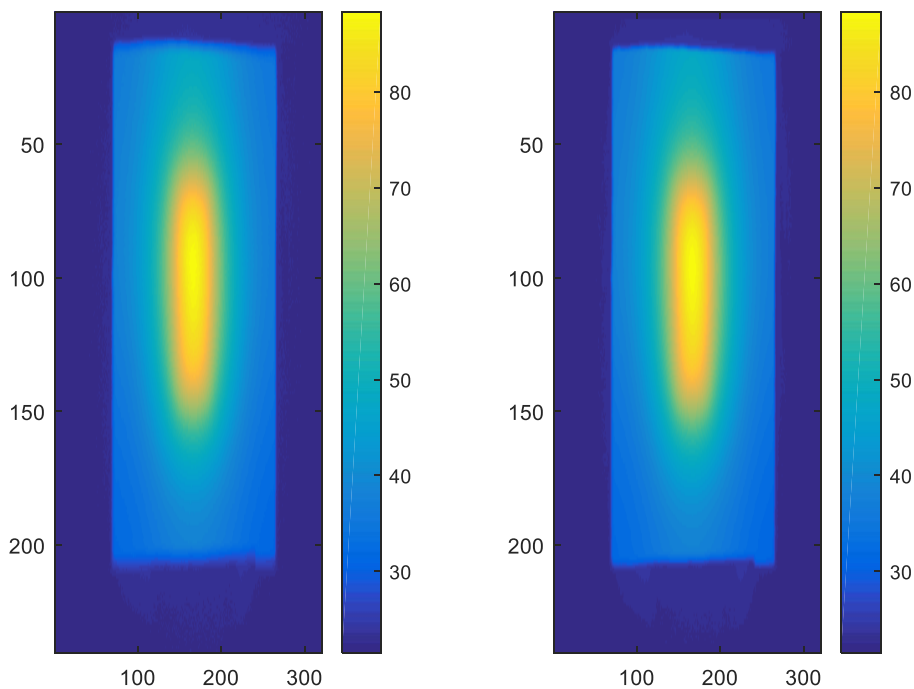


Σχήμα 18: Μετατόπιση που έχει σημειωθεί κατά την λήψη των θερμογραφήματων του μέλανος σώματος στο χ άξονα με μπλε κουκίδες και στο γ άξονα με κόκκινες κουκίδες σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα.



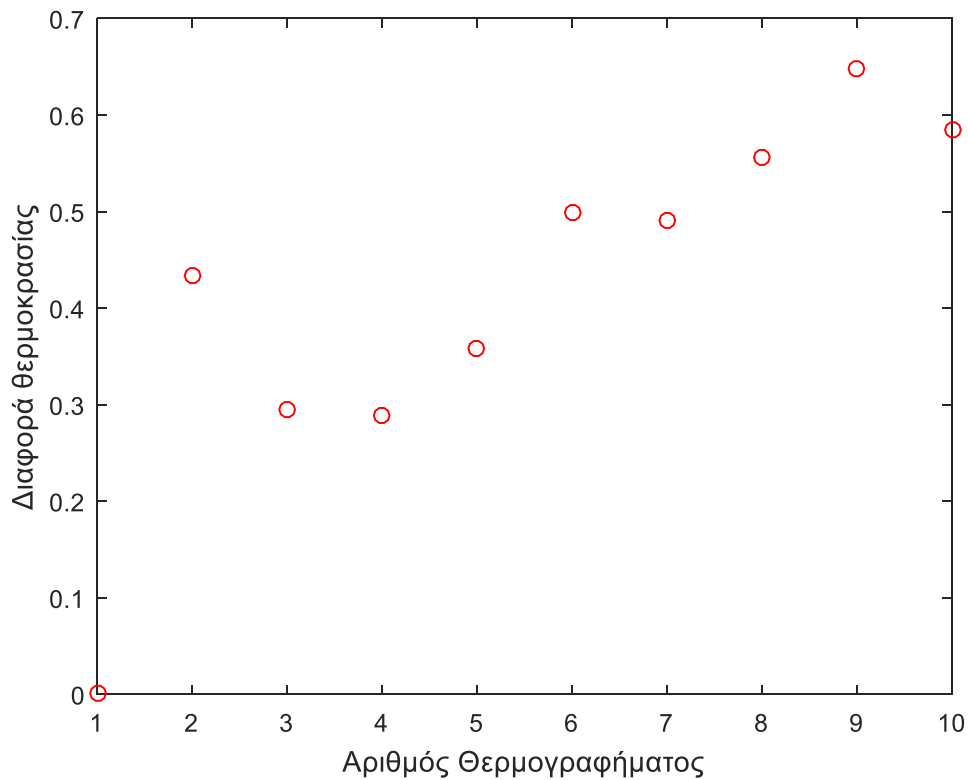
Σχήμα 19: Περιστροφή που έχει σημειωθεί κατά την λήψη των θερμογραφήματων του μέλανος σώματος σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα, σε μοίρες.

Στο Σχήμα 20 αριστερό μέρος του, παρουσιάζεται ο μέσος όρος αυτών των δέκα θερμογραφημάτων, όταν αυτά δεν έχουν ευθυγραμμιστεί μεταξύ τους. Παρατηρώντας το κάτω κομμάτι της μαύρης πλάκας, γίνεται εμφανής η μετατόπιση της κάμερας στο γ άξονα η οποία υπολογίστηκε στο Σχήμα 18. Παρατηρώντας τώρα την περίπτωση που τα θερμογραφήματα έχουν ευθυγραμμιστεί μεταξύ τους, η οποία φαίνεται στο δεξιό κομμάτι στο Σχήμα 20, γίνεται ξεκάθαρη η ελάττωση αυτού του φαινομένου. .



Σχήμα 20: Μέσος όρος των θερμογραφημάτων του μέλανος σώματος στα 0.8m, αριστερά όταν δεν έχουν ευθυγραμμιστεί, δεξιά όταν έχουν ευθυγραμμιστεί.

Όπως ειπώθηκε η ευθυγράμμιση δεν λύνει εντελώς το πρόβλημα. Για παράδειγμα, εάν υπολογιστεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δέκα ευθυγραμμισμένων θερμογραφημάτων και του πρώτου θερμογραφήματος, ρικελ ανά ρικελ και υπολογιστεί η μέση τιμή τους, προκύπτει το Σχήμα 21.



Σχήμα 21: Μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας που έχουν τα αντίστοιχα ριχέλ του εκάστοτε θερμογραφήματος σε σχέση με το πρώτο θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα 0.8m, αφού έχουν ευθυγραμμιστεί.

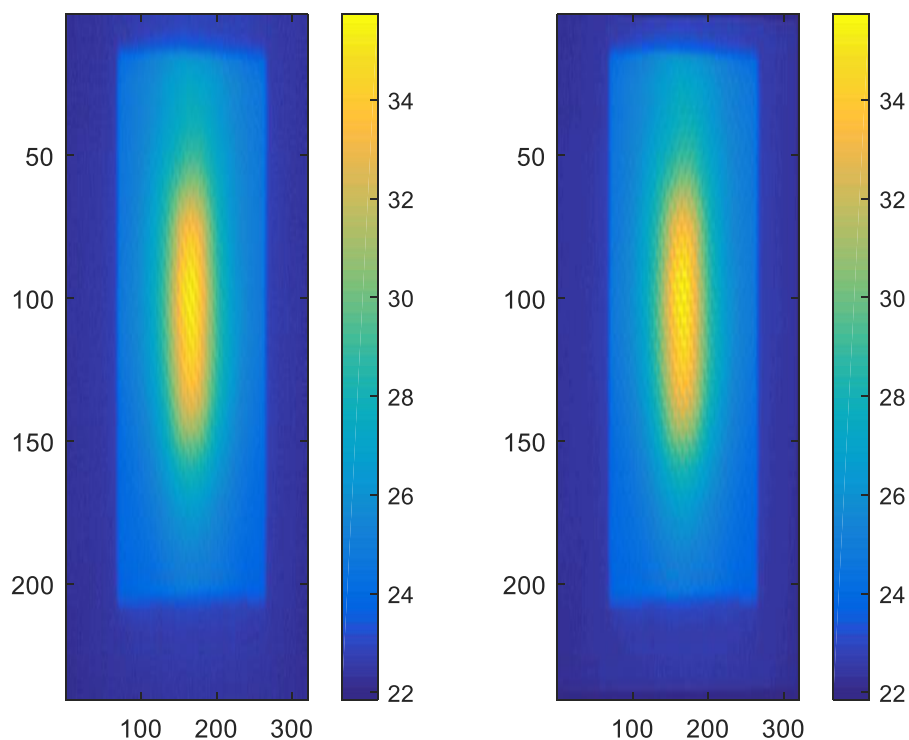
Παρατηρείται ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε εικονοστοιχεία της ίδιας θέσης, διαφορετικών θερμογραφημάτων. Η μεγαλύτερη διαφορά για τα θερμογραφήματα του μέλανος σώματος, είναι περίπου 0.65 βαθμούς Κελσίου. Αυτές οι διαφορές προκύπτουν από την ημιτελή ευθυγράμμιση που πραγματοποιήθηκε αλλά και από την διαφορετική βαθμονόμηση που έκανε η κάμερα μας. Αφού όπως αναφέρθηκε, πριν από κάθε θερμογράφημα δίνεται εντολή στην κάμερα να εκτελέσει καινούργια βαθμονόμηση ώστε να μειωθεί το σφάλμα που προκύπτει από την ίδια την διαδικασία της βαθμονόμησης. Υπενθυμίζεται ότι η θερμοκρασία και η τιμή του s_{ob} , υπολογίζονται με την εξίσωση (26) και (24) αντίστοιχα, με τις δύο εξισώσεις να επηρεάζονται από το σφάλμα που εισάγουν οι σταθερές R,B,F.

Αποφαινεται λοιπόν πως κατά την διάρκεια της λήψης των θερμογραφημάτων, του μέλανος σώματος υπάρχουν πολλές πηγές σφαλμάτων. Έτσι, πριν ξεκινήσει η ανάλυση ενός υλικού, επαναλαμβάνεται η διαδικασία προσδιορισμού του θερμογραφήματος του μέλανος σώματος.

3.3 Υλικό ΣΚ1

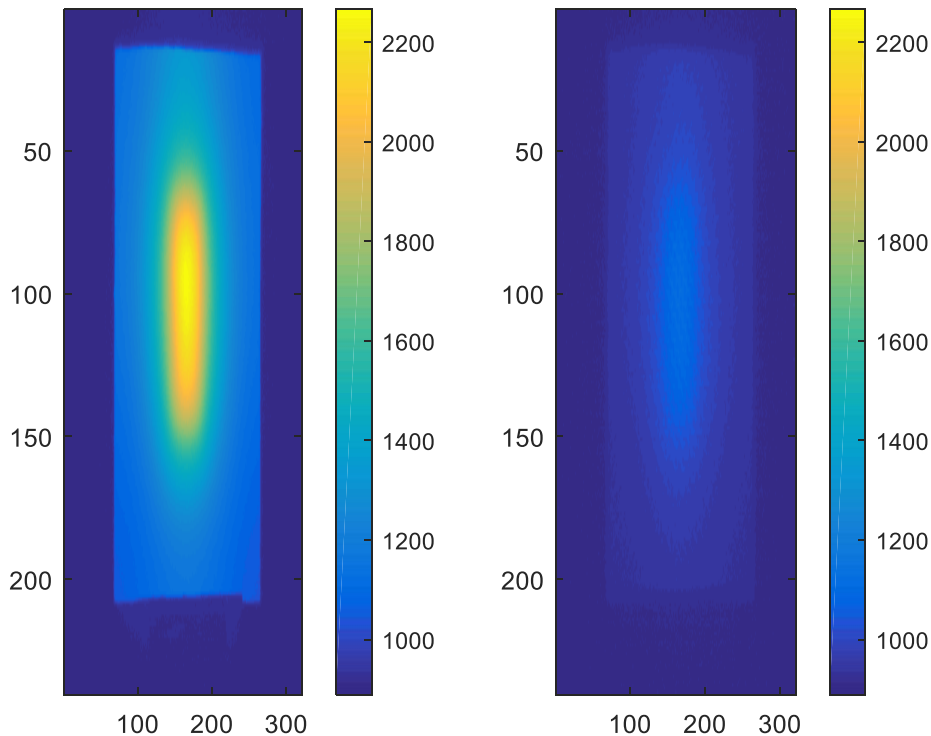
Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για το υλικό με κωδικό όνομα ΣΚ1, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 1.

Αρχικά όπως είπαμε, πρέπει να προσδιοριστεί το θερμογράφημα του μέλανος σώματος. Η διαδικασία αυτή περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Μετά εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία στα θερμογραφήματα του ΣΚ1 με αυτήν που εφαρμόστηκε στα θερμογραφήματα του μέλανος σώματος, δηλαδή ευθυγράμμιση των θερμογραφημάτων και εξαγωγή του μέσου όρου τους, με $l_{cm} = 0.4m$. Τα αποτελέσματα είναι εμφανή στο Σχήμα 22 ιδιαίτερα στο κάτω άκρο της πλάκας.



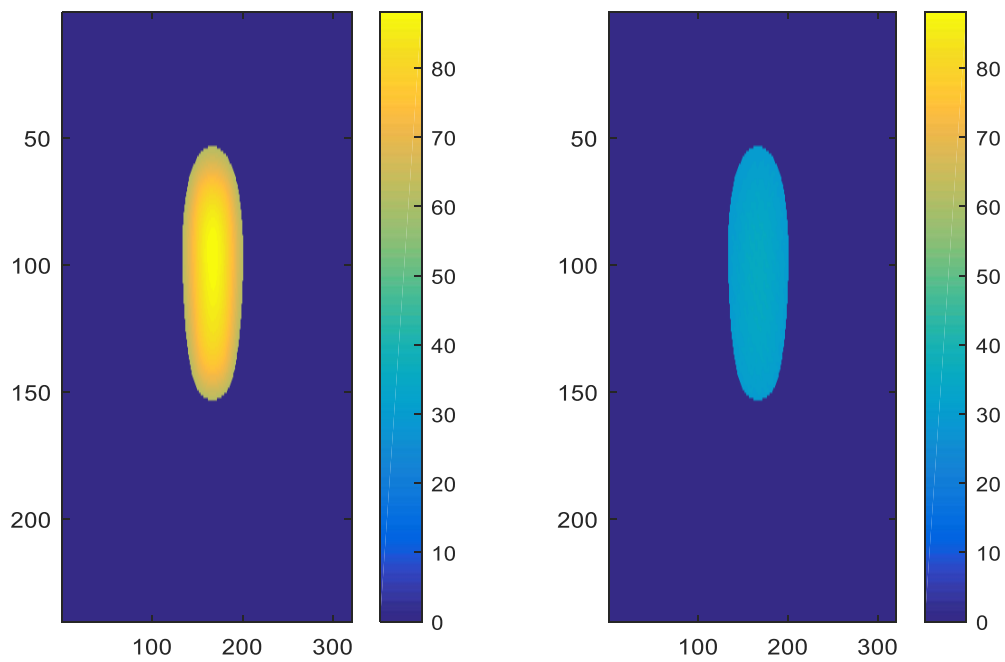
Σχήμα 22: Μέσος όρος των θερμογραφημάτων του ΣΚ1 στα 0.4m, αριστερά όταν δεν έχουν ευθυγραμμιστεί, δεξιά όταν έχουν ευθυγραμμιστεί, σε μονάδες C°.

Έχοντας τώρα και το θερμογράφημα του μέλανος σώματος αλλά και εκείνο του ΣΚ1, μπορεί να γίνει η σύγκρισή τους όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 23. Παρατηρούμε ότι το ΣΚ1 δεν αφήνει μεγάλο ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας να περάσει.

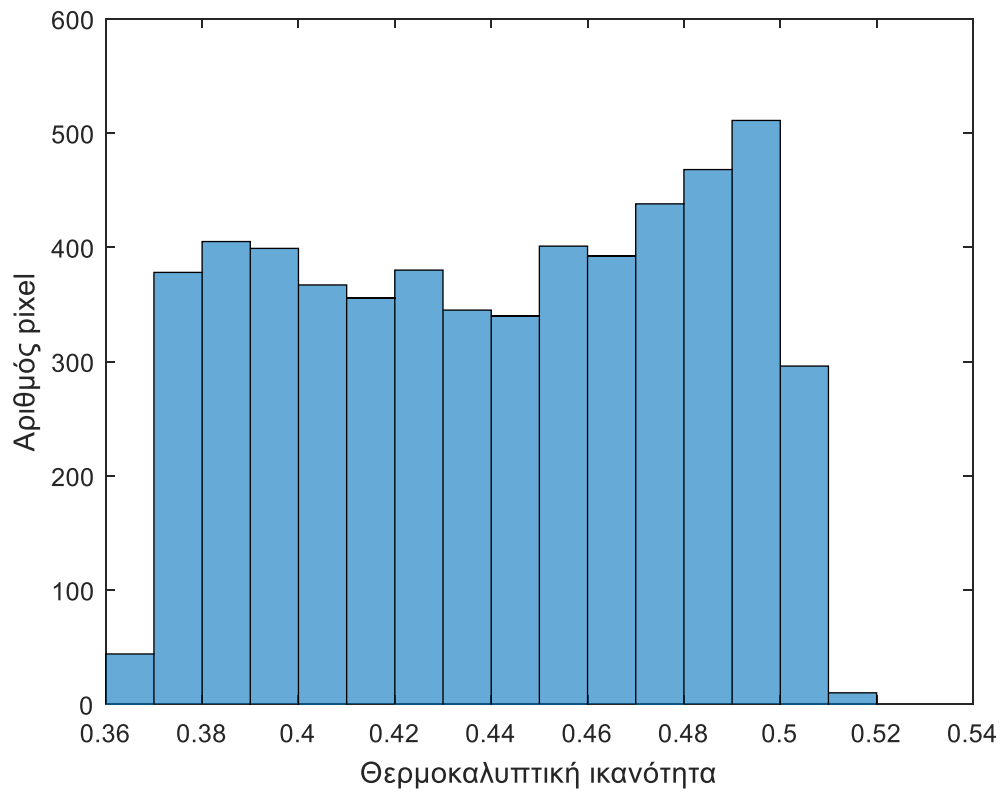


Σχήμα 23: Αριστερά το θερμογράφημα του μέλανος σώματος και δεξιά το θερμογράφημα του ΣΚ1 με $I_{cm}=0.4$, σε μονάδες OS

Στη συνέχεια βρίσκουμε την περιοχή του μέλανος σώματος με ρixel έντασης άνω των 40 βαθμών Κελσίου από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος που καταγράφηκε. Έπειτα βρίσκουμε τα αντίστοιχα ρixel στο θερμογράφημα του ΣΚ1, βλέπε Σχήμα 24 και τα επιλέγουμε αυτά τα ρixel γιατί, αυτά δεν επηρεάζονται έντονα από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Αυτό προκύπτει από την βασική εξίσωση, σχέση (24), όσο αυξάνεται η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αντικειμένου που μελετάται και του περιβάλλοντος, τόσο λιγότερο επηρεάζει το περιβάλλον τις μετρήσεις με την ακτινοβολία του. Τα ρixel μετά από αυτή την διάκριση αριθμούνται στα 5273, δηλαδή μελετάται το 6.8% των αρχικών εικονοστοιχείων. Να σημειωθεί ακόμα ότι έχει προηγηθεί ευθυγράμμιση αποτυπώματος του ΣΚ1 πάνω στο μέλαν σώμα, ώστε να υπάρξει ακόμη καλύτερη ακρίβεια.

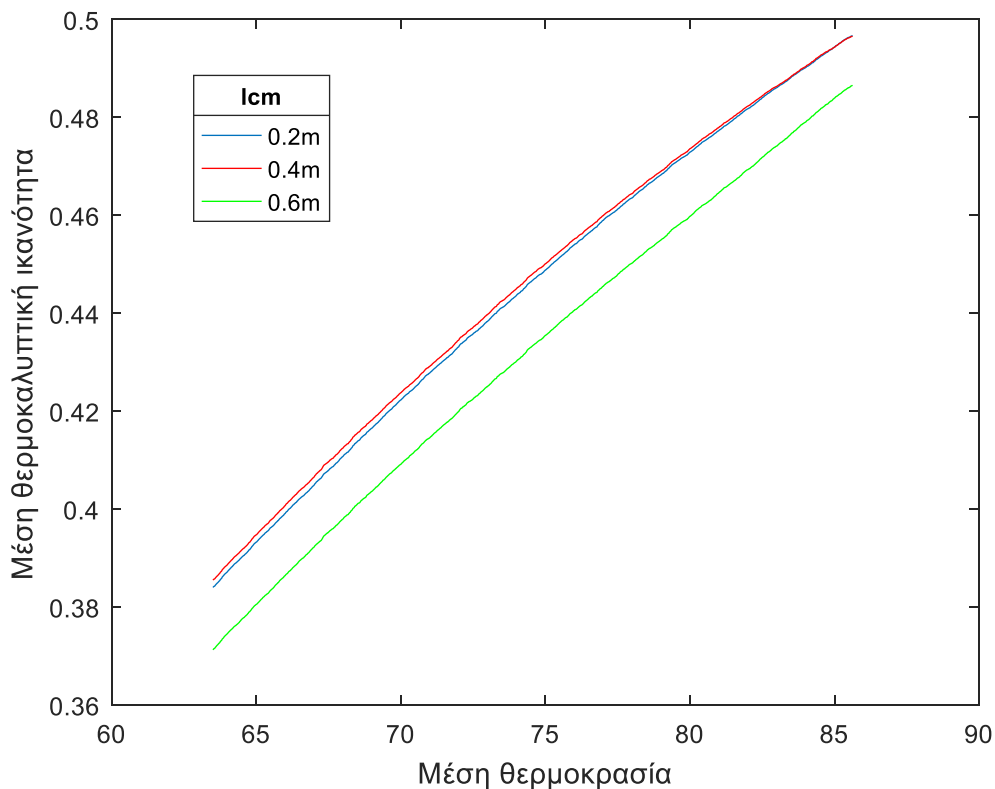


Σχήμα 24: Περιοχή του μέλανος σώματος με ρixel έντασης άνω των 40 βαθμών Κελσίου από την θερμοκρασία του παραβάλλοντος που έχουμε καταγράψει στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρixel στο υλικό 1, στα 0.4m.



Σχήμα 25: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας που υπολογίσουμε για κάθε ρixel για το πρώτο υλικό στα 0.4m.

Στο Σχήμα 25, παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκαλυπτικής ικανότητας της περιοχής που επιλέχθηκε. Παρατηρείται ότι η θερμοκαλυπτική ικανότητα δεν παραμένει σταθερή, αλλά αντιθέτως κυμαίνεται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος. Αυτό οφείλεται στη διακύμανση της θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στην πλάκα.



Σχήμα 26: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες pixel με εύρος 5 βαθμών Κελσίου, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ1, για $l_{cm} = 0.2, 0.4, 0.6m$.

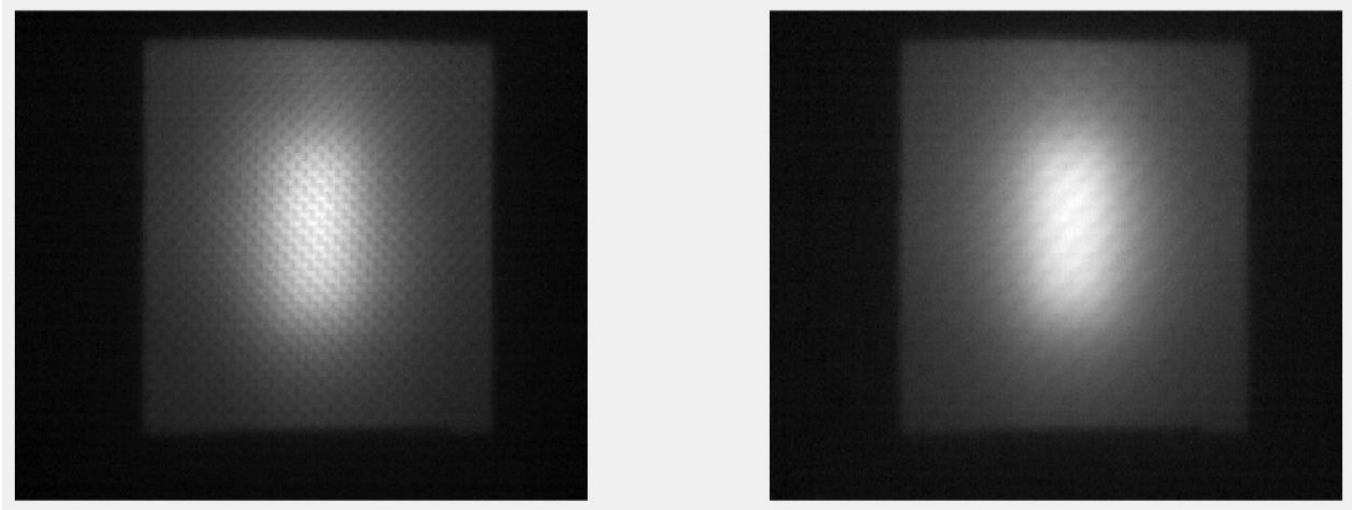
Για να ερευνηθεί η εξάρτηση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας από την θερμοκρασία της μαύρης πλάκας δημιουργήθηκε ο εξής αλγόριθμος. Τα εικονοστοιχεία σε χωρίζονται σε ομάδες. Κάθε ομάδα περιέχει εικονοστοιχεία των οποίων η θερμοκρασία τους δεν διαφέρει πάνω από 5 βαθμούς Κελσίου. Για κάθε μία ομάδα βρίσκονται τα αντίστοιχα pixel στο θερμογράφημα του υλικού και υπολογίζεται στοιχείο προς στοιχείο η θερμοκαλυπτική ικανότητα. Τέλος υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκαλυπτικής ικανότητας και παρουσιάζονται σε συνάρτηση με την μέση θερμοκρασία τους. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκαλυπτικής ικανότητας της περιοχής που επιλέχθηκε. Παρατηρείται ότι η θερμοκαλυπτική ικανότητα δεν παραμένει σταθερή, αλλά αντιθέτως κυμαίνεται σε ένα αρκετά μεγάλο

εύρος. Αυτό οφείλεται στη διακύμανση της θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στην πλάκα. Στο Σχήμα 26 φαίνονται τα διαγράμματα που προκύπτουν για το ΣΚ1 για τις τρεις διαφορετικές τιμές του l_{cm} . Αυτό που συμπεραίνεται κατευθείαν από το Σχήμα 26, είναι ότι η θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού δεν παραμένει σταθερή σε σχέση με την θερμοκρασία του πομπού, και αυτό είναι λογικό, αφού για κάθε θερμοκρασία το μέλαν σώμα εκπέμπει σε διαφορετικά μήκη κύματος και με διαφορετική ένταση ανά μήκος κύματος. Παράλληλα ως γνωστόν η θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού όπως και όλες οι άλλες ιδιότητες του όπως η απορροφητικότητα, η εκπεμπότητα κλπ., εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που δέχονται ή εκπέμπουν. Άρα αυτή η διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας σε σχέση με την θερμοκρασία είναι λογική.

Τα αποτελέσματα που έχουμε για $l_{cm} = 0.2m$ και για $l_{cm} = 0.6m$ και $l_{cm} = 0.4m$ αναμένεται να είναι παρόμοια μεταξύ τους, διότι η απόσταση του υλικού από την κάμερα δεν επηρεάζει με κάποιο τρόπο την θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού. Από την στιγμή που δεν αλλάζουν οι ιδιότητες των υλικών, ούτε η θερμοκρασία του μέλανος σώματος και αντίστοιχα η ένταση με την οποία εκπέμπουν και απορροφούν και μεταδίδουν την υπέρυθη ακτινοβολία, δεν θα έπρεπε να μεταβάλλεται η θερμοκαλυπτική ικανότητα με την l_{cm} . Όμως στο Σχήμα 26 φαίνεται ότι υπάρχουν αποκλίσεις, ιδιαίτερα όταν το $l_{cm} = 0.6m$. Οι μεταβολές που παρουσιάζονται οφείλονται κυρίως στην αλλαγή του πεδίου όρασης της κάμερας FOV (Field Of View). Όσο πιο κοντά είναι το υλικό στην κάμερα τόσο αυξάνεται η ανάλυση για ένα μικρότερο κομμάτι του υλικού. Το αντίθετο αποτέλεσμα λαμβάνεται όταν το υλικό απομακρύνεται από την κάμερα. Επιπλέον όταν αλλάζει η l_{cm} επηρεάζεται και το στιγμιαίο οπτικό πεδίο IFOV της κάμερας, δηλαδή η περιοχή που μελετάει ένα μεμονωμένο pixel. Όσο αυξάνεται η τιμή του l_{cm} τόσο αυξάνεται και η περιοχή που βλέπει ένα μεμονωμένο pixel. Αντίθετα όσο μειώνεται η τιμή του l_{cm} τόσο μικραίνει και η περιοχή που βλέπει ένα μεμονωμένο pixel. Αυτό σημαίνει ότι η κάμερα μπορεί να ανιχνεύσει όλο και μικρότερου μεγέθους λεπτομέρειες.

Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν αντιληπτά και με το μάτι, συγκρίνοντας δύο θερμογραφήματα με διαφορετική απόσταση του υλικού από την κάμερα (l_{cm}) και κρατώντας σταθερή την θέση του μέλανος σώματος (Σχήμα 27). Στα δεξιά η απόσταση l_{cm} είναι 0.6 μέτρα, ενώ στα αριστερά είναι 0.2 μέτρα. Στο αριστερό θερμογράφημα τα διάκενα που έχει το υλικό μας είναι πιο ευδιάκριτα από ότι στην δεξιά, διότι όπως αναλύθηκε όσο πιο κοντά είναι το αντικείμενο μας στην κάμερα τόσο περισσότερα pixel αφιερώνονται για μικρότερη έκταση υλικού.

Ο συγκεκριμένος παράγοντας της απόστασης υλικού κάμερας (l_{cm}) δεν επηρεάζει τόσο έντονα τα αποτελέσματα για το ΣΚ1, επειδή εάν παρατηρήσουμε την Εικόνα 1, το ΣΚ1 είναι μορφολογικά ομοιόμορφο σε όλη την έκταση του.



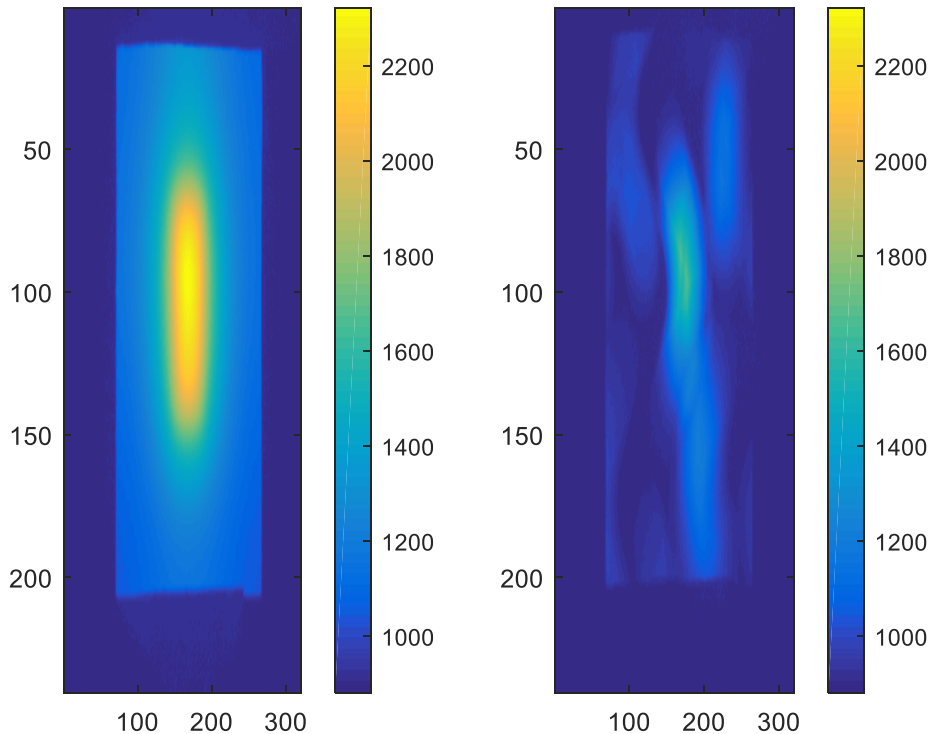
Σχήμα 27: Παρουσίαση δύο θερμογραφημάτων με διαφορετική l_{cm} , αριστερά $l_{cm} = 0.2m$, στα δεξιά $l_{cm} = 0.6m$.

Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει και τον μέσο όρο της θερμοκαλυπτικής ικανότητας όταν συγκρίνουμε στοιχείο προς στοιχείο την ένταση OS μεταξύ των δύο θερμογραφημάτων. Υπενθυμίζεται ότι τα εικονοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν θερμοκρασία $40^{\circ}C$ πάνω από αυτή του περιβάλλοντος. Οπότε όταν το $l_{cbb} = 0.4m$ και $l_{cm} = 0.4m$ η $MΘΙ = 0.4441$ ή 44.41% . Για $l_{cm} = 0.2m$ η $MΘΙ = 0.4431$ ή 44.31% . Για $l_{cm} = 0.6m$ η $MΘΙ = 0.4306$ ή 43.06% .

3.4 Υλικό ΣΚ 2

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί το υλικό με κωδικό όνομα ΣΚ2 το οποίο εμφανίζεται στην Εικόνα 2. Όπως έχει αναφερθεί, πριν μελετηθεί η θερμοκαλυπτική ικανότητα ενός υλικού επαναλαμβάνεται η διαδικασία της λήψης και προσδιορισμού του μέλανος σώματος, επειδή με το πέρασμα του χρόνου οι συνθήκες κατά τις οποίες διεξάγεται το πείραμα έχουν αλλάξει, π.χ. η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οπότε με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Ειδικότερα, με την επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας ορίζεται με καλύτερη ακρίβεια η περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία άνω το 40 βαθμών Κελσίου από αυτή του περιβάλλοντος.

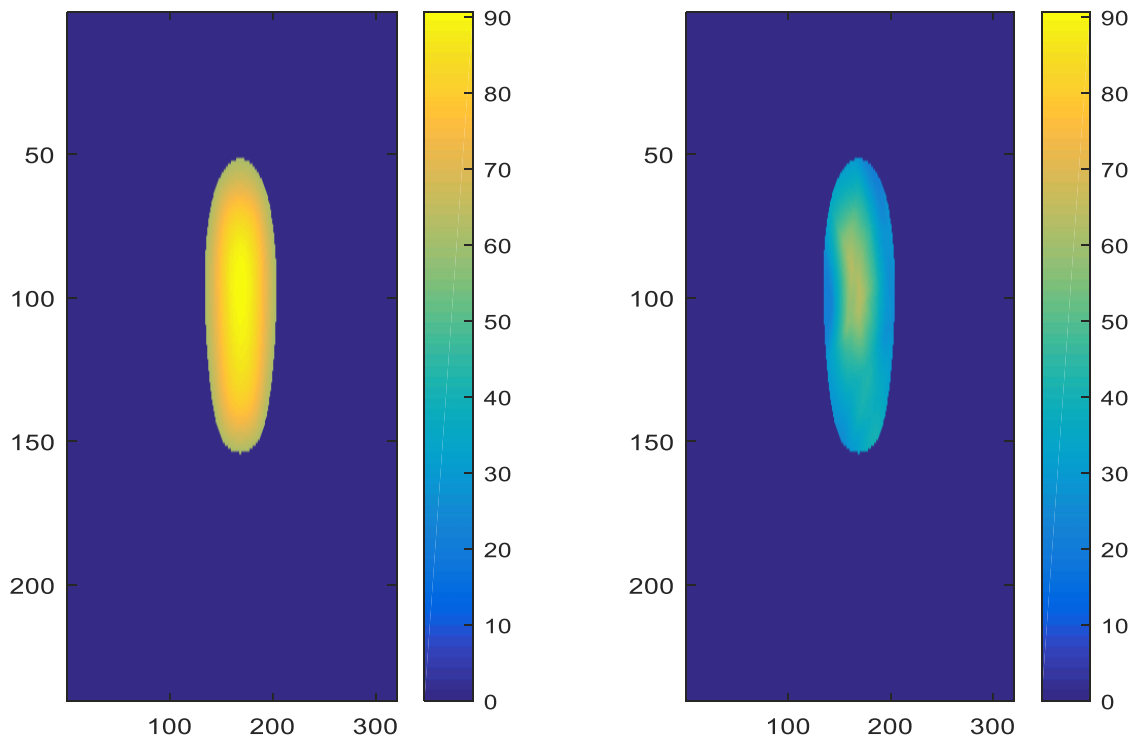
Στη συνέχεια τοποθετούμε το ΣΚ2 μπροστά από την κάμερα, με $l_{cm} = 0.4m$ και ακολουθείται η διαδικασία προσδιορισμού του τελικού θερμογράφηματος όπως έγινε και για το ΣΚ1. Στο Σχήμα 28 συγκρίνεται το θερμογράφημα του μέλανος σώματος με αυτό του ΣΚ2, σε μονάδες OS και παρατηρείται ότι σε μερικά σημεία έχουμε καλή μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας ενώ σε άλλα σημεία υπάρχει σχεδόν μηδενική μετάδοση.



Σχήμα 28: Τελικό θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα αριστερά και του ΣΚ2 στα δεξιά με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.

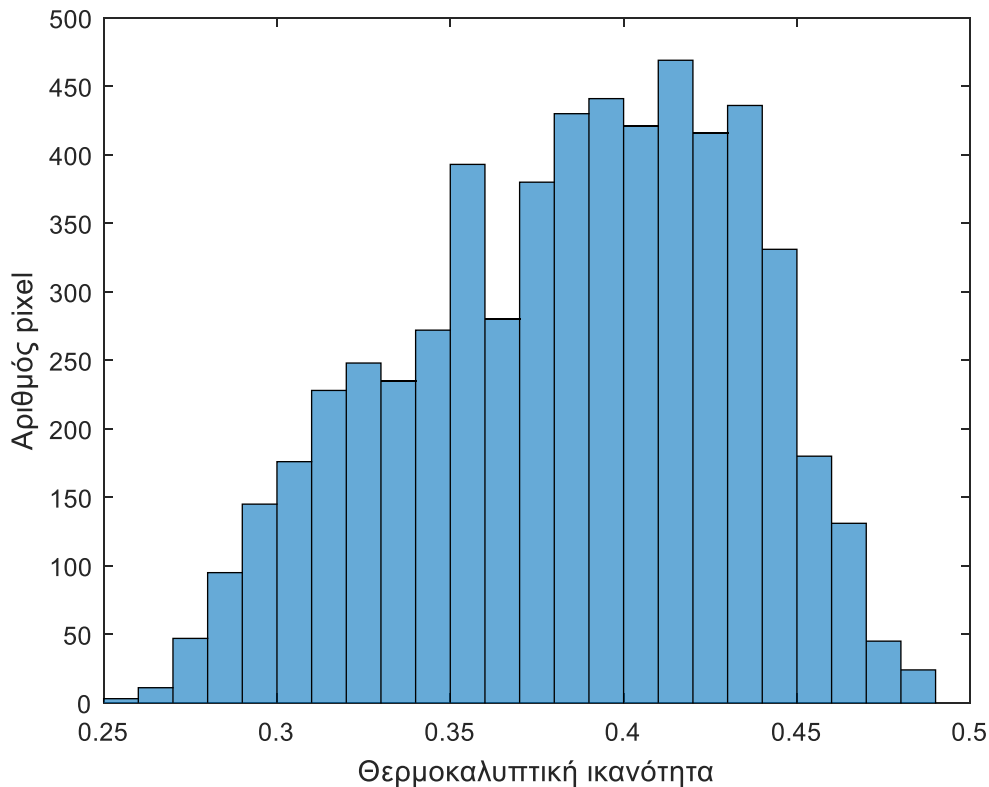
Αυτή η ανομοιομορφία του ΣΚ2, οφείλεται κυρίως στο ότι μερικές περιοχές του υφάσματος είναι κομμένες σε συγκεκριμένο μοτίβο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Στα σημεία που δεν υπάρχει ύφασμα η υπέρυθρη ακτινοβολία μεταδίδεται μέσω του αέρα. Για αυτό το λόγο στις συγκεκριμένες περιοχές υπάρχει καλύτερη μετάδοση της ακτινοβολίας.

Ακολουθεί η ευθυγράμμιση του θερμογραφήματος του ΣΚ2 σε αυτό του μέλανος σώματος και επιλογή της περιοχής του θερμογραφήματος του μέλανος σώματος, όπου η θερμοκρασία είναι άνω των 40 βαθμών Κελσίου από αυτήν του περιβάλλοντος (Σχήμα 29).



Σχήμα 29: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα pixel στο ΣΚ2 με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες °C.

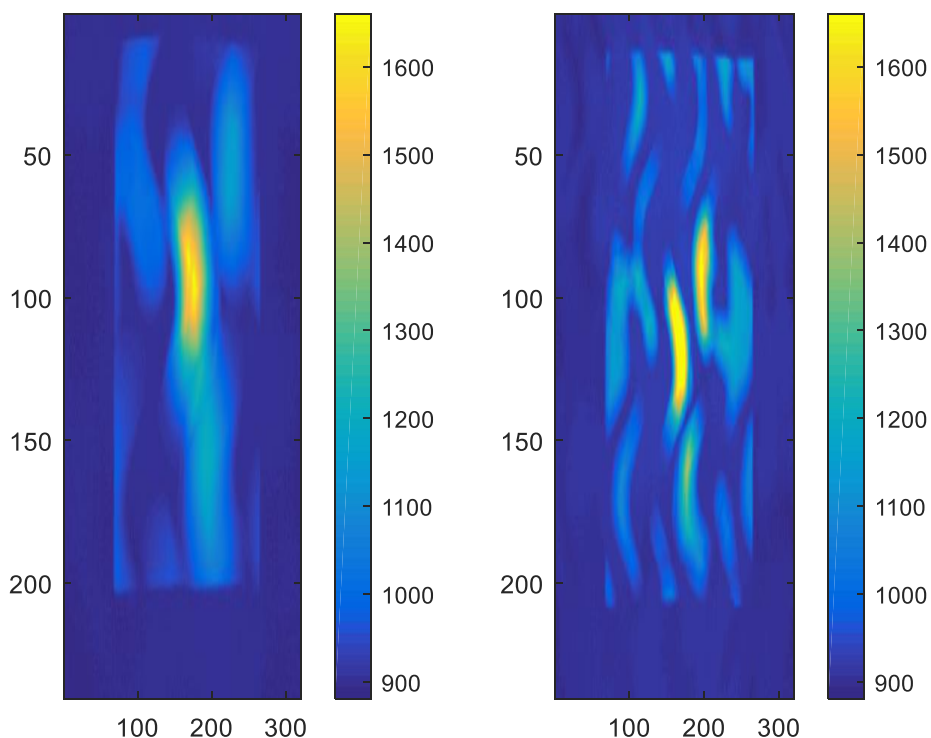
Ακόμα παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας (Σχήμα 30) και φαίνεται ότι υπάρχει έντονη διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας, ενώ το εύρος των τιμών είναι πολύ μεγάλο.



Σχήμα 30: Ιστογράμμο της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του SK2, για $l_{cm}=0.4m$.

Αυτή η διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας, συνήθως οφείλεται στην μεταβολή των συντελεστών μετάδοσης, απορρόφησης και ανάκλασης του υλικού σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση οφείλεται κυρίως στην ανομοιομορφία του υφάσματος του SK2 την οποία αναφέρθηκε παραπάνω.

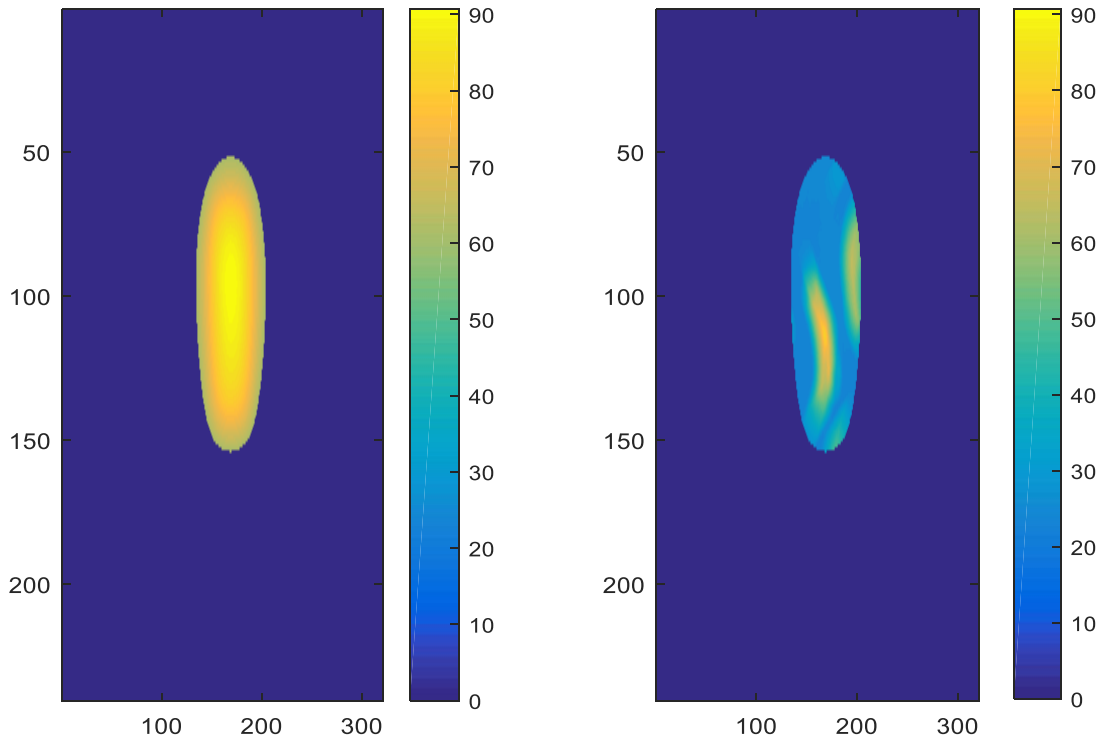
Τα αποτελέσματα για την θερμοκαλυπτική ικανότητα του SK2 για $l_{cm}=0.4m$ δεν είναι απολύτως έγκυρα, διότι η έντονη μορφολογία του υλικού δεν είναι κατανομημένη ομοιόμορφα στο κομμάτι του θερμογραφήματος που μελετήθηκε, βλέπε Σχήμα 29. Για αυτό τον λόγο δεν θα μελετήσουμε παρακάτω την περίπτωση κατά την οποία το $l_{cm}=0.2$, καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση μειώνεται το πεδίο όρασης FOV και μαζί μειώνεται η έκταση του υλικού η οποία αναλύεται. Συνεπώς το πεδίο προς μελέτη, έχει μη ικανοποιητική αναλογία υφάσματος-κενού. Για το συγκεκριμένο υλικό είναι πολύ ενδιαφέρον η σύγκριση του θερμογραφήματος του SK2 με $l_{cm}=0.4m$ με το θερμογράφημα με $l_{cm}=0.6m$.



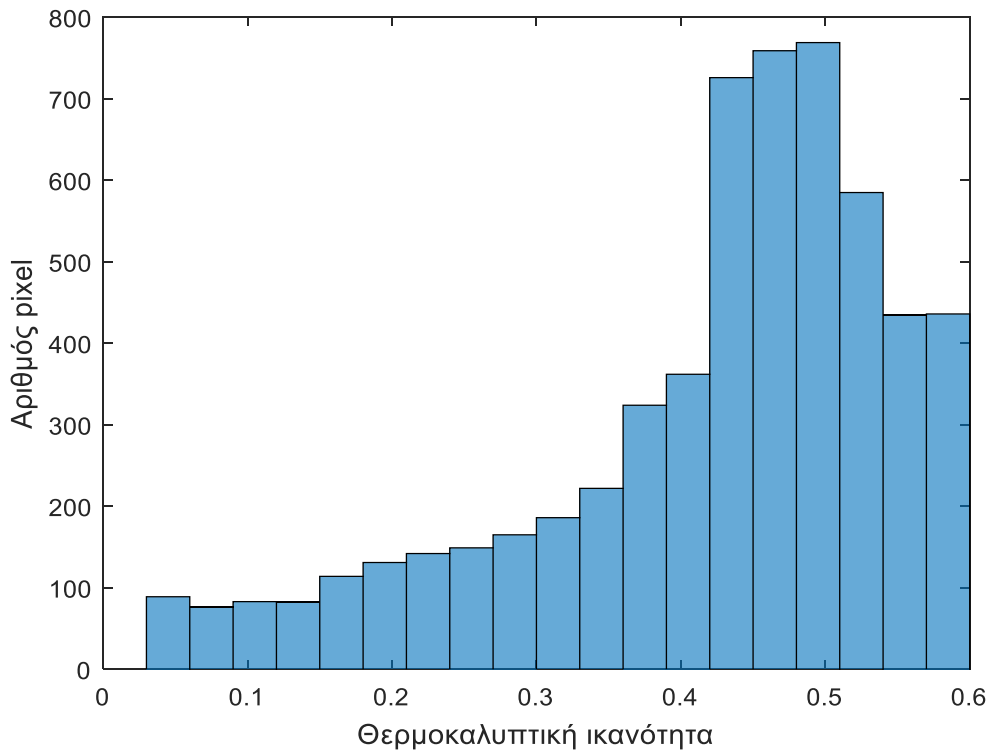
Σχήμα 31: Θερμογραφήμάτων του ΣΚ2 για $l_{cm}=0.4m$ αριστερά, για $l_{cm}=0.6m$ δεξιά, σε μονάδες OS .

Από το Σχήμα 31, αντιλαμβανόμαστε ότι στην περίπτωση που το $l_{cm}=0.6m$ αναλύεται μεγαλύτερη περιοχή του υλικού τόσο ώστε να λαμβάνεται πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα. Στο Σχήμα 32, παρουσιάζεται η περιοχή που ξεχωρίσαμε για να αναλύσουμε. Παρατηρείται ότι η συγκεκριμένη περιοχή που ξεχωρίσαμε έχει ικανοποιητική αναλογία υφάσματος-κενού. Με την σύγκριση της περιοχής που επιλέχθηκε να μελετηθεί από το θερμογράφημα του ΣΚ2 για $l_{cm}=0.4m$ (Σχήμα 29) με αυτή για $l_{cm}=0.6m$, Σχήμα 32, θα παρατηρείται ότι οι περιοχές παρουσιάζουν έντονες διαφοροποιήσεις. Το ίδιο παρατηρείται όπως είναι λογικό και για την θερμοκαλυπτική ικανότητα που υπολογίζουμε, με τη σύγκριση του Σχήμα 30 με το Σχήμα 33.

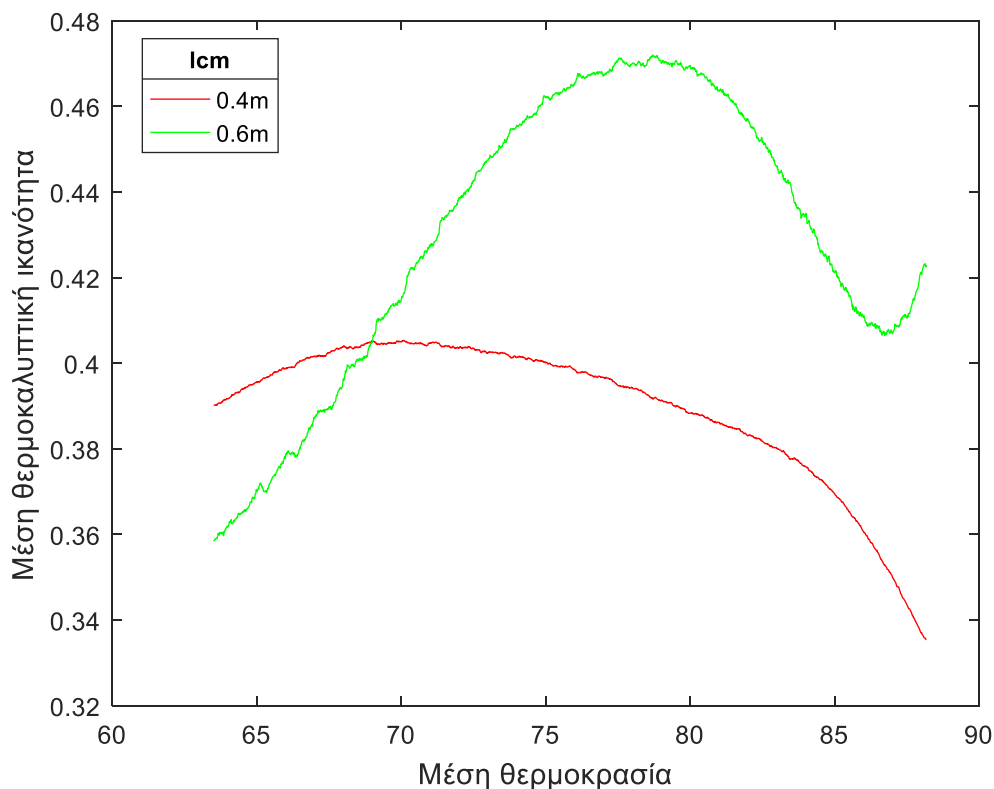
Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας σε σχέση με την θερμοκρασία για δύο διαφορετικές τιμές του l_{cm} . Παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτή η έντονη διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, οφείλεται κυρίως όπως ειπώθηκε, στην μορφολογία του υλικού. Ο ίδιος παράγοντας επηρεάζει και τη μορφή των καμπύλων. Για παράδειγμα για χαμηλό θερμοκαλυπτικό συντελεστή βρίσκεται στις θερμοκρασιακές ζώνες όπου παρουσιάζονται έντονα τα κενά στο υλικό, οπότε μεγάλο ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας περνάει ανεμπόδιο. Το αντίθετο συμβαίνει, για υλικό με υψηλή θερμοκαλυπτική ικανότητα.



Σχήμα 32: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία 40 °C πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα pixel στο ΣΚ2 με $l_{cm}=0.6m$, σε μονάδες °C.



Σχήμα 33: Ιστογράμμο της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ2, για $l_{cm}=0.6m$.



Σχήμα 34: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες pixel με εύρος 5 °C, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ2, για $l_{cm} = 0.4, 0.6m$.

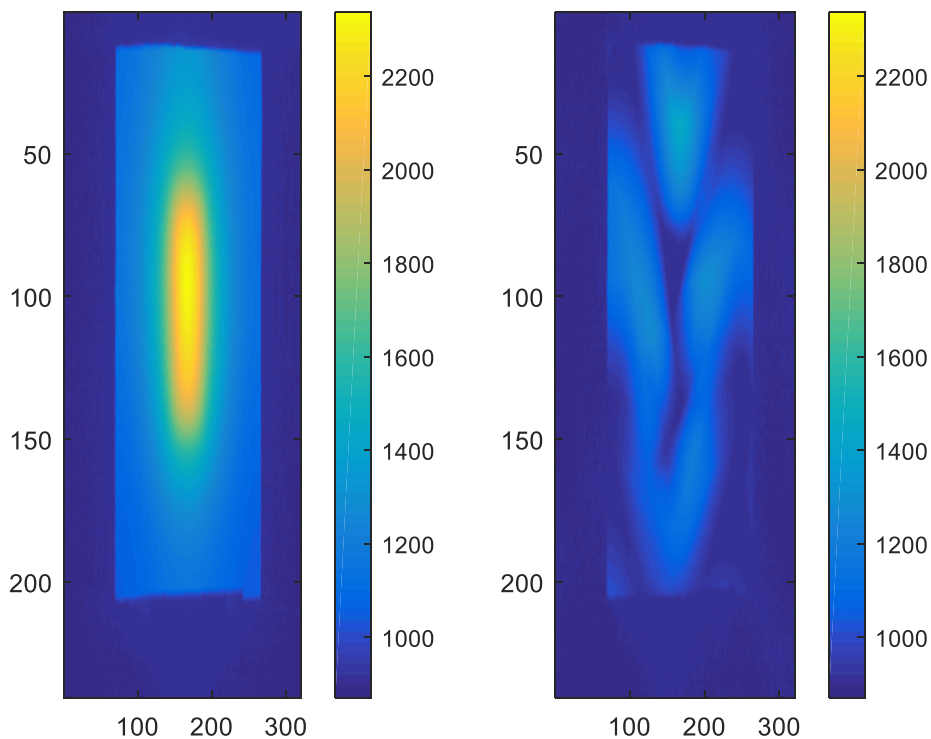
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας, σε σχέση με την θερμοκρασία του πομπού υπέρυθρης ακτινοβολίας, οφείλεται στην διαφοροποίηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας σε σχέση με την θερμοκρασία.

Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει και το μέσο όρο της θερμοκαλυπτικής ικανότητας όταν συγκρίνουμε στοιχείο προς στοιχείο την ένταση OS μεταξύ των δύο θερμογραφημάτων. Υπενθυμίζεται ότι τα εικονοστοιχεία που χρησιμοποιήσαμε έχουν θερμοκρασία 40 °C πάνω από αυτή του περιβάλλοντος. Οπότε όταν το $l_{cbb} = 0.4m$ και $l_{cm} = 0.4m$ η ΜΘΙ = 0.3844 ή 38.44% και για $l_{cm} = 0.6m$ η ΜΘΙ = 0.4192 ή 41.92% .

3.5 Υλικό ΣΚ 5

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετήσουμε το υλικό με κωδικό όνομα ΣΚ5 το οποίο βλέπουμε στην Εικόνα 5. Ομοίως με τις άλλες περιπτώσεις επαναπροσδιορίζουμε το θερμογράφημα του μέλανος σώματος σύμφωνα με το οποίο θα υπολογίσουμε την θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού. Στη συνέχεια ευθυγραμμίζουμε τα δέκα θερμογραφήματα του ΣΚ5 που έχουμε καταγράψει και υπολογίζουμε την μέση τιμή τους, προσδιορίζοντας έτσι το τελικό θερμογράφημα του ΣΚ5.

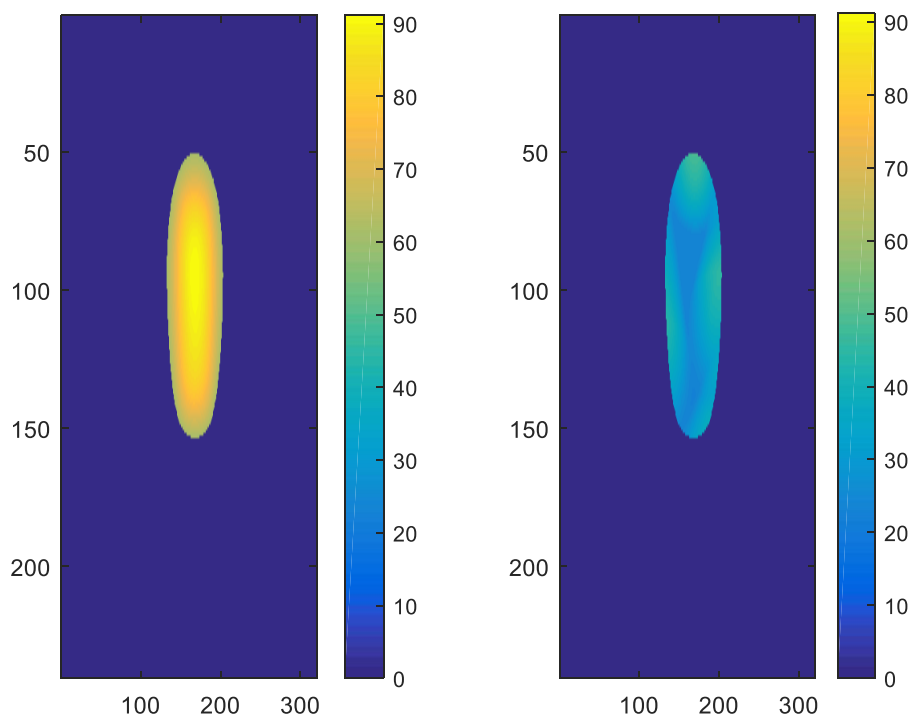
Στο Σχήμα 35, συγκρίνουμε το θερμογράφημα του μέλανος σώματος, με το θερμογράφημα του ΣΚ5 για $l_{cm}=0.4m$ και όπως για το ΣΚ2 παρατηρούμε ότι, σε κάποια σημεία έχουμε καλύτερη μετάδοση της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε σχέση με άλλα σημεία. Αυτή η ανομοιομορφη συμπεριφορά του ΣΚ5 ως προς την μετάδοση της υπέρυθρης κυκλοφορίας, οφείλεται στην διαμόρφωση του υλικού. Αν προσέξουμε την Εικόνα 5, θα παρατηρήσουμε ότι το ύφασμα είναι κομμένο σχηματίζοντας ένα μοτίβο.



Σχήμα 35: Τελικό θερμογράφημα του μέλανος σώματος στα αριστερά και του ΣΚ5 στα δεξιά με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.

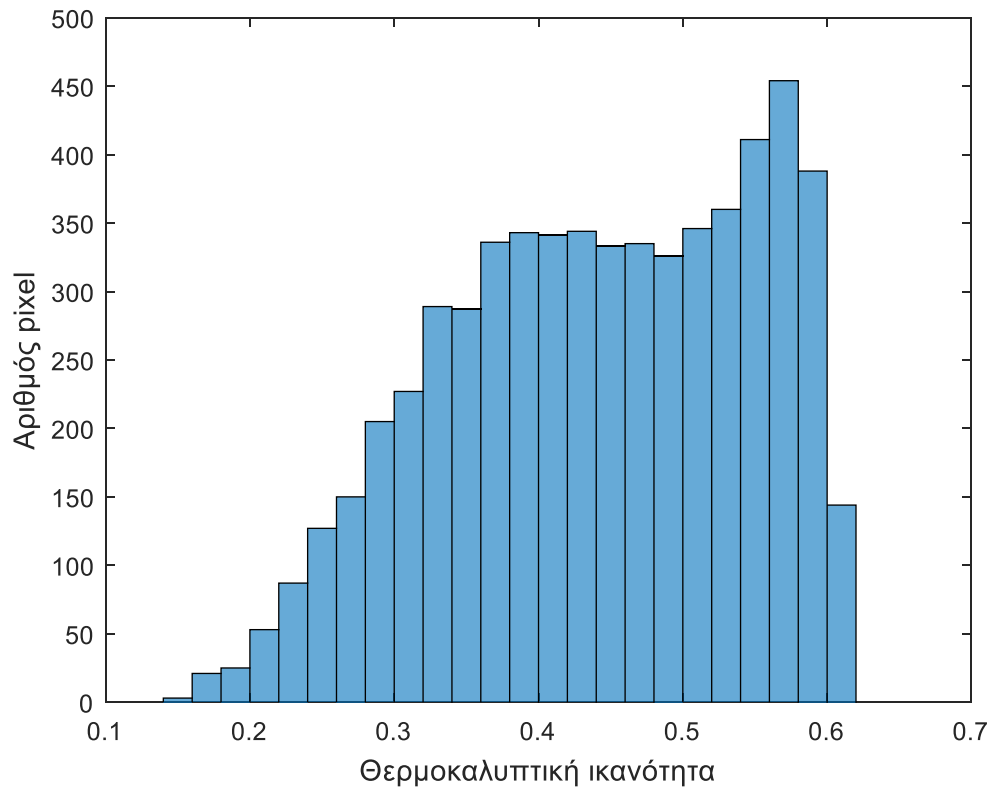
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάποιες περιοχές του υλικού να είναι κενές και να μεταδίδεται η υπέρυθρη ακτινοβολία έντονα σε σχέση με τα σημεία όπου υπάρχει υλικό.

Στο Σχήμα 36, φαίνεται το θερμογράφημα του υλικού και παρατηρείται ότι αντιμετωπίζουμε το ίδιο πρόβλημα με αυτό του ΣΚ2. Δηλαδή ότι η περιοχή του υλικού που βρίσκεται μέσα στα θερμοκρασιακά όρια που θέλουμε δεν έχει ικανοποιητική αναλογία υφάσματος-κενού. Τα αποτελέσματα λοιπόν τα οποία θα προκύψουν δεν θα είναι και απολύτως αξιόπιστα. Για αυτό λόγο απορρίπτεται η περίπτωση ανάλυσης του υλικού για $l_{cm}=0.2m$ και αποφασίστηκε να στηριχτούμε κυρίως στις περιπτώσεις όπου $l_{cm}=0.4m$ και $l_{cm}=0.6m$.



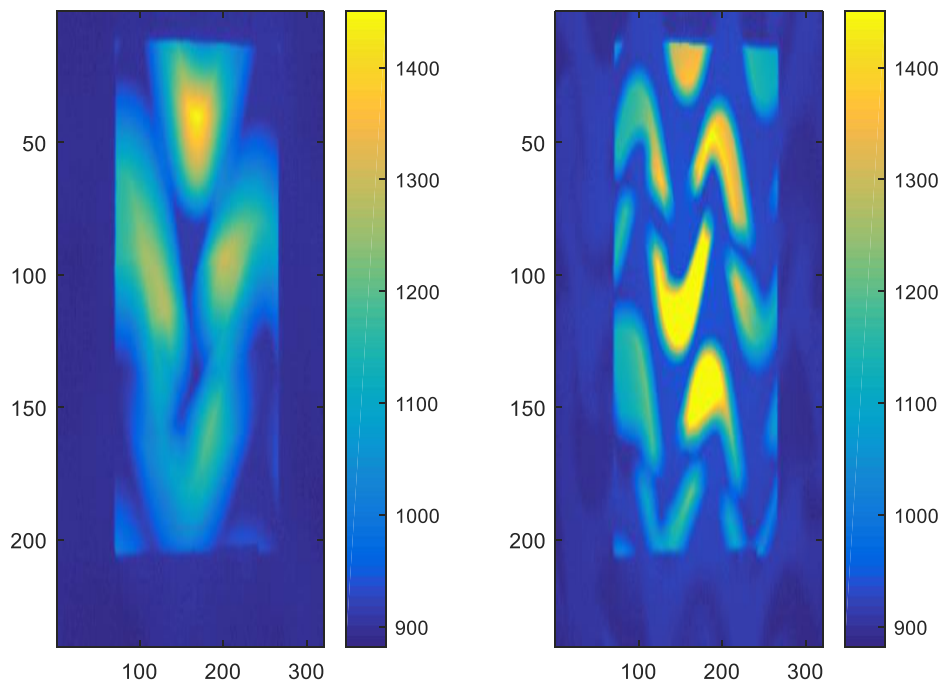
Σχήμα 36: : Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία $40^{\circ}C$ πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα pixel στο ΣΚ5 με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες $^{\circ}C$.

Εφαρμόζοντας την σχέση (33), στα pixel τα οποία επιλέξαμε, προκύπτει η θερμοκαλυπτική ικανότητα του ΣΚ5, για $l_{cm}= 0.4m$. Στο ιστόγραμμα που σχηματίζεται, βλέπε Σχήμα 37, παρατηρείται πολύ μεγάλο εύρος τιμών για τον λόγο που μόλις περιγράφηκε.

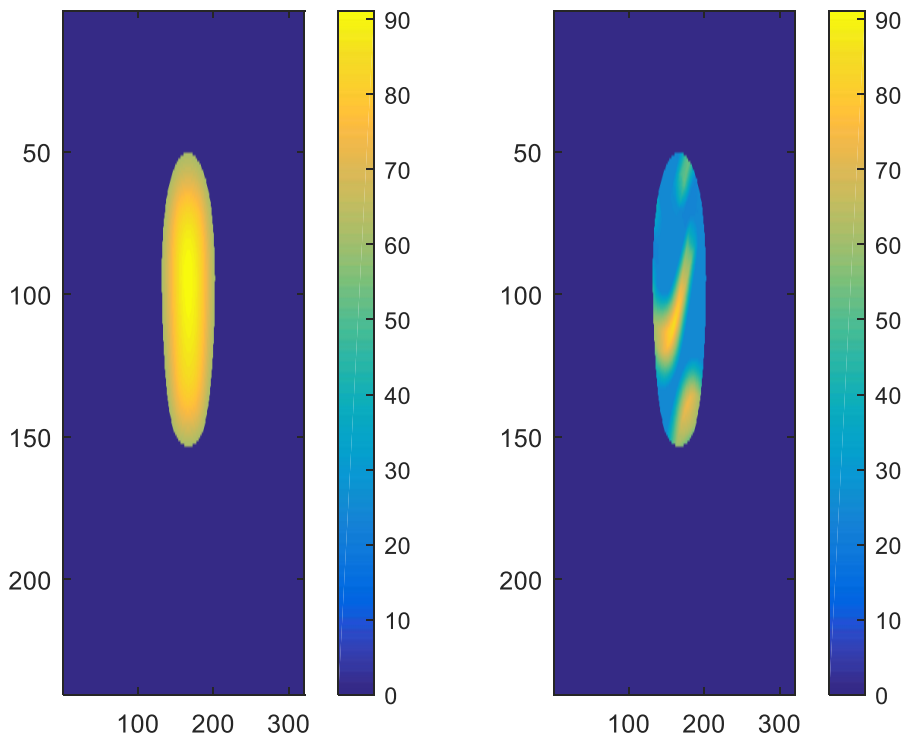


Σχήμα 37: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ5, για $I_{cm} = 0.4m$.

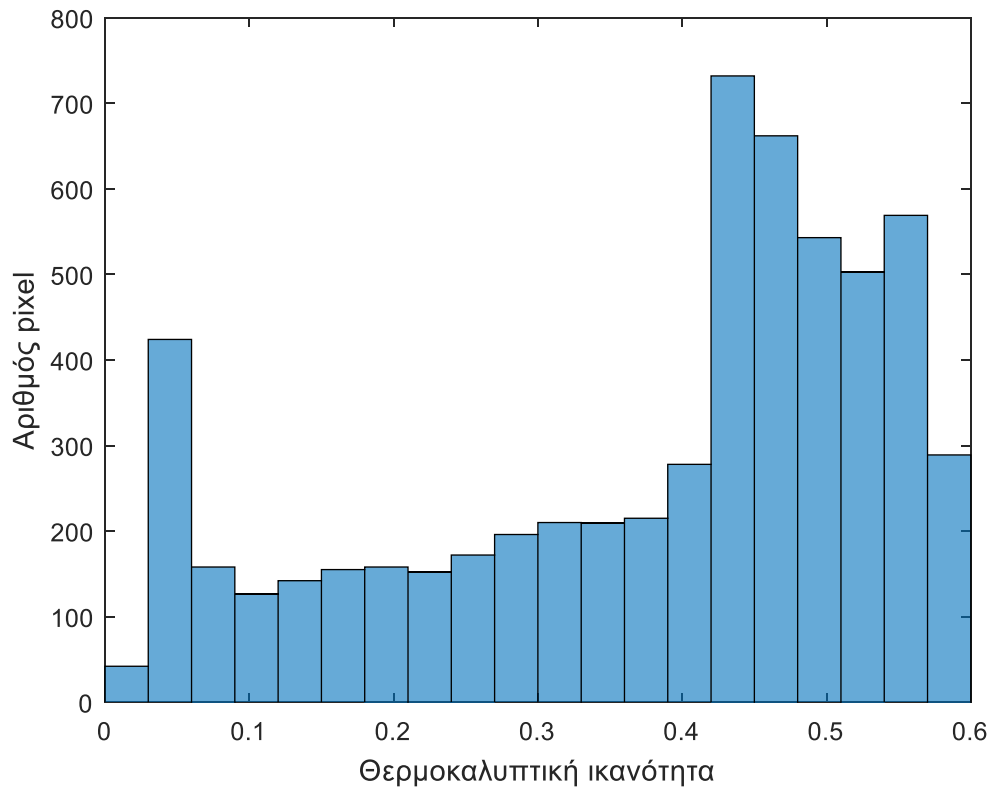
Τώρα εάν συγκριθεί το θερμογράφημα του ΣΚ5 για $I_{cm} = 0.4m$ με αυτό του $I_{cm} = 0.6m$, βλέπε Σχήμα 38, παρατηρείται ότι το πεδίο όρασης της κάμερας στην δεύτερη περίπτωση είναι καταλληλότερο, αφού για την συγκεκριμένη τιμή του I_{cm} αναλύεται μεγαλύτερη έκταση του υλικού και το μοτίβο γίνεται πιο ξεκάθαρο. Η περιοχή που επιλέχθηκε για μελέτη, Σχήμα 39, περιέχει καλύτερη αναλογία μεταξύ υλικού και κενού. Από αυτά τα δύο σχήματα, γίνεται εμφανές ότι με αυτή την απόσταση, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας είναι πιο ακριβή. Αντίθετα το ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ5 που φαίνεται στο Σχήμα 40 έχει μια εντελώς διαφορετική κατανομή από το ιστόγραμμα της προηγούμενης περίπτωσης.



Σχήμα 38: Θερμογραφήμάτων του ΣΚ5 για $l_{cm}=0.4m$ αριστερά, για $l_{cm}=0.6m$ δεξιά, σε μονάδες OS .

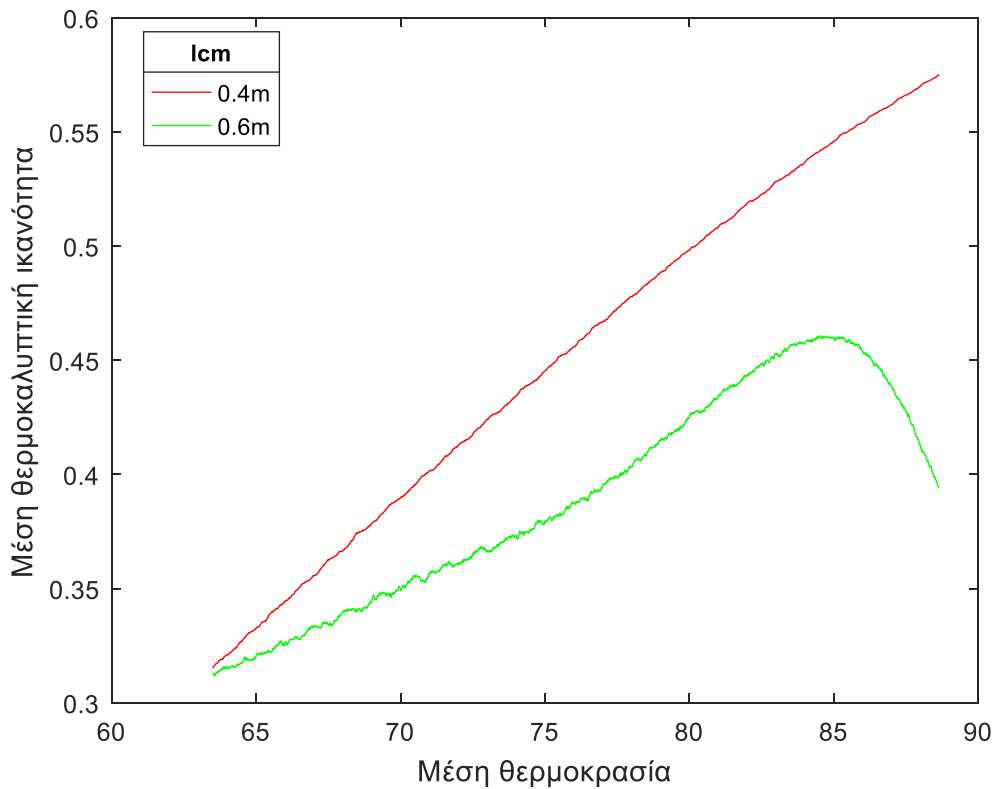


Σχήμα 39: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία $40^{\circ}C$ πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα ρικελ στο ΣΚ5 με $l_{cm}=0.6m$, σε μονάδες $^{\circ}C$.



Σχήμα 40: Ιστόγραμμα της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του ΣΚ5, για $l_{cm} = 0.6m$.

Στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας σε σχέση με την θερμοκρασία, για δύο διαφορετικές τιμές του l_{cm} . Παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτή η έντονη διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, οφείλεται κυρίως στην μορφολογία του υλικού και στην εξάρτηση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Να τονιστεί όμως ότι τα διαγράμματα που προέκυψαν εξαρτώνται κυρίως από την τοποθεσία των κενών μέσα την περιοχή που μελετάται, ενώ οι φυσικές ιδιότητες του υλικού δεν επηρεάζουν δραματικά την μορφή τους.

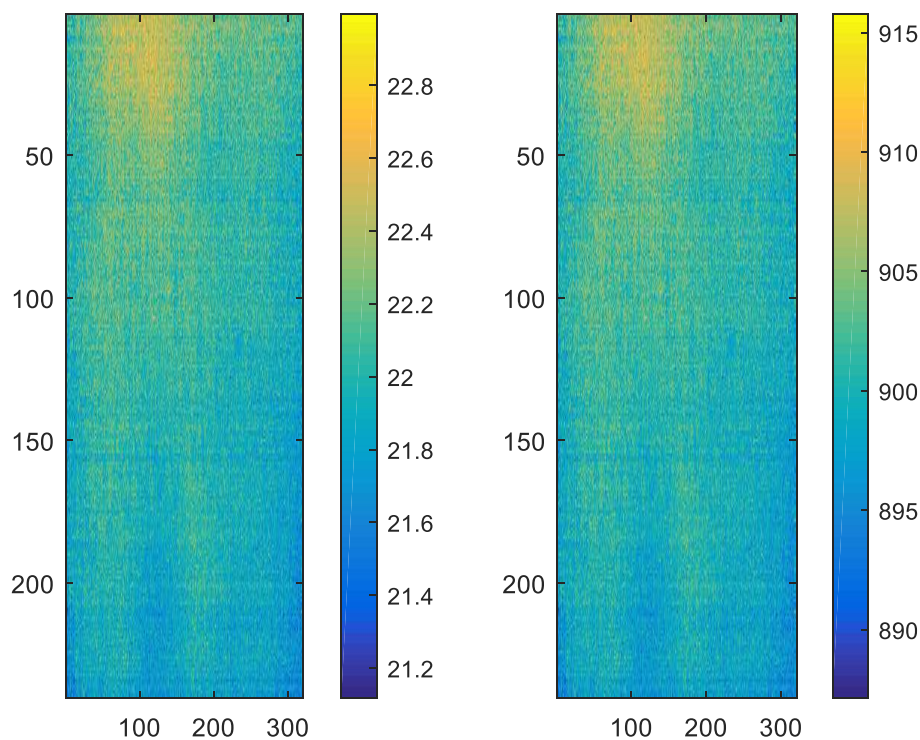


Σχήμα 41: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες pixel με εύρος 5 °C, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το ΣΚ5, για $l_{cm} = 0.4, 0.6m$.

Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει και το μέσο όρο της θερμοκαλυπτικής ικανότητας όταν συγκρίνουμε στοιχείο προς στοιχείο την ένταση OS μεταξύ των δύο θερμογραφημάτων. Υπενθυμίζεται ότι τα εικονοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν θερμοκρασία 40 °C πάνω από αυτή του περιβάλλοντος. Οπότε όταν το $l_{cbb} = 0.4m$ και $l_{cm} = 0.4m$ η ΜΘΙ = 0.3754 ή 37.54%. και για $l_{cm} = 0.6m$ η ΜΘΙ = 0.4413 ή 44.13%.

3.6 Υλικό ΣΚ 3 - Υλικό ΣΚ 4

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθούν τα υλικά με κωδικό όνομα ΣΚ3 και το ΣΚ4 τα οποία φαίνονται αντίστοιχα στην Εικόνα 3 και Εικόνα 4. Για το ΣΚ3 και το ΣΚ4 δεν θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία λόγω της ιδιαίτερης φύσης τους. Εάν ληφθεί ένα απλό θερμογράφημα τους παρατηρείται ότι η θερμοκαλυπτική ικανότητά τους είναι ίση με το 1, δηλαδή τα συγκεκριμένα υλικά δεν επιτρέπουν την διέλευση υπέρυθρης ακτινοβολίας και δεν χρειάζεται να επαναπροσδιορίσουμε το θερμογράφημα του μέλανος σώματος. Παρακάτω στο Σχήμα 42, βλέπουμε το θερμογράφημα του ΣΚ3 και σε μονάδες θερμοκρασίας Κελσίου και σε μονάδες OS.

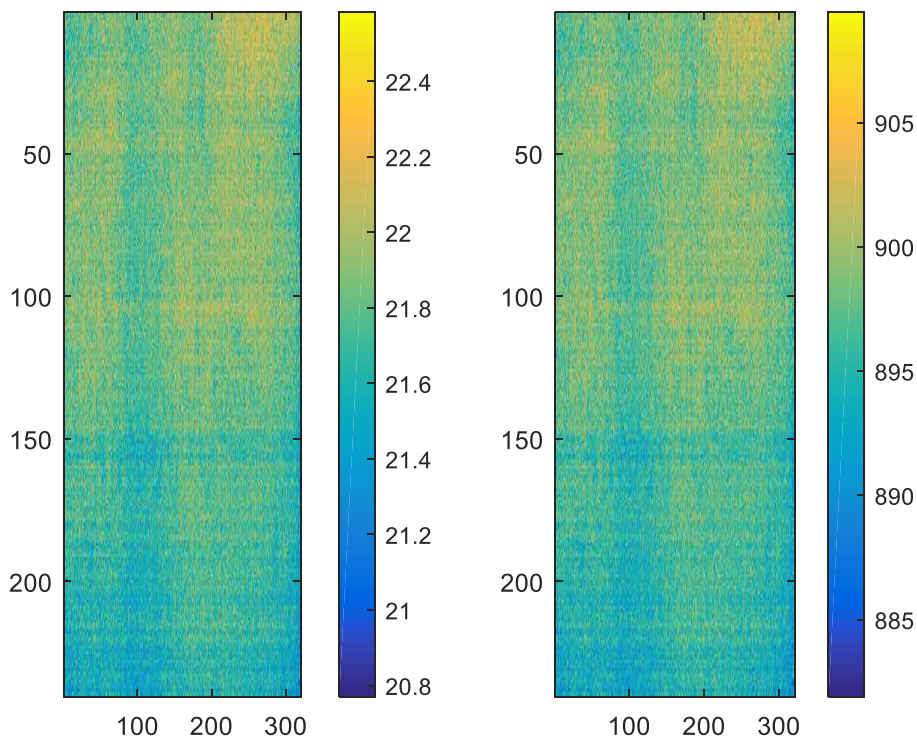


Σχήμα 42: Θερμογράφημα του ΣΚ3 σε μονάδες Κελσίου στα αριστερά και σε μονάδες OS στα δεξιά.

Έχοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που μέτρησε το θερμομέτρο είναι 21.8°C παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες στις οποίες μετατρέπει ο αλγόριθμος της θερμοκάμερας την υπέρυθρη ακτινοβολία είναι πολύ κοντά αν όχι ίδιες με αυτήν του περιβάλλοντος. Εξάιρεση αποτελούν ορισμένα εικονοστοιχεία τα οποία είναι το αποτέλεσμα αντανάκλασης της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το περιβάλλον στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και ο χρήστης

της κάμερας και το σφάλμα που προκύπτει όταν το αντικείμενο που εξετάζουμε δεν εκπέμπει αρκετά παραπάνω από το γύρο περιβάλλον.

Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα εξάγεται και από το θερμογράφημα του ΣΚ4.



Σχήμα 43: Θερμογράφημα του ΣΚ4 σε μονάδες Κελσίου στα αριστερά και σε μονάδες OS στα δεξιά.

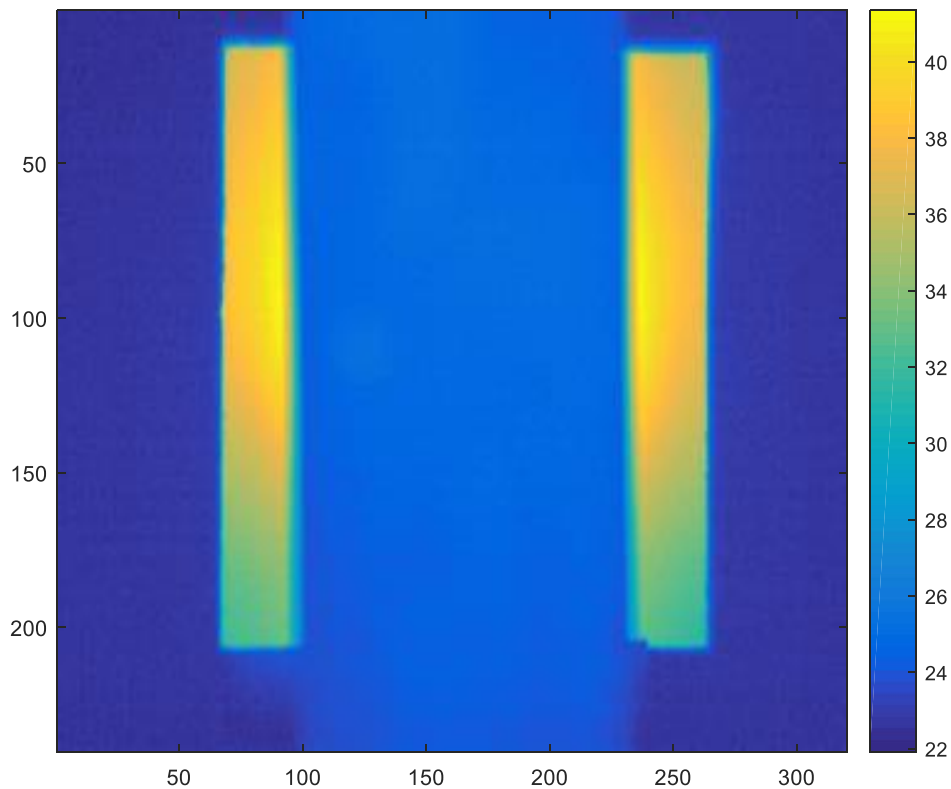
Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι τα συγκεκριμένα υλικά είναι αδιαπέραστα από την υπέρυθη ακτινοβολία σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα μήκους κύματος.

Παρακάτω θα μελετηθούν αντικείμενα τα οποία τα συναντώνται στην καθημερινή μας ζωή όπως για παράδειγμα μία μεταλλική λαμαρίνα, ένα κομμάτι plexiglass, ένα κομμάτι μαύρου υφάσματος και μία σακούλα σκουπιδιών.

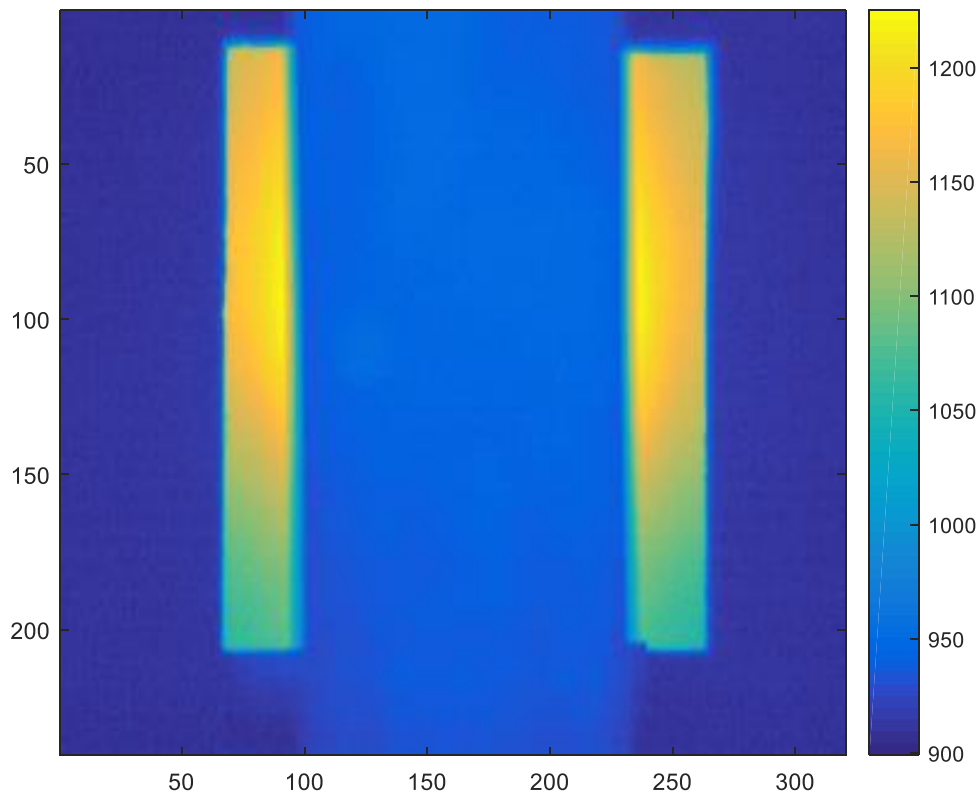
3.7 Υλικό PG – Υλικό ΦΑ

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθούν τα υλικά με κωδικό όνομα PG και ΦΑ τα οποία φαίνονται αντίστοιχα στην Εικόνα 6 και Εικόνα 7. Για να μελετηθεί ένα κομμάτι plexi glass όπως αυτό στην Εικόνα 6, θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς το τελικό θερμογράφημα του μέλανος σώματος που χρησιμοποιήθηκε στο ΣΚ5. Δεν ορίζεται καινούργιο θερμογράφημα για το μέλαν σώμα διότι είναι προφανές από την αρχή ότι δεν θα χρειαστεί κάτι τέτοιο.

Παρακάτω στο Σχήμα 44, φαίνεται το θερμογράφημα του PG για $l_{cm}=0.4m$, σε βαθμούς Κελσίου και στο σχήμα 45 σε βαθμούς OS.



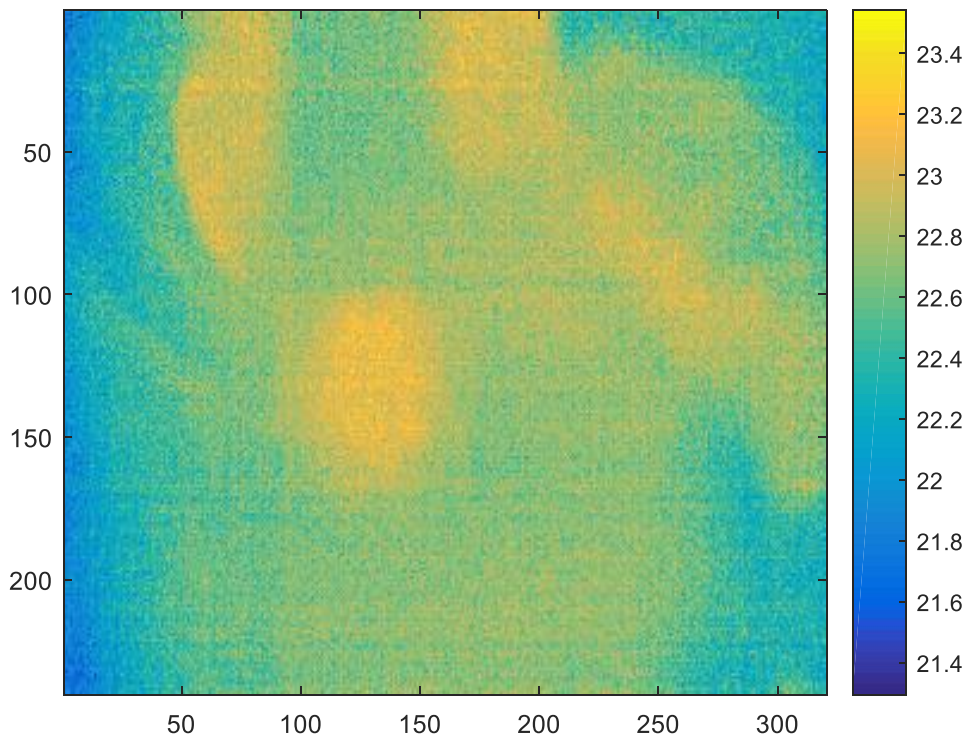
Σχήμα 44: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες $^{\circ}C$, για $l_{cm}=0.4m$.



Σχήμα 45: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες OS, για $l_{cm}=0.4m$.

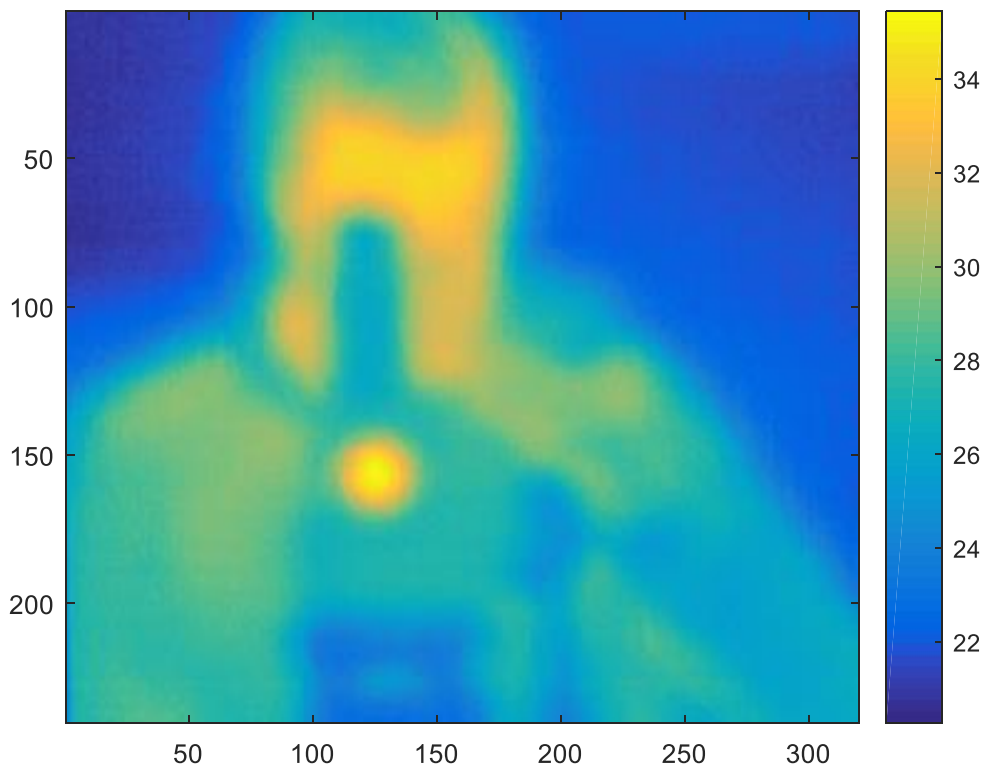
Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το συγκεκριμένο κομμάτι είναι σχεδόν ίδια με αυτήν που εκπέμπει το περιβάλλον. Αυτή η μικρή διαφορά στην ακτινοβολία που εκπέμπει το υλικό σε σχέση με τον περιβάλλον οφείλεται στο ότι η επιφάνεια του PG είναι πολύ λεία. Μία λεία επιφάνεια όπως έχει αναφερθεί στη σελίδα 24, έχει υψηλό βαθμό ανάκλασης της ακτινοβολίας, οπότε το υλικό εκτός από την ακτινοβολία που εκπέμπει, εκπέμπει και ακτινοβολία που ανακλάται πάνω του από το περιβάλλον χώρο. Μέσα στον περιβάλλον χώρο συμπεριλαμβάνεται και ο χειριστής της κάμερας. Άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν επιτρέπει την διέλευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας και ότι έχει υψηλό συντελεστή ανάκλασης. Ακόμα ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι ο δείκτης μετάδοσης της ακτινοβολίας του υλικού εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αρκεί απλά να αναφερθεί το γεγονός ότι αφήνει το ορατό φως να περάσει τόσο ώστε να φαίνονται ξεκάθαρα από την άλλη μεριά.

Το παραπάνω μπορεί να γίνει ακόμη πιο εμφανές βλέποντας το παρακάτω θερμογράφημα του υλικού με $l_{cm}=0.2m$ (Σχήμα 46). Εάν προσέξουμε καλά θα διακρίνουμε ότι σχηματίζεται το ανάγλυφο του χρήστη, όταν εκτελεί το πείραμα. Το στοιχεί αυτό καταδεικνύει πολύ υψηλό δείκτη ανάκλασης και κατ' επέκταση χαμηλό δείκτη μετάδοσης και απορρόφησης.



Σχήμα 46: Θερμογράφημα του PG σε μονάδες Κελσίου, για $l_{cm}=0.2m$.

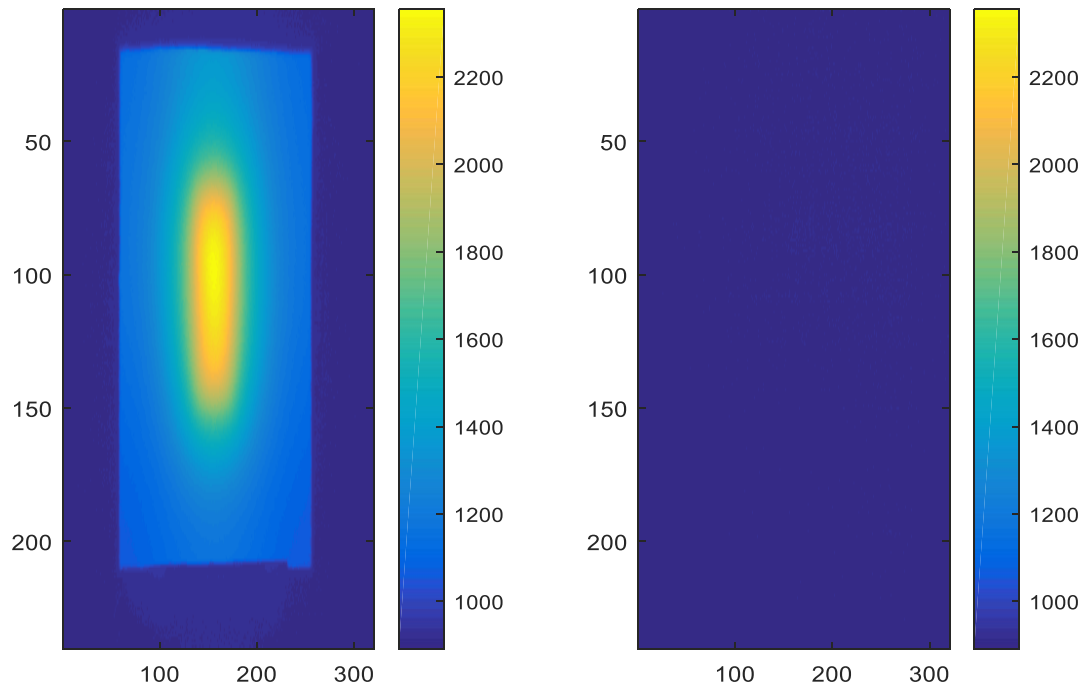
Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα προκύπτει και από το θερμογράφημα του ΦΑ για $l_{cm}=0.6m$, βλέπε Σχήμα 47. Πάλι παρατηρείται η αντανάκλαση του χειριστή της κάμερας στο Σχήμα 47, ενώ ακόμα πιο αξιοσημείωτο είναι η θερμοκρασία που υπολογίζεται από την κάμερα για το άτομο, η οποία είναι πάρα πολύ κοντά στην πραγματική θερμοκρασία του ατόμου. Άρα εντέλει μπορεί να θεωρηθεί ότι και αυτό το υλικό είναι αδιαπέραστο από την υπέρυθρη ακτινοβολία και η απορροφητικότητα είναι πολύ χαμηλή εφόσον έχει τόσο υψηλή αντανάκλαση.



Σχήμα 47: Θερμογράφημα του ΦΑ σε μονάδες Κελσίου, για $l_{cm}=0.6m$

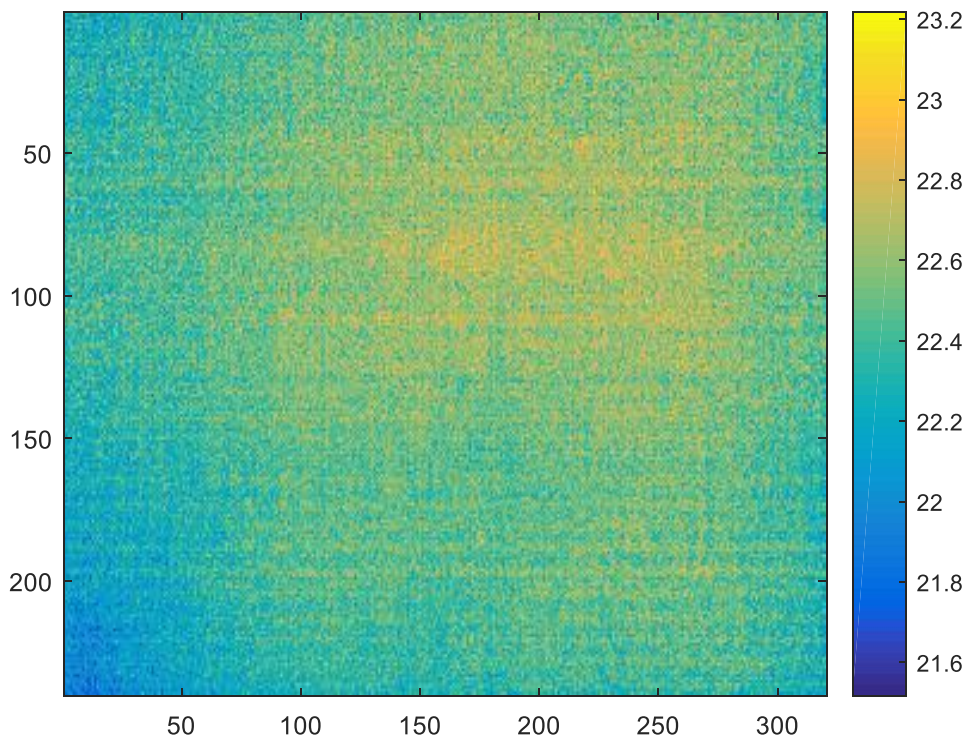
3.8 Υλικό ΜΥ

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί το υλικό με κωδικό όνομα ΜΥ το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 8. Είναι ένα κομμάτι μαύρου υφάσματος το οποίο είναι κατασκευασμένο από βαμβάκι, ένα υλικό το οποίο το συναντάται σχεδόν συνέχεια στα ρούχα μας. Να σημειωθεί πως τα θερμογραφήματα για το ΜΥ και για το επόμενο υλικό, το ΠΣ, έγιναν άλλη μέρα οπότε άλλαξαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στους 21.9 βαθμούς Κελσίου και της σχετικής υγρασίας στο 42% και επαναπροσδιορίστηκε το θερμογράφημα αναφοράς του μέλαν σώματος.



Σχήμα 48: Θερμογράφημα του μέλανος σώματος για $l_{bb}=0.8m$ στα αριστερά και του ΜΥ για $l_{cm}=0.4m$ στα δεξιά, σε μονάδες OS.

Στο Σχήμα 48, παρουσιάζονται το θερμογράφημα του ΜΥ όταν $l_{cm}=0.4m$, σε σύγκριση με το θερμογράφημα του μέλανος σώματος για $l_{bb}=0.8m$, σε μονάδες OS. Ενώ στο Σχήμα 49, φαίνεται το ίδιο θερμογράφημα του μαύρου υφάσματος αλλά σε μονάδες Κελσίου.

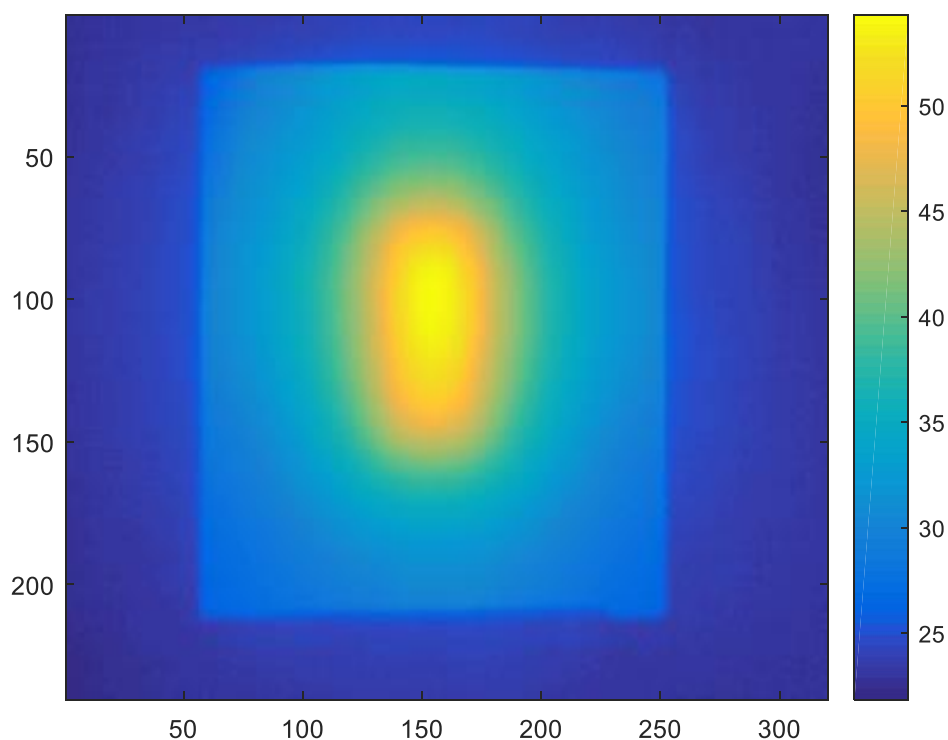


Σχήμα 49: Θερμογράφημα του MY $I_{cm}=0.4m$ σε μονάδες Κελσίου.

Από αυτά τα δύο σχήματα, συμπεραίνεται ότι από το μαύρο ύφασμα δεν περνάει υπέρυθρη ακτινοβολία, αλλά αυτό δεν θα έπρεπε να προκαλεί έκπληξη διότι ως γνωστόν η μαύρη μπογιά έχει υψηλό δείκτη απορροφητικότητας. Επομένως, το μαύρο ύφασμα που έχουμε απορροφά το περισσότερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που φθάνει σε αυτό, με ένα πολύ αμυδρό ποσοστό να μεταδίδεται και να ανακλάται. Αυτός είναι και ο λόγος που το καλοκαίρι δεν συστήνεται η ένδυση με μαύρα ρούχα, διότι τα μαύρα ρούχα έχουν υψηλό δείκτη απορροφητικότητας λόγω της μαύρης μπογιάς.

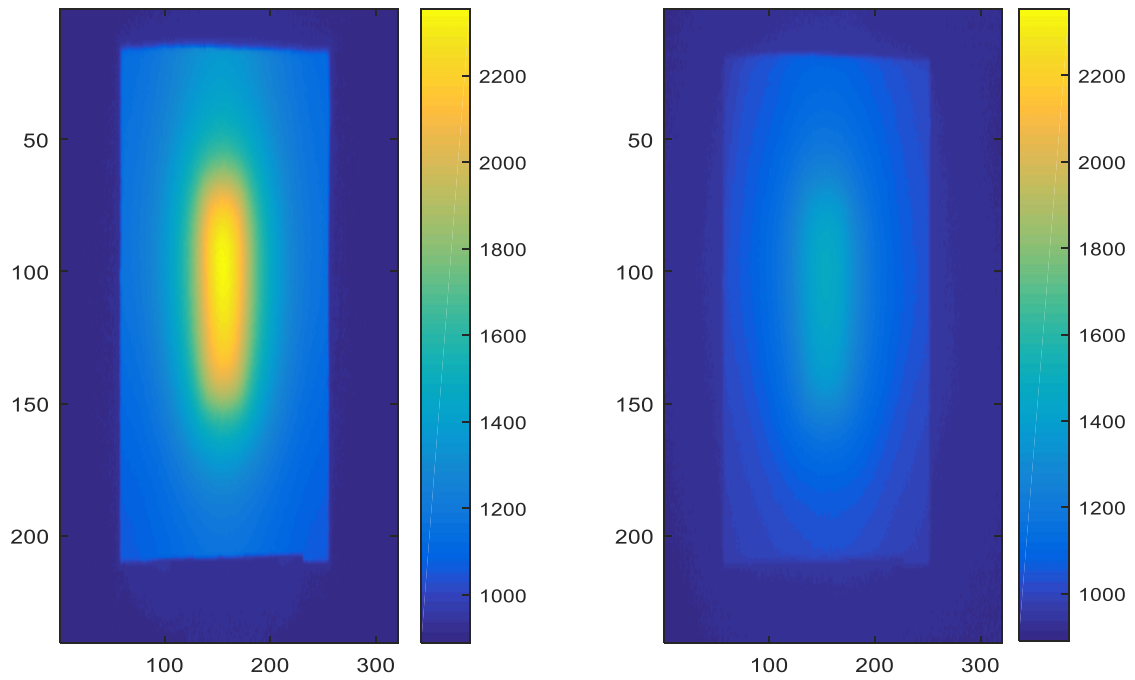
3.9 Υλικό ΠΣ

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί το υλικό με κωδικό όνομα ΠΣ το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 9. Είναι το τελευταίο υλικό που μελετήθηκε και είναι μια κοινή σακούλα σκουπιδιών γκρίζου χρώματος την οποία μπορούμε να βρούμε οπουδήποτε. Παρόλο αυτά, παρουσιάζει κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Αρχικά δίνεται ένα απλό θερμογράφημα του ΠΣ για $l_{cm}=0.4m$ σε βαθμούς Κελσίου, Σχήμα 50.

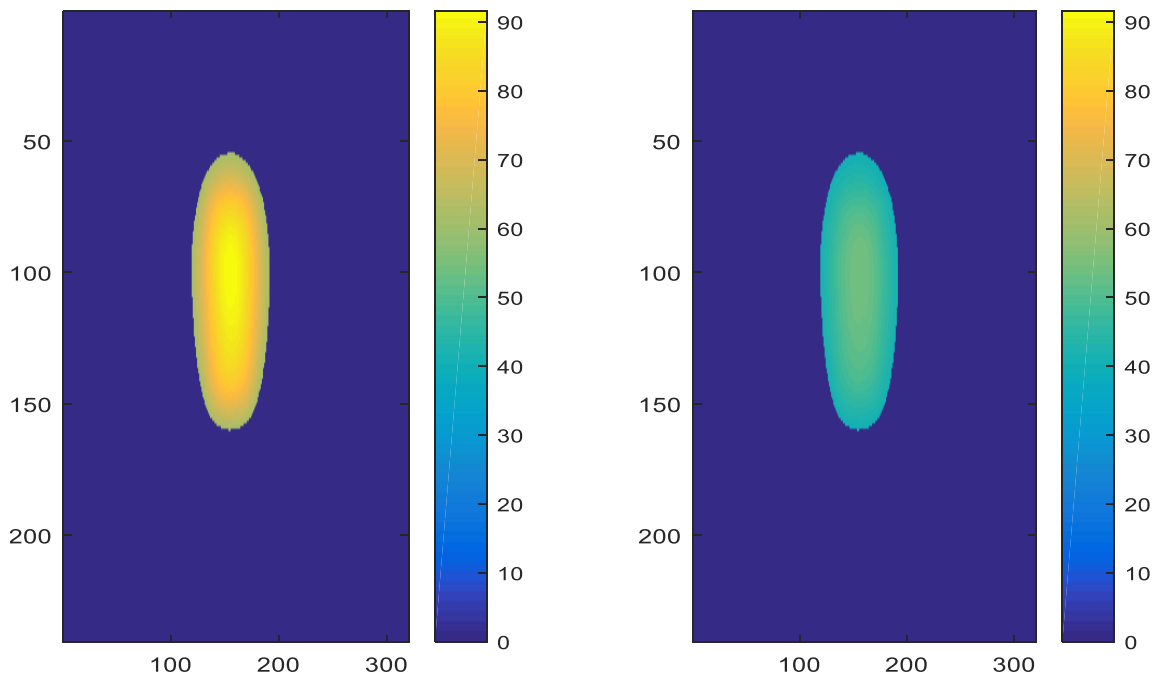


Σχήμα 50: Θερμογράφημα του ΠΣ $l_{cm}=0.4m$ σε μονάδες Κελσίου.

Όπως παρατηρείται το μέλαν σώμα διακρίνεται εύκολα πίσω από την μαύρη σακούλα σκουπιδιών, άρα το συγκεκριμένο υλικό έχει αρκετά μεγάλο συντελεστή μεταδοτικότητας ενώ αντίστοιχα έχει μικρό συντελεστή θερμοκαλυπτικής ικανότητας. Βέβαια ο συντελεστής της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του υλικού δεν είναι μηδενικός, αρκεί να συγκριθεί το θερμογράφημα του μέλανος σώματος με αυτό του ΠΣ, βλέπε Σχήμα 51.



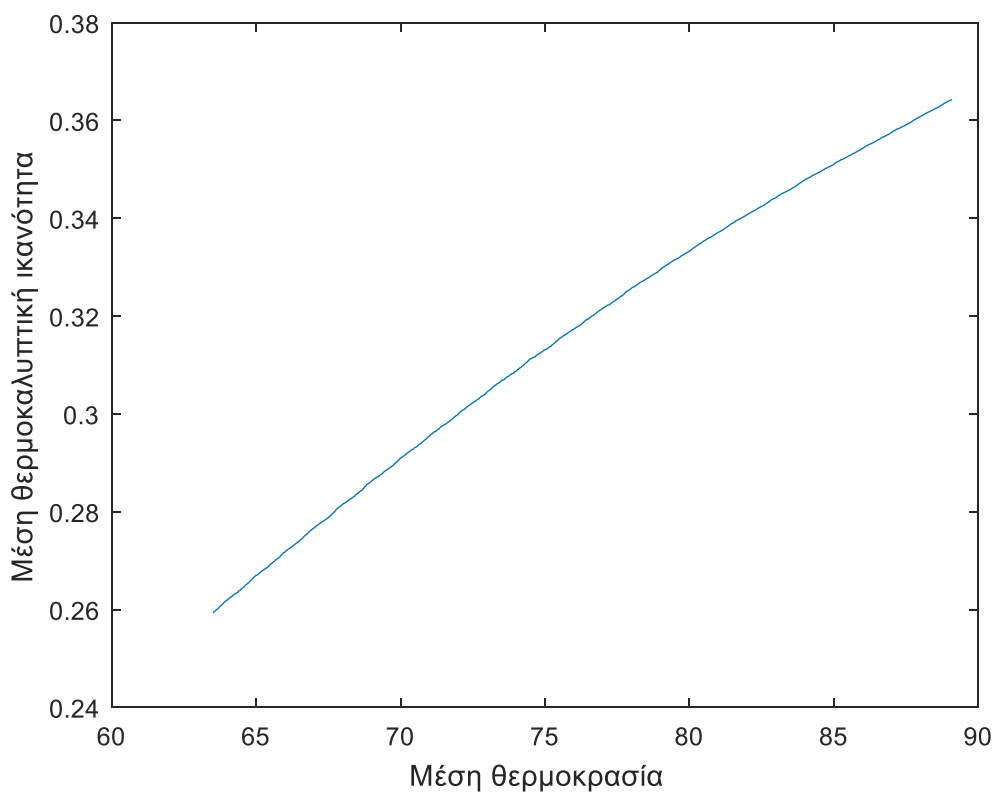
Σχήμα 51: Μέσος όρος των θερμογραφημάτων του μέλανος σώματος $l_{bb}=0.8m$, στα αριστερά και του ΠΣ δεξιά στα $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες OS.



Σχήμα 52: Περιοχή του μέλανος σώματος με θερμοκρασία $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ πάνω από το περιβάλλον στα αριστερά και στα δεξιά τα αντίστοιχα pixel στο ΠΣ με $l_{cm}=0.4m$, σε μονάδες $^{\circ}\text{C}$.

Στο Σχήμα 52, φαίνεται η περιοχή που θα μελετηθεί για το υπολογισμό της θερμοκαλυπτικής ικανότητας τόσο στο μέλαν σώμα όσο και στην πλαστική σακούλα. Για το υλικό ΠΣ υπολογίστηκε ότι για $l_{cbb} = 0.4\text{m}$ και $l_{cm} = 0.4\text{m}$ η ΜΘΙ = 0.3133 ή 31.33% , μια αρκετά χαμηλή τιμή εάν ληφθεί υπόψη ότι το υλικό δεν έχει διάκενα και ότι το χρώμα του είναι γκρι , δηλαδή αρκετά σκούρο ώστε να απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ακόμα μελετήθηκε η σχέση που υπάρχει μεταξύ τη μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας και της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 53, καθώς αυξάνεται η μέση θερμοκρασία, αυξάνεται η θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού, πράγμα που σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος συντελεστής αλλάζει έντονα σε σχέση με το μήκος κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



Σχήμα 53: Διάγραμμα της μέσης θερμοκαλυπτικής ικανότητας για ομάδες ρίχει με εύρος 5 °C, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία των ομάδων αυτών, για το υλικό ΠΣ στα 0.4m.

4. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα του πειράματος που έγινε, αλλά και προτάσεις για βελτίωση του. Στον Πίνακα 2 καταγράφονται οι τιμές του ΜΘΙ που υπολογίστηκαν για κάθε ένα από τα υλικά καθώς και για κάθε τιμή του l_{cm} . Για τον υπολογισμό της τιμής ΜΘΙ για ένα συγκεκριμένο υλικό και μία συγκεκριμένη τιμή l_{cm} εφαρμόζεται η σχέση (33). Για s_{ob1} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ρίχει του θερμογραφήματος του μέλανος σώματος, που έχουν θερμοκρασία άνω των 40°C , ενώ για s_{ob2} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των αντίστοιχων σε θέση ρίχει του θερμογραφήματος του υλικού. Στον Πίνακα 2 φαίνεται ότι τα υλικά ΣΚ2,ΣΚ3,ΡΓ,ΦΑ και ΜΥ έχουν ΜΘΙ=100% το οποίο σημαίνει άριστη θερμοκαλυπτική ικανότητα. Επιπλέον, στον ίδιο πίνακα, τα υλικά ΣΚ1,ΣΚ2, ΣΚ5 με τελευταίο το ΠΣ τοποθετούνται με φθίνουσα σειρά ως προς την θερμοκαλυπτική τους ικανότητα.

Όσον αφορά τα στρατιωτικά υλικά, τα αποτελεσματικότερα είναι το υλικό ΣΚ2 και το υλικό ΣΚ3. Ωστόσο αυτά τα υλικά, εγκυμονούν κινδύνους υπερθέρμανσης οπότε η χρήση τους καθίσταται επικίνδυνη διότι σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στρατιωτικά υλικά δεν έχουν διάκενα στην μορφολογία τους. Με την ίδια λογική το υλικό ΣΚ1 το οποίο έχει μικρές οπές, δεν επιτρέπει την αποτελεσματική ψύξη του αντικειμένου και για αυτό καθίσταται επικίνδυνη η εφαρμογή του. Συνεπώς, από τα πέντε στρατιωτικά υλικά, δύο είναι τα πιο ενδιαφέροντα το ΣΚ2 και το ΣΚ5. Αυτά έχουν το πλεονέκτημα της πρακτικής εφαρμογής παρόλο που έχουν χαμηλότερους δείκτες θερμοκαλυπτικής ικανότητας.

Για τα υλικά ΣΚ2 και ΣΚ5, οι τιμές ΜΘΙ για $l_{cm}=0.6\text{m}$ αντικατοπτρίζουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες σε σχέση με τις τιμές ΜΘΙ για $l_{cm}=0.4\text{m}$ διότι, όπως έχουμε αναφέρει στις προηγούμενες ενότητες, για $l_{cm}=0.6\text{m}$ επιτυγχάνεται καλύτερη αναλογία υλικού-κενού στην περιοχή που απομονώνεται για μελέτη. Συγκρίνοντας τις τιμές ΜΘΙ για $l_{cm}=0.6\text{m}$ για τα υλικά ΣΚ2 και ΣΚ5 φαίνεται ότι το ΣΚ2 προσφέρει καλύτερη θερμοκάλυψη. Ωστόσο, δεν είναι εφικτή η επιλογή ενός εκ των δύο υλικών διότι η αναλογία υλικού-κενού στις δύο περιπτώσεις δεν είναι ίδια. Επιπλέον, συγκρίνοντας το Σχήμα 33 με το Σχήμα 40 γίνεται εμφανές ότι τα δύο υλικά έχουν το ίδιο εύρος θερμοκαλυπτικής ικανότητας, από 0 έως 0.6, έχουν δηλαδή, την ίδια ελάχιστη και μέγιστη τιμή όπου το μηδέν αντιστοιχεί στην περιοχή όπου δεν υπάρχει υλικό, ενώ το 0.6 αντιστοιχεί στις περιοχή όπου υπάρχει υλικό.

Όλες οι υπόλοιπες, ενδιάμεσες τιμές που καταγράφονται οφείλονται κυρίως, είτε στην διακύμανση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας του υλικού με την θερμοκρασία, είτε στο IFOV ενός εικονοστοιχείου. Ως IFOV συμβολίζεται το οπτικό πεδίο ενός μεμονωμένου ανιχνευτή. Οι περιοχές προς μελέτη στα θερμογραφήματα του ΣΚ2 και ΣΚ5, έχουν περιοχές με υλικό ή με κενό. Στις περιοχές μετάβασης από υλικό σε κενό, ο ανιχνευτής 'βλέπει' περιοχές με υλικό και με κενό, οπότε ο ανιχνευτής παράγει ένα σήμα που είναι συνδυασμός αυτών των δύο περιοχών. Από την στιγμή που τα δύο υλικά έχουν την ίδια μέγιστη και ελάχιστη τιμή ΜΘΙ, η ΜΘΙ που υπολογίζεται εξαρτάται από την αναλογία υλικού-κενού στην περιοχή που έχει απομονωθεί για μελέτη. Άρα η επιλογή ενός εκ των δύο υλικών δεν είναι εφικτή.

Όσον αφορά τα υλικά που δεν προορίζονται για στρατιωτική χρήση, δηλαδή τα υλικά ΡG,ΦΑ ξεχωρίζουν διότι έχουν υψηλό συντελεστή αντανάκλασης. Συγκεκριμένα, το υλικό ΜΥ ξεχωρίζει διότι έχει υψηλό βαθμό απορρόφησης. Αντίθετα, το υλικό ΠΣ ξεχωρίζει για την χαμηλή θερμοκαλυπτική ικανότητα του παρόλο που δεν υπήρχαν διάκενα στην μορφολογία του και του σκούρου χρώματος που συνάδει με υψηλή απορροφητικότητα.

Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι η έντονη εξάρτηση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας ενός υλικού σε σχέση με την θερμοκρασία που εκπέμπει το μέλαν σώμα και κατ'επέκταση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του. Αυτή η εξάρτηση γίνεται εμφανή στο Σχήμα 26 και στο Σχήμα 53, όπου για εύρος 40°C η θερμοκαλυπτική ικανότητα έχει εύρος μεγαλύτερο των δέκα μονάδων.

Ακόμα, είναι αξιοσημείωτη η εξάρτηση της θερμοκαλυπτικής ικανότητας από την παράμετρο I_{cm} . Συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας την παράμετρο I_{cm} , μεταβάλλεται τόσο το οπτικό πεδίο της κάμερας (FOV) όσο και το οπτικό πεδίο ενός ανιχνευτή (IFOV), τα οποία οδηγούν σε αμφισβητήσιμα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 2 για το υλικό ΣΚ1, είναι εμφανές ότι το I_{cm} επηρεάζει ελάχιστα την τιμή ΜΘΙ όμως η επιρροή του I_{cm} γίνεται σημαντική για ανομοιογενή υλικά όπως το ΣΚ2 και ΣΚ5.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι από την στιγμή που ο αισθητήρας, είναι ευαίσθητος μόνο σε μια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 7μm έως τα 13 μm, τα αποτελέσματα ισχύουν μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή και όχι για όλο το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

ΥΛΙΚΑ\ l_{cm}	0.2m	0.4m	0.6m
ΣΚ1	44.31%	44.41%	43.06%
ΣΚ2	–	38.44%	41.92%
ΣΚ3	100%	100%	100%
ΣΚ4	100%	100%	100%
ΣΚ5	–	44.13%	37.54%
ΡΓ	100%	100%	100%
ΦΑ	100%	100%	100%
ΜΥ	100%	100%	100%
ΠΣ	–	31.33%	–

Πίνακας 2: Πίνακας ΜΘΙ των εννέα υλικών σε σχέση με την απόσταση που έχουν από την κάμερα.

Το πείραμα βοήθησε στην κατάταξη των στρατιωτικών υλικών, ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο υλικό για θερμοκάλυψη. Ωστόσο, το πείραμα θα βελτιωνόταν εάν εφαρμοζόταν διαφορετική μέθοδος για την θέρμανση της πλάκας. Ειδικότερα, η πλάκα να είχε σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη την έκταση της. Με αυτόν θα μπορούσε να μελετηθεί καλύτερα η επίδραση της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος στην θερμοκαλυπτική ικανότητα του υλικού. Ακόμα, εάν αυξηθεί το εμβαδόν της πλάκας, θα γίνει εφικτή η λήψη θερμογραφημάτων από μεγαλύτερες αποστάσεις με το οποίο θα γινόταν καλύτερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών. Συνολικά, ένα μέλαν σώμα με μεγάλο εμβαδόν, ομοιόμορφη θερμοκρασία και η δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας είναι κάποιες από τις τροποποιήσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του πειράματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Maldague X. P. V., 'Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography', University Laval Quebec Canada, (1993)
- [2] Vollmer M., Mollman K. P., 'Infrared Thermal Imaging', (2018)
- [3] Ring F. , Jung A. , Žuber J., (2009), 'New opportunities for infrared thermography in medicine' , Act Bio – Optika et Informatica Medica v.15 p.(28-30)
- [4] Plesa C., Ţurcanu D., Bodoc V., (2004), 'The Use of Infrared Radiation for Thermal Signatures Determination of Ground Targets' , Romanian Journal of Physics v.51 p(63-72)
- [5] Wake L. V.,. Brady R. F, 'Formulating Infrared Coatings for Defence Applications', Materials Research Laboratory Melbourne Australia, (1993)
- [6] Jingzhou Z., Chengxiong P., Yong S., (2014), 'Progress in Helicopter Infrared Signature Suppression', Chinese Journal of Aeronautics v.27 p.189-199
- [7] Minkina W. , Dudzik S., 'Infrared Thermography Errors and Uncertainties', Czestochowa University of Technology Poland, (2009)
- [8] Minkina W., 'Thermovision Measurements – Methods and Instruments' , Publishing Office of Czestochowa University of Technology Czestochowa , (2004)
- [9] Tissot J.L., Bertrand F., Vilain M., Yon J.J., (1999), 'Uncooled infrared focal plane arrays – technical trends and LETI/LIR microbolometer development', Proceedings of 5th AITA International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications pp. 57–63
- [10] QWIP Seminar, (2000), 'Proceedings of Seminar on QWIP Detector', 7 June, Santahamina Island Finland.
- [11] Flir Systems, 'AGEMA 570 Operating Manual', (1997)

Παράρτημα

Matlab Functions and Scripts

Στην παρούσα εργασία δημιουργήσαμε και χρησιμοποιήσαμε λογισμικό για να αναλύσουμε τα δεδομένα που μας δίνει η κάμερα, ώστε να υπολογίσουμε την θερμοκαλυπτική ικανότητα των υλικών. Το λογισμικό αυτό δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του MATLAB με τα αρχεία να έχουν την μορφή m-files. Στο Πίνακας 3 καταγράφουμε τις functions που χρησιμοποιήσαμε.

Όνομα του m-file	Περιγραφή
mesos_oros_black_body.m	Προσδιορισμός του τελικού θερμογραφήματος του μέλανος σώματος.
mesos_oros_mat.m	Προσδιορισμός του τελικού θερμογραφήματος του υλικού.
thermokaliptiki_ikanotita.m	Υπολογισμός της θερμοκαλυπτικής ικανότητας.
analogia_e.m	Έλεγχος αναλογίας $s - \epsilon_{ob}$
bounds_line_black_body.m	Εύρεση του κέντρου και του άνω δεξιού άκρου του μέλανος σώματος.

Πίνακας 3: Καταγραφή των m-files που χρησιμοποιήσαμε για τις αναλύσεις μας.

```
function [m] = mesos_oros_black_body(num1,num2,d,body)
%Υπολογισμός μέσου όρου τελικής φωτογραφίας σε βαθμούς Κελσίου και σε OS.
%Έχουμε υπολογισμό σφάλματος μετατόπισης
%και υπολογισμό της μέσης διακύμανσης θερμοκρασίας ανά pixel
%και πραγματοποιείτε ευθυγράμμιση
a=cell(2,length(num1:num2));
for i =1:length( num1:num2);%Περίπτωση με θερμοκρασίες
a{1,i}=csvread( ['im',num2str((num1-1+i)),'.csv']);
%H πρώτη σειρά του α έχει τους αρχικούς πίνακες έντασης (Κελσίου)
end
if max(a{1,1}(:))<200
b=cell(3,length(num1:num2));
dT=zeros(1,length(num1:num2));
dx=zeros(1,length(num1:num2));
dy=zeros(1,length(num1:num2));
dtheta=zeros(1,length(num1:num2));
for i =1:length( num1:num2);
[b{1,i},b{2,i},b{3,i}]=bounds_line_black_body(a{1,i});
%H πρώτη σειρά του b έχει τους δυαδικούς τύπους
%H δεύτερη έχει τα κέντρα τους ενώ η τρίτη το άνω δεξιό άκρο του
%αντικειμένου
end
%Υπολογισμός σφάλματος
theta1= atan(abs((b{2,1}(2)-b{3,1}(2)))/abs((b{2,1}(1)-b{3,1}(1))));
```

```

for i =2:length( num1:num2);
    dx(i)=abs(abs(b{2,1}(1)-abs(b{2,i}(1)))));
    dy(i)=abs(abs(b{2,1}(2)-abs(b{2,i}(2)))));
    theta2= atan(abs((b{2,i}(2)-b{3,i}(2)))/abs((b{2,i}(1)-b{3,i}(1)))));
    dtheta(i)=abs((theta2-theta1)*(180/pi));%σε μοίρες *(180/π)
end
%Παρουσίαση σφάλματος
figure()
plot((1:length(num1:num2)),dx,'bo')
hold on
plot((1:length(num1:num2)),dy,'ro')
hold on
legend('Μετατόπιση στον χ άξονα','Μετατόπιση στον y άξονα')
title('Σφάλμα μετατόπισης')
xlabel('Αριθμός Φωτογραφίας')
ylabel('Διαφορά σε pixel')
hold off
figure()
plot((1:length(num1:num2)),dtheta,'go')
title('Σφάλμα περιστροφής')

xlabel('Αριθμός Φωτογραφίας')
ylabel('Διαφορά σε μοίρες')
% Ευθυγράμμιση και υπολογισμός μέσου όρου
[optimize, metric] = imregconfig('monomodal');
%monomodal γιατί και οι δύο εικόνες προέρχονται από την ίδια κάμερα
fixed=a{1,1};a{2,1}=a{1,1};
%H δεύτερη σειρά του α έχει τις ευθυγραμμισμένους πίνακες
for i=2:length( num1:num2);
    moving=a{1,i};
    registered=imregister(moving,fixed,'rigid',optimize,metric);
    a{2,i}=registered;
end
sum1=a{2,1};%Αθροισμα ευθυγραμμισμένων πινάκων
sum2=a{1,1};%Αθροισμα μη ευθυγραμμισμένων πινάκων
for i=2:length( num1:num2);
    sum1=sum1+a{2,i};
    sum2=sum2+a{1,i};
end
m.mean=sum1/length( num1:num2);
m.d=d;
figure()
subplot(1,2,1);
imagesc(sum2./length( num1:num2));
title([body, ' στα ',num2str(d), ' μέτρα χωρίς ευθυγράμμιση']);
lim=caxis;% Πέρνουμε τα όρια του colormap
colorbar()
subplot(1,2,2)
imagesc(m.mean);
title([body, ' στα ',num2str(d), ' μέτρα με ευθυγράμμιση']);
colorbar()
caxis('manual')
caxis(lim);
% Εφαρμόζουμε τα όρια της πρώτης εικόνας και στην ευθυγραμμισμένη
subplot(1,2,2)

%υπολογισμός και διακύμανσης θερμοκρασίας
t1=a{2,1};
for i=1:length( num1:num2);
    dt=mean(abs(t1-a{2,i}));
    dt=mean(dt(:));
    dT(i)=dt;
end
m.dt=dT;
figure()

```

```

plot((1:length(num1:num2)),dT, 'ro')
title('Διακύμανση θερμοκρασίας')
xlabel('Αριθμός Φωτογραφίας')
ylabel('Διαφορά θερμοκρασίας')
else % Περίπτωση με counts
% Ευθυγράμμιση και υπολογισμός μέσου όρου
[optimize, metric] = imregconfig('monomodal');
%monomodal γιατί και οι δύο εικόνες προέρχονται από την ίδια κάμερα
fixed=a{1,1};a{2,1}=a{1,1};
%H δεύτερη σειρά του α έχει τις ευθυγραμμισμένους πίνακες
for i=2:length( num1:num2);
moving=a{1,i};
registered=imregister(moving,fixed,'rigid',optimize,metric);
a{2,i}=registered;
end
sum1=a{2,1};%Αθροισμα ευθυγραμμισμένων πινάκων
sum2=a{1,1};%Αθροισμα μη ευθυγραμμισμένων πινάκων
for i=2:length( num1:num2);
sum1=sum1+a{2,i};
sum2=sum2+a{1,i};
end
m.mean=sum1/length( num1:num2);
m.d=d;
end

```

```

function [m ] = mesos_oros_mat(num1,num2,d,body )
%υπολογισμός μέσου όρου τελικής φωτογραφίας
%ενός υλικού σε συγκεκριμένη απόσταση
%δεν έχουμε υπολογισμό σφάλματος μετατόπισης
%αλλα πραγματοποιείτε ευθυγράμμιση
a=cell(2,length(num1:num2));
for i =1:length( num1:num2);
a{1,i}=csvread( ['im',num2str((num1-1+i)),'.csv']);
end
if max(a{1,1}(:))<200 %Περίπτωση υπολογισμού με βαθμούς Κελσίου
% Ευθυγράμμιση και υπολογισμός μέσου όρου
[optimize, metric] = imregconfig('monomodal');
%monomodal γιατί και οι δύο εικόνες προέρχονται από την ίδια κάμερα
fixed=a{1,1};a{2,1}=a{1,1};
for i=2:length( num1:num2);
moving=a{1,i};
registered=imregister(moving,fixed,'rigid',optimize,metric);
a{2,i}=registered;
end
sum1=a{2,1};
sum2=a{1,1};
for i=2:length( num1:num2);
sum1=sum1+a{2,i};
sum2=sum2+a{1,i};
end
m.mean=sum1/length( num1:num2);
m.d=d;
figure()
imagesc(sum2./length( num1:num2));

```

```

title([body, ' στα ', num2str(d)]);
colorbar()
figure()
subplot(1,2,1);
imagesc(sum2./length( num1:num2));
title([body, ' στα ', num2str(d), ' μέτρα χωρίς ευθυγράμμιση']);
colorbar()
lim=caxis;
subplot(1,2,2)
imagesc(m.mean);
title([body, ' στα ', num2str(d), ' μέτρα με ευθυγράμμιση']);
colorbar()
caxis('manual');
caxis(lim);
subplot(1,2,2)
else %Περίπτωση υπολογισμού με os
% Ευθυγράμμιση και υπολογισμός μέσου όρου
[optimize, metric] = imregconfig('monomodal');
%monomodal γιατί και οι δύο εικόνες προέρχονται από την ίδια κάμερα
fixed=a{1,1};a{2,1}=a{1,1};
for i=2:length( num1:num2);
moving=a{1,i};
registered=imregister(moving, fixed, 'rigid', optimize, metric);
a{2,i}=registered;
end
sum1=a{2,1};
sum2=a{1,1};
for i=2:length( num1:num2);
sum1=sum1+a{2,i};
sum2=sum2+a{1,i};
end
m.mean=sum1/length( num1:num2);
m.d=d;
figure();
imagesc(m.mean);
end

```

```

function [ th_ikan ] = thermokaliptiki_ikanotita( bb,mat,ambientT)
%Επιστρέφει την θερμοκαλυπτική ικανότητα
%του υλικού ευθυγραμμίζοντας τις δύο εικόνες
%και συγκρίνοντας pixel με pixel
%Προσοχή χρειάζομαστε την θερμοκρασία περιβάλλοντος
%διότι η ευθυγράμμιση των φωτογραφιών δημιουργεί μηδενικά pixel
%στα άκρα της φωτογραφίας
% Ευθυγράμμιση
[optimize, metric] = imregconfig('monomodal');
%monomodal γιατί και οι δύο εικόνες προέρχονται από την ίδια κάμερα
%OS registration
fixedos=bb.os.mean;
movingos=mat.os.mean;

```

```

registereddos=imregister(movingos, fixedos, 'rigid', optimize, metric);
%T registration
fixedT=bb.T.mean;
movingT=mat.T.mean;
registeredT=imregister(movingT, fixedT, 'rigid', optimize, metric);
%threshholding
fixedT(fixedT<(ambientT+40))=0;
registeredT(fixedT<(ambientT+40))=0;
fixedos(fixedT<(ambientT+40))=0;
registereddos(fixedT<(ambientT+40))=0;
%show areas
figure(); subplot(1,2,1); imagesc(fixedT); title('Pixel μ.σ. με θερμοκρασία άνω
των 40 από το περρ. '); colorbar();
lim=caxis;
subplot(1,2,2); imagesc(registeredT); title('Τα αντίστοιχα pixel στο υλικό
'); colorbar();
caxis('Manual'); caxis(lim);
p1=fixedos;
p1(p1>0)=1;
s1=sum(p1(:))%αριθμός χρήσιμων στοιχείων
th_ikan.pin=1-(registereddos./fixedos);
th_ikan.list=th_ikan.pin(th_ikan.pin>0);%μας δίνει την λίστα
th_ikan.mean=(sum(th_ikan.list(:))/s1);
%Δημιουργία Ιστογράμματος
figure()
hist(th_ikan.list);
title('Ιστόγραμμα θερμοκαλυπτικής ικανότητας των pixel που μελετήσαμε')
ylabel('Αριθμός pixel που μελετήσαμε')
xlabel(' Θερμοκαλυπτική ικανότητα ');
%Ανά εύρος 5 βαθμών Κελσίου η θερμοκαλυπτική ικανότητα
t=(max(fixedT(:))-5):(10^-2):(ambientT+40);
l=length(t);
T=zeros(1,l);
mesi_therm_ikan=zeros(1,l);
k=1;
for t=(max(fixedT(:))-5):(10^-2):(ambientT+40);
    iT=fixedT;
    icounts=fixedos;
    j=registereddos;
    r=[t t+5];
    icounts(iT<r(1))=0;
    j(iT<r(1))=0;
    icounts(iT>r(2))=0;
    j(iT>r(2))=0;
    p1=1-(j./icounts);
    s1=p1(p1>0);
    s1=sum(s1(:));
    icounts(icounts>0)=1;
    b=sum(icounts(:));
    s=(s1)/b;
    mesi_therm_ikan(k)=s;
    T(k)=(r(1) +r(2))/2;

```

```

        k=k+1;
    end
figure()
plot(T, mesi_therm_ikan);
title('Μέση θερμοκαλυπτική ικανότητα ανά μέση θερμοκρασία εύρους 5 βαθμών Κελσίου')
xlabel('Μέση θερμοκρασία εύρους 5 βαθμών Κελσίου για θερμοκρασίες άνω των 40 βαθμών σε σχέση με το περιβάλλον')
ylabel('Μέση θερμοκαλυπτική ικανότητα')
th_ikan.T=T;
th_ikan.mesi_therm_ikan=mesi_therm_ikan;
end

```

```

function [ ] = analogia_e( num1,num2 )
close all
format shortG
clc
%όλοι πίνακες πρέπει να είναι του ίδιου θερμογράφηματος σε μονάδες OS
%αλλά να έχουν αποθηκευτεί με διαφορετικό συντελεστή εκπομπής
%ε = [1.00 : 0.05 : 0.60];
e=1:-0.05:(1-((length(num1:num2)-1)*0.05));
a=cell(1,length(num1:num2));
for i =1:length( num1:num2);
    a{1,i}=csvread( ['im',num2str((num1-1+i)),'.csv']);
end
%παίρνω 9 σημεία από πάνω προς τα κάτω από κάθε εικόνα
simia= linspace(30,210,10);
figure()
imagesc(a{1,1});
colormap gray
hold on
plot(170,simia(:),'*r');
%
figure()
title('OS ακτινιοβολία απο το ίδιο σημείο σε σχέση με τον βαθμό εκπομπής');
ylabel('Sob')
xlabel('Βαθμός εκπομπής')
hold on
y=zeros(1,length(num1:num2));
for i=1:length(simia)
    for j=1:length(num1:num2);
        y(j)=a{1,j}(round(simia(1,i)),170);
        % Προσοχή οι γραμμές είναι ο άξονας y , ενώ οι στήλες είναι ο άξονας x
    end
    plot(e,y,'b*-');
    hold on
end
OS1=a{1,1};
OS2=a{1,1}*(e(1));
dOS1=zeros(1,length(num1:num2));

```



```

dOS2=zeros(1,length(num1:num2));
for i =1:length( num1:num2);
    dOS=mean(abs(OS1-a{1,i}));
    dOS1(i)=mean(dOS(:));
    dOS=mean(abs(OS2-(a{1,i}*e(i)))));
    dOS2(i)=mean(dOS(:));
end
figure()
plot(e,dOS1,'r-o')
title('Διακύμανση OS')
xlabel('Εικόνα με βαθμό εκπομπής')
ylabel('Μέση διαφορά OS σε σχέση με τον βαθμό εκπομπής')
figure()
plot(e,dOS2,'b-o')
title('Διακύμανση OS')
xlabel('Εικόνα με βαθμό εκπομπής')
ylabel('Με κανονικοποιημένους πίνακες')

```

```

function [im1,c,upper_right_corner ] = bounds_line_black_body(im1)
%Επιστρέφει την εικόνα σε δυαδικό σύστημα
%το κέντρο της εικόνας
%και το άνω δεξιό άκρο για ένα μέλαν σώμα
%εύρεση γκρίζας εικόνας
im1g=mat2gray(im1);
im1b=im1g;
im1b=(im1b>0.11);%Το 0.1 πρέπει να ελέγχεται αν μας ικανοποιεί ως τιμή για ό-
ριο
% edges=edge(im1g,'Sobel');
% im1b=imfill(edges,'holes');
%εύρεση κέντρου βάρους του αντικειμένου
s=regionprops(im1b,'Centroid');
c=s.Centroid;
im1=im1b;
%εύρεση συνόρων του αντικειμένου
b=cell2mat(bwboundaries(im1b));
bound=zeros(length(b),2);
bound(:,1)=b(:,2);
bound(:,2)=b(:,1);
c1=round(c);
c2=find(bound(:,1)==c1(1));
limit=bound(c2(1:end),:);
c2= limit(:,2)== min(limit(:,2));
limit=limit(c2,:);
a=find(bound(:,1)<c(1,1));
bound(a(1:end),:)=0;
a=find(bound(:,2)>c(1,2));
bound(a(1:end),:)=0;
a=find(bound(:,1)==0);
bound(a(1:end),:)=[];
x=0;

```

```
y=0;
i=2;
c2=bound(i,:);
while x==0
    if c2(1,2)>limit(1,2)
        y=bound(i+1,:);
        x=c2;
        if y(1,2)>x(1,2);
            x=1;
        else
            x=0;
        end
    end
end
upper_right_corner=c2;
limit=c2;
i=i+1;
c2=bound(i,:);

end
end
```