



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

## ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Επεξεργασία εικόνων θερμοκάμερας για την αποτίμηση  
σφαλμάτων στις πλατείες Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ Μ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΤΖΟΥΒΑΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012

Copyright © ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ Μ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, all rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτική ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό σε αυτή την εργασία εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι η ανάδειξη των μη καταστρεπτικών διαγνωστικών μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων ως ένα πολύ χρήσιμο και αποδοτικό εργαλείο στα χερίά του πολιτικού μηχανικού. Πιο συγκεκριμένα, αναδεικνύεται ο ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει η θερμοκάμερα ως γρήγορο, ακριβές και χαμηλού κόστους μέσο στα έργα του μηχανικού.

Η εργασία ξεκινά με μια αναφορά στις μεθόδους μη καταστρεπτικές μεθόδους αποτίμησης σφαλμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την υπέρυθρη θερμογραφία και άλλα ενδιαφέροντα στοιχεία όπως το εύρος εφαρμογής της.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις πλατείες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου με θερμοκάμερα, οι οποίες κατόπιν επεξεργασίας οδήγησαν στην ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των στοιχείων τους.

Τέλος, η εργασία περιλαμβάνει και μία πρόταση ανάπλασης των εν λόγω πλατειών με σκοπό τη βέλτιστη διαμόρφωσή τους για το περιβάλλον και τους χρήστες της.

## Λέξεις κλειδιά

Υπέρυθρη θερμογραφία, υπέρυθρη ακτινοβολία, θερμογραφία, θερμοκάμερα, πλατείες Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, γλώσσα προγραμματισμού, μοντέλο RGB, σκίαση

## Abstract

The main purpose of this diploma thesis is to laud the non-destructive diagnostic methods in identifying faults as a very useful and efficient tool for the civil engineer. Specifically, this thesis praises the contribution of infrared camera as a rapid, precise and low-cost tool for every engineer.

The first part of this thesis includes a presentation of the non-destructive methods in identifying faults. Then, there is an extensive reference to the fundamentals of thermography and other interesting aspects regarding the range of its applications.

The second part includes specific tests that were performed at the squares of ntua campus and were performed with an infrared camera. The results of those tests were analysed and led to the development of application software that can contribute to the exploitation of the tests' features.

Additionally, the current thesis includes a suggestion of recasting the squares mentioned above so as to upgrade them in favour of the environment and their users.

## Keywords

Infrared thermography, infrared radiation, thermography, infrared camera, squares of ntua campus, programming language, RGB colour model, shading

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Τζουβαδάκη, επίκουρο καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Στάμο, μέλος ΕΕΔΙΠ για τη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του στα ζητήματα που προέκυπταν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Θεόφιλο Παπαναστασίου. Μηχανικού Η/Υ & Πληροφορικής του Πολυτεχνείου Πάτρας, καθηγητή πληροφορικής για την πολύτιμη συνεισφορά του στην πληρότητα και αρτιότητα της διπλωματικής αυτής.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος εικόνων

Κατάλογος σχημάτων

Κατάλογος διαγραμμάτων

<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b> .....	1
1.1 Σκοπός και στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικής Αποτίμησης.....	1
1.2.1 Ραδιογραφία.....	1
1.2.2 Μηχανογραφημένη Ραδιενεργή Τομογραφία.....	2
1.2.3 Μέθοδος Ραντάρ.....	4
1.2.4 Ακουστικές Μέθοδοι.....	5
1.2.5 Υπέρυθρη Θερμογραφία.....	7
1.3 Παρουσίαση του έργου που μελετά η διπλωματική.....	9
1.3.1 Θερμογραφική μελέτη των κεντρικών πλατειών της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.....	9
1.3.2 Ανάπτυξη λογισμικού.....	11
1.4 Περιγραφή της δουλειάς που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής.....	11
1.5 Περιορισμοί και ευκαιρίες του περιβάλλοντος.....	12
1.5.1 Περιορισμοί.....	12
1.5.2 Ευκαιρίες.....	12
1.6 Οδηγός επομένων κεφαλαίων.....	13
<b>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b> .....	14
2.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	14
2.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	15
2.3 Θερμική ακτινοβολία.....	17
2.3.1 Το μέλαν σώμα.....	17
2.3.2 Πραγματικά σώματα.....	20
2.4 Μετάδοση Θερμότητας.....	21
2.4.1 Αγωγή.....	22
2.4.2 Συναγωγή.....	23
2.4.3 Ακτινοβολία.....	24
2.4.4 Εκπεμπικότητα (Emissivity).....	25

2.5	Θερμογραφία.....	27
2.5.1	Θερμοκάμερα.....	27
2.5.2	Θόρυβος.....	31
2.5.3	Παθητική θερμογραφία.....	32
2.5.4	Ενεργητική θερμογραφία.....	33
2.6	Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας.....	35
2.7	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας.....	41
2.7.1	Βασικά μειονεκτήματα.....	41
2.7.2	Βασικά πλεονεκτήματα.....	41
2.8	Επεξεργασία εικόνας.....	42
2.8.1	Ανθρώπινη όραση.....	43
2.8.2	Ψηφιακή εικόνα.....	44
2.8.3	Χρωματικά μοντέλα.....	45
2.8.4	Αναπαράσταση εικόνας.....	49
2.8.5	Επεξεργασία και ανάλυση εικόνας.....	51
2.8.6	Στατιστική-χρωματικά μοντέλα.....	53
<b>Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....</b>		<b>56</b>
3.1	Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	56
3.2	Θερμογραφική μελέτη.....	56
3.2.1	Κριτήρια επιλογής της θερμοκάμερας.....	57
3.2.2	Θερμοκάμερα.....	57
3.2.3	Υλικά που συνθέτουν την περιοχή μελέτης.....	59
3.2.4	Λήψη θερμογραφικών εικόνων.....	62
3.3	Επεξεργασία δεδομένων.....	62
3.3.1	Εκτέλεση του προγράμματος.....	63
3.3.2	Εφαρμογή της διαδικασίας επεξεργασίας εικόνας.....	63
<b>Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Μετρήσεων.....</b>		<b>65</b>
4.1	Προκαταρκτικές πληροφορίες για τις μετρήσεις.....	65
4.2	Αναλυτική παρουσίαση μετρήσεων ανά σημείο.....	65
4.2.1	Σημείο μέτρησης 1.....	65
4.2.2	Σημείο μέτρησης 2.....	67
4.2.3	Σημείο μέτρησης 3.....	70
4.2.4	Σημείο μέτρησης 4.....	72
4.2.5	Σημείο μέτρησης 5.....	73
4.2.6	Σημείο μέτρησης 8.....	75

4.2.7 Σημείο μέτρησης 9.....	76
4.2.8 Σημείο μέτρησης 10.....	79
4.2.9 Σημείο μέτρησης 12.....	80
4.2.10 Σημείο μέτρησης 13.....	82
4.2.11 Σημείο μέτρησης 18.....	84
4.2.12 Σημείο μέτρησης 19.....	86
4.2.13 Σημείο μέτρησης 20.....	88
4.2.14 Σημείο μέτρησης 24.....	93
4.2.15 Σημείο μέτρησης 25.....	95
4.2.16 Σημείο μέτρησης 37.....	98
4.2.17 Σημείο μέτρησης 39.....	99
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....</b>	<b>102</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>104</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας ThermoCalc.....</b>	<b>106</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΑΤΕΙΩΝ-ΠΡΟΤΑΣΗ.....</b>	<b>114</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ραδιογραφική μέθοδος

Εικόνα 1.2: Μηχανογραφημένη τομογραφική απεικόνιση ενός (α) κυλίνδρου σκυροδέματος με ράβδο οπλισμού στο κέντρο, (β) απλού κυλίνδρου σκυροδέματος φορτισμένο σε αστοχία

Εικόνα 1.3: Τομογραφική εικόνα ενός κυλίνδρου σκυροδέματος με μια οπή στο κέντρο και μονοδιάστατο προφίλ του συντελεστή εξασθένησης κατά μήκος της άσπρης γραμμής

Εικόνα 1.4: Μέθοδος ραντάρ (ραντάρ εδαφικής εισχώρησης)

Εικόνα 1.5: (α) Διατομή του τοίχου, (β) Δημιουργημένο τομογράφημα της ταχύτητας (βάση)

Εικόνα 1.7: Μέθοδος υπέρυθρης θερμογραφίας

Εικόνα 1.6: (α) Διαστάσεις του δοκιμίου σε mm, (β) Δημιουργία εικόνας με χρήση SAFT

Εικόνα 2.1. Το μέλαν σώμα απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται.

Εικόνα 2.2: Θερμογραφική κάμερα.

Εικόνα 2.3: Παθητική θερμογράφιση ενός κτηρίου

Εικόνα 2.4: Η ενέργεια που μεταδίδεται από τους προβολείς στο πειραματικό υλικό θα βοηθήσει στην αποκάλυψη τυχόν επιφανειακών ή υποεπιφανειακών ανωμαλιών.

Εικόνα 2.5: Μπάρες ηλεκτρικών συνδέσεων σε συμβατική απεικόνιση και σε θερμογράφημα

Εικόνα 2.6: Θερμογράφημα μίας κρεμαστής γέφυρας κι ενός σπιτιού

Εικόνα 2.7: Θερμογράφημα σκεπής-Διακρίνεται η υγρασία που έχει αναπτυχθεί

Εικόνα 2.8: Θερμογραφήματα λέβητα και σωληνώσεων

Εικόνα 2.9: Θερμογράφημα σε διυλιστήριο

Εικόνα 2.10: Θερμογράφημα ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος

Εικόνα 2.11: Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων στη θάλασσα του Μεξικό

Εικόνα 2.12: Θερμογράφημα κινητήρα και σασί ενός αυτοκινήτου

Εικόνα 2.13: Θερμογραφήματα μπροστινής όψης και τουρμπίνας επιβατικού αεροσκάφους

Εικόνα 2.14: Θερμογράφημα για ιατρικούς σκοπούς

Εικόνα 2.15: Θερμογραφήματα φλεγόμενου δάσους και κτιρίου

Εικόνα 2.16: Το ανθρώπινο μάτι

Εικόνα 2.17: Το ιστόγραμμα είναι ένα στατιστικό μέτρο για την εμφάνιση των

διαφορετικών χρωματικών τόνων σε μια εικόνα

Εικόνα 3.1: Η θερμοκάμερα bxx series.

Εικόνα 4.1: Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1

Εικόνα 4.1.1.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1

Εικόνα 4.1.2.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1 (δάπεδο-  
πεζούλι)

Εικόνα 4.1.2.Thermocalc

Εικόνα 4.2: Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2

Εικόνα 4.2.1.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2

Εικόνα 4.2.2.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2  
(λεπτομέρεια)

Εικόνα 4.2.2.Thermocalc

Εικόνα 4.2.3.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2  
(λεπτομέρεια-δάπεδο)

Εικόνα 4.2.3.Thermocalc

Εικόνα 4.3: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 3

Εικόνα 4.3.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 3

Εικόνα 4.3.Thermocalc

Εικόνα 4.4: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 4

Εικόνα 4.4.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 4

Εικόνα 4.4.Thermocalc

Εικόνα 4.5: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 5

Εικόνα 4.5.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 5

Εικόνα 4.5.Thermocalc

Εικόνα 4.8: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 8

Εικόνα 4.8.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 8

Εικόνα 4.8.Thermocalc

Εικόνα 4.9: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 9

Εικόνα 4.9.1.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 9 (βόρεια  
όψη)

Εικόνα 4.9.1.Thermocalc

Εικόνα 4.9.2.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 9 (νότια  
όψη)

Εικόνα 4.9.2.Thermocalc

Εικόνα 4.10: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 10

Εικόνα 4.10.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 10

Εικόνα 4.10. Thermocalc

Εικόνα 4.12: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 12

Εικόνα 4.12.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 12

Εικόνα 4.12. Thermocalc

Εικόνα 4.13: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 13

Εικόνα 4.13.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 13

Εικόνα 4.13. Thermocalc

Εικόνα 4.18: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18

Εικόνα 4.18.1.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18

Εικόνα 4.18.1. Thermocalc

Εικόνα 4.18.2: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18 (λεπτομέρεια)

Εικόνα 4.18.2. Thermocalc

Εικόνα 4.19: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19

Εικόνα 4.19.1.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19

Εικόνα 4.19.2.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19

Εικόνα 4.19.2. Thermocalc

Εικόνα 4.20: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20

Εικόνα 4.20.1.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20

Εικόνα 4.20.1. Thermocalc

Εικόνα 4.20.2.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20

(λεπτομέρεια 1)

Εικόνα 4.20.2. Thermocalc

Εικόνα 4.20.3.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20

(λεπτομέρεια 2)

Εικόνα 4.20.3. Thermocalc

Εικόνα 4.20.4: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20 (λεπτομέρεια 3)

Εικόνα 4.20.4. Thermocalc

Εικόνα 4.24: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24

Εικόνα 4.24.1.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24

Εικόνα 4.24.1. Thermocalc

Εικόνα 4.24.2: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24

Εικόνα 4.24.2. Thermocalc

Εικόνα 4.25: Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25

Εικόνα 4.25.1: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25

Εικόνα 4.25.1. Thermocalc

Εικόνα 4.25.2.THERM: Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25 (λεπτομέρεια)

Εικόνα 4.25.2. Thermocalc

Εικόνα 4.37: Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 37

Εικόνα 4.37.THERM: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 37

Εικόνα 4.37.Thermocalc

Εικόνα 4.39: Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39

Εικόνα 4.39.1: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39

Εικόνα 4.39.1.Thermocalc

Εικόνα 4.39.2: Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39 (λεπτομέρεια)

Εικόνα 4.39.2.Thermocalc.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Πλατείες Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση κύματος

Σχήμα 2.2: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Σχήμα 2.3: Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή γύρω από σώμα  
θερμοκρασίας  $T_s$ .

Σχήμα 2.4: Ποιοτική απεικόνιση FPA ανιχνευτή

Σχήμα 2.5: Διάταξη FPA ανιχνευτή σύγχρονης θερμικής κάμερας σε 3D  
σχεδίαση

Σχήμα 2.6: Γραφική απεικόνιση του 8-bit RGB χρωματικού μοντέλου.

Σχήμα 2.7: Η λειτουργία του χρωματικού μοντέλου HSV

Σχήμα 3.1. Τυπική τομή αρμού διαστολής και επιφάνειας επιστρώσεων

Σχήμα 3.2. Τυπική τομή ορίου επιστρώσεων των πλατειών

Σχήμα 3.4. Τυπική τομή αρμού διαστολής και επιφάνειας επιστρώσεων με  
υδρομονωτικό υλικό

Σχήμα 3.3. Τυπική τομή αρμού εργασίας

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα συναρτήσει του μήκους κύματος για διάφορες θερμοκρασίες

Διάγραμμα 2.2: Εκπεμπικότητα διάφορων υλικών: 1.Αδμαντίνη 2.Γύψος  
3.Τσιμέντο 4.Άργιλος

Διάγραμμα 2.3: Καμπύλες του φάσματος παρατηρησιμότητας για διάφορους ανιχνευτές, Η παρατηρησιμότητα πρέπει να είναι υψηλή ώστε να έχουμε ένα αξιόλογο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Διάγραμμα 2.4: Κανονικοποιημένο φάσμα αντίδρασης των κόνων για μικρά (μπλε χρώμα), μεσαία (πράσινο χρώμα) και μεγάλα (κόκκινο χρώμα) μήκη κύματος. Η μίξη των χρωμάτων δίνει το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε.

Διάγραμμα 2.5: Δειγματοληψία. Στα διαγράμματα  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  διαφέρει η πυκνότητα λήψης των δειγμάτων η οποία καθορίζεται από το θεώρημα της δειγματοληψίας όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.8.2.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Σκοπός και στόχοι διπλωματικής εργασίας

Είναι κοινός τόπος στις μέρες μας η αναγκαιότητα υποστήριξης και συντήρησης των παλιών κατασκευών σκυροδέματος ή λιθοσωμάτων. Οι παλαιές αυτές κατασκευές είναι είτε απαρχαιωμένες είτε λειτουργικά ανεπαρκείς είτε δεν είναι σύμφωνες με την οικολογική ευαισθησία που διακρίνει την εποχή μας. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις έχουν υποστεί βλάβες, οπότε υπάρχει ανάγκη αντικατάστασης ή αποκατάστασης τους.

Καθώς όμως η αντικατάσταση είναι αρκετά δαπανηρή και συχνά πρακτικά αδύνατη, στρεφόμεστε όλο και περισσότερο στην αποκατάσταση των κατασκευών. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν, η ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης της απόκλισης των υπό μελέτη κατασκευών από τις σύγχρονες ανάγκες και προδιαγραφές.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι η ανάδειξη των μη καταστροφικών μεθόδων αποτίμησης ως ένα πολύ χρήσιμο και αποδοτικό εργαλείο στα χεριά του πολιτικού μηχανικού. Πιο συγκεκριμένα η ανάδειξή τους ως γρήγορα, ακριβή και χαμηλού κόστους μέσα για τα έργα του μηχανικού.

### 1.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικής Αποτίμησης

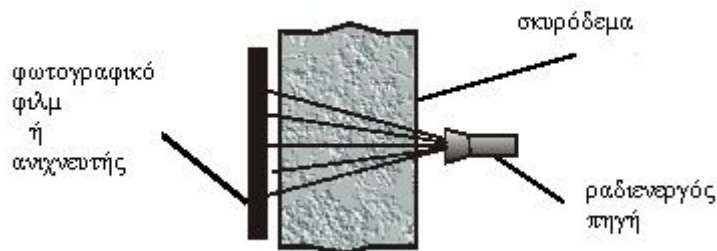
#### 1.2.1 Ραδιογραφία

Η ραδιογραφία είναι μια από τις πιο πρόσφατες τεχνικές NDE (Non destructive examination) η οποία χρησιμοποιείται για τη λήψη μιας εικόνας ανακλώμενου ειδώλου με τη χρήση ακτινοβολίας εισχώρησης, όπως ακτίνες X ή Γ παραγόμενες από ηλεκτρικές λυχνίες ακτινών X ή ραδιενεργά ισότοπα, αντίστοιχα. Οι ακτίνες X και Γ είναι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως το ορατό φως και τα μικροκύματα, αλλά το μήκος κύματος τους είναι τόσο μικρό που μπορούν να εισχωρήσουν σε όλα τα υλικά με κάποια απορρόφηση και διασκόρπιση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Οι ακτίνες X παράγονται όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων εισβάλλει σε ένα στερεό στόχο, δεδομένου ότι οι ακτίνες Γ είναι ακτίνες X υψηλής ενέργειας εκπεμπόμενες από την αποσύνθεση ενός ραδιενεργού ισότοπου. Αυτές οι ακτίνες διαδίδονται μέσω του υλικού κατά μήκος ευθειών διαδρομών χωρίς καμιά σημαντική διάθλαση. Η ένταση της δέσμης μέσα στο υλικό μειώνεται εκθετικά βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^L \mu(x, y, z) dL\right)$$

οπού  $I_0$  είναι η ένταση της προσπίπτουσας δέσμης,  $\mu(x,y,z)$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης του υλικού σαν συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων και  $L$  είναι το μήκος της διαδρομής μέσα στο υλικό. Οι εκπεμφθείσες ακτίνες προσκρούουν στον ανιχνευτή που είναι γενικά ένα φωτογραφικό φιλμ και το εκθέτουν με τον ίδιο τρόπο όπως εκθέτει το φως το φιλμ μιας κάμερας. Η εικόνα που λαμβάνεται είναι στη μορφή μιας δισδιάστατης προβολής η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, όπως η πυκνότητα, η σύνθεση και για ατέλειες μέσω του βαθμού εξασθένησης. Πάντως, η εικόνα δεν παρέχει καμιά πληροφόρηση σχετικά με το βάθος των ατελειών μέσα στο υλικό.

Οι μέθοδοι των ακτίνων X και Γ είναι ικανές να παράγουν ακριβής διαστάτες εικόνες του εσωτερικού του σκυροδέματος. Πάντως, η χρήση τους στη δοκιμή του σκυροδέματος είναι γενικά περιορισμένη εξαιτίας του υψηλού αρχικού κόστους, τη σχετικά χαμηλή ταχύτητα, το βαρύ και ακριβό εξοπλισμό, την ανάγκη για εκτεταμένες προφυλάξεις ασφαλείας και τους πολύ καλά εκπαιδευμένους χειριστές, και ίσως το πιο σημαντικό από όλα, η απαίτηση για πρόσβαση και στις δυο πλευρές της κατασκευής. Η εικόνα 1.1 δείχνει τη διάταξη της μεθόδου της ραδιογραφίας.



Εικόνα 1.1 Ραδιογραφική μέθοδος

### 1.2.2 Μηχανογραφημένη Ραδιενεργή Τομογραφία

Η Μηχανογραφημένη Ραδιενεργή Τομογραφία, που ονομάζεται και Μηχανογραφημένη Τομογραφία (CT-Computerized Tomography) είναι η ανακατασκευή μιας εικόνας διατομής ενός αντικειμένου από την προβολή του. Με άλλα λόγια, είναι η συνεπής εναπόθεση από πάνω των προβολών που ληφθήκανε με τη χρήση ενός σαρωτή για την ανακατασκευή μιας γραφικής αναπαράστασης του αντικειμένου. Η μαθηματική διατύπωση της CT έγινε από τον Radon το 1917 και αρχικά χρησιμοποιήθηκε στην ιατρική σαν ένα διαγνωστικό εργαλείο μετά την εφεύρεση του υπολογιστικού τομογραφικού σαρωτή ακτίνων X από τον Hounsfield το 1972.

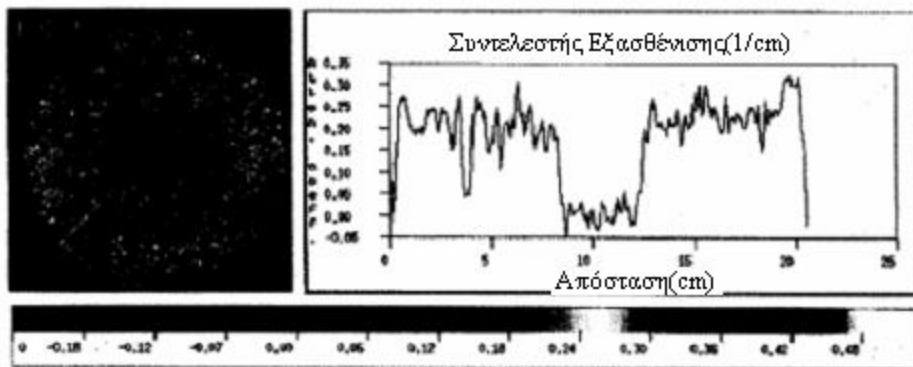
Το 1980, ο Morgan et al ανέπτυξε ένα σύστημα CT το οποίο χρησιμοποιεί μια ισοτοπική πηγή για την παραγωγή δεσμών φωτονίων, και εξέτασε κυλίνδρους σκυροδέματος διαμέτρου 6inch για τον καθορισμό των διαφορών πυκνότητας εντός των κυλίνδρων, για τον εντοπισμό του σπλισμού και κενών και για τον καθορισμό του μεγέθους τους. Η ανακατασκευή της εικόνας έγινε με χρήση 100 προβολών που λήφθηκαν περιστρέφοντας την πηγή 360° γύρω από τους κυλίνδρους. Ο χρόνος έκθεσης για κάθε προβολή ήταν 40 λεπτά εξαιτίας της χαμηλής έντασης της πηγής. Το σύστημα ήταν ικανό να αναγνωρίσει την πυκνότητα με απόκλιση 1%. Τα αποτελέσματα σάρωσης δυο κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος φαίνονται στην εικόνα 1.2. Στο σχήμα 1.2(α), φαίνεται η ανακατασκευασμένη εικόνα του κυλίνδρου σκυροδέματος με ράβδο σπλισμού διαμέτρου 3/8inch. Όπως φαίνεται, η ράβδος και τα κενά στον κύλινδρο αναγνωρίζονται με ακρίβεια. Η εικόνα 1.2(β) δείχνει την εικόνα ενός κυλίνδρου που φορτίζεται σε αστοχία. Ο τρόπος αστοχίας αναγνωρίζεται ξεκάθαρα στην εικόνα.





**Εικόνα 1.2.** Μηχανογραφημένη τομογραφική απεικόνιση ενός (α) κυλίνδρου σκυροδέματος με ράβδο οπλισμού στο κέντρο, (β) απλού κυλίνδρου σκυροδέματος φορτισμένο σε αστοχία

Μια πιο πρόσφατη εφαρμογή της CT στο σκυρόδεμα αναφέρεται από τον Martz et al. Αυτός ανέπτυξε ένα σύστημα CT ακτίνων X για την ποσοτική επιθεώρηση μικρών δοκιμίων σκυροδέματος για διαφορές στην πυκνότητα τους με μια χωρική ανάλυση περίπου 2mm. Η εικόνα 1.3 δείχνει ένα κοίλο κύλινδρο διαμέτρου 20cm με μια οπή 4.4cm στο κέντρο του, που ανακατασκευάστηκε από 45 προβολές σε διαστήματα 4° εντός των 180°. Στα δεξιά της εικόνας του κυλίνδρου είναι ένα μονοδιάστατο προφίλ εξασθένισης υπολογισμένο κατά μήκος μιας διαγώνιας άσπρης γραμμής που φαίνεται πάνω στην εικόνα. Η κεντρική οπή και ένα μικρότερο κενό μεγέθους περίπου 5mm αναγνωρίζονται ξεκάθαρα και στην εικόνα και στο μονοδιάστατο προφίλ.



**Εικόνα 1.3.** Τομογραφική εικόνα ενός κυλίνδρου σκυροδέματος με μια οπή στο κέντρο και μονοδιάστατο προφίλ του συντελεστή εξασθένισης κατά μήκος της άσπρης γραμμής

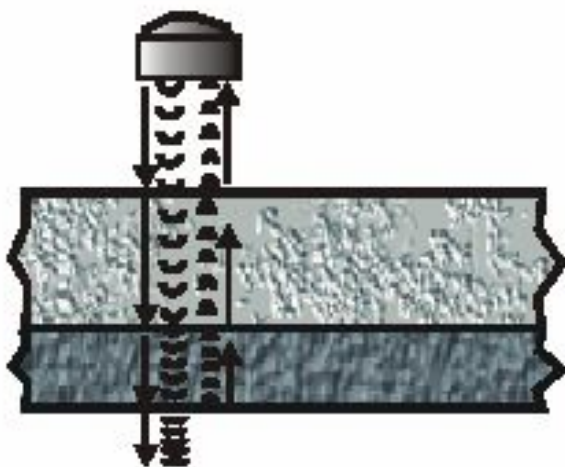
Η Μηχανογραφημένη Τομογραφία είναι ικανή να παράγει εικόνες υψηλής ακρίβειας ανάλυσης της τάξης mm και μεγαλύτερης. Πάντως, οι εφαρμογές της στο σκυρόδεμα είναι γενικά περιορισμένες σε εργαστηριακές μελέτες, καθώς οι σαρωτές είναι ακριβοί, οι μετρήσεις διαρκούν πολύ χρόνο και καλύπτουν μικρό μέγεθος και τέλος απαιτείται η πρόσβαση και στις δυο πλευρές της κατασκευής.

### 1.2.3 Μέθοδος Ραντάρ

Η τεχνική του ραντάρ, που είναι γνωστή και ως μέθοδος ραντάρ εδαφικής εισχώρησης (GPR-Ground Penetrating Radar) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε γεωφυσικές εφαρμογές από το 1960 για τον καθορισμό του πάχους παγετού, για την εύρεση αποθεμάτων πετρελαίου, για τον εντοπισμό γραμμών οχετού, θαμμένα αντικείμενα, για την αποτίμηση του προφίλ του πυθμένα λιμνών και ποταμών και γενικά για τον υποεπιφάνειο χαρακτηρισμό σε διαφορές περιπτώσεις. Οι εφαρμογές πολιτικού μηχανικού της τεχνικής του ραντάρ περιέχουν επιθεώρηση καταστρωμάτων οδών ταχείας κυκλοφορίας και γεφυρών, ανίχνευση κοιλοτήτων πίσω από τις εσωτερικές επενδύσεις σκυροδέματος σε σήραγγες και την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του τοπικού τριψίματος γύρω από τις βάσεις γεφυρών. Οι εφαρμογές της μεθόδου ραντάρ σε κατασκευαστικά στοιχεία σκυροδέματος, όπως δοκοί, υποστρώματα και τοιχία είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

Η αρχή της μεθόδου ραντάρ είναι η παραγωγή και η εκπομπή βραχέων ηλεκτρομαγνητικών παλμών ή κυμάτων αρμονικών με το χρόνο μέσω ενός πομπού προς ένα δοκίμιο-στόχο και η καταγραφή των διασκορπισμένων σημάτων στο δέκτη. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο και στα όποια μέσα μπορεί να περιγραφεί από μια ομάδα διπλών εξισώσεων που ονομάζονται σπείρα του Maxwell και εξισώσεις απόκλισης. Ενσωματώνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού και τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση του προβλήματος με τη χρήση των εξισώσεων της σπείρας του Maxwell.

Όταν τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκρούονται σε ένα αντικείμενο ή άλλο δείγμα με διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, ένα μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας ανακλάται από το όριο και το υπόλοιπο μεταφέρεται στο νέο δείγμα υπομένοντας κάποια διάθλαση ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού του νέου δείγματος και τη γωνία πρόσκρουσης. Έτσι, τα διασκορπισμένα σήματα που καταγράφτηκαν στο δέκτη περιέχουν κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού που μπορούν να εξαχθούν εξελίσσοντας και ερμηνεύοντας τα καταγεγραμμένα σήματα. Τα διασκορπισμένα σήματα μπορούν να αποκτηθούν είτε με αμφιστατικό στήσιμο, όπου ο πομπός και ο δέκτης είναι δυο ξεχωριστές συσκευές, είτε με μονοστατικό στήσιμο, όπου ο πομπός και ο δέκτης συμπίπτουν. Τα δεδομένα που πάρθηκαν κινώντας το σημείο παρατήρησης εντός ενός καθορισμένου ανοίγματος είτε στο μονοστατικό είτε στον αμφιστατικό τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή χωρικών εικόνων του στόχου μέσω αλγορίθμων απεικόνισης. Η μέθοδος ραντάρ φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4. Μέθοδος ραντάρ (ραντάρ εδαφικής εισχώρησης)

#### 1.2.4 Ακουστικές Μέθοδοι

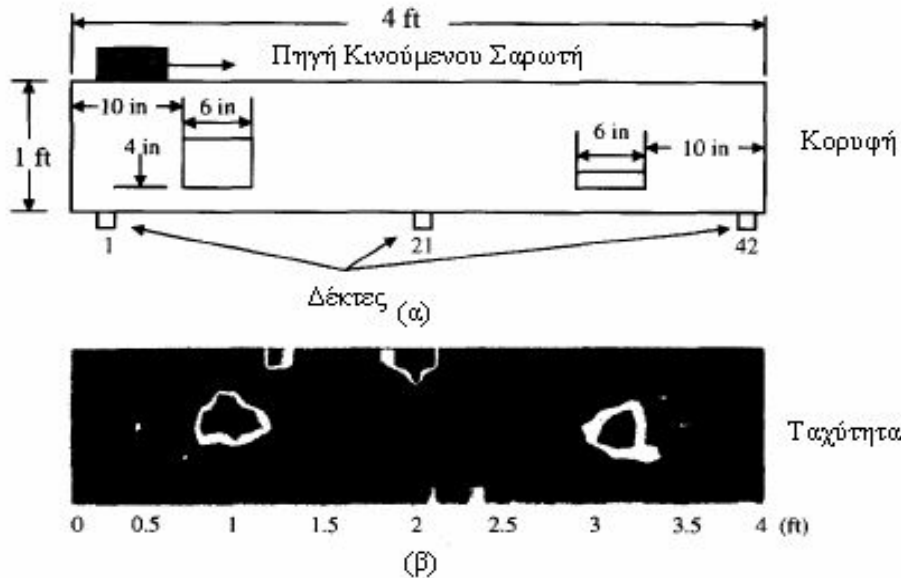
Οι Ακουστικές τεχνικές περιλαμβάνουν τις υπερηχητικές μεθόδους, τη μέθοδο ηχούς πρόσκρουσης και τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής. Η αρχές αυτών των μεθόδων βασίζονται στη διάδοση του ελαστικού κύματος στα στερεά. Η διάδοση του ήχου λαμβάνει χώρα στη μορφή θλιπτικών (P) κυμάτων, διατμητικών (S) κυμάτων μέσα στα στερεά, και στη μορφή επιφανειακών κυμάτων ή κυμάτων Reyleigh (R) κατά μήκος της επιφάνειας. Οι ανομοιογένειες στο σκυρόδεμα προκαλούν διασκόρπιση των ηχητικών κυμάτων η οποία μπορεί να καταγραφεί και να ερμηνευτεί για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το υλικό.

Η τεχνική ηχούς πρόσκρουσης περιλαμβάνει τη μετάδοση ενός παροδικού παλμού μέσα στο σκυρόδεμα μέσω μιας μηχανικής πρόσκρουσης και την ανάλυση των καταγεγραμμένων κυμάτων που ανακλώνται στο σκυρόδεμα. Αυτή η τεχνική δε χρησιμοποιείται για απεικόνιση εξαιτίας της μικρής τάξης μεγέθους της συχνότητας. Η μέθοδος είναι χρήσιμη για μια ταχεία προκαταρκτική εκτίμηση της περιοχής για τον εντοπισμό των ανωμαλιών. Στη συνέχεια αυτές οι ανωμαλίες μπορούν να απεικονιστούν με τη χρήση πιο ειδικών μεθόδων υπερηχητικής δοκιμής.

Η τεχνική ακουστικής εκπομπής είναι μια τεχνική παθητικής κατάστασης απεικόνισης που επιτρέπει τη συνεχή εξέταση της κατασκευής ενώ αυτή είναι σε χρήση. Η ακουστική εκπομπή αναφέρεται στους παλμούς που οφείλονται στη μεταβολή της ενέργειας ελαστικής έντασης, που συμβαίνει στο υλικό τοπικά σαν αποτέλεσμα κάποιας παραμόρφωσης και θραύσης. Μέρος αυτής της ενέργειας διαδίδεται μέσω του υλικού, η οποία μπορεί να ανιχνευτεί από δέκτες υψηλής ευαισθησίας που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια της κατασκευής. Η μέθοδος ηχούς πρόσκρουσης δε χρησιμοποιείται για σκοπούς απεικόνισης, αλλά για σκοπούς εντοπισμού των ατελειών.

Οι υπερηχητικές μέθοδοι αναφέρονται στην εφαρμογή και στη μελέτη των υπερήχων, που είναι ήχοι άνω των 18 KHz που δε μπορούν να ανιχνευτούν από το ανθρώπινο αυτί. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη μετάδοση υπερηχητικών κυμάτων μέσα στο σκυρόδεμα με τη χρήση ενός πομπού που είναι σε επαφή με την επιφάνεια του αντικειμένου. Έπειτα καταγράφονται και ερμηνεύονται τα διασκορπισμένα σήματα. Τα δεδομένα που λήφθηκαν από τα υπερηχητικά πειράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας εικόνας των ατελειών και των ανομοιογενειών στο σκυρόδεμα με τη χρήση τομογραφικών αλγορίθμων απεικόνισης. Οι εφαρμογές αυτής της τεχνικής για την αποτίμηση των συνθηκών στο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν τον καθορισμό του πάχους, τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας και την ανίχνευση και την απεικόνιση ρωγμών, κενών και διαχωρισμών σε στρώσεις.

Μια εφαρμογή απεικόνισης που χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετάδοσης εκτελέστηκε από τους Jalinoos και Olson. Αυτοί εκτέλεσαν την απεικόνιση ενός τοίχου σκυροδέματος με κενά στο εσωτερικό του, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5(α), συνδυάζοντας τις μεθόδους ηχούς πρόσκρουσης και ταχύτητας υπερηχητικού παλμού με την τεχνική της τομογραφίας που χρησιμοποιείται στη γεωφυσική. Η θέση των κενών βρέθηκε με τη χρήση ενός σαρωτή ηχούς πρόσκρουσης, ο οποίος επέτρεψε γρήγορη σάρωση του τοίχου. Έπειτα, διεξήχθησαν δοκιμές ταχύτητας υπερηχητικού παλμού στις θέσεις των κενών για τη δημιουργία της εικόνας. Η εικόνα δημιουργήθηκε με χρήση επαναληπτικής προσέγγισης. Η δημιουργημένη εικόνα φαίνεται στο σχήμα 1.5(β).



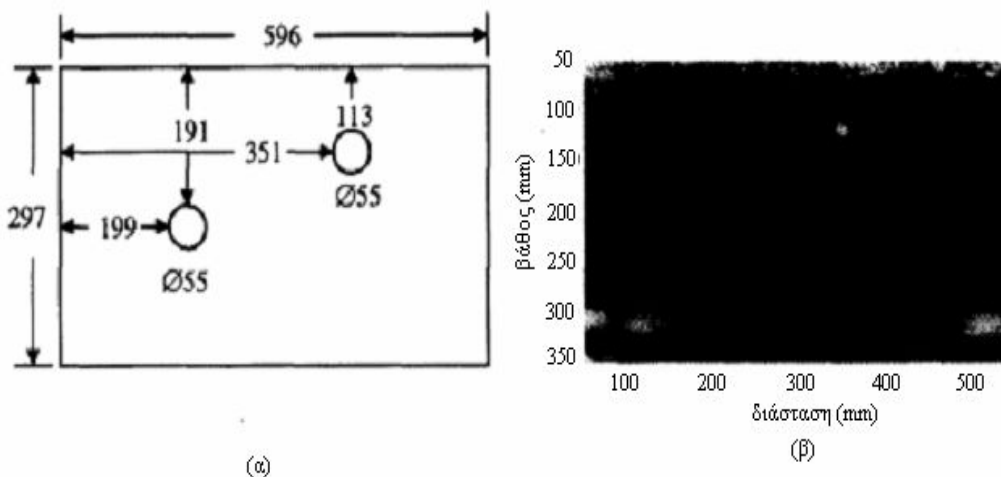
Εικόνα 1.5. (α) Διατομή του τοίχου, (β) Δημιουργημένο τομογράφημα της ταχύτητας (βάση).

Οι τεχνικές ηχούς υπερηχητικού παλμού περιλαμβάνουν την εισαγωγή ενός τασικού κύματος μέσα στο σκυρόδεμα σε ένα προσιτό σημείο με ένα πομπό. Ο παλμός διαδίδεται μέσα στο σκυρόδεμα και ανακλάται από ρωγμές, κενά, διαχωρισμούς σε στρώσεις ή διεπιφάνειες υλικών. Τα ανακλώμενα κύματα καταγράφονται στην επιφάνεια και η ένδειξη του δέκτη επιδεικνύεται σε ένα παλμογράφο ή αποθηκεύεται για περαιτέρω επεξεργασία. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εξέτασης ενός δοκιμίου κάνοντας χρήση της τεχνικής ηχούς παλμού.

Η μέθοδος A-scan ή A-score είναι μια μονοδιάστατη άποψη των ατελειών στο σκυρόδεμα. Η μέθοδος B-scan ή B-score περιλαμβάνει μια σειρά παράλληλων A-scan και δίνει μια διδιάστατη άποψη των ατελειών στο σκυρόδεμα. Η μέθοδος Cscan ή C-score περιλαμβάνει μια σειρά παράλληλων A-scan που εκτελούνται σε μια επιφάνεια. Για εφαρμογές απεικόνισης υπέρηχου υψηλής συχνότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μη καταστροφική αποτίμηση μετάλλων, η επίδειξη της B- ή της C-scan μπορεί να παράσχει σημαντική πληροφόρηση σχετικά με τις εσωτερικές ατέλειες εξαιτίας της υψηλής ευθύτητας των κυμάτων. Πάντως, η παρουσία του εδαφικού υλικού, που συχνά υπερβαίνει τα 10mm σε διάμετρο, απαιτεί η διεξαγωγή της δοκιμής στο σκυρόδεμα να γίνει σε σχετικά χαμηλές συχνότητες με σκοπό την αποφυγή υπερβολικής εξασθένισης προκαλούμενη από διασκόρπιση. Συνεπώς, η υπερηχητική δέσμη δεν έχει χαρακτηριστικά κατεύθυνσης και η εξαγωγή συμπερασμάτων για το μέγεθος των ατελειών είναι δύσκολη. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τη B- ή τη C-scan χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με το μέγεθος των ανομοιογενειών.

Ο Schickert εκτέλεσε υπερηχητική απεικόνιση ενός δοκιμίου εργαστηριακού μεγέθους με δυο οπές κάνοντας χρήση της τεχνικής ηχούς παλμού. Για την απεικόνιση έγινε χρήση της τεχνικής Synthetic Aperture Focusing (SAFT). Η SAFT μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ανάποδη τεχνική η οποία παράγει μια εικόνα του εσωτερικού του αντικειμένου εστιάζοντας στα καταγεγραμμένα δεδομένα. Οι μετρήσεις έγιναν σε ένα γραμμικό άνοιγμα (γραμμική-SAFT) και η δημιουργία εκτελέστηκε στο πεδίο ορισμού του χρόνου. Η απεικόνιση εκτελέστηκε για τρία δοκίμια της ίδιας γεωμετρικής μορφής αλλά με διαφορετικά μέγιστα μεγέθη εδαφικού υλικού με σκοπό την επίδειξη της επιρροής του μεγέθους του εδαφικού υλικού στην υπερηχητική απεικόνιση. Η εικόνα 1.6(α) δείχνει το δοκίμιο και η

εικόνα 1.6(β) δείχνει τη δημιουργημένη εικόνα του δοκιμίου με μέγιστο μέγεθος εδαφικού υλικού 8mm. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για δοκίμια που είχαν μέγιστα μεγέθη εδαφικού υλικού 16 και 32mm, αντίστοιχα. Για τα μεγαλύτερα μεγέθη εδαφικού υλικού παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση της ποιότητας της εικόνας.



**Εικόνα 1.6.** (α) Διαστάσεις του δοκιμίου σε mm, (β) Δημιουργία εικόνας με χρήση SAFT

### 1.2.5 Υπέρυθρη Θερμογραφία

Η υπέρυθρη θερμογραφία σχετίζεται άμεσα με την υπέρυθρη ακτινοβολία. Γι' αυτό τον λόγο, η ιστορία της πρώτης ξεκινά μ' αυτή της δεύτερης. Ο αυστηρός ορισμός αναφέρει πως όλες οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος μεγαλύτερο του κόκκινου φωτός, δηλαδή  $\lambda=0.8\mu\text{m}$ , ονομάζονται υπέρυθρες ακτινοβολίες. Σ' αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι ο συγκεκριμένος ορισμός δεν προέρχεται από τη φυσική. Το όριο  $\lambda=0.8\mu\text{m}$ , πηγάζει από την φυσιολογία του ανθρώπου. Έχει διαπιστωθεί πως οι περισσότεροι άνθρωποι δεν μπορούν να διακρίνουν κάποιο χρώμα με μήκος κύματος μεγαλύτερο από αυτό το όριο. Για κάθε άνθρωπο βέβαια, το όριο αυτό δεν είναι ακριβώς το ίδιο καθώς έχουν παρατηρηθεί μικροαποκλίσεις. Μετά από επεμβάσεις όρασης όπου το ανθρώπινο μάτι αντικαταστάθηκε από τεχνητό, οι ασθενείς μπορούσαν να δουν φως με μήκος κύματος λίγο μεγαλύτερο από  $\lambda=0.8\mu\text{m}$ . Πώς αυτοί οι άνθρωποι βλέπουν το υπέρυθρο; Τι χρώμα ακριβώς παρατηρούν; Η απάντηση είναι απλή. Το υπέρυθρο φως μεταφράζεται σε κόκκινο χρώμα καθώς ο αμφιβληστροειδής του ματιού μας έχει αισθητήρες μόνο για το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο. Ακόμα, έχει ανακαλυφθεί ότι ορισμένα ζώα μπορούν να διακρίνουν μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που είναι άορατη για τον άνθρωπο. Συνεπώς, η διαφορά ανάμεσα σε ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία οφείλεται στην φυσιολογία του ανθρώπινου ματιού. Αυτό όμως το γεγονός, έχει τεράστια επιρροή στην τεχνολογία. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα μάτια μας για να δούμε μέσα από ένα κανονικό μικροσκόπιο, ένα μικροσκόπιο ορατού φωτός. Για να δούμε όμως μέσα από ένα υπέρυθρο μικροσκόπιο απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός ώστε να γίνουν αυτές οι εικόνες ορατές σε εμάς.

Οι υπέρυθρες (IR) τεχνικές χρησιμοποιούνται κοινώς σε εφαρμογές του στρατού, στη μη καταστροφική εξέταση των υλικών και σε ιατρικές διαγνώσεις. Εντός κάποιων περιορισμών, η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται εξ' αποστάσεως, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και έχει τη δυνατότητα ποιοτικής ή ποσοτικής πληροφόρησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και τον καθορισμό του μεγέθους των κενών,

των διαχωρισμών σε στρώσεις και τις αποκολλήσεις στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι εφαρμογές αυτής της μεθόδου σε θέματα πολιτικού μηχανικού περιλαμβάνουν τη θερμογραφία γεφυρών και οδών ταχείας κυκλοφορίας, ασφαλικών καταστρωμάτων, συστημάτων αποχέτευσης, σωλήνων οχετού, κανάλια όμβριων και εσωτερική και εξωτερική θερμογραφία σε κτίρια. Η υπέρυθρη θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι οι υποεπιφάνειες ανωμαλίες στο υλικό επιτελούν σε τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες. Η θερμογραφία ανιχνεύει αυτομάτως την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του υλικού και παράγει μια οπτική εικόνα από το θερμικό σήμα η οποία μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος της εσωτερικής ατέλειας. Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν μια υπέρυθρη κάμερα συνδεδεμένη με ένα υπέρυθρο ανιχνευτή που απεικονίζει τις διαφορές θερμικής ακτινοβολίας. Η θερμογραφική απεικόνιση μπορεί να περιλαμβάνει ενεργές ή παθητικές πηγές όπως θερμάστρα ή ηλιακή ακτινοβολία.

Η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα με τρεις τρόπους που ονομάζονται αγωγιμότητα, μεταγωγή και ακτινοβολία. Ο τρόπος που ενδιαφέρει στις εφαρμογές πολιτικού μηχανικού από την άποψη της μη καταστροφικής εξέτασης είναι η ακτινοβολία, καθώς οι IR (Infrared radiation) κάμερες ανιχνεύουν την ακτινοβολούμενη θερμότητα. Πάντως, οι άλλοι τρόποι πρέπει να γίνουν κατανοητοί για την αποτίμηση των περιορισμών της IR θερμογραφίας.

Όλα τα υλικά σε μια θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια και η ενέργεια που εκπέμπεται έτσι, ονομαζόμενη θερμική ακτινοβολία, μεταδίδεται στο χώρο στη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα υπέρυθρα  $\mu\text{954}$  κύματα αποτελούν ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως τα μικροκύματα ή οι ακτίνες X. Ο ρυθμός εκπομπής ενέργειας,  $\Phi$ , ανά μονάδα επιφανειακής περιοχής του υλικού σχετίζεται με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του,  $T$ , με βάση το νόμο των Stefan-Boltzmann:

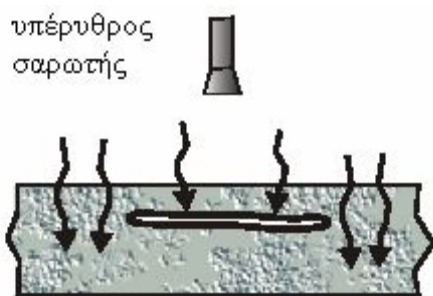
$$\Phi = \varepsilon \sigma T^4$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και  $\varepsilon$  η εκπεμπτικότητα του υλικού.

Αν κάποια ποσότητα ενέργειας εισαχθεί σε μια δοσμένη θέση του υλικού, η ενέργεια που δίνεται στο σύστημα θα διαχυθεί βαθμιαία σε όλο το υλικό. Αυτός ο μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας ονομάζεται αγωγιμότητα. Η σημασία της αγωγιμότητας στις εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας σε θέματα πολιτικού μηχανικού είναι ότι αν οι ατέλειες βρίσκονται βαθιά μέσα στο σκυρόδεμα ή αν η διάμετρος τους είναι μικρή σε σχέση με το βάθος τους, η θερμική διαφορά στην επιφάνεια, οφειλόμενη στην αγωγιμότητα, θα είναι πολύ μικρή. Έτσι, τέτοιες ατέλειες μπορεί να μην ανιχνευτούν από την υπέρυθρη θερμογραφία. Μεταγωγή είναι ο τρόπος θερμικής μεταφοράς μεταξύ του υλικού και μιας ποσότητας ρευστού, σε μια θερμοκρασία διαφορετική από αυτή του υλικού, που ρέει κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού. Η επιρροή της μεταγωγής στη μη καταστροφική εξέταση κατασκευών σκυροδέματος είναι σημαντική καθώς η πλειονότητα των μετρήσεων λαμβάνουν χώρα σε συνθήκες πεδίου. Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή κατά το χρόνο της μέτρησης, η μεταφορά θερμότητας οφειλόμενη στη μεταγωγή επηρεάζει τη θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια του σκυροδέματος, δίνοντας εσφαλμένες εικόνες.

Οι πιο κρίσιμες παράμετροι αποτίμησης που επηρεάζουν τις τεχνικές της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η επιφανειακή εκπεμπτικότητα και η ταχύτητα του ανέμου. Για την ποσοτική αποτίμηση κατασκευών σκυροδέματος, μπορούν να γίνουν διορθώσεις στα δεδομένα μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη τις επιρροές της εκπεμπτικότητας,

της ταχύτητας του ανέμου, της περιβάλλουσας θερμοκρασίας και της ακτινοβολήσης από τα περιβάλλοντα αντικείμενα. Ακόμα, οι αποτιμήσεις υπέρυθρης θερμογραφίας περιορίζονται σε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες. Ένας άλλος περιορισμός της IR θερμογραφίας είναι ότι δεν παράσχει πληροφόρηση σχετικά με το βάθος των ατελειών, καθώς αυτή απεικονίζει u964 την ακτινοβολήση από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Για τη διόρθωση αυτής της αδυναμίας, μπορεί να συνδυαστεί με το ραντάρ εδαφικής εισχώρησης. Στην εικόνα 1.7 δίνεται μια σχηματική παράσταση αυτής της μεθόδου.

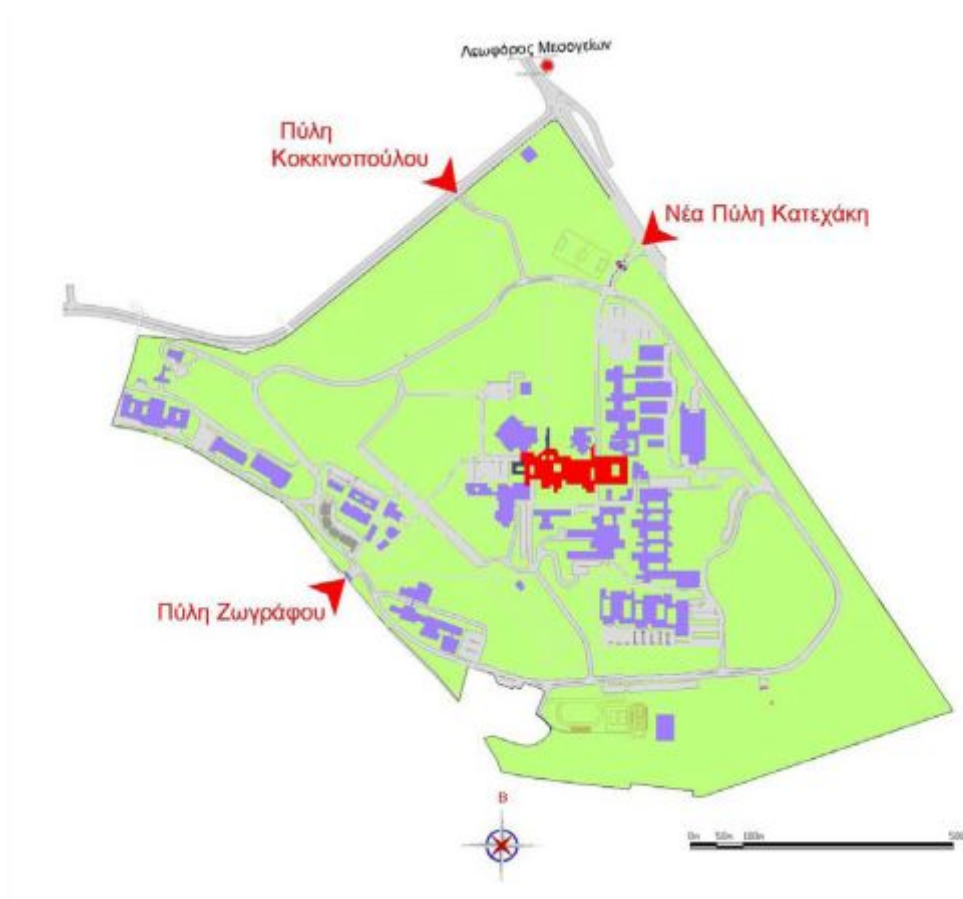


Εικόνα 1.7. Μέθοδος υπέρυθρης θερμογραφίας

### 1.3 Παρουσίαση του έργου που μελετά η διπλωματική

#### 1.3.1 Θερμογραφική μελέτη των κεντρικών πλατειών της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

Οι Πλατείες Κέντρου, όπως είναι γνωστές στους περισσότερους μελετητές, σχεδιάστηκαν τη δεκαετία του 1970 από την Τεχνική Υπηρεσία του Ε.Μ.Π. Βρίσκονται στο κέντρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου και εφάττονται στο κτίριο Διοίκησης και την Κεντρική Βιβλιοθήκη, όπως επισημαίνονται και στο σχήμα 1.1 με κόκκινο χρώμα.



**Σχήμα 1.1.** Πλατείες Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Τα προβλήματα των εν λόγω πλατειών που διαπιστώθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής είναι τα εξής :

- 1) Οι υπερβολικές εκπομπές θερμότητας από τα δομικά της στοιχεία, ιδιαίτερα κατά την περίοδο του καλοκαιριού.
- 2) Έλλειψη λειτουργικότητας του χώρου για τις ανάγκες της πολυτεχνικής κοινότητας. Πιο συγκεκριμένα μεγάλο τμήμα του χώρου δεν χρησιμοποιείται καθόλου.
- 3) Έλλειψη πρασίνου.
- 4) Τα υλικά που τη συνθέτουν είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για το περιβάλλον.
- 5) Μη επαρκής σχεδίαση όσον αφορά την απορροή των υδάτων.
- 6) Η μόνωση των Πλατειών Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου έχει απορροφήσει μεγάλα κονδύλια σε διάφορες χρονικές περιόδους χωρίς επιτυχή αποτελέσματα.



7) Αισθητικά προσβλητική για το επίπεδο, την ιστορία και το αντικείμενο μελέτης των σχολών που βρίσκονται περιμετρικά της.

8) Η κατασκευή των πλατειών έγινε σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο μοντέλο της εποχής εκείνης. Συγκεκριμένα, διάταξη των κτιρίων περιμετρικά μίας μεγάλης έκτασης, μορφής πάρκου, κατασκευή υπόγειου χώρου στάθμευσης για τα οχήματα των χρηστών με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση και χρηστικότητα του χώρου. Η συρροή οχημάτων, η κατακόρυφη αύξηση των χρηστών, η εκτεταμένη χρήση υλικών μη φιλικών προς το περιβάλλον στην κατασκευή των πλατειών καθώς και κακοτεχνίες κατά την υλοποίηση του έργου, κρίνεται επιτακτική η ανάπλάσή τους το συντομότερο δυνατό.

### 1.3.2 Ανάπτυξη λογισμικού

Η ανάγκη για ακριβέστερα αποτελέσματα και η αναζήτηση μεθόδου υπολογισμού της ακριβής επιφάνειας του δομικού στοιχείου που κρίνεται αναγκαία η αποκατάστασή του, οδήγησε στην ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Έτσι, η έκταση της φθοράς θα γίνει καλύτερα αντιληπτή και θα μπορούμε να επέμβουμε μόνο στις προβληματικές περιοχές των υπό μελέτη δομικών στοιχείων. Επίσης θα γίνει αντιληπτή και η πραγματική έκταση του προβλήματος στις πλατείες της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.

### 1.4 Περιγραφή της δουλειάς που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής

Η σύνταξη της παρούσας διπλωματικής αποδείχθηκε μία μακρόχρονη διαδικασία βασικοί άξονες της οποίας ήταν οι εξής:

- Απρίλιος 2011: Ανάθεση διπλωματικής από τον κ. Ιωάννη Τζουβαδάκη
- Μάιος-Ιούνιος 2011: Ανάπτυξη βασικού θεωρητικού υποβάθρου όσον αφορά τις μη καταστρεπτικές μεθόδους αποτίμησης σφραμάτων και τη θερμογραφία.
- Ιούλιος 2011: Εξοικείωση με τη θερμογραφική κάμερα, το χειρισμό της και το λογισμικό που μου παρείχε η σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Σεπτέμβριος 2011: Συνάντηση με την κ. Ε. Τριάντη, αρχιτέκτων, η οποία μου παρείχε όλες τις δυνατές πληροφορίες σχετικά με τις πλατείες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.
- Οκτώβριος 2011: Έγιναν οι μετρήσεις με τη θερμοκάμερα στις πλατείες σε συγκεκριμένα σημεία σύμφωνα με την κρίση του μελετητή, ώστε να υπάρχουν ποικίλα δεδομένα προς εξέταση ανάλογα με τη χρήση και το υλικό κατασκευής των δομικών στοιχείων.
- Νοέμβριος 2011: Επιλογή των εικόνων που απεικονίζουν με το βέλτιστο τρόπο το μέγεθος της βλάβης ανά σημείο μελέτης.

- Νοέμβριος-Φεβρουάριος 2012: Ανάπτυξη θεωρητικού υποβάθρου στη γλώσσα προγραμματισμού java.
- Φεβρουάριος-Μάιος 2012: Ανάπτυξη λογισμικού επεξεργασίας εικόνας
- Ιούνιος 2012: Σύνταξη τοπογραφικού με την προτεινόμενη λύση του μελετητή.
- Ιούνιος 2011-Σεπτέμβριος 2012: Συγγραφή διπλωματικής

## 1.5 Περιορισμοί και ευκαιρίες του περιβάλλοντος

### 1.5.1 Περιορισμοί

1) Ο υπό μελέτη χώρος των πλατειών είναι ανοικτός. Συνεπώς, το περιθώριο σφάλματος των θερμογραφικών μετρήσεων είναι μεγαλύτερο. Για το λόγο αυτό λήφθηκαν υπόψη κλιματολογικοί παράγοντες όπως ο άνεμος, η υγρασία και η ηλιοφάνεια. Επίσης, έγιναν πολλές θερμογραφικές λήψεις ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα σοβαρού σφάλματος μέτρησης.

2) Απειρία του μηχανικού που εκπόνησε τη διπλωματική, διότι αυξάνεται η πιθανότητα πιθανών σφαλμάτων κυρίως στην εκτίμηση των παραγόντων που επιδρούν στις θερμογραφικές μετρήσεις.

3) Η εκάστοτε επιφάνεια μελέτης ήταν συχνά καλυμμένη και με άλλα υλικά τα οποία αλλοιώνουν το τελικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό καθαρίστηκαν κι έπειτα λήφθηκαν οι μετρήσεις.

### 1.5.2 Ευκαιρίες

1) Η χρήση τελευταίας τεχνολογίας τεχνολογικού εξοπλισμού προσέδωσε αξιοπιστία στις θερμογραφικές μετρήσεις .

2) Τα κύρια είδη δομικών στοιχείων που απαρτίζουν τις πλατείες επαναλαμβάνονται τακτικά. Το γεγονός αυτό, συνδυαζόμενο με τις πολλές λήψεις προσφέρει ακριβέστερα αποτελέσματα και μειώνει το περιθώριο σφάλματος.

3) Μεγάλη ποικιλομορφία όσον αφορά την κατάσταση των δομικών στοιχείων της πλατείας. Πιο συγκεκριμένα, παρόμοιο δομικό στοιχείο δύναται να μετρηθεί υπό σκίαση ή εκτεθειμένο στην ηλιακή ακτινοβολία, δίπλα σε βλάστηση ή απομονωμένο, ενωμένο με άλλα δομικά στοιχεία ή ανεξάρτητο και τέλος υπό διαφορετικές χρήσεις.

4) Σπουδαιότητα του έργου και η ανάγκη επισήμανσης του προβλήματος που αντιμετωπίζει ο χώρος των πλατειών.

### **1.6 Οδηγός επομένων κεφαλαίων**

Με την ολοκλήρωση μία εκτενούς εισαγωγής αναφορικά με το θέμα που μελετά η διπλωματική αυτή θα γίνει μία αναφορά στο περιεχόμενο των επόμενων κεφαλαίων.

Το κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη θερμογραφία, τα χρωματικά μοντέλα και την επεξεργασία εικόνας. Στο κεφάλαιο 3 αναφέρεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση θερμοκάμερας και την αντίστοιχο αποτέλεσμα που προέκυψε κατόπιν επεξεργασίας. Τέλος, το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της μελέτης, καθώς και μία πρόταση για την ανάπλαση των Κεντρικών Πλατειών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Το σύνολο των φυσικών καταστάσεων που δημιουργούνται σε κάποιο σημείο του χώρου, μεταδίδονται μέσα στο χώρο και γίνονται αντιληπτές λίγο αργότερα σε κάποιο άλλο σημείο είναι παραδείγματα κυματικής κίνησης. Στην κυματική κίνηση γίνεται μεταφορά ενέργειας διαμέσου κάποιου υλικού ή ακόμα και του κενού.

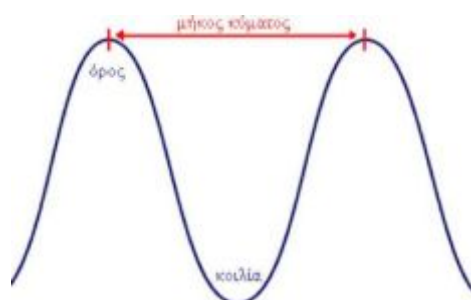
Αν σε κάποιο σημείο, οι φυσικές καταστάσεις επαναλαμβάνονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, μετά την πάροδο σταθερού χρονικού διαστήματος τότε η κυματική κίνηση λέγεται περιοδική. Το σταθερό χρονικό διάστημα ονομάζεται περίοδος.

Τα περιοδικά κύματα χαρακτηρίζονται από τα όρη ή κορυφές και τις κοιλίες. Όρος ή κορυφή είναι το σημείο του κύματος όπου συναντάμε την μέγιστη τιμή μετατόπισης. Αντίθετα, κοιλία είναι το σημείο του κύματος όπου συναντάμε την ελάχιστη τιμή μετατόπισης.

Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα περιοδικό κύμα είναι το μήκος κύματος, η ταχύτητα διάδοσης και η συχνότητα. Συχνότητα ( $f$ ) ονομάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων του γεγονότος στην μονάδα του χρόνου. Η συχνότητα ισούται με το αντίστροφο της περιόδου. Μήκος κύματος ( $\lambda$ ) ονομάζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος. Καθώς ταξιδεύει ένα περιοδικό κύμα στο χώρο, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του, παραμένει σταθερή. Αυτή η σταθερή απόσταση ονομάζεται μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ίδιου κύματος, που σημαίνει πως: όσο μικρότερη είναι η συχνότητα ενός κύματος τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μήκος κύματος του. Η σχέση που συνδέει τη συχνότητα με το μήκος κύματος είναι:

$$f = \frac{u}{l}$$

όπου  $u$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.



Σχήμα 2.1. Αναπαράσταση κύματος

Ακτινοβολία ονομάζεται κάθε διαδικασία στην οποία η ενέργεια που εκπέμπεται από κάποιο σώμα "ταξιδεύει" διαμέσου κάποιου υλικού ή του κενού μέχρι τελικά να απορροφηθεί από κάποιο άλλο σώμα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι τύπος κυμάτων σε μορφή ακτινοβολίας, με συνιστώσες ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η θεωρία της, διατυπώθηκε πρώτα από τον Maxwell, προκειμένου να εξηγήσει τη φύση του φωτός. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετη προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός ( $c$ ) που είναι περίπου ίση με  $3 \cdot 10^8 \text{ km/sec}$ . Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συνίσταται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα που καλύπτουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων και έτσι μπορεί να παραχθεί και τεχνικά. Ορισμένες μορφές αυτής της ακτινοβολίας, σε αυξητική σειρά συχνότητας είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες X, οι ακτίνες γάμμα.

Υπάρχουν όμως κάποια φαινόμενα όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Κόμπτον τα οποία δεν εξηγεί η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Τα φαινόμενα αυτά τα εξήγησε ο Einstein το 1905 ο οποίος υπέθεσε ότι η ακτινοβολία όχι μόνο απορροφάται ή εκπέμπεται κατά ακέραια ποσά (κβάντα), όπως είχε ορίσει ο Planck το 1900, αλλά και μεταδίδεται στο χώρο κατά ακέραια ποσά, τα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια ίση με:

$$E = h \cdot \nu$$

όπου  $\nu$  είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας και  $h$  η σταθερά του Planck που ισούται με  $6.626068 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{sec}$ .

Η ερμηνεία της φύσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τη θεωρία των κβάντων έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell. Τις δύο αντίθετες απόψεις συνδυάζει η κυματομηχανική που δέχεται ότι το κύμα και το σωματίδιο είναι δύο διαφορετικές μορφές της ίδιας οντότητας, δηλαδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες (δυσμός). Σωματιδιακές ακτινοβολίες είναι υποατομικά σωματίδια, όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια κλπ., καθώς και άτομα ή μόρια. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι ηλεκτρισμένα ή όχι. Παραδείγματα σωματιδιακών ακτινοβολιών είναι οι πυρηνικές ακτινοβολίες  $\alpha$  και  $\beta$ , οι καθοδικές ακτίνες και οι κοσμικές ακτίνες.

Οι ακτινοβολίες, κυματικές και σωματιδιακές, όταν έχουν υψηλή ενέργεια, μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό, δηλαδή να διώξουν ηλεκτρόνια από τα άτομα της ύλης, μέσα από την οποία περνούν και να τα αφήσουν θετικά φορτισμένα. Οι ακτινοβολίες που προκαλούν ιονισμό ονομάζονται ιονίζουσες ακτινοβολίες. Ο ιονισμός προκαλεί βλάβες στους ζωντανούς οργανισμούς και έτσι οι ιονίζουσες ακτινοβολίες προκαλούν μεταλλάξεις, κακοήθειες όγκους και λευχαιμίες.

## 2.2 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Φάσμα, με τη φυσική έννοια, είναι η απεικόνιση της έντασης μίας μίξης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα ή το μήκος κύματος αυτών. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καλύπτει μία πολύ μεγάλη περιοχή μηκών κύματος και χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες ακτινοβολίας με κριτήρια την προέλευση, τη δημιουργία και τις εφαρμογές που χαρακτηρίζουν την ακτινοβολία για κάθε συγκεκριμένο διάστημα μήκους κύματος.

Όλοι οι τύποι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπακούν στις ίδιες φυσικές αρχές που αφορούν την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη σκέδασή τους. Η ταχύτητα διάδοσης

θεωρείται ίδια με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός και για κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύει η παρακάτω θεμελιώδης σχέση :

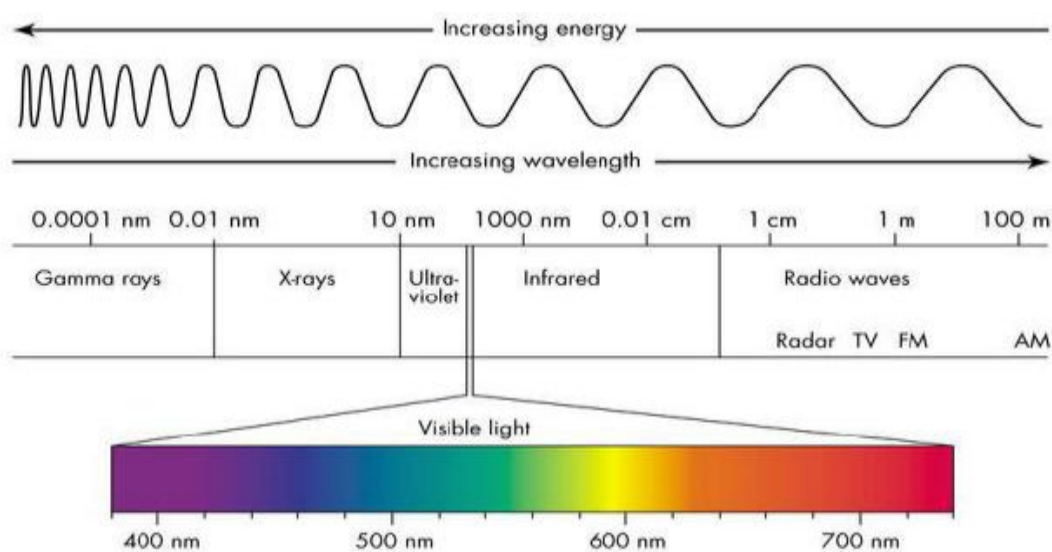
$$\lambda \times f = c$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας,  $f$  η συχνότητα διάδοσής της και  $c$  η ταχύτητα του φωτός ίση με  $3 \cdot 10^8$  km/sec.

Η υπέρυθη ακτινοβολία καλύπτει μία πολύ μικρή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ξεκινάει από την περιοχή της ορατής ακτινοβολίας, περίπου  $0,78\mu\text{m}$  κι εκτείνεται μέχρι τα  $10\mu\text{m}$  περίπου.

Η περιοχή που μας ενδιαφέρει για τη λειτουργία των θερμικών καμερών και για κάθε άλλο όργανο μέτρησης με χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μεταξύ  $0,7$  και  $14\mu\text{m}$ . Πέραν αυτού του διαστήματος η ενέργεια είναι τόσο χαμηλή που οι ανιχνευτές των οργάνων δεν είναι τόσο ευαίσθητοι να την εντοπίσουν.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και οι κύριες περιοχές στις οποίες χωρίζεται με βάση το μήκος κύματος, ενώ φαίνεται και μία μεγέθυνση στην υπέρυθη περιοχή.



**Σχήμα 2.2.** Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

### 2.3 Θερμική ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία, δηλαδή ηλεκτρομαγνητικά κύματα, εξαιτίας της ίδιας τους της θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται θερμική ακτινοβολία. Παράλληλα με την εκπομπή, όλα τα σώματα απορροφούν ακτινοβολία από το περιβάλλον τους. Αν ένα σώμα είναι θερμότερο από το περιβάλλον του τότε εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία απ' όση απορροφά και ψύχεται. Στην αντίθετη περίπτωση απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από όση εκπέμπει και το σώμα αυτό θερμαίνεται. Τελικά θα έρθει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του, μία κατάσταση όπου οι ρυθμοί εκπομπής και απορρόφησης ακτινοβολίας είναι ίσοι. Η ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους τρεις τρόπους μετάδοσης θερμότητας.

Το φάσμα συχνοτήτων της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας ενός στερεού σώματος είναι συνεχές. Το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται διαφέρει για κάθε συχνότητα και εξαρτάται τόσο από την δομή του σώματος όσο και από το υλικό του. Οι συχνότητες αυτές αναφέρονται ως φάσμα του σώματος και συχνά συγκεντρώνει το ενδιαφέρον όχι μόνο το εύρος τους αλλά και η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υποσύνολο του φάσματος. Συγκεκριμένα, έχει ενδιαφέρον να βρεθεί η συχνότητα εκείνη στην οποία εκπέμπεται η περισσότερη ακτινοβολία από το σώμα, δηλαδή το κυρίαρχο σημείο του φάσματος συχνοτήτων. Είναι λογικό ότι το αποτέλεσμα της προηγούμενης αναζήτησης θα εξαρτάται από το υλικό και την θερμοκρασία του σώματος.

Τα περισσότερα σώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή ο άνθρωπος έχουν κυρίαρχη συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στο υπέρυθρο φως και επομένως η ακτινοβολία τους δεν είναι ορατή. Παρ' όλα αυτά, όσο η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπεται. Επίσης η κυρίαρχη συχνότητα μεταφέρεται προς το ορατό φως και άρα γίνεται ορατή από τους ανθρώπους. Συνήθως, όταν το σώμα θερμαίνεται, η κυρίαρχη συχνότητα μεταφέρεται από το βαθύ κόκκινο στο φωτεινό κίτρινο και τελικά στο λευκό φως.

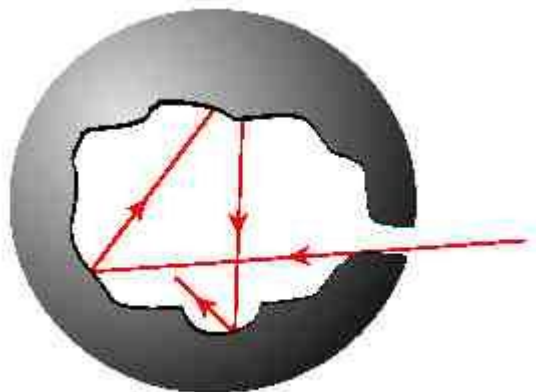
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ακτινοβολία εξαρτάται από την θερμοκρασία αλλά και την σύσταση του σώματος. Για παράδειγμα, στους  $2000\text{ K}$ , μια γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια από βολφράμιο εκπέμπει ακτινοβολία με ρυθμό  $23.5\text{ Watts/cm}^2$ , την ώρα που για το μολυβδαίνιο ο αντίστοιχος ρυθμός είναι  $19.2\text{ Watts/cm}^2$ . Σε κάθε περίπτωση ο ρυθμός αυξάνεται όταν οι επιφάνειες δεν είναι γυαλισμένες αλλά τραχιές. Η εξάρτηση από το υλικό των σωμάτων κάνει το πρόβλημα ακόμα πιο πολύπλοκο. Ευτυχώς, η βοήθεια έρχεται από τις δυσκολίες που υπήρξαν στην περιγραφή των αερίων.

Αέρια με διαφορετική ατομική σύσταση έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Τα πιο βασικά σημεία της συμπεριφοράς τους θα μπορούσαν να γίνουν πιο κατανοητά με τη χρήση της έννοιας του ιδανικού αερίου. Το ιδανικό αέριο είναι εύκολο στην μελέτη του και μπορεί αργότερα να χρησιμοποιηθεί για την, καταρχήν, κατανόηση άλλων πιο σύνθετων αερίων. Στην πραγματικότητα είναι μια ιδανικοποίηση ή προσέγγιση των βασικών ιδεών που αφορούν στην συμπεριφορά των αερίων. Ομοίως, στο πρόβλημά της θερμικής ακτινοβολίας, είναι χρήσιμο να εισαχτεί η έννοια του ιδανικού εκπομπού. Για το συγκεκριμένο σώμα, το φάσμα της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του σώματος και όχι από το υλικό του και την φύση της επιφάνειάς του.

#### 2.3.1 Το μέλαν σώμα

Στην πραγματικότητα, ένα αέριο που συμπεριφέρεται περίπου όπως το ιδανικό μπορεί να προσεγγιστεί από ένα αέριο μονατομικών ατόμων όπως το ήλιο, το νέον κλπ., σε όχι τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Αντίστοιχα, ο ιδανικός εκπομπός μπορεί να προσεγγιστεί από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια μικρή τρύπα ενός κοίλου σώματος σε κάποια θερμοκρασία. Η ακτινοβολία αντανakλάται στα εσωτερικά τοιχώματα της κοιλότητας και

αλλάζει αρκετά πριν καταφέρει να βρει την μικρή τρύπα και ξεφύγει. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα, η ακτινοβολία να μην εξαρτάται τελικά από το υλικό και την φύση της επιφάνειας του σώματος. Αναφερόμαστε σ' αυτήν ως ακτινοβολία κοιλότητας. Ας αναλυθεί τώρα η αντίστροφη διαδικασία, όταν δηλαδή η ακτινοβολία απορροφάται από το σώμα και όχι όταν εκπέμπεται. Σύμφωνα με αυτή, μια μικρή τρύπα με μια σκούρα κοιλότητα στο εσωτερικό, απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται, ανεξαρτήτως του υλικού του σώματος. Συνγνά, η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται ακτινοβολία μέλανος σώματος.



**Εικόνα 2.1.** Το μέλαν σώμα απορροφά όλη την ακτινοβολία που εισέρχεται.

Η έννοια "μέλαν σώμα" διατυπώθηκε από τον Gustav Kirchhoff το 1896. Η ονομασία αυτή έχει δοθεί διότι στη συνηθισμένη θερμοκρασία τα σώματα είναι μαύρα (ή μελανά), επειδή ακριβώς απορροφούν όλα τα μήκη κύματος ακόμη και στην ορατή περιοχή. Η πλησιέστερη προσέγγιση ενός μέλανος σώματος είναι μια ισοθερμοκρασιακή κοιλότητα. Ένα μέλαν σώμα εκπέμπει ακτινοβολία, που αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του, και φυσικά ένα μέρος της μπορεί να βρίσκεται και στην ορατή περιοχή του φάσματος, όταν η θερμοκρασία του είναι αρκετά υψηλή. Η διάδοση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι ισοτροπική. Η θερμική ακτινοβολία του μέλανος σώματος ακολουθεί ορισμένους νόμους.

Ο νόμος του Planck είναι από τους πιο σημαντικούς. Περιγράφει την κατανομή της εκπεμπόμενης ενέργειας συναρτήσει του μήκους κύματος για μια θερμοκρασία. Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα σταθερής κλίσης είναι :

$$E = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

Πριν το νόμο του Planck δύο σχέσεις αναπτύχθηκαν για συγκεκριμένα όμως μήκη κύματος.

Ο πρώτος νόμος του Wien ισχύει για μικρά μήκη κύματος και περιγράφεται από την εξίσωση:

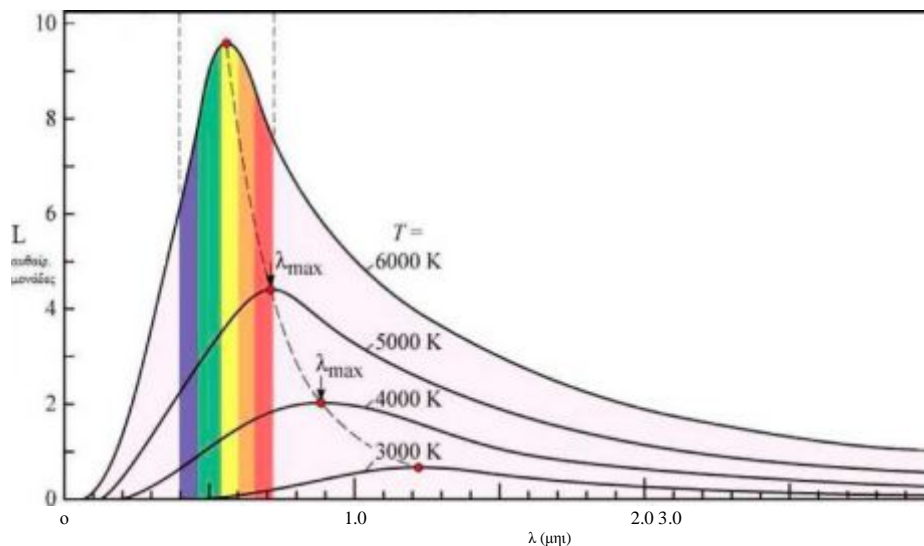


$$E = c_1 \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)$$

Για μεγάλα μήκη κύματος ο νόμος των Rayleigh-Jeans επιβεβαιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα. Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι η:

$$E = \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{T}{\lambda^4}$$

Η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι για μεγάλα μήκη κύματος υπάρχει γραμμική εξάρτηση ανάμεσα στην εκπεμπόμενη ενέργεια και στην θερμοκρασία.



**Διάγραμμα 2.1.** Η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα συναρτήσει του μήκους κύματος για διάφορες θερμοκρασίες.

Ο νόμος μετατόπισης του Wien συνδέει την θερμοκρασία του σώματος με το μήκος κύματος  $\lambda_{max}$ , στο οποίο το μέλαν σώμα εκπέμπει το περισσότερο ποσοστό της ακτινοβολουμένης ισχύος. Μάλιστα τα δύο αυτά μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα και το γινόμενο τους είναι μια σταθερά ίση με  $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . Ο νόμος του Wien λοιπόν είναι:

$$\lambda_{max} T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Με βάση αυτό το νόμο, όταν το μέλαν σώμα βρίσκεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, το  $\lambda_{max}$  είναι μεγάλο. Άρα θα βρίσκεται στην υπέρυθη (μη ορατή) περιοχή του φάσματος. Όταν η θερμοκρασία αυξηθεί, τότε το  $\lambda_{max}$  θα μετατοπισθεί προς χαμηλότερες τιμές π.χ. του ερυθρού χρώματος. Κι αν αυξηθεί ακόμη περισσότερο η θερμοκρασία, τότε το  $\lambda_{max}$  θα

μετατοπισθεί στην περιοχή του ιώδους. Με την βοήθεια του νόμου βρήκαμε την θερμοκρασία της επιφάνειάς του ήλιου, περίπου  $6000\text{ K}$ .

Οι Stefan - Boltzmann, διαπίστωσαν ότι η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής  $q$  που είναι το πηλίκο της συνολικής ακτινοβολούμενης ισχύος ενός μέλανος σώματος προς το εμβαδόν της επιφάνειάς του  $S$ , είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος:

$$q = \sigma T^4$$

όπου  $\sigma$  είναι μία θεμελιώδης φυσική σταθερά, γνωστή ως σταθερά των Stefan- Boltzmann. Η σταθερά Stefan-Boltzmann ισούται με  $5.67 \cdot 10^{-8}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ . Ο νόμος αυτός προέκυψε από πειράματα τόσο του Stefan όσο και του Boltzmann, που δούλευαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο.

### 2.3.2 Πραγματικά σώματα

Τα πραγματικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα από την στιγμή που η απορροφούμενη ακτινοβολία ( $\Phi_a$ ) είναι μόνο ένα κομμάτι της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $\Phi_i$ ). Ένα άλλο κομμάτι ροής ανακλάται ( $\Phi_r$ ) και ένα τελευταίο διαπερνά την επιφάνεια και μεταδίδεται στον χώρο ( $\Phi_t$ ). Ισχύει:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

Γενικότερα, τα κομμάτια αυτά εξαρτώνται από το μήκος κύματος, την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία και την ποιότητα της επιφάνειας. Η ανακλώμενη επιφάνεια δεν επηρεάζει το σώμα ενώ η απορροφημένη αυξάνει την εσωτερική θερμική ενέργεια και συνεπώς την θερμοκρασία του σώματος. Έτσι συμπληρώνεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η ενέργεια που προσπίπτει είναι ίση με την ενέργεια που ανακλάται, απορροφάται και διαπερνά το σώμα.

Κάποια σώματα έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Στα αδιαφανή υλικά, η μεταδιδόμενη ενέργεια ισούται με μηδέν. Η ανάκλαση και η απορρόφηση είναι επιφανειακά φαινόμενα. Στους τέλειους καθρέφτες όλη η ενέργεια ανακλάται ενώ στα μέλανα σώματα απορροφάται.

Η απορρόφηση εξαρτάται από δύο παράγοντες, το χρώμα και την τραχύτητα της επιφάνειας. Όσο πιο μαύρο είναι το χρώμα της επιφάνειας τόσο καλύτερα απορροφά την ακτινοβολία. Γι' αυτό και είναι συνήθης τακτική να βάφεται με μαύρο χρώμα μια επιφάνεια ώστε να δεσμεύει μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας. Ακόμα, μια ματ ή τραχεία επιφάνεια απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από μια γυαλιστερή επιφάνεια, ανεξάρτητα από το χρώμα τους.

Στην περίπτωση της πραγματικής επιφάνειας, η εκπομπή μέλανος σώματος που αναφέρθηκε νωρίτερα πρέπει να διορθωθεί. Εισάγεται ο παράγοντας του συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ). Ο συντελεστής εκπομπής είναι μια ιδιότητα της επιφάνειας που αναφέρεται στην ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας. Είναι στην πράξη, ο λόγος της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια ακτινοβολίας, προς την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στις ίδιες συνθήκες. Ο συντελεστής εκπομπής παίρνει τιμές από  $0$  μέχρι  $1$  και γενικά δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτή η εξάρτηση οδήγησε στον συντελεστή εκπομπής φάσματος- διεύθυνσης. Για σώμα με θερμοκρασία επιφάνειας  $T$  που εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$  με κατεύθυνση  $(\theta, \varphi)$  ισούται με:

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi) = \frac{L(\lambda, T, \theta, \phi)}{L_b(\lambda, T)}$$

με τον παρονομαστή να αφορά το μέλαν σώμα γι' αυτό και χρησιμοποιείται ο δείκτης  $b$ .

Για τα μέταλλα ο συντελεστής αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ παραμένει σταθερός στην αύξηση της τιμής της γωνίας ( $\theta$ ), μέχρι ενός σημείου. Αντίθετα για τα μη-μέταλλα ο συντελεστής εκπομπής αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της συγκεκριμένης γωνίας.

Στην πράξη δεν είναι απαραίτητη πάντα η ενασχόληση με όλους αυτούς τους παράγοντες. Υπάρχουν σώματα που είναι ειδικές περιπτώσεις π.χ. τα σώματα που ο συντελεστής εκπομπής τους δεν επηρεάζεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ονομάζονται γκριζα σώματα. Η αμφιβολία σχετικά με την ακριβή τιμή του συντελεστή εκπομπής αποτελεί σημείο έντονου ενδιαφέροντος στην υπέρυθη θερμογραφία. Η τελευταία βασίζεται στην μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτεί γνώση του συντελεστή εκπομπής και το αντίστροφο.

## 2.4 Μετάδοση Θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας και η διατύπωση των μαθηματικών σχέσεων οι οποίες την περιγράφουν αποτελούν έναν ξεχωριστό κλάδο στις τεχνολογικές επιστήμες. Με τον όρο μετάδοση θερμότητας εννοούμε την ενέργεια που μεταφέρεται λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Τα σημαντικότερα αντικείμενα της μετάδοσης θερμότητας αφορούν στους μηχανισμούς με τους οποίους μεταφέρεται η θερμότητα και τους ρυθμούς με τους οποίους πραγματοποιείται η μεταφορά αυτή. Συμπληρώνει δηλαδή τη θερμοδυναμική η οποία, όπως είναι γνωστό, ασχολείται με τις οριακές καταστάσεις των διαδικασιών κατά τις οποίες έχουμε αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το περιβάλλον. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή πραγματοποιείται η μεταφορά ενέργειας, χωρίς όμως να μας δίνεται καμία επιπλέον πληροφορία τόσο για τον τρόπο της αλληλεπίδρασης όσο και για τους ρυθμούς μεταφοράς της ενέργειας. Το κενό αυτό της θερμοδυναμικής συμπληρώνει η μετάδοση θερμότητας. Η μετάδοση θερμότητας, λοιπόν, είναι η επιστήμη η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας σ' ένα σώμα σε συνάρτηση των συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου, και τον υπολογισμό της ροής θερμότητας. Οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταδίδεται η θερμότητα είναι τρεις:

1. Μετάδοση με αγωγή. Είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται σ' ένα στερεό ή σε ακίνητο ρευστό, όταν στο μέσο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση.
2. Μετάδοση με συναγωγή. Είναι η μετάδοση θερμότητας που πραγματοποιείται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού σε επαφή με την επιφάνεια, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία.
3. Μετάδοση με ακτινοβολία. Είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η περιγραφή του έγινε στην προηγούμενη παράγραφο.

Για ευκολία, οι βασικοί νόμοι που διέπουν τους παραπάνω μηχανισμούς αντιστοιχούνται με τους βασικούς νόμους της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, πολλές φορές τα προβλήματα μετάδοσης θερμότητας αντιστοιχίζονται με ηλεκτρικά κυκλώματα για ευκολότερη κατανόηση και επίλυση. Οι αντιστοιχίσεις, χρησιμοποιούνται τόσο σε μονοδιάστατα όσο και σε πολυδιάστατα προβλήματα, με χρονικά σταθερά ή και μεταβαλλόμενα μεγέθη. Βασίζονται στην παρακάτω ομοιότητα:

Μετάδοση θερμότητας – Ηλεκτρική ενέργεια

$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \Leftrightarrow i = \frac{\Delta V}{R}$$

Το δεύτερο μέλος της παραπάνω αντιστοιχίσης αποτελεί τον γνωστό νόμο του Ohm. Τα θερμικά προβλήματα, λοιπόν, μπορούν να μετατραπούν στο ηλεκτρικό τους ανάλογο και να λυθούν με πιο πρακτικούς τρόπους.

Επειδή η γνώση των τριών μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας είναι απαραίτητη στο χώρο της θερμογραφίας θα χρειαστεί να αναλυθούν παρακάτω ένας προς ένας. Βέβαια, καθώς η μετάδοση θερμότητας αποτελεί από μόνη της μια επιστήμη, η μελέτη της δεν είναι εύκολη και συνεπώς θα περιοριστεί στα ζητήματα που είναι σημαντικά για την θερμογραφία, σαν μια μη καταστρεπτική τεχνική.

#### 2.4.1 Αγωγή

Στην αγωγή έχουμε μεταφορά ενέργειας από σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας σε σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας ενός υλικού, λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων. Όταν δύο σώματα, ή σωματίδια, με διαφορετικές θερμοκρασίες έλθουν σε άμεση επαφή, πραγματοποιείται μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Η θερμοκρασία είναι μέτρο της κινητικής ενέργειας της τυχαίας κίνησης των μορίων ενός σώματος. Αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει αύξηση της κινητικής ενέργειας. Τα μόρια περιοχής μεγάλης θερμοκρασίας συγκρούονται με τα γειτονικά τους, μικρότερης θερμοκρασίας και μεταφέρουν σε αυτά ένα μέρος της κινητικής τους ενέργειας. Ο μηχανισμός αυτός μετάδοσης ενέργειας ονομάζεται αγωγή θερμότητας. Αποτελεί το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας στα στερεά σώματα. Στα μέταλλα συμβάλλουν στην αγωγή θερμότητας και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Μαθηματικά η μετάδοση θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από τον εμπειρικό νόμο του Fourier σύμφωνα με τον οποίο, η πυκνότητα θερμοροής που οφείλεται στην αγωγή θερμότητας είναι ανάλογη και αντιθέτου πρόσημου προς την κλίση της θερμοκρασίας. Αν  $k$  ο συντελεστής αναλογίας, τότε για μονοδιάστατο πρόβλημα:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $k$  ονομάζεται και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και είναι σημαντική θερμική ιδιότητα που επηρεάζει την μετάδοση θερμότητας. Αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μετάδοσης σε ένα αγωγίμο σώμα, ανά μονάδα επιφάνειας, για θερμοκρασιακή διαφορά  $1^\circ C$ . Καλοί θερμικοί μονωτές έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μικρότερο από  $1 W \cdot m \cdot K^{-1}$ , την ίδια ώρα που υλικά με συντελεστή μεγαλύτερο του  $100 W \cdot m \cdot K^{-1}$ ,

θεωρούνται καλοί αγωγοί της θερμότητας. Είναι ενδιαφέρον ότι οι καλοί αγωγοί της θερμότητας είναι μέταλλα που χαρακτηρίζονται και από καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η τιμή του  $k$  δίνει σε διάφορα υλικά ξεχωριστές χρήσεις όπως μεταλλικά σκεύη για την μαγειρική και υαλοβάμβακας για την θερμική μόνωση των τοίχων.

Για δεδομένο υλικό, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από την θερμοκρασία. Σε υπολογιστικά προβλήματα, ο συντελεστής παίζει σημαντικό ρόλο. Για να διευκολύνουμε την κατάσταση, όταν η μεταβολές τις θερμοκρασίας δεν είναι μεγάλες, τον θεωρούμε σταθερό. Στην περίπτωση μεγάλων θερμοκρασιακών αλλαγών, αυτό θα οδηγούσε σε λάθος αποτελέσματα. Συνεπώς, επιβάλλεται να λάβουμε υπόψη την εξάρτηση του συντελεστή  $k$  με την θερμοκρασία  $T$ . Τις περισσότερες φορές ο  $k$  έχει γραμμική εξάρτηση και ισούται με:

$$k = k_0(1 + \beta_T T)$$

όπου το  $\beta_T$  είναι μια σταθερά που υπολογίζεται πειραματικά.

Ένα επίσης σημαντικό μέγεθος είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης. Αποτελεί φυσική ιδιότητα του υλικού με διαστάσεις  $m^2 \cdot sec^{-1}$  και ισούται με:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

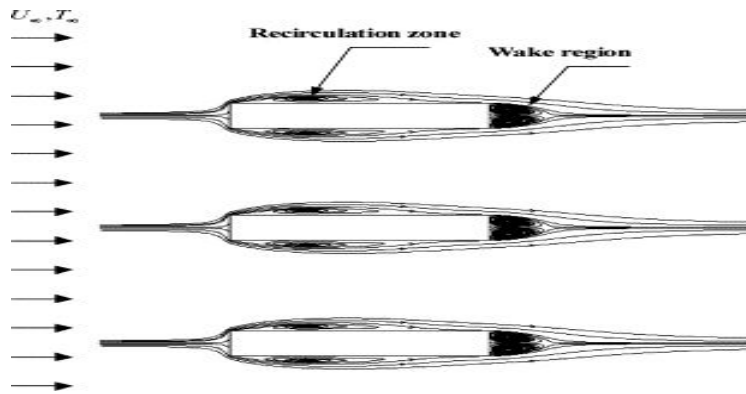
Ο συντελεστής θερμικής διάχυσης είναι ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να άγει θερμική ενέργεια σε σχέση με την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Όπως φαίνεται από την εξίσωση, ο  $\alpha$  είναι μεγάλος όταν είναι μεγάλο το  $k$  που εκφράζει την ικανότητα του υλικού για αγωγή θερμικής ενέργειας ή και όταν είναι μικρή η ειδική θερμοχωρητικότητα  $\rho \cdot c_p$  του υλικού που εκφράζει την ικανότητα του υλικού για αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

#### 2.4.2 Συναγωγή

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι σύνθεση δύο μηχανισμών. Εκτός από τη μεταφορά ενέργειας με αγωγή μεταξύ των μορίων έχουμε και μεταφορά ενέργειας λόγω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού. Ας θεωρήσουμε ένα τυπικό πρόβλημα ψύξης με συναγωγή. Ψυχρό αέριο θερμοκρασίας  $T_l$  ρέει γύρω από θερμό σώμα θερμοκρασίας  $T_s$ . Το ρευστό που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του σώματος σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα (στο οποίο η ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια μέχρι τη μέση ταχύτητα του ρευστού), το οποίο ονομάζεται οριακό στρώμα. Θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή στο οριακό αυτό στρώμα και στη συνέχεια έχουμε, λόγω της κίνησης του ρευστού μεταφορά μάζας - ενέργειας από το λεπτό οριακό στρώμα στην υπόλοιπη μάζα του ρευστού όπου η ενέργεια διαχέεται με το μηχανισμό της αγωγής. Ανάλογα με τη ροή του ρευστού, η συναγωγή διακρίνεται σε :

1. Εξαναγκασμένη συναγωγή, αν η ροή προκαλείται από εξωτερικά μέσα (π.χ. ανεμιστήρες, αντλίες, κλπ).

2. Ελεύθερη (ή φυσική) συναγωγή, όταν η ροή προκαλείται από τις δυνάμεις άνωσης που οφείλονται στις διαφορές πυκνότητας λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών στο ρευστό.
3. Συνδυασμένη συναγωγή, όταν συνυπάρχουν και οι δύο προηγούμενες μορφές. Αυτό συμβαίνει όταν η ταχύτητα του ρευστού, λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, είναι μικρή, ενώ οι δυνάμεις της άνωσης είναι μεγάλες.



**Σχήμα 2.3.** Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή γύρω από σώμα θερμοκρασίας  $T_s$ .

Ανεξάρτητα από τον τύπο της συναγωγής, αυτή περιγράφεται μαθηματικά από το νόμο ψύξης του Newton.

$$q = h (T_2 - T_1)$$

Η πυκνότητα θερμορροής  $q$  είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασιών επιφάνειας  $T_s$  και ρευστού  $T_1$ . Ο συντελεστής αναλογίας  $h$  ονομάζεται συντελεστής συναγωγής και έχει διαστάσεις  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ . Ο συντελεστής αυτός εμπεριέχει όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την συναγωγή και ο καθορισμός του αποτελεί συχνό πρόβλημα. Το πρόβλημα δεν είναι εύκολο καθώς ο συντελεστής εκτός από την εξάρτηση από διάφορες ιδιότητες του ρευστού όπως πυκνότητα, ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα, εξαρτάται και από τη γεωμετρία της επιφάνειας και τις συνθήκες της ροής.

### 2.4.3 Ακτινοβολία

Ήδη από την παράγραφο 2.3 έχει παρουσιαστεί ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Ανακεφαλαιώνοντας, όλα τα σώματα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του απολύτου μηδενός ( $0\text{ K}$ ) εκπέμπουν ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας. Η ενέργεια που ακτινοβολείται μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σύμφωνα με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή από φωτόνια (φορείς μεταφοράς ενέργειας) σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Συνήθως για την εξήγηση των φαινομένων της ακτινοβολίας ακολουθείται η ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Η ένταση της ροής ενέργειας που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και τη φύση της

επιφάνειάς του. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή όπου για τη μεταφορά της ενέργειας απαιτείται η ύπαρξη μέσου, στην ακτινοβολία κάτι τέτοιο δεν απαιτείται.

Στο κενό μάλιστα η ακτινοβολία μεταφέρεται πιο αποτελεσματικά. Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής εκπέμπεται από ιδεατό σώμα που ονομάζεται μέλαν και δίνεται από το νόμο των Stefan-Boltzmann:

$$q = \sigma T_s^4$$

όπου  $T_s$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και  $\sigma$  είναι η σταθερά των Stefan-Boltzmann.

Η θερμορροή που εκπέμπεται από πραγματικό σώμα δίνεται από τη σχέση:

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4$$

όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής του σώματος, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3.

#### 2.4.4 Εκπεμπικότητα (Emissivity)

Πολύ λίγα σώματα προσεγγίζουν το ιδεατό μέλαν σώμα. Συνήθως τα πραγματικά σώματα εκπέμπουν πολύ λιγότερη ακτινοβολία. Η παράμετρος που συσχετίζει την ακτινοβολία ενός πραγματικού σώματος με αυτή του μέλανος είναι η εκπεμπικότητα ( $\varepsilon$ ) και ισχύει  $0 < \varepsilon < 1$ . Για το ιδεατό μέλαν σώμα  $\varepsilon = 1$ .

Ουσιαστικά η εκπεμπικότητα συγκρίνει τη θερμική ακτινοβολία του μέλανος σώματος για μία δεδομένη θερμοκρασία με τη θερμική ακτινοβολία ενός γκρι σώματος στην ίδια θερμοκρασία. Με τον όρο γκρι σώμα εννοούμε το σώμα που έχει το ίδιο  $\varepsilon$  για όλα τα μήκη κύματος κι εκπέμπει λιγότερη ακτινοβολία από το μέλαν σώμα (δηλαδή  $\varepsilon < 1$ ). Τα αντικείμενα των οποίων το  $\varepsilon$  εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία αλλά και το μήκος κύματος ονομάζονται επιλεκτικά ή όχι γκρι σώματα (πχ. μέταλλα).

Ο υπέρυθρος ανιχνευτής της θερμικής κάμερας ή αντίστοιχα όποιου άλλου οργάνου τέτοιας τεχνολογίας, δέχεται την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια του σώματος μαζί με ένα ποσοστό ακτινοβολίας από το περιβάλλον, δημιουργώντας έτσι κάποια αλλοίωση στη ζητούμενη μέτρηση. Η σχέση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των πραγματικών σωμάτων είναι :

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

όπου  $\varepsilon$  η εκπεμπικότητα,  $\rho$  ο συντελεστής ανάκλασης και  $\tau$  ο συντελεστής διάδοσης του σώματος που εξετάζεται. Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του ενός 1mm. Θεωρούνται λοιπόν αδιαφανή σώματα έτσι έχουμε :

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Η παραπάνω σχέση θεωρείται πολύ σημαντική καθώς από αυτή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η υψηλή εκπεμπικότητα σημαίνει χαμηλή ανάκλαση κι αντίστροφα.

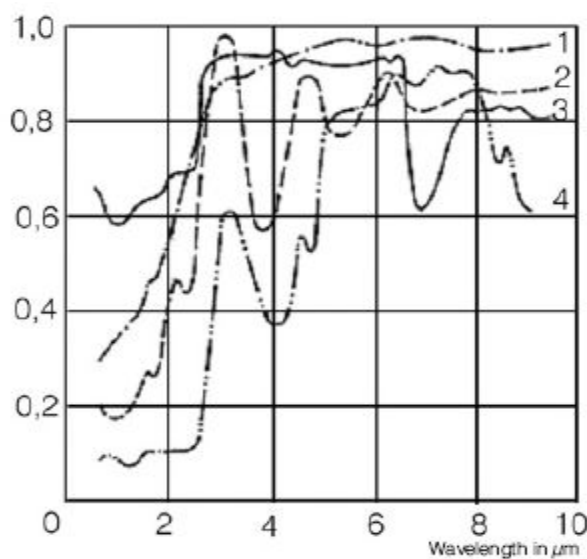
Για ακριβείς μετρήσεις στη θερμογραφία είναι απαραίτητο η εκπεμπικότητα να λαμβάνει μεγάλες τιμές. Οι σύγχρονες θερμικές κάμερες έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν την εκπεμπικότητα χρησιμοποιώντας κάποια αρχική τιμή που εισάγει ο χρήστης. Μελέτες έχουν δείξει ότι για  $\varepsilon < 0,5$  οι λαμβανόμενες μετρήσεις θεωρούνται αρκετά ανακριβείς.

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μία τιμή εκπεμπικότητας, που μπορούμε να βρούμε με τη βοήθεια κατάλληλων πινάκων. Ένας τέτοιος πίνακας παρατίθεται στο παράρτημα Α.

Γενικά η παράμετρος εκπεμπικότητα είναι αρκετά ασταθής. Εκτός από το είδος του υλικού εξαρτάται και από τα παρακάτω:

- την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται, δηλαδή το σχήμα και γενικότερα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του
- Τη θερμοκρασία του αντικειμένου
- Τη γωνία παρατήρησης του αντικειμένου
- Το μήκος κύματος, που σημαίνει ότι δύο διαφορετικές θερμικές κάμερες να δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για το ίδιο αντικείμενο και να θεωρούνται και τα δύο αληθή. Συστήνεται λοιπόν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για τον όσος πιο ακριβή προσδιορισμό της εκπεμπικότητας.
- Το πάχος του αντικειμένου, όταν αυτό είναι αδιαφανές

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η εκπεμπικότητα διαφόρων υλικών σε συνάρτηση με το μήκος κύματος:



**Διάγραμμα 2.2.** Εκπεμπικότητα διαφόρων υλικών: 1.Αδμαντίνη 2.Γύψος 3.Τσιμέντο 4.Αργίλος



## 2.5 Θερμογραφία

Η θερμογραφία ή υπέρυθη φωτογράφιση, ανιχνεύει την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και προκύπτει οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η εκπεμπόμενη επιφανειακή ακτινοβολία. Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται μικρότερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των  $10\mu m$  (στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις, τις θερμοκάμερες, οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν την υπέρυθη ακτινοβολία που μετράται σε μια θερμογράφιση είναι η ικανότητα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας (εκφράζεται από τον συντελεστή εκπομπής και συγκρίνεται με εκείνη του μέλανος σώματος), η επιφανειακή θερμοκρασία, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα, το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η υπέρυθη φωτογράφιση βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Από την ιατρική μέχρι τον στρατό και από τον χώρο των κατασκευών μέχρι την ηλεκτρονική. Είναι λοιπόν χρήσιμο να εξεταστεί λεπτομερώς ξεκινώντας από την θερμοκάμερα.

### 2.5.1 Θερμοκάμερα

Η θερμοκάμερα είναι μια ανιχνευτική διάταξη η οποία μετράει την ακτινοβολία που προσπίπτει στον φακό και με κατάλληλες βαθμονομήσεις την "μεταφράζει" σε θερμοκρασία. Πρακτικά, παρουσιάζει την επιφανειακή θερμοκρασία των σωμάτων στα οποία εστιάζει. Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται μία κοινή θερμογραφική κάμερα.



Εικόνα 2.2. Θερμογραφική κάμερα.

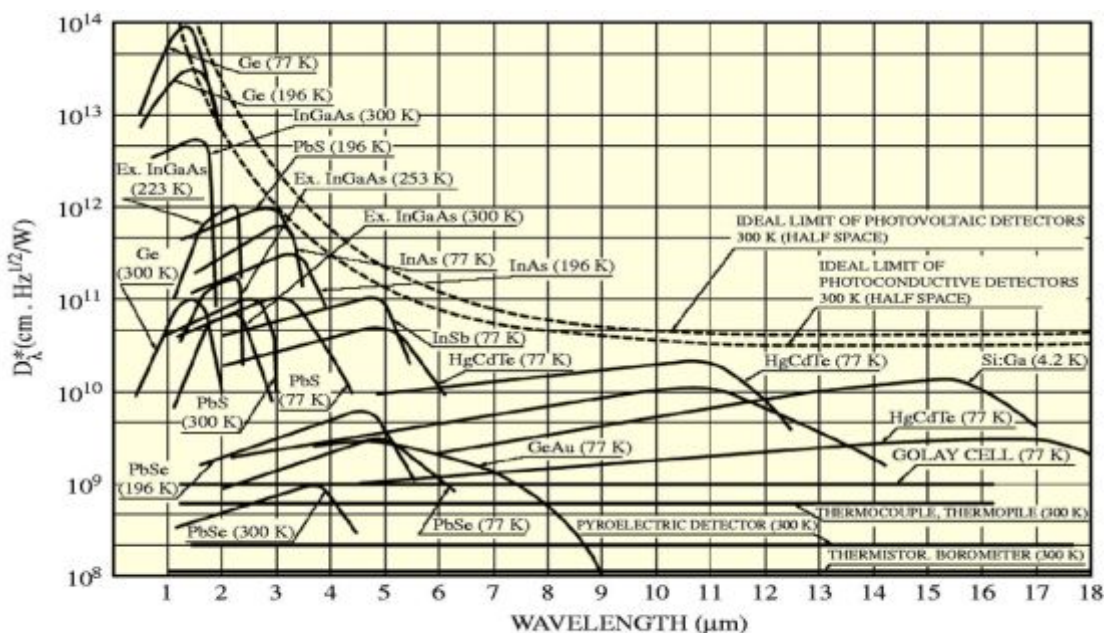
Σημαντικό στοιχείο μιας θερμοκάμερας είναι ο ανιχνευτής θερμότητας. Συχνά αναφέρεται και ως οπτικός δέκτης. Αποτελεί την καρδιά κάθε συστήματος που μετρά την υπέρυθη ακτινοβολία και συνεπώς χρησιμοποιείται σε κάθε θερμογραφική εργασία. Η αγορά των ανιχνευτών ακτινοβολίας υπολογίζεται ότι πλησιάζει τα 10 δισεκατομμύρια δολάρια (μέτρηση 1999) και αυξάνει κατά 30% κάθε χρόνο. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους, επιγραμματικά, είναι η εσωτερική αντίσταση του δέκτη, ο χρόνος απόκρισης του, ο λόγος ισχύος-θορύβου, ο λόγος θερμοκρασιακής διαφοράς-θορύβου, η παρατηρησιμότητα, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη θερμοκρασιακή διαφορά (γνωστή και ως ευαισθησία), η συνάρτηση γραμμικής εξάπλωσης και η υποβάθμιση του σήματος.

Οι ανιχνευτές θερμότητας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους θερμικούς και τους φωτονικούς.

Στους θερμικούς ανιχνευτές, η προσπίπτουσα ακτινοβολία θερμαίνει την ευαίσθητη επιφάνεια και η θέρμανση επηρεάζει κάποια ιδιότητα του υλικού όπως η θερμική αγωγιμότητα. Αυτό το γεγονός μεταφράζεται σαν μια διακύμανση στο σήμα εξόδου. Σημαντικό χαρακτηριστικό των θερμικών δεκτών είναι η ανεξαρτησία από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Γι' αυτό και όταν κάποιο συγκεκριμένο μήκος

κύματος είναι το επιθυμητό, είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί κάποιο φίλτρο που θα απορρίπτει τις ακτινοβολίες με διαφορετικά, από το επιθυμητό, μήκη κύματος. Παραδείγματα θερμικών ανιχνευτών είναι τα βολόμετρα, οι θερμοσωροί, οι πυροηλεκτρικοί δέκτες και οι υγροί κρύσταλλοι.

Στους φωτονικούς ανιχνευτές, το σήμα λαμβάνεται από την απευθείας μέτρηση της διέγερσης που προκαλείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Με την σειρά τους, οι φωτονικοί ανιχνευτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους φωτοεκπεμπόμενους και τους κβαντικούς.



Source: Courtesy of Hamamatsu

**Διάγραμμα 2.3.** Καμπύλες του φάσματος παρατηρησιμότητας για διάφορους ανιχνευτές, Η παρατηρησιμότητα πρέπει να είναι υψηλή ώστε να έχουμε ένα αξιόλογο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

Από την μέχρι τώρα εξέταση των ανιχνευτών ακτινοβολίας προκύπτει ότι στην έξοδο τους καταλήγει ένα σήμα εξαρτώμενο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον φακό. Από το συγκεκριμένο σήμα τελικά θα προκύψει μια οπτική αναπαράσταση. Παράγεται, λοιπόν, μια σειρά σημείων (είναι ευρέως γνωστά και ως pixels) είτε σε μία, είτε σε δύο διαστάσεις. Παρόλη την ύπαρξη ειδικών φίλμ για απεικόνιση των υπέρυθρων εικόνων, στην πράξη, τα φίλμ δεν έχουν μεγάλη αξία. Στις μη καταστρεπτικές εφαρμογές προτιμάται η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο.

Υπάρχουν δύο βασικές διαδικασίες για τον σχηματισμό της εικόνας. Ο άμεσος σχηματισμός εικόνας (πχ με πυροηλεκτρικό δέκτη ή με φίλμ) και ο σχηματισμός εικόνας με χρήση ενός δέκτη και ενός ηλεκτρομηχανικού σαρωτή της σκηνής.

Δύο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν, άμεσα, την εικόνα μιας θερμοκάμερας είναι η ευαισθησία και η ανάλυση (θερμοκρασιακή και χωρική).

Η ευαισθησία μετράται σε βαθμούς κελσίου και εκφράζει την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ποσότητα θερμοκρασίας. Θερμοκάμερες με καλή ευαισθησία αναγνωρίζουν θερμοκρασιακές διαφορές ακόμα και  $0.025^{\circ} C$ .

Η θερμοκρασιακή ανάλυση είναι ανάλογη του αριθμού των χρωμάτων σε μια οθόνη υπολογιστή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση τόσο πιο ομαλά θα παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές. Αν ένα σώμα έχει ξαφνικές θερμοκρασιακές μεταβολές αυτές θα οφείλονται στο ίδιο το σώμα και όχι στην κάμερα.

Η χωρική ανάλυση της θερμοκάμερας εξαρτάται από τον αριθμό των pixels της κάμερας. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στη ψηφιακή φωτογραφία. Όπως μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με 4 Mega-pixel βγάζει πιο ακριβείς εικόνες από μια μηχανή με 2 Mega-pixel έτσι και στην περίπτωση της θερμογραφίας, η χωρική ανάλυση αποτελεί μια παράμετρο κλειδί.

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να επισημανθεί είναι το δυναμικό εύρος. Το δυναμικό εύρος εξαρτάται από την ψηφιοποίηση της θερμικής εικόνας. Όσο περισσότερα bits χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της θερμοκρασίας-χρώματος για κάθε pixel τόσο καλύτερη θεωρείται η θερμοκάμερα. Το δυναμικό εύρος αντικατοπτρίζει, λοιπόν, την θερμοκρασιακή λεπτομέρεια που αποθηκεύεται για κάθε pixel. Επανάσταση στην υπέρυθρη τεχνολογία αποτέλεσαν οι συστοιχίες εστιακού επιπέδου (FPA κάμερες).

Όπως αναφέρθηκε και στο ιστορικό σημείωμα, στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στην αρχή της επόμενης δεκαετίας, μια νέα συσκευή απεικόνισης εμφανίστηκε και έφερε την επανάσταση στην επιστημονική κοινότητα. Η χρήση συστοιχιών μεγάλων διαστάσεων απλοποίησε την κατασκευή υπέρυθρων καμερών. Με αυτή την τεχνολογία, το μόνο που χρειάζεται για να κατασκευαστεί μια υπέρυθρη κάμερα, είναι τα οπτικά μέσα, η συστοιχία εστιακού επιπέδου, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και για κάποια ήδη καμερών, ένα σύστημα ψύξης. Όμοια με τα συμβατικά CCD (charge-coupled device) για βίντεο, τα chip της FPA τεχνολογίας, δεν απαιτούν μηχανισμό ηλεκτρομηχανικού σαρωτή για τον σχηματισμό εικόνας. Ακόμα, δεν είναι τόσο εύθραυστα όσο οι πυροηλεκτρικοί σωλήνες ούτε δέχονται ανάλογες επιβαρύνσεις. Η βασική δυσκολία που υπάρχει στην κατασκευή καλής ποιότητας FPA καμερών είναι τα υλικά κατασκευής των αισθητήρων (η ίδια δυσκολία συναντάται σε όλες τις κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας). Η χρήση της σιλικόνης, η οποία είναι κλασσικό υλικό κατασκευής, δεν δίνει αποτελέσματα καθώς είναι ευαίσθητη μόνο στο ορατό φως. Μια λύση είναι το κράμα υδράργυρος-κάδμιο-τελούριο ενώ έχουν αναπτυχθεί και πολλές άλλες. Με την λύση του προβλήματος, μια σειρά τεχνολογιών αναπτύχθηκαν γύρω από την τεχνολογία των FPA καμερών. Μοντέρνες κάμερες έχουν φτάσει να παράγουν εικόνες με αναλύσεις 2048x2048 pixels ενώ είναι στην παραγωγή ακόμα μεγαλύτερες αναλύσεις. Μικρότερες αναλύσεις είναι διαθέσιμες και οικονομικά προσιτές για το ευρύ κοινό.

Στις σύγχρονες θερμικές κάμερες χρησιμοποιούνται ανιχνευτές που βασίζονται στην τεχνολογία των πινάκων εστιακού επιπέδου (focal plane array-FPA). Οι ανιχνευτές FPA

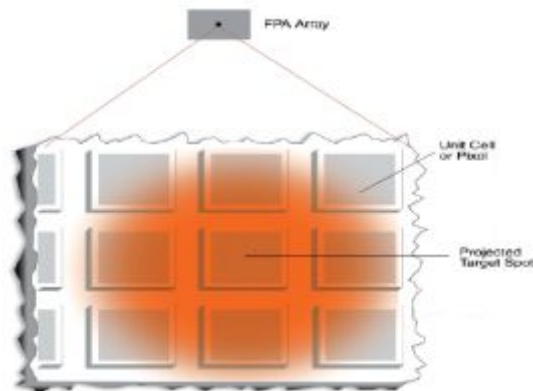
κατασκευάζονται συνδυάζοντας τη σύγχρονη τεχνολογία της φωτολιθογραφίας και της μικρομηχανικής με τις τεχνικές επεξεργασίας πυριτίου. Ουσιαστικά πρόκειται για μία κρυσταλλική μονάδα που περιέχει πολλούς ανιχνευτές.

Οι FPA ανιχνευτές είναι πολύ αποδοτικοί, ενώ οι κάμερες που κατασκευάζονται βάσει αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα κάποια από τα οποία είναι:

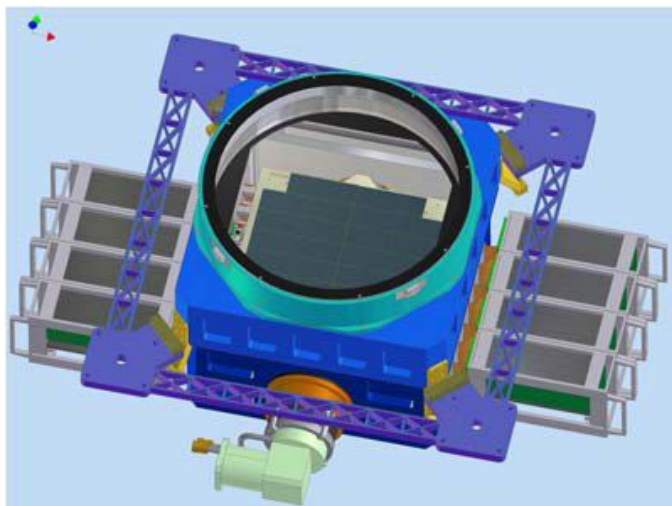
- Η δυνατότητα καταγραφής πολύ υψηλών θερμοκρασιών καθώς η ψύξη των διατάξεων είναι αρκετά εύκολη.
- Η μεγάλη αξιοπιστία λόγω των περιορισμένων κινούμενων διατάξεων που απαιτούνται
- Το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με κάμερες που χρησιμοποιούν άλλη τεχνολογία
- Η καλύτερη ανάλυση εικόνας
- Η μειωμένη επίδραση παράσιτων μεγεθών (πχ. Θερμοκρασία περιβάλλοντος)

Παρόλα αυτά υπάρχει κάποιο όριο στην ακρίβεια των μετρήσεων. Στους σύγχρονους ανιχνευτές FPA είναι απαραίτητο η εικόνα του αντικειμένου να «πέφτει» τουλάχιστον σε μία μονάδα ανιχνευτών (που περιέχονται στο FPA), μεγέθους 3x3 pixels, έτσι ώστε να έχουμε ακρίβεια στις μετρήσεις εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Για να επιτευχθεί αυτό επιλέγονται κατάλληλες οπτικές διατάξεις ώστε να εστιάζεται η εικόνα σε αυτόν τον ελάχιστο αριθμό pixels.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται μία αναπαράσταση FPA ανιχνευτή σε μεγέθυνση όπου απεικονίζεται η προϋπόθεση για εστίαση στα 3x3 pixels και μία διάταξη FPA ανιχνευτή πίσω από το φακό μίας σύγχρονης θερμικής κάμερας.



**Σχήμα 2.4.** Ποιοτική απεικόνιση FPA ανιχνευτή



Σχήμα 2.5. Διάταξη FPA ανιχνευτή σύγχρονης θερμικής κάμερας σε 3D σχεδίαση

### 2.5.2 Θόρυβος

Αποτελεί κανόνα ότι σε κάθε εξεταζόμενο σύστημα συναντάται κάποια μορφή θορύβου. Η μελέτη του θορύβου είναι μια δύσκολη αποστολή και η αναφορά του στην παρούσα παράγραφο αποσκοπεί στην απλούστευση της εικόνας του.

Θόρυβος είναι κάθε ανεπιθύμητο σήμα το οποίο παράγεται σαν υποπροϊόν μιας διαδικασίας και συμβάλλει στην αλλοίωση του εξεταζόμενου σήματος.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον ηλεκτρονικό θόρυβο ο οποίος είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστεί σε κάθε σύστημα θερμικής απεικόνισης ή ανίχνευσης θερμότητας. Πέρα από τον ηλεκτρονικό θόρυβο, ο οπτικός θόρυβος (τυχαίες διακυμάνσεις της προσπίπτουσας ακτινοβολίας), ο θερμικός θόρυβος (ο θόρυβος που παρουσιάζεται στις συσκευές διέγερσης στην ενεργή θερμογραφία) και ο περιβαλλοντικός θόρυβος (ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στον δέκτη) συμβάλουν στην υποβάθμιση της υπό εξέταση ακτινοβολίας. Οι πιο σημαντικές κατηγορίες ηλεκτρονικού θορύβου παρουσιάζονται παρακάτω. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι στην ενεργητική θερμογραφία, η οποία θα αναλυθεί στην παράγραφο 2.5.4, συναντιέται και ο δομικός θόρυβος. Ο δομικός θόρυβος, παράγεται από τις τυχαίες διαφοροποιήσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υπό εξέταση υλικού. Αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα αντιδράσεις μετά την θερμική διέγερση του υλικού. Οι παρεμβολές, εξαιτίας των διαφοροποιήσεων, μπορούν να δώσουν την εντύπωση για ύπαρξη μιας υποεπιφανειακής ανωμαλίας σε σημείο που δεν υπάρχει. Παρακάτω βρίσκονται οι τρεις μορφές ηλεκτρονικού θορύβου.

1. Θόρυβος shot. Δημιουργείται από την άφιξη τυχαίων και διακριτών φωτονίων μαζί με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.
2. Θόρυβος Johnson ή θερμικός θόρυβος. Παράγεται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων σε υλικά με αντίσταση. Ο θερμικός θόρυβος μπορεί να μειωθεί με την ψύξη του δέκτη. Η ψύξη του δέκτη είναι συχνό φαινόμενο για την σωστή λειτουργία του συστήματος.
3. Θόρυβος τρεμοσβήματος ή  $1/f$  θόρυβος. Είναι διαφορετικός από τους δύο παραπάνω θορύβους (ονομάζονται και λευκοί θορύβοι γιατί είναι ανεξάρτητοι με την συχνότητα παρατήρησης) με την έννοια ότι εξαρτάται από την συχνότητα παρατήρησης. Η συχνότητα του θορύβου ισούται με  $1/f^n$  όπου  $f$  είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας και  $n$  είναι συνήθως



μια τιμή ανάμεσα στο 0.9 και στο 1.35. Παράγεται λόγω φορτισμένων σωματιδίων που παγιδεύονται κοντά στην αισθητήρια επιφάνεια του ανιχνευτή.

### 2.5.3 Παθητική θερμογραφία

Αφού παρουσιάστηκαν κάποια στοιχεία, απαραίτητα στην επιστήμη της θερμογραφίας, είναι αναγκαίο να αναλυθούν τώρα και τα δύο είδη της, η παθητική και η ενεργητική θερμογραφία.

Κατά την παθητική μέθοδο καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας. Οι σημαντικές εφαρμογές της παθητικής προσέγγισης είναι στην παραγωγή, προληπτική συντήρηση, ιατρική, πυρανίχνευση δασών, προγράμματα θερμικής αποδοτικότητας κτιρίων, έλεγχος οδικής κυκλοφορίας, γεωργία και βιολογία, ανίχνευση αερίου και μη καταστρεπτικές δοκιμές. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, μη κανονικά θερμοκρασιακά αποτελέσματα δείχνουν ένα πιθανό πρόβλημα που πρέπει να προσεχθεί. Βασικά, η παθητική θερμογραφία είναι περισσότερο ποιοτική προσέγγιση καθώς ο στόχος της είναι απλά να αναδείξει κάποια ανωμαλία και όχι να αποσπάσει περαιτέρω πληροφορίες.



Εικόνα 2.3. Παθητική θερμογράφιση ενός κτηρίου

Η υπέρυθρη κάμερα βρίσκεται σε κάποια απόσταση από τα υπό εξέταση αντικείμενα και αναζητά θερμοκρασιακές ανωμαλίες. Καθώς δεν υπάρχει εξωτερική πηγή θερμότητας, τα εξαρτήματα που χρειάζονται για μια θερμογράφιση είναι:

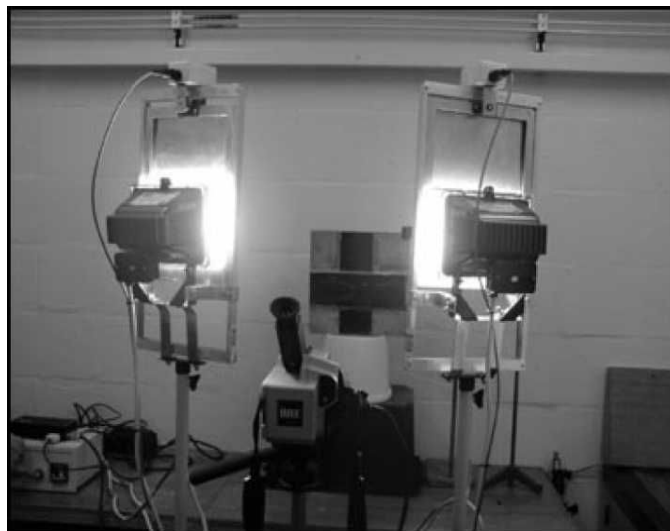
1. Υπέρυθρη κάμερα.
2. Οπτικά εξαρτήματα (τηλεσκόπια, μηχανισμοί εστίασης και ζουμ).
3. Τρίποδας στήριξης.

4. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα και εξοπλισμός ανάλυσης.
5. Συσκευή μαγνητοσκόπησης (σε ορισμένες περιπτώσεις).
6. Ηλεκτρονικός υπολογιστής (αν και η επεξεργασία εικόνας μπορεί να γίνει σε κάποια άλλη στιγμή).
7. Γεννήτρια (σε ορισμένες περιπτώσεις).
8. Σύστημα ψύξης (αν η κάμερα δεν έχει ενσωματωμένο σύστημα και απαιτεί τακτική ψύξη) .

#### **2.5.4 Ενεργητική θερμογραφία**

Σε αντίθεση με την παθητική προσέγγιση, στην ενεργητική προσέγγιση απαιτείται ένα εξωτερικό ερέθισμα για να παράγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας που αλλιώς δε θα εμφανιζόταν. Γνωστά χαρακτηριστικά αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος επιτρέπουν τον ποσοτικό χαρακτηρισμό, όπως για παράδειγμα την ανίχνευση του βάθους μιας ρωγμής. Βασιζόμενοι σε εξωτερικό ερέθισμα έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, όπως Θερμογραφία παλμού (PT), Βηματικής θέρμανσης (SH), Θερμογραφία ασφαλείας (LT), Θερμογραφία ταλαντώσεων (VT). Η ενεργητική προσέγγιση βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές σε μη καταστρεπτικές δοκιμές.

Η θερμογραφία παλμού (PT) αποτελεί μια από τις πιο συχνές μεθόδους διέγερσης που συναντάμε στην ενεργητική θερμογραφία και μαζί με την θερμογραφία ασφαλείας αποτελούν τις πλέον παραδοσιακές μεθόδους. Σ' αυτή την μέθοδο, το υπό εξέταση αντικείμενο θερμαίνεται για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα και στην συνέχεια μελετάται η φθίνουσα θερμοκρασιακή πορεία. Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη: η θερμοκρασία του υλικού αλλάζει απότομα μετά τον αρχικό θερμικό παλμό, λόγω των απωλειών θερμότητας με αγωγή, προς το εσωτερικό του υλικού, αλλά και με ακτινοβολία. Η παρουσία κάποιας υποεπιφανειακής ανωμαλίας επηρεάζει τον ρυθμό απωλειών. Έτσι, καθώς παρατηρούμε την επιφανειακή θερμοκρασία διαφορετική θερμοκρασία φαίνεται στην περιοχή όπου από κάτω της βρίσκεται η ανωμαλία.



**Εικόνα 2.4.** Η ενέργεια που μεταδίδεται από τους προβολείς στο πειραματικό υλικό θα βοηθήσει στην αποκάλυψη τυχόν επιφανειακών ή υποεπιφανειακών ανωμαλιών.

Στην περίπτωση της βηματικής θέρμανσης (SH), η αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας παρατηρείται παράλληλα με την βηματική θέρμανση. Αυτή η μέθοδος έχει αρκετές εφαρμογές όπως η εκτίμηση του πάχους του επιχρίσματος, των δομικών συστατικών, και των δεσμών υποστρωμάτων.

Η θερμογραφία ασφαλείας (LT) βασίζεται σε θερμικά κύματα που παράγονται μέσα στο υλικό και η ανίχνευσή γίνεται εξ αποστάσεως. Η παραγωγή των κυμάτων επιτυγχάνεται με την περιοδική απόθεση θερμότητας στην επιφάνεια του υλικού που εξετάζεται. Την ίδια ώρα καταγράφεται εξ αποστάσεως η υπέρυθη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υλικού. Ο όρος ασφαλεία, αναφέρεται στην ανάγκη εξέτασης της ακριβούς χρονικής εξάρτησης μεταξύ του εξερχομένου σήματος και του εισερχομένου σήματος αναφοράς (θερμικά κύματα). Αυτό επιτυγχάνεται με έναν ενισχυτή, σε σημειακή θέρμανση με laser, ή με υπολογιστή, σε ολική θέρμανση με λάμπα. Με τον τρόπο αυτό, τα διαγράμματα πλάτους και φάσης γίνονται διαθέσιμα. Τα διαγράμματα φάσης σχετίζονται με τον χρόνο διάδοσης της θερμότητας και καθώς η εξάρτησή τους με τοπικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (όπως αυτά που παράγονται από μια ανομοιογενή θέρμανση) είναι αμελητέα, θεωρούνται ενδιαφέροντα για μη καταστροφικές τεχνικές. Το βάθος της υποεπιφανειακής ανωμαλίας είναι αντιστρόφως ανάλογο της διαφοροποιούμενης συχνότητας. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφοροποιούμενη συχνότητα τόσο το βάθος προσεγγίζει την επιφάνεια.

Η θερμογραφία ταλαντώσεων (VT) είναι και αυτή μια ενεργητική προσέγγιση θερμογραφίας όπου εξαιτίας μηχανικών δονήσεων, μεταδίδεται θερμότητα μέσω τριβής σε σημεία όπου έχουν εντοπιστεί ανωμαλίες, όπως ρωγμές και αποστρωματώσεις. Οι δονήσεις εφαρμόζονται εκτός υλικού. Στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογραφίας τα εξαρτήματα που απαιτούνται είναι περίπου τα ίδια με τα εξαρτήματα της παθητικής θερμογραφίας. Απαιτείται, επιπλέον, μια εξωτερική πηγή διέγερσης (πχ. προβολείς), και ισχυρότερα λογισμικά, για επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων. Έχει ήδη αναφερθεί ότι, η παθητική θερμογραφία αποσκοπεί απλά στον εντοπισμό ανωμαλιών. Στην ενεργητική θερμογραφία επιλύονται πολύ πιο σύνθετα προβλήματα. Η ενεργητική θερμογραφία αποτελεί μια άκρως δυναμική διαδικασία και απαιτεί μεθόδους επεξεργασίας των εικόνων που καταγράφονται από την θερμοκάμερα. Στην δυναμική ενεργητική θερμογραφία χρησιμοποιούνται ευρέως μέθοδοι μετασχηματισμού όπως ο μετασχηματισμός Fourier και ο κυματικός



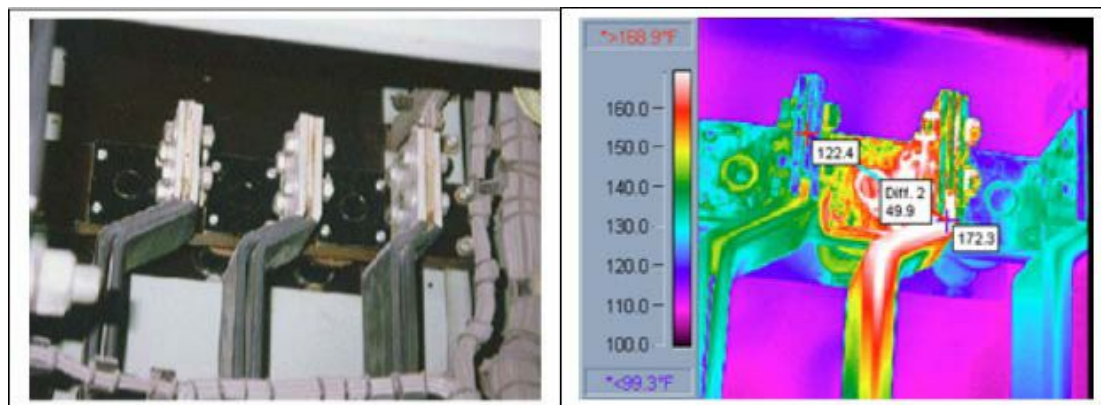
μετασηματισμός. Η επιστημονική κοινότητα δείχνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνων. Με την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων υπάρχει πλέον η δυνατότητα να αποκαλυφθούν, με μεγαλύτερη επιτυχία, τυχόν ανωμαλίες και τα χαρακτηριστικά τους.

## 2.6 Πεδία εφαρμογής της υπέρυθρης θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο και ευπροσάρμοστο εργαλείο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Γενικά μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση όπου το πρόβλημα μπορεί να αποκαλυφθεί με τη βοήθεια της θερμοκρασιακής διαφοράς. Οι κυριότεροι τομείς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι οι ακόλουθοι:

### 1) Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας:

- Επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται στην παραγωγή ενέργειας και συγκεκριμένα στους διεγέρτες, στις διάφορες συνδέσεις και στις μηχανές.
- Έλεγχοι στους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα στους διακόπτες, στους αποζεύκτες, στους μετασηματιστές, στους μονωτήρες και στις συστοιχίες πυκνωτών.
- Έλεγχοι σε όλο το δίκτυο διανομής.

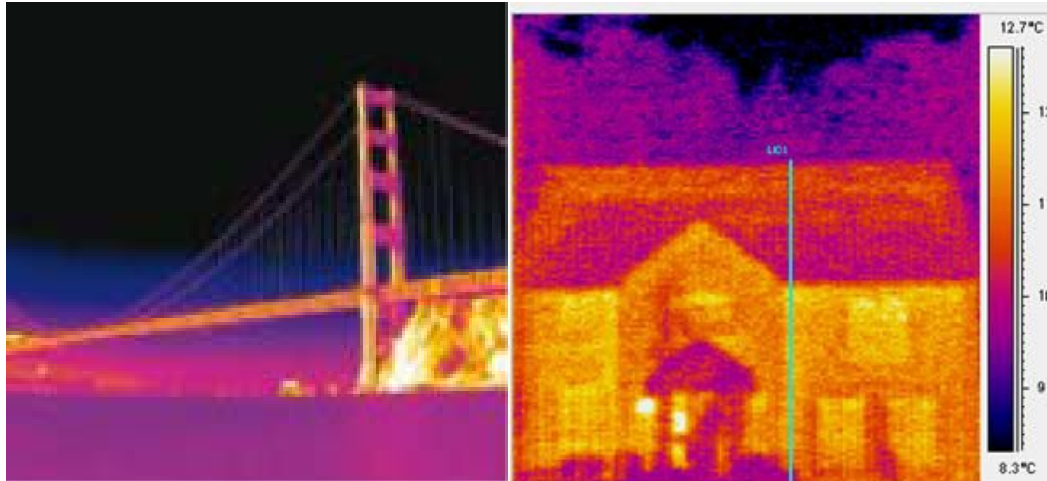


Εικόνα 2.5. Μπάρες ηλεκτρικών συνδέσεων σε συμβατική απεικόνιση και σε θερμογράφημα

### 2) Σε κατασκευές:

- Πραγματοποιούνται επιθεωρήσεις για να καθοριστούν οι θερμικές απώλειες σε κατοικίες, σε εργοστάσια, σε κτίρια που στεγάζουν υπηρεσίες ή γραφεία και σε διυλιστήρια.
- Επιθεωρήσεις για τον εντοπισμό υγρασίας
- Έλεγχοι για να καθοριστεί η ευστάθεια του τσιμέντου
- Έλεγχοι σε θερμαινόμενα πατώματα, ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαρροές και να εξακριβωθεί ο τρόπος που διανέμεται η θερμοκρασία τους.

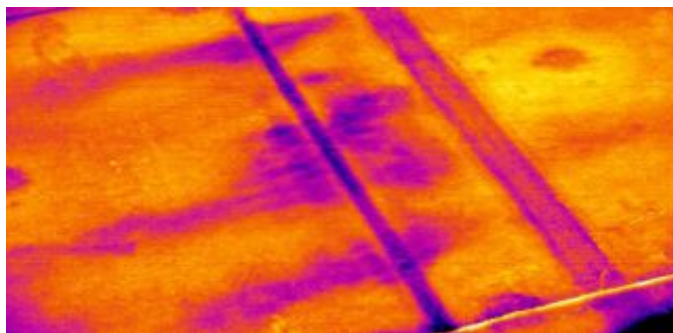
- Έλεγχος των στρωμάτων τσιμέντου σε ισχυρές κατασκευές, όπως γέφυρες.
- Εντοπισμών σημείων ανάπτυξης μούχλας σε κτίρια



**Εικόνα 2.6.** Θερμογράφημα μίας κρεμαστής γέφυρας κι ενός σπιτιού

### 3) Σε συστήματα στέγασης

- Εντοπισμός πιθανών διαρροών στις στέγες των σπιτιών, βιομηχανικών μονάδων και άλλων εγκαταστάσεων.
- Παρέχεται η δυνατότητα άμεσου εντοπισμού κι επιδιόρθωσης των κατεστραμμένων τμημάτων στέγασης από την υγρασία.

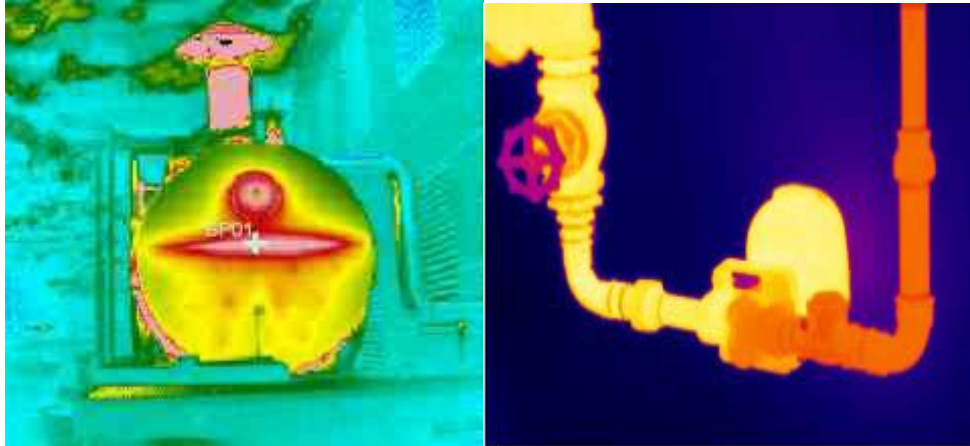


**Εικόνα 2.7.** Θερμογράφημα σκεπής-Διακρίνεται η υγρασία που έχει αναπτυχθεί

### 4) Σε μηχανολογικά συστήματα

- Έλεγχος σε καυστήρες για υπερβολική ανάπτυξη θερμοκρασίας
- Εξέταση της πορείας της καύσης στους καυστήρες και μετρήσεις στην επιφανειακή θερμοκρασία των σωληνώσεων θέρμανσης κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους και όταν είναι σε αναμονή.

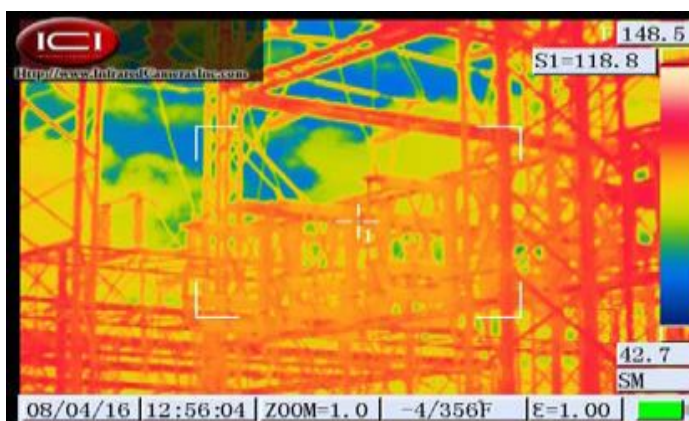
- Ανίχνευση των ζημιών στο εξωτερικό περίβλημα του λέβητα ή εντοπισμός θερμότερων περιοχών που πιθανώς να εξελιχθούν σε βλάβες μελλοντικά.
- Εντοπισμός αερίων σε καπνοδόχους λεβήτων σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.
- Αξιολόγηση του εξοπλισμού στον εξαερισμό και στον κλιματισμό.
- Εντοπισμός διαρροών στις μονώσεις εξοπλισμού ψύξεως.



Εικόνα 2.8. Θερμογραφήματα λέβητα και σωληνώσεων

5) Σε πετροχημικές εφαρμογές

- Έλεγχος για απώλειες των μονώσεων και διαρροές σε διωλιστήρια
- Εκτίμηση της απόδοσης και της ποιότητας των εναλλακτών θερμότητας
- Έλεγχοι στις μονώσεις των κλιβάνων, καθώς και στους σωλήνες τους αλλά και στη διαδικασία καύσης τους

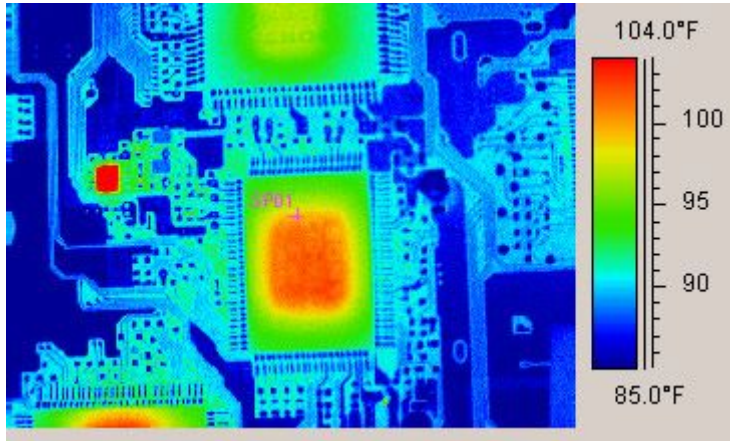


Εικόνα 2.9. Θερμογράφημα σε διωλιστήριο

6) Σε εφαρμογές ηλεκτρονικού εξοπλισμού

- Αξιολόγηση κι εντοπισμός βλαβών σε ολοκληρωμένα κυκλώματα

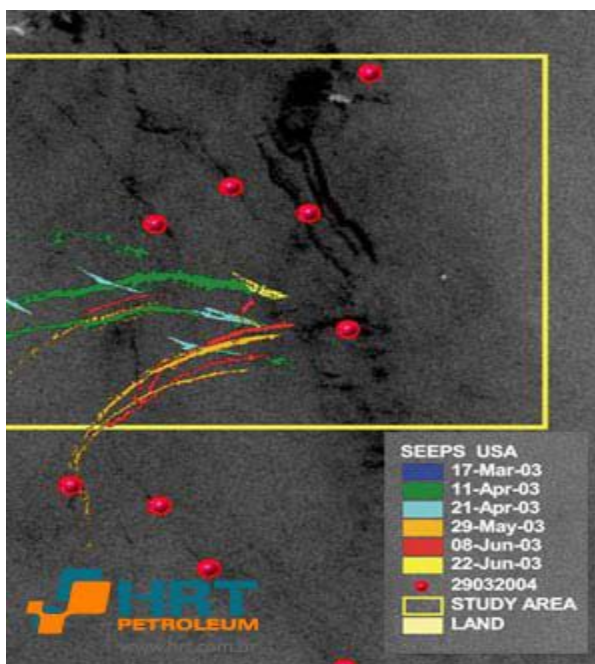
- Δυνατότητα ανάπτυξης θερμικού χάρτη διατάξεων ημιαγωγών
- Έλεγχος υβριδικών μικροκυκλωμάτων
- Έλεγχος συγκολλήσεων από καλάνι



Εικόνα 2.10. Θερμογράφημα ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος

7) Σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

- Εντοπίζονται παλιές περιοχές ταφής αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων
- Δυνατότητα εντοπισμού διαρροών πετρελαίου ή άλλων επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών. Σημειώνεται ότι οι επιθεωρήσεις αυτές πραγματοποιούνται και εναέρια.



Εικόνα 2.11. Εντοπισμός πετρελαιοκηλίδων στη θάλασσα του Μεξικό



## 8) Σε αυτοκινητοβιομηχανίες

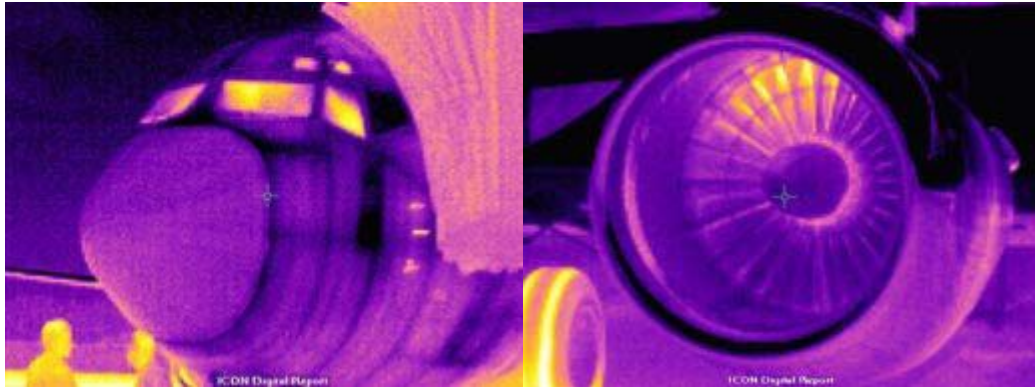
- Έλεγχος στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα λάστιχα και στις αναρτήσεις
- Επιθεώρηση των συστημάτων του κινητήρα και των φρένων, ώστε να γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες, που εξασφαλίζουν μέγιστη απόδοση και σωστή κατανομή θερμότητας



Εικόνα 2.12. Θερμογράφημα κινητήρα και σασί ενός αυτοκινήτου

## 9) Αεροδιαστημικές εφαρμογές

- Διευκολύνεται η ανίχνευση νερού στις επιφάνειες του αεροπλάνου και στο επικάλυμμα του ραντάρ, που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα
- Παρέχεται εύκολος και ακριβής έλεγχος στα ελαστικά, στα φρένα και στα φτερά των αεροσκαφών
- Εντοπισμός ρωγμών και διαβρώσεων στο σώμα του αεροσκάφους
- Έλεγχος της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η μηχανή των αεροπλάνων και των διαστημοπλοίων



**Εικόνα 2.13.** Θερμογραφήματα μπροστινής όψης και τουρμπίνας επιβατικού αεροσκάφους

10) Σε ιατρικές εφαρμογές

- Διάγνωση διαφόρων χτυπημάτων και κάποιων συνδρόμων
- Διάγνωση καρκινικών όγκων αρθρίτιδας κτλ
- Οδοντιατρικές εφαρμογές
- Διαγνώσεις σε αθλητικά ατυχήματα και αξιόπιστη παρακολούθηση της αποκατάστασης
- Έλεγχος ποσότητας ουσιών και laser που χορηγούνται σε ιστούς



**Εικόνα 2.14.** Θερμογράφημα για ιατρικούς σκοπούς

11) Σε διάφορες άλλες εφαρμογές

- Στον εντοπισμό πυρκαγιών χαμηλής έντασης σε δασικές περιοχές
- Σε εφαρμογές τηλεσκοπησης
- Σε εντοπισμό ανθρώπων σε φλεγόμενα κτίρια ώστε να μπορέσουν να διασωθούν
- Στον εντοπισμό χαμένων ανθρώπων (σκανάρισμα περιοχής από ύψος)

- Στην αρχαιολογία για την αποστρωματοποίηση τοιχογραφιών και τον εντοπισμό ευρημάτων.



**Εικόνα 2.15.** Θερμογραφήματα φλεγόμενου δάσους και κτιρίου

## 2.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας

### 2.7.1 Βασικά μειονεκτήματα

- Η επίδραση των θερμικών, εκ μεταφοράς και ακτινοβολίας απωλειών συνήθως προκαλούν ψεύτικες μεταβολές θερμοκρασίας και έχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία της μέτρησης.
- Το υψηλό κόστος του θερμογραφικού εξοπλισμού.
- Η δυνατότητα επιθεώρησης ενός περιορισμένου πάχους υλικού κάτω από την επιφάνεια, άρα μόνο τα επιφανειακά αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα.
- Οι λάθος εκτιμήσεις λόγω απειρίας του προσωπικού, διότι αντί για θερμά σημεία εντοπίζονται ανακλάσεις από τον ήλιο ή χρησιμοποιούνται λανθασμένες γωνίες θερμογράφησης, οπότε τα αποτελέσματα δε δείχνουν σφάλματα ή δείχνουν σφάλματα που δεν υπάρχουν.
- Πολλές φορές υπάρχει πρόβλημα που αφορά την αδυναμία ή και δυσκολία προσδιορισμού του συντελεστή εκπεμπικότητας (emmissivity). Όταν επίσης μελετούνται εξοπλισμοί ή αντικείμενα που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, τα δεδομένα είναι εσφαλμένα όταν τοποθετείται ο ίδιος δείκτης εκπεμπικότητας που αφορά ένα μόνο υλικό.

### 2.7.2 Βασικά πλεονεκτήματα

Οι παραπάνω αρνητικές διαπιστώσεις όσον αφορά την υπέρυθρη θερμογραφία αντισταθμίζονται αν σκεφτεί κανείς τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι:

- Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι τύπου non-contact (άνευ επαφής)

- Παρέχει γρήγορες, αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις, χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας ενός συστήματος ή κάποιας διάταξης
- Μία μεγάλη επιφάνεια μπορεί να εξεταστεί σε ελάχιστο χρονικό διάστημα
- Τα αποτελέσματα μετρήσεις μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε ψηφιακή μορφή
- Παρέχουν κατάλληλα πακέτα λογισμικού για την επεξεργασία και την ανάλυση εικόνας
- Ο χειρισμός του εξοπλισμού της υπέρυθρης θερμοκάμερας είναι αρκετά εύκολος και δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις ή ικανότητες
- Επιφέρει μείωση στο κόστος και το χρόνο συντήρησης εξοπλισμού
- Παρέχει πρόβλεψη στη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι υποψήφιες βλάβες μπορούν να αποφευχθούν, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και χρήμα
- Συνεισφέρει στη γενική εξοικονόμηση ενέργειας, αποτελώντας έτσι τεχνολογία που βοηθά στην προστασία του περιβάλλοντος

#### Θερμογραφία και εξοικονόμηση ενέργειας

- Διεθνής ενεργειακή κατάσταση
- Υπερκατανάλωση ενέργειας - υπερθέρμανση πλανήτη
- Σταδιακή μείωση αποθεμάτων συμβατικών πηγών ενέργειας
- Νομοθεσία
- Πρωτόκολλο Κιότο 1997
- Ευρωπαϊκή οδηγία 2002/91/CE
- Νόμος 3661- 05 του 08 «Μέτρα για τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας»
- Σαν αποτέλεσμα της νομοθεσίας
- Εταιρείες &
- Ιδιώτες ωθούνται στην κατεύθυνση μείωσης κατανάλωσης

### 2.8 Επεξεργασία εικόνας

Η σημασία των εικόνων στην ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού είναι μεγάλη. Ακόμα και από τα αρχαία χρόνια οι εικόνες έπαιζαν σημαντικό ρόλο. Σήμερα, με την τεχνολογία να εξελίσσεται ταχύτητα, είναι λογικό οι εικόνες να γίνονται όλο και πιο χρήσιμες. Εκτός της καλλιτεχνικής τους πλευράς, σημαντική θεωρείται και η χρήση τους στα υπολογιστικά συστήματα όπου ξεπερνά τα όρια της βοήθειας στην ανθρώπινη όραση.

Στα πληροφοριακά συστήματα η εικόνα είναι ο φυσικός μεταφορέας της πληροφορίας. Είναι εύκολο να μετατρέψουμε μια εικόνα σε κατάλληλη μορφή ώστε να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Συνεπώς, η χρήση των εικόνων μας βοηθά και στον κλάδο των αυτοματοποιημένων πληροφοριακών συστημάτων. Ένα απλό παράδειγμα είναι ένας υπέρυθρος ανιχνευτής εφοδιασμένος με έναν αισθητήρα. Ο ανιχνευτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το αυτόματο άνοιγμα μιας πόρτας. Στην έξοδό του θα υπάρχουν δύο καταστάσεις. Η παρουσία θερμότητας θα δίνει εντολή για άνοιγμα της πόρτας (κατάσταση 1) ενώ αντίθετα η απουσία θερμικής πηγής θα διατηρεί την πόρτα κλειστή (κατάσταση 2).

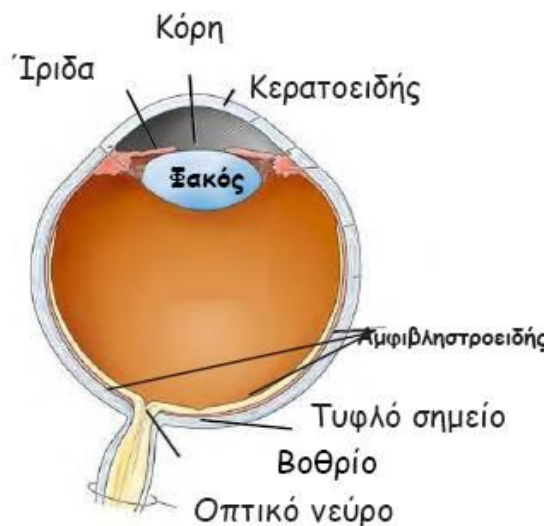


Κατά την ενασχόλησή μας με τις εικόνες, το πιο ενδιαφέρον στοιχείο είναι πάντα κάποιο αντικείμενο, ή συλλογή αντικειμένων, τα οποία υπάρχουν στον τρισδιάστατο χώρο. Στην φωτογραφία, για παράδειγμα, είναι κάποιο πρόσωπο, ή τοπίο, ή κτήριο. Στην διαγνωστική ιατρική ίσως κάποιος ιστός του ανθρώπινου σώματος, ενώ στον ποιοτικό έλεγχο, κάποιο προϊόν. Μαζί με το γύρω περιβάλλον, τα αντικείμενα αυτά σχηματίζουν μια σκηνή.

Ο σχηματισμός μια εικόνας γίνεται μέσω αξιοποίησης της ακτινοβολίας. Στην ανθρώπινη όραση, η ακτινοβολία που μας δίνει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον σχηματισμό μιας εικόνας στον εγκέφαλό μας είναι η ορατή ακτινοβολία. Η υπέρυθη ακτινοβολία, τα μικροκύματα αλλά και οι ακτίνες X και γάμμα είναι επίσης φορείς πληροφοριών.

### 2.8.1 Ανθρώπινη όραση

Για να γίνει κατανοητή η έννοια της ανθρώπινης όρασης πρέπει να παρουσιαστεί η φυσιολογία του ματιού. Στο εμπρός μέρος βρίσκεται το σύστημα συγκέντρωσης και εστίασης των εικόνων (ίριδα, φακός). Το είδωλο της εικόνας σχηματίζεται ανεστραμμένο στο πίσω μέρος του οφθαλμού πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Στο σημείο της εστίασης υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση των φωτοαισθητήρων. Δίπλα ακριβώς ξεκινά το οπτικό νεύρο που μεταφέρει τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις των φωτοαισθητήρων στον εγκέφαλο. Υπάρχουν δύο είδη φωτοαισθητήρων στον αμφιβληστροειδή, τα ραβδία και οι κώνοι. Τα ραβδία είναι περίπου εκατό εκατομμύρια και σχετίζονται με την όραση στο χαμηλό φως (scotopic vision). Οι κώνοι είναι γύρω στα έξι εκατομμύρια και είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τα ραβδία. Σε φωτεινό περιβάλλον το κύριο βάρος της όρασης φέρουν οι κώνοι. Οι κώνοι επίσης είναι υπεύθυνοι για το χρώμα στην όραση.



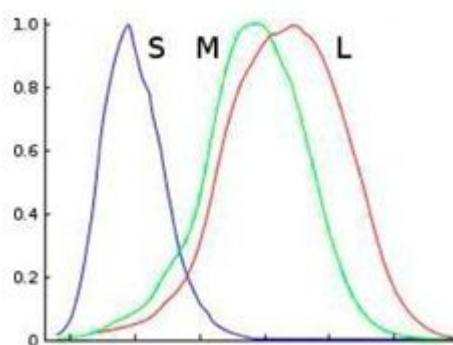
**Εικόνα 2.16.** Το ανθρώπινο μάτι

Το οπτικό σύστημα του ανθρώπου είναι ευαίσθητο στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και σε μήκη κύματος από 350 ως 780nm (ορατό φως). Παρουσιάζει όμως μέγιστη ευαισθησία στο πράσινο φως (γύρω στα 550nm). Επίσης, είναι ικανό να

λειτουργήσει με ελάχιστο φως (ραβδία), αλλά και σε πολύ φωτεινό περιβάλλον (κόννοι). Το ανθρώπινο οπτικό σύστημα παρουσιάζει την ιδιότητα να είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητο στις έγχρωμες από ότι στις ασπρόμαυρες εικόνες. Έτσι, ενώ μπορεί να ξεχωρίσει μόνο μερικές δεκάδες αποχρώσεις του γκριζου στις ασπρόμαυρες εικόνες, έχει τη δυνατότητα να διακρίνει χιλιάδες διαφορετικά χρώματα.

Η αναπαράσταση της χρωματικής πληροφορίας στηρίζεται στην κλασική θεωρία του Thomas Young ότι κάθε χρώμα μπορεί να δημιουργηθεί με την κατάλληλη μίξη τριών χρωμάτων, όπως για παράδειγμα των κόκκινου, πράσινου και μπλε (RGB). Με το RGB μοντέλο γίνεται η αναπαράσταση του χρώματος στην ανθρώπινη όραση.

Το ανθρώπινο σύστημα όρασης δεν μπορεί να ξεχωρίσει περιοδικές αναλαμπές φωτεινής πηγής όταν η συχνότητά της ξεπερνά τα 50 Hz περίπου. Στην περίπτωση αυτή εκλαμβάνει ως συνεχή την εκπομπή της φωτεινής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο καθορίζει την ταχύτητα με την οποία πρέπει να ανανεώνεται η πληροφορία στις οθόνες της τηλεόρασης ή του υπολογιστή. Συχνότητα ανανέωσης 60Hz, δίνει σταθερή εικόνα χωρίς την αίσθηση της ασυνέχειας μεταξύ των διαδοχικών στιγμιότυπων.



**Διάγραμμα 2.4.** Κανονικοποιημένο φάσμα αντίδρασης των κόννων για μικρά(μπλε χρώμα), μεσαία (πράσινο χρώμα) και μεγάλα (κόκκινο χρώμα) μήκη κύματος. Η μίξη των χρωμάτων δίνει το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε.

### 2.8.2 Ψηφιακή εικόνα

Ψηφιακή εικόνα ονομάζεται η ψηφιακή αναπαράσταση μιας εικόνας. Είναι ένας πίνακας αριθμών που έχει προκύψει από την δειγματοληψία μιας δισδιάστατης έκδοσης της αρχικής εικόνας. Μια τέτοια αναπαράσταση δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας της εικόνας με υπολογιστικά συστήματα.

Η ανάγκη για επεξεργασία της πληροφορίας της εικόνας οδηγεί κατ' αρχήν στη μαθηματική περιγραφή του περιεχομένου της. Έτσι, την ασπρόμαυρη εικόνα μπορούμε να τη δούμε ως μία δισδιάστατη συνάρτηση των συντεταγμένων του χώρου  $x$  και  $y$ .

$$f \rightarrow f(x,y)$$

Αυτό σημαίνει ότι η  $f$  περιγράφει μία επιφάνεια, η οποία έχει μεγάλη τιμή όπου η εικόνα είναι πιο λευκή ενώ για μικρές τιμές της  $f$  η εικόνα πλησιάζει το μαύρο. Στην ουσία η  $f$  περιγράφει την αμαύρωση της εικόνας σε κάθε θέση  $(x,y)$  και παίρνει συνεχείς τιμές.

Στην πράξη, κάθε εικόνα για να υποστεί ψηφιακή επεξεργασία θα πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή. Έτσι, θα πρέπει να ληφθούν ισαπέχοντα δείγματα της συνάρτησης

$f(x,y)$  στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Η πυκνότητα με την οποία θα ληφθούν τα δείγματα καθορίζεται στην περίπτωση αυτή (δισδιάστατη συνάρτηση στο χώρο) από το θεώρημα δειγματοληψίας. Το θεώρημα δειγματοληψίας αναφέρει ότι η απόσταση δύο διαδοχικών δειγμάτων στο επίπεδο  $(x,y)$  θα πρέπει να είναι μικρότερη από την ημιπερίοδο των ταχύτερων εναλλαγών της συνάρτησης  $f(x,y)$ . Με άλλα λόγια, η δειγματοληψία πρέπει να γίνει αρκετά γρήγορα ώστε να προλαβαίνει τις γρήγορες εναλλαγές της αμαύρωσης της εικόνας. Στη συνέχεια τα δείγματά θα πρέπει να κβαντιστούν σε πεπερασμένο αριθμό σταθμών. Συνήθως οι στάθμες που χρησιμοποιούνται είναι 255 ( $2^8-1$ ). Στη στάθμη 255 αντιστοιχίζεται το λευκό ενώ στη στάθμη 0 το μαύρο. Έτσι, ένας δυαδικός αριθμός των 8 bits (1 byte) επαρκεί για να περιγραφεί η τιμή της αμαύρωσης ενός δείγματος της εικόνας που καλείται και εικονοστοιχείο (picture element - pixel).

Η ψηφιακή εικόνα παριστάνεται μαθηματικά ως η κβαντισμένη σε πλάτος συνάρτηση:

$$f \rightarrow f_q(n_1, n_2)$$

όπου τα  $n_1$  και  $n_2$  αντιστοιχούν στις διακριτές χωρικές μεταβλητές  $x$  και  $y$ . Σε ειδικού τύπου εικόνες, όπως είναι το κείμενο ή το σχέδιο, αρκούν δύο μόνο στάθμες, οι 0 και 1, που αντιστοιχούν στο μαύρο και το λευκό. Στην περίπτωση αυτή ένα μόνο δυαδικό ψηφίο είναι αρκετό για να αναπαραστήσει την πληροφορία. Σε περίπτωση που η εικόνα είναι έγχρωμη τότε σε κάθε θέση  $(n_1, n_2)$  η  $f$  έχει τρεις τιμές (διάνυσμα), οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές των χρωμάτων κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB). Όταν, τέλος, συναντάται διαδοχή εικόνων η συνάρτηση  $f$  έχει μία επιπλέον μεταβλητή, το χρόνο  $t$ . Το σήμα είναι διακριτό και ως προς το χρόνο ( $t \rightarrow n_3$ ). Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικόνα απέχει χρονικά από την άλλη κάποιο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό, περίπου 1/30 sec, για να γίνει δυνατή η παρουσίαση της κίνησης.

### 2.8.3 Χρωματικά μοντέλα

Για την περιγραφή και χρήση των χρωμάτων στις ψηφιακές εικόνες έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις περιγραφής τους, γνωστές ως χρωματικά μοντέλα (RGB, CMY, XYZ, xyY, I1I2I3, UVW, LSLM, L\*a\*b\*, L\*u\*v\*, LHC, LHS, HSV, HSV Polar, HSI, HSI Polar, YUV, YIQ, YcbCr). Η εικόνα αναλύεται - συνθέτεται σε αρκετά μικρά ομοιόμορφα στοιχεία, τα εικονοστοιχεία (pixels). Τα επιμέρους αυτά στοιχεία είναι ίδιου μεγέθους και αποτελούνται από ένα χρώμα ή τον συνδυασμό κάποιων λίγων, των βασικών του κάθε μοντέλου. Έτσι προσεγγίζουν αρκετά την εικόνα που βλέπουμε, με διαφορετική ακρίβεια το καθένα. Τα χρώματα αυτά και οι μέθοδοι διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο.

Η επιλογή του χρωματικού μοντέλου είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία για αλγόριθμους ηλεκτρονικής όρασης και επεξεργασίας εικόνας καθώς το επιλεγμένο χρωματικό μοντέλο θα περιέχει τις πληροφορίες που θα αξιοποιηθούν από τον αλγόριθμο.

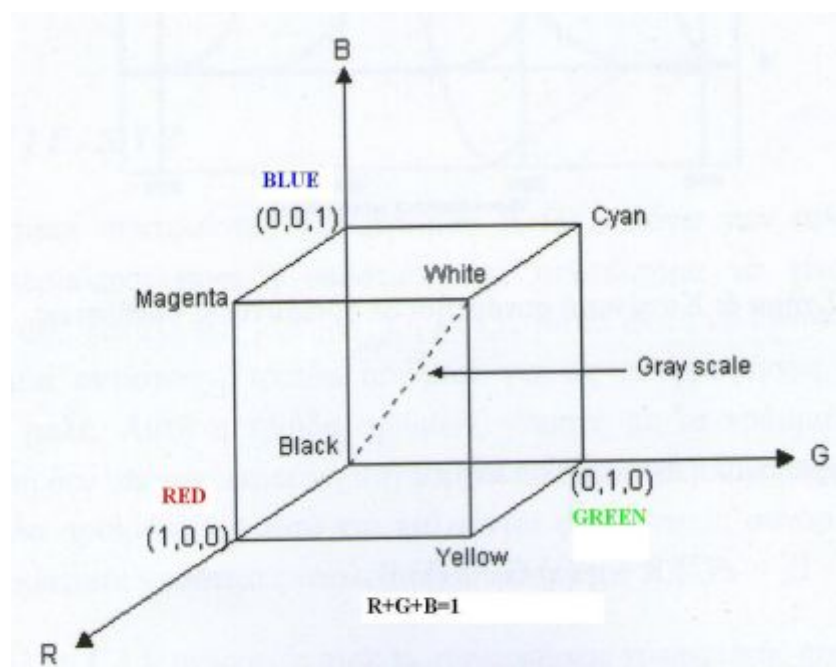
Σ' αυτή την παράγραφο θα αναλυθούν τα πλέον σημαντικά χρωματικά μοντέλα. Αυτά είναι:

1. Το RGB
2. Το HSV

## 3. Το CMYK

## 4. Το YCbCr

Στο RGB μοντέλο, τα χρώματα εμφανίζονται με βάση τις πρωταρχικές φασματικές συνιστώσες του κόκκινου, πράσινου και μπλε. Η επιλογή των βασικών χρωμάτων προήλθε από την ανθρώπινη βιολογία επειδή είναι ερεθίσματα τα οποία διεγείρουν συγκεκριμένους δέκτες του ανθρώπινου αμφιβληστροειδούς. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Ο χρωματικός υποχώρος που ενδιαφέρει είναι ο κύβος του οποίου οι τρεις γωνίες πάνω στους άξονες είναι τα RGB χρώματα, οι άλλες τρεις γωνίες είναι τα χρώματα κίτρινο, βαθύ κόκκινο και γαλάζιο, στην αρχή των αξόνων είναι το μαύρο και το άσπρο τοποθετημένο στην πιο απομακρυσμένη γωνία από το μαύρο.

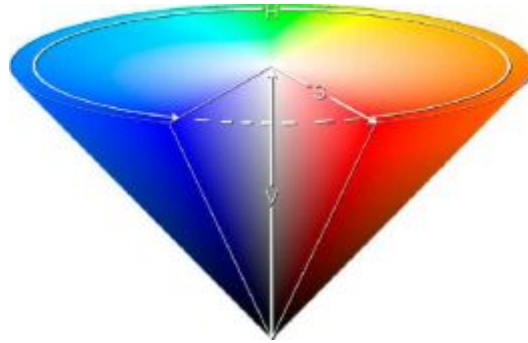


**Σχήμα 2.6.** Γραφική απεικόνιση του 8-bit RGB χρωματικού μοντέλου.

Οι εικόνες που αναπαριστώνται στο RGB χρωματικό μοντέλο αποτελούνται από τρεις συστατικές εικόνες, μία για κάθε πρωταρχικό χρώμα. Ο αριθμός των bits (δυναδικά ψηφία 0 και 1) που χρησιμοποιείται για να αναπαρασταθεί κάθε pixel στον RGB χώρο ονομάζεται βάθος pixel (pixel depth). Αν η κάθε συστατική εικόνα του RGB μοντέλου είναι μια 8-bit εικόνα, τότε τα pixels της RGB εικόνας θα έχουν βάθος ίσο με 24 bits. Έτσι, σε κάθε pixel της εικόνας θα αντιστοιχεί μια τιμή από 0 έως 255 ( $2^8=256$ , γι' αυτό και η απαίτηση των 8-bit) για την περιγραφή κάθε βασικού χρώματος.

Σε ορισμένες εφαρμογές της φυσικής, η συζήτηση γύρω από την χρωματική αντίληψη περιστρέφεται συνήθως γύρω από τρεις ποσότητες. Την απόχρωση (hue), τον κορεσμό (saturation) και τη φωτεινότητα (value). Απόχρωση είναι αυτό που ονομάζεται "χρώμα" και χρώμα. Παραδείγματα είναι το κίτρινο, το κόκκινο, το μαύρο. Ο κορεσμός είναι ένα μέτρο του βαθμού που έχει ένα καθαρό χρώμα όταν αλλοιωθεί από την μίξη του με το

λευκό. Έτσι, για παράδειγμα, το ροζ και το πορφυρό είναι διαφορετικές saturations του κόκκινου. Η αυξομείωση της τιμής της παραμέτρου κορεσμός αντιστοιχεί στην πρόσθεση ή αφαίρεση λευκού. Η φωτεινότητα είναι το τελευταίο μέτρο (το μοντέλο αντιστοιχίζεται στο *value*) και είναι ένας υποκειμενικός παράγοντας που είναι στην πραγματικότητα δύσκολο να μετρηθεί. Ενσωματώνει τη χρωματική έννοια της έντασης και είναι ένας από τους παράγοντες κλειδιά στην περιγραφή της χρωματικής αίσθησης. Στο μοντέλο αυτό αυξομειώνοντας την τιμή του *value* είναι σαν προσθέτουμε ή να αφαιρούμε μαύρο.



**Σχήμα 2.7.** Η λειτουργία του χρωματικού μοντέλου HSV

Σε αντίθεση με το RGB μοντέλο, στο HSV μοντέλο αποσυνδέεται η χρωματική πληροφορία (*hue* και *saturation*) από την πληροφορία έντασης. Έτσι το HSV μοντέλο είναι ιδανικό για την ανάπτυξη αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας που βασίζονται σε χρωματικές περιγραφές που είναι φυσικές και διαισθητικές για τους ανθρώπους. Η περιγραφή της χρωματικής πληροφορίας στο συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται και πάλι με τρεις αριθμούς που περιγράφουν την ποσότητα *hue*, *saturation* και *value*. Ο συνδυασμός τους δίνει το χρώμα του pixel.

Τα δύο παραπάνω χρωματικά μοντέλα παρόλη την διαφορετική φιλοσοφία στον τρόπο έκφρασης του χρώματος μπορούν να συνδυαστούν με μαθηματικές σχέσεις. Αν οι συνιστώσες του κόκκινου (*r*), πράσινου (*g*) και του μπλε (*b*) ανήκουν στην περιοχή  $[0,1]$  το *max* είναι η μεγαλύτερη σε τιμή συνιστώσα του μοντέλου ενώ το *min* η μικρότερη, τότε για να βρούμε τη γωνία της απόχρωσης (*h*), ακολουθούμε τον παρακάτω τύπο:

$h=0$ , αν  $\max=\min$

$$h = (60^\circ \times \frac{g - b}{\max - \min} + 360^\circ) \bmod 360^\circ, \text{ αν } \max=r$$

$$h = 60^\circ \times \frac{b - r}{\max - \min} + 120^\circ, \text{ αν } \max=g$$

$$h = 60^\circ \times \frac{r - g}{\max - \min} + 240^\circ, \text{ αν } \max=b$$

Οι τιμές για τον κορεσμό (s) και την φωτεινότητα (v) βρίσκονται ως εξής:

$s=0$ , αν  $\max=0$

$s = \frac{\max - \min}{\max} = 1 - \frac{\min}{\max}$ , σε κάθε άλλη περίπτωση

$v = \max$

Στα εκτυπωτικά συστήματα χρησιμοποιείται ευρέως το σύστημα CMYK. Τα τρία βασικά χρώματα στο CMY είναι το γαλάζιο (Cyan), το βαθύ κόκκινο (Magenta) και το κίτρινο (Yellow). Με τα τρία αυτά χρώματα δημιουργούνται τα δευτερογενή κόκκινο, πράσινο, μπλε ως εξής:

Κόκκινο: Βαθύ κόκκινο + Κίτρινο

Πράσινο: Κίτρινο + Γαλάζιο

Μπλε: Γαλάζιο + Βαθύ κόκκινο

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι το υπόβαθρο της εκτύπωσης είναι το λευκό χαρτί που ανακλά όλα τα χρώματα (μήκη κύματος). Κάθε βασικό χρώμα που προστίθεται με ένα μελάνι απορροφά ορισμένα χρώματα και αποδίδει τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα το κίτρινο μελάνι απορροφά το μπλε χρώμα και αφήνει το πράσινο και το κόκκινο να ανακλαστεί. Εδώ ο συνδυασμός των τριών βασικών χρωμάτων δίνει το μαύρο χρώμα (πλήρης απορρόφηση των ακτινοβολιών). Για το λόγο αυτό το μοντέλο CMY χαρακτηρίζεται και ως "αφαιρετικό". Μαύρο χρώμα, επίσης, προκύπτει από το συνδυασμό ενός βασικού και του αντίθετου δευτερογενούς.

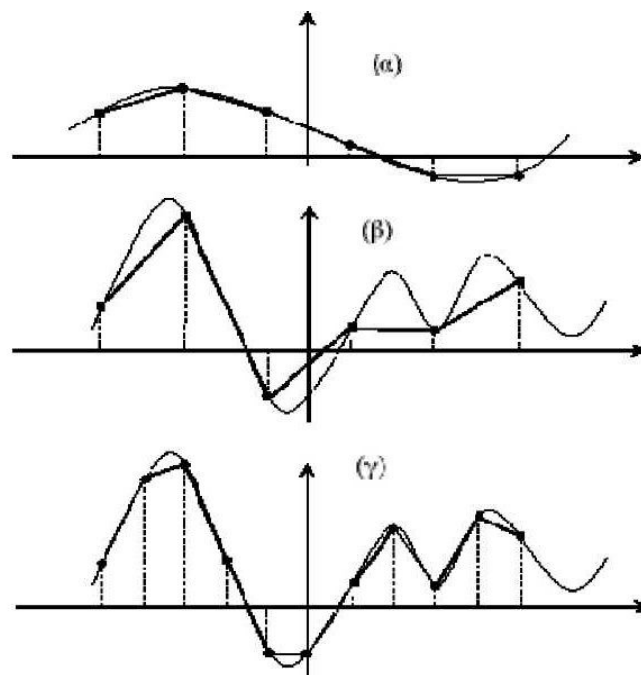
Τα μελάνια, όμως, από τη φύση τους δεν μπορούν να αποδώσουν συγκεκριμένα μήκη κύματος – χρώματα αλλά, μία πιο ευρεία περιοχή του χρωματικού φάσματος. Το αποτέλεσμα είναι ο συνδυασμός των τριών βασικών χρωμάτων να δίνει ένα καφετί χρώμα αντί για το μαύρο. Για το λόγο αυτό προστέθηκε στο μοντέλο CMY και το μαύρο μελάνι, με αποτέλεσμα να προκύψει το χρωματικό μοντέλο CMYK (Cyan – Magenta – Yellow σήμερα το CMY μοντέλο αλλά το CMYK. Το μοντέλο CMY όπως και το RGB, με ένα κύβο σε ένα καρτεσιανό σύστημα αξόνων με το λευκό χρώμα στην αρχή των αξόνων και τα βασικά χρώματα επάνω στους άξονες. χρωματική πληροφορία προκύπτει από το συνδυασμό των τριών συνιστωσών του μοντέλου.

Η χρωματική απεικόνιση YCbCr χρησιμοποιείται ευρέως στο ψηφιακό βίντεο. Σε αυτόν τον τύπο εικόνας οι πληροφορίες για την φωτεινότητα της εικόνας είναι αποθηκευμένες σε μια μοναδική συντεταγμένη είναι αποθηκευμένες σε δυο δ αναπαριστά την διάφορα μεταξύ συνιστώσας. Η Cr αναπαριστά την διαφορά μεταξύ της συνιστώσας του κόκκινου και της προαναφερθείσας συνιστώσας. Ο συνδυασμός των τιμών των Y, Cb, Cr θα μας δώσει την απόχρωση που επιθυμούμε.

### 2.8.4 Αναπαράσταση εικόνας

Ήδη από την παράγραφο 2.8.2 έχει γίνει σαφές ότι το πρώτο στάδιο επεξεργασίας εικόνας ή βίντεο είναι η ψηφιοποίηση, η αναπαράσταση δηλαδή ενός φυσικού (αναλογικού) σήματος μέσω μιας ακολουθίας αριθμητικών τιμών. Η ακολουθία μπορεί να είναι δισδιάστατη ή τρισδιάστατη κατ' αντιστοιχία με τις διαστάσεις του ψηφιοποιούμενου σήματος (εικόνα, βίντεο). Η διαδικασία ψηφιοποίησης έχει δύο στάδια, την δειγματοληψία και τον κβαντισμό.

Η διαδικασία της δειγματοληψίας συνίσταται στην καταγραφή της τιμής ενός αναλογικού σήματος σε ένα πλέγμα σημείων. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία του διακριτού σήματος. Γενικά, η παραπάνω διαδικασία είναι μη αντιστρεπτή. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό αναλογικό σήμα δεν μπορεί να ανασυντεθεί από το διακριτό αντίγραφο του.



**Διάγραμμα 2.5.** Δειγματοληψία. Στα διαγράμματα  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  διαφέρει η πυκνότητα λήψης των δειγμάτων η οποία καθορίζεται από το θεώρημα της δειγματοληψίας όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.8.2.

Ο κβαντισμός είναι το δεύτερο στάδιο στην ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος. Σε ελεύθερη απόδοση, με τον όρο κβαντισμός εννοούμε στρωγγυλοποίηση των τιμών ενός σήματος σε μία από τις πεπερασμένου πλήθους στάθμες που έχουν προκαθοριστεί. Η ανάγκη της διαδικασίας του κβαντισμού προκύπτει από την επιλογή μας (η μόνη τεχνικά εφικτή επιλογή) να αναπαραστήσουμε την τιμή κάθε δείγματος ενός σήματος με πεπερασμένο πλήθος bit. Έτσι αν επιλέξουμε  $b$  bits ανά δείγμα οι διαθέσιμες στάθμες κβαντισμού είναι συνολικά το πολύ  $N=2^b$  (έχουμε αναφέρει ότι για την αναπαράσταση κάθε βασικού χρώματος στο μοντέλο RGB υπάρχουν 256 στάθμες). Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι και η διαδικασία του κβαντισμού είναι μη αντιστρεπτή. Ως αποτέλεσμα εμφανίζεται το λεγόμενο σφάλμα κβαντισμού.

Με τον όρο συμπίεση εννοούμε το μετασχηματισμό της εσωτερικής αναπαράστασης των πολυμέσων (εικόνα ή βίντεο) σε μια διαφορετική μορφή. Εσωτερική αναπαράσταση είναι η αναπαράσταση των πολυμέσων αμέσως μετά την ψηφιοποίησή τους (δειγματοληψία, κβαντισμός).

Η συμπίεσμένη αναπαράσταση χρειάζεται μικρότερο πλήθος bits για την περιγραφή της. Συνεπώς, μικρότερο χώρο αποθήκευσης και μετάδοσης μέσω δικτύων υπολογιστών. Επίσης είναι δυνατή η ανάκτηση της εσωτερικής αναπαράστασης από τη συμπίεσμένη μορφή είτε με πλήρη ταύτιση είτε με μερική. Έτσι προκύπτουν τα δύο είδη συμπίεσης, η συμπίεση χωρίς απώλειες (lossless) και η συμπίεση με απώλειες (lossy).

Η συμπίεση είναι αναγκαία διαδικασία για την εξοικονόμηση αποθηκευτικού χώρου και εύρους ζώνης κατά την μεταφορά δεδομένων σε εφαρμογές που θα ήταν πρακτικώς αδύνατες ή οικονομικά ασύμφορες χωρίς αυτήν. Μερικές τέτοιες εφαρμογές είναι η ψηφιακή τηλεόραση, η κινητή τηλεφωνία, η μετάδοση εικόνων και βίντεο μέσω του Internet, τα DVDs, η αποστολή fax.

Η πορεία που θα ακολουθήσει μια εικόνα μέχρι να είναι κατάλληλη για μεταφορά και αποθήκευση περιλαμβάνει την δειγματοληψία, τον κβαντισμό και την συμπίεση. Η αναπαράσταση που θα προκύψει μπορεί να είναι πολλών ειδών. Σε όλα τα είδη, η αναπαράσταση αποτελείται από μια επικεφαλίδα ακολουθούμενη από την κυρίως αναπαράσταση της εικόνας. Επειδή η συμπίεση είναι προαιρετική, η κυρίως αναπαράσταση της εικόνας μπορεί να είναι αυτούσια η εσωτερική αναπαράσταση ή ένας μετασχηματισμός της.

Οι συνηθέστερες αναπαραστάσεις μεταφοράς και αποθήκευσης εικόνων είναι η TIFF, η PNM, η PGM, η TGA, η PCX, η GIF, η BMP, η PPM και η JPEG. Η τελευταία είναι η πλέον συνηθισμένη μορφή και έχει δύο εκδόσεις, με και χωρίς συμπίεση.

Όσον αφορά στην επικεφαλίδα αυτή κατά περίπτωση περιέχει τις εξής ενότητες:

1. Είδος αναπαράστασης (Format) και έκδοση της αναπαράστασης. Η πληροφορία αυτή είναι αναγκαία στο σύστημα που διαβάζει το αρχείο της εικόνας για να ερμηνεύσει με τον ορθό τρόπο το υπόλοιπο μέρος της επικεφαλίδας και την κυρίως αναπαράσταση.
2. Διαστάσεις της εικόνας.
3. Μέθοδος πολυπλεξίας των δεδομένων.
4. Παράμετροι κβαντισμού. Κατά περίπτωση περιγράφεται το είδος του κβαντιστή, οι στάθμες κβαντισμού, ο αριθμός των bits ανά σύμβολο κλπ.
5. Χρωματικός πίνακας. Είναι απαραίτητος στην περίπτωση αναπαραστάσεων που χρησιμοποιούν δεικτοδότηση χρώματος.
6. Παράμετροι συμπίεσης. Εφόσον η συγκεκριμένη αναπαράσταση χρησιμοποιεί κάποιον αλγόριθμο συμπίεσης η επικεφαλίδα περιέχει τις παραμέτρους χρήσης του αλγορίθμου. Το είδος των παραμέτρων εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μέθοδο συμπίεσης.

Σε όλα τα είδη αναπαράστασης η πληροφορία που περιλαμβάνεται στην επικεφαλίδα, οι συμβάσεις που συνάγονται εμμέσως από την υιοθέτηση ενός συγκεκριμένου τύπου



αναπαράστασης και τα κυρίως δεδομένα που ακολουθούν την επικεφαλίδα επιτρέπουν την ανασύνδεση της εσωτερικής αναπαράστασης.

### 2.8.5 Επεξεργασία και ανάλυση εικόνας

Επεξεργασία εικόνας ονομάζεται οποιαδήποτε μορφή επεξεργασίας δεδομένων, η οποία καλύπτει τις επόμενες κατηγορίες:

Επεξεργασία εικόνας: Είσοδος: Εικόνα → Έξοδος: Εικόνα

Ανάλυση εικόνας: Είσοδος: Εικόνα → Έξοδος: Αποτελέσματα μετρήσεων

Κατανόηση εικόνας: Είσοδος: Εικόνα → Έξοδος: Προσδιορισμός στοιχείων υψηλού επιπέδου

Η επεξεργασία της εικόνας αφορά κυρίως στον τονισμό συγκεκριμένων στοιχείων της εικόνας με σκοπό τη διευκόλυνση των διαδικασιών που θα ακολουθήσουν. Ακόμα αφορά στη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας, μέσω φίλτραρίσματος του θορύβου. Από την στιγμή που μια εικόνα είναι ένα δισδιάστατο σήμα και περιγράφεται από μια μαθηματική συνάρτηση έχουν αναπτυχθεί πολλές μαθηματικές τεχνικές και θεωρίες που αφορούν στην επεξεργασία της. Οι τεχνικές στην ψηφιακή επεξεργασία της εικόνας έχουν ως στόχο τον υπολογισμό κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας εξόδου. Ανάλογα με τον τρόπο που υπολογίζεται η τιμή του εικονοστοιχείου αυτού, οι πράξεις διακρίνονται σε τοπικές (local), καθολικές (global), γεωμετρικές (geometrical). Απαραίτητη έννοια στις πράξεις αυτές είναι η έννοια της γειτονιάς ενός εικονοστοιχείου. Πρόκειται ουσιαστικά για τον αριθμό των εικονοστοιχείων που το περιβάλλουν (π.χ. 4 ή 8).

Στις τοπικές πράξεις η τιμή κάθε εικονοστοιχείου στη θέση  $(n_1, n_2)$  στην εικόνα εξόδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την τιμή του εικονοστοιχείου στην αντίστοιχη θέση της εικόνας εισόδου, καθώς επίσης και τις τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων.

Στις καθολικές πράξεις για να υπολογιστεί η τιμή ενός εικονοστοιχείου της εικόνας εξόδου χρησιμοποιούνται όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας εισόδου.

Οι γεωμετρικές πράξεις αφορούν σε μετασχηματισμούς των συντεταγμένων της αρχικής εικόνας. Από τις κυριότερες γεωμετρικές πράξεις είναι η μετατόπιση (translation), η στροφή (rotation) και ο αντικατοπτρισμός (mirroring).

Τα επόμενα στάδια εντάσσονται στην ανάλυση της εικόνας. Σημαντικά θέματα εδώ είναι:

1. Η εξαγωγή των κατάλληλων χαρακτηριστικών για αναγνώριση και ταξινόμηση αντικειμένων που υπάρχουν μέσα στην εικόνα.
2. Η συμπίεση της εικόνας για γρήγορη μετάδοσή της ή οικονομική αποθήκευση. Μας απασχόλησε στην προηγούμενη παράγραφο.

3. Ο μετασχηματισμός της αποκάλυψη πληροφορίας που στον αρχικό χώρο δεν είναι εμφανής.

4. Οι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί που είναι απαραίτητοι για τη σύγκριση τη σύνθεση της πληροφορίας σκηνών που έχουν ληφθεί από καθώς και τη σύνθεση εγκάρσιων τομών αντικειμένων από προβολικές εικόνες (αξονική τομογραφία).

Το πρώτο στάδιο είναι αρκετά σαφές. Στόχος είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών (features) από μία εικόνα για αναγνώριση αντικειμένων. Μπορούμε να πούμε ότι η εξαγωγή χαρακτηριστικών και η μελέτη τους αποτελούν σημαντικό αντικείμενο της ανάλυσης εικόνας. Τέτοια χαρακτηριστικά, στο επίπεδο του pixel, είναι π.χ. ο κορεσμός (saturation) και η φωτεινότητα (value). Η ανάλυση εικόνας και η μελέτη των χαρακτηριστικών της απαιτεί καλή γνώση προγραμματισμού και στατιστικής. Οι δύο αυτές επιστήμες αποτελούν την σημερινή εποχή απαραίτητα εργαλεία στον χώρο της επεξεργασίας εικόνας.

Στην επιστήμη υπολογιστών με τον όρο πρόγραμμα αναφερόμαστε σε μία συγκεκριμένη ακολουθία εντολών την οποία θα πρέπει να εκτελέσει ο υπολογιστής για να παραγάγει το επιθυμητό για το χρήστη αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τον γενικό ορισμό που έδωσε ο Τζόν Φόν Νόιμαν το 1945, το πρόγραμμα αποτελείται από μια συνεχή αλληλουχία εντολών τις οποίες ο υπολογιστής καλείται να εκτελέσει μία προς μία για να παραχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στους σύγχρονους υπολογιστές το πρόγραμμα εγγράφεται σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο προσβάσιμο από τον υπολογιστή. Ο υπολογιστής "διαβάζει" από εκεί μια εντολή, την εκτελεί και επανέρχεται διαβάζοντας την επόμενη κοκ. Το πρόγραμμα δημιουργείται από ειδικευμένα άτομα, τους προγραμματιστές. Για την κατασκευή ενός προγράμματος χρησιμοποιείται μια κατάλληλη γλώσσα που επιτρέπει την επικοινωνία προγραμματιστή και υπολογιστή. Η γλώσσα αυτή που και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι και η ίδια πρόγραμμα, ονομάζεται γλώσσα προγραμματισμού.

Η διαδικασία δημιουργίας ενός προγράμματος ονομάζεται προγραμματισμός. Οι εντολές που γράφει ο προγραμματιστής αποτελούν τον πηγαίο κώδικα (source code). Συνήθως, οι εντολές του προγράμματος χρειάζεται να "μεταφραστούν" στη γλώσσα που αντιλαμβάνεται ο υπολογιστής και αυτό γίνεται δυνατό με τη χρήση ενός άλλου προγράμματος που ονομάζεται, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του, μεταγλωττιστής (compiler) ή διερμηνέας (interpreter). Το παραγόμενο αποτέλεσμα λέγεται ότι αποτελεί τον αντικειμενικό κώδικα. Αυτός αποτελείται από μία μακροσκελή σειρά από δυαδικά ψηφία μηχανής 0, 1, η οποία αποτελεί τη γλώσσα μηχανής (machine code), τη μόνη που αντιλαμβάνεται ο επεξεργαστής ενός υπολογιστή.

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία εικόνας στη διπλωματική αυτή είναι η java. Η java είναι μια αντικειμενοστρεφής γλώσσα προγραμματισμού που σχεδιάστηκε από την εταιρία πληροφορικής Sun Microsystems. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της Java έναντι των περισσότερων άλλων γλωσσών είναι η ανεξαρτησία του λειτουργικού συστήματος και πλατφόρμας. Τα προγράμματα που είναι γραμμένα σε Java τρέχουν ακριβώς το ίδιο σε Windows, Linux, Unix και Macintosh χωρίς να χρειαστεί να ξαναγίνει μεταγλώττιση (compiling) ή να αλλάξει ο πηγαίος κώδικας για κάθε διαφορετικό λειτουργικό σύστημα.

Αφού γραφεί κάποιο πρόγραμμα σε Java, στη συνέχεια μεταγλωττίζεται μέσω του μεταγλωττιστή javac, ο οποίος παράγει έναν αριθμό από αρχεία .class (κώδικας byte ή bytecode). Ο κώδικας byte είναι η μορφή που παίρνει ο πηγαίος κώδικας της Java όταν μεταγλωττιστεί. Όταν πρόκειται να εκτελεστεί η εφαρμογή σε ένα μηχάνημα, το Java Virtual Machine που πρέπει να είναι εγκατεστημένο σε αυτό θα αναλάβει να διαβάσει τα αρχεία .class. Στη συνέχεια τα μεταφράζει σε γλώσσα μηχανής που να υποστηρίζεται από το λειτουργικό σύστημα και τον επεξεργαστή, έτσι ώστε να εκτελεστεί (να σημειωθεί εδώ ότι αυτό συμβαίνει με την παραδοσιακή Εικονική Μηχανή). Πιο σύγχρονες εφαρμογές της

εικονικής Μηχανής μπορούν και μεταγλωττίζουν εκ των προτέρων τμήματα bytecode απευθείας σε κώδικα μηχανής (εγγενή κώδικα ή native code) με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ταχύτητα). Χωρίς αυτό δε θα ήταν δυνατή η εκτέλεση λογισμικού γραμμένου σε Java. Πρέπει να σημειωθεί ότι η JVM είναι λογισμικό που εξαρτάται από την πλατφόρμα, δηλαδή για κάθε είδος λειτουργικού συστήματος και αρχιτεκτονικής επεξεργαστή υπάρχει διαφορετική έκδοση του. Έτσι υπάρχουν διαφορετικές JVM για Windows, Linux, Unix, Macintosh, κινητά τηλέφωνα, παιχνιδιομηχανές κλπ.

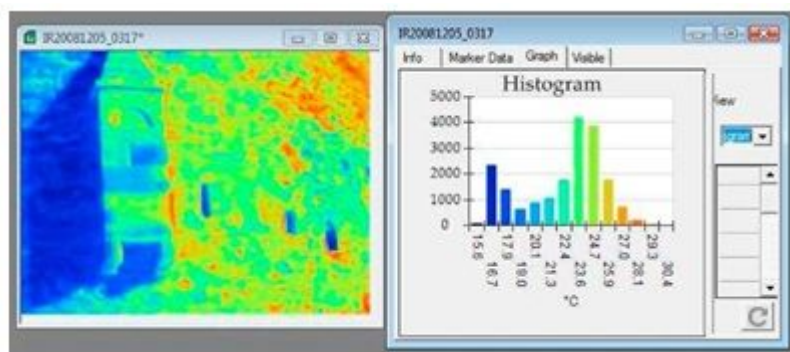
Οτιδήποτε θέλει να κάνει ο προγραμματιστής (ή ο χρήστης) γίνεται μέσω της εικονικής μηχανής. Αυτό βοηθάει στο να υπάρχει μεγαλύτερη ασφάλεια στο σύστημα γιατί η εικονική μηχανή είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία χρήστη - υπολογιστή. Ο προγραμματιστής δεν μπορεί να γράψει κώδικα ο οποίος θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα για τον υπολογιστή γιατί η εικονική μηχανή θα τον ανιχνεύσει και δε θα επιτρέψει να εκτελεστεί. Από την άλλη μεριά ούτε ο χρήστης μπορεί να κατεβάσει «κακό» κώδικα από το δίκτυο και να τον εκτελέσει. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα καταναμημένα συστήματα όπου πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο πρόγραμμα συγχρόνως.

### 2.8.6 Στατιστική-χρωματικά μοντέλα

Η στατιστική αποτελεί έναν κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών, ο οποίος μαζί με την θεωρία πιθανοτήτων, χρησιμοποιείται στη λύση προβλημάτων τα οποία συνδέονται με διάφορες παρατηρήσεις δεδομένων. Κάθε φαινόμενο είναι δυνατό να παρουσιαστεί με ένα μαθηματικό μοντέλο. Η στατιστική ορίζεται σαν το σύνολο των μεθόδων και των θεωριών που έχουν αναπτυχθεί για τη συλλογή, παρουσίαση, ανάλυση και ερμηνεία των στατιστικών στοιχείων.

Οι ρίζες της στατιστικής βρίσκονται στη μελέτη των τυχερών παιχνιδιών του 17ου αιώνα. Κοντά στο 1650 στη Γαλλία παίζονταν πολλά τυχερά παιχνίδια με ζάρια, χαρτιά κλπ. Η ονομασία προέρχεται από τη Λατινική λέξη Status, που σημαίνει κατάσταση, γιατί στην αρχική της μορφή η στατιστική περιελάμβανε τη συλλογή και την περιγραφή στοιχείων, που αναφέρονται στην πολιτεία. Ο πρώτος που εφάρμοσε τις στατιστικές μεθόδους είναι ο Βέλγος Quetelet (1796-1874), ο οποίος ονομάζεται πατέρας της στατιστικής, γιατί για πρώτη φορά έδειξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εφαρμόσει τις στατιστικές μεθόδους σε οικονομικά στοιχεία.

Για να χρησιμοποιήσουμε τις μεθόδους της στατιστικής, απαιτούνται αριθμητικά δεδομένα, που τα ονομάζουμε στατιστικά στοιχεία. Τα στοιχεία συγκεντρώνονται από την μελέτη διαφόρων χαρακτηριστικών μέσω της διαδικασίας της δειγματοληψίας και συνήθως παρουσιάζονται σε στατιστικούς πίνακες- διαγράμματα.



**Εικόνα 2.17.** Το ιστόγραμμα είναι ένα στατιστικό μέτρο για την εμφάνιση των διαφορετικών χρωματικών τόνων σε μια εικόνα.

Από τις πλέον σημαντικές μαθηματικές έννοιες στον χώρο της στατιστικής είναι οι εξής:

1. Μέση τιμή. Ονομάζεται και μαθηματική ελπίδα. Συμβολίζεται με  $E(X)$  ή  $\mu$  και ορίζεται ως:

$$\mu = E(x) = \sum_{i=1}^n x_i \times f(x_i)$$

όπου  $x_i$  είναι η βαρύτητα της τιμής  $f(x_i)$ , του εξεταζόμενου χαρακτηριστικού (i).

2. Διασπορά. Είναι ένα μέτρο για το πόσο οι τιμές ενός χαρακτηριστικού είναι διασπαρμένες γύρω από τη μέση τιμή  $\mu$ . Ορίζεται με τον τύπο:

$$VAR(X) = E((X-\mu)^2)$$

3. Τυπική απόκλιση. Για λόγους διαστάσεων χρησιμοποιείται συχνότερα από την διασπορά.

$$\sigma = \sqrt{VAR(X)}$$

4. Ποσοστό μεταβολής. Είναι ένα μέτρο της μεταβολής της τιμής των στατιστικών στοιχείων. Ορίζεται ως:

$$\alpha = \left| \frac{\text{αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή}}{\text{αρχική τιμή}} \right| \times 100\%$$

Το τρίτο στάδιο αναφέρεται στον μετασχηματισμό της εικόνας σε άλλους χώρους. Πιο συνηθισμένος είναι ο μετασχηματισμός στο χώρο των συχνοτήτων. Ο μετασχηματισμός ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη μελέτη του σήματος αφού μπορεί να εξεταστεί από μία άλλη σκοπιά. Στα περιοδικά σήματα εφαρμόζονται οι σειρές Fourier ενώ σε περιοδικά και μη περιοδικά σήματα ο μετασχηματισμός Fourier. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) υλοποιείται γρήγορα με τον αλγόριθμο που καλείται FFT (fast fourier transform). Στα διδιάστατα σήματα, όπως είναι οι εικόνες, υπάρχει ακριβώς η ίδια δυνατότητα μετασχηματισμού. Φυσικά, αφού η εικόνα αποτελεί σήμα που περιγράφει τον τρόπο μεταβολής της αμαύρωσης (ή του χρώματος) στο χώρο και όχι στο χρόνο, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier θα μας μεταφέρει στην περιοχή των χωρικών συχνοτήτων (διαστάσεις αντιστρόφου χώρου).

Το τελευταίο στάδιο είναι η τεχνητή όραση. Εδώ περιλαμβάνονται όλα τα αυτοματοποιημένα συστήματα επεξεργασίας εικόνας, αναγνώρισης αντικειμένων και λήψης αποφάσεων για συγκεκριμένες ενέργειες (robot).

Συμπερασματικά, η επιστήμη της επεξεργασίας εικόνας είναι μια από τις πλέον ανερχόμενες και συνεχώς εξελισσόμενες. Η συνεχής μείωση στις τιμές των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε συνδυασμό με την γιγάντωση του διαδικτύου δημιούργησαν απροσδόκητες δυνατότητες ανάπτυξης της επιστήμης. Σήμερα, δεν υπάρχει σχεδόν κανένας τεχνολογικός κλάδος που δεν επηρεάστηκε, με κάποιο τρόπο, από την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Στην περίπτωση της υπέρυθρης θερμογραφίας οι πιο συνηθισμένοι μετασχηματισμοί της αρχικής εικόνας είναι ο μετασχηματισμός Fourier και ο κυματικός μετασχηματισμός.

Έχουν ήδη αναφερθεί κάποια στοιχεία για τον μετασχηματισμό Fourier. Ας υποθεθεί ότι μια συσκευή καταμετρά την εξέλιξη με το χρόνο κάποιου φαινομένου. Η περιοδικότητα που μπορεί να υποκρύπτεται σε μια τέτοια χρονοσειρά είναι πολλές φορές σημαντικό να αναδυθεί, γιατί μέσω αυτής μπορεί να αποκαλυφθεί η δυναμική που δημιουργεί την εξέλιξη του εν λόγω φαινομένου. Άλλες φορές η περιοδικότητα αυτή μπορεί να είναι γνωστή αλλά λόγω πολυπλοκότητας ή ακόμη και θορύβου που είναι μπλεγμένος στις μετρήσεις μας δεν είναι αυτή άμεσα ορατή στη χρονοσειρά των μετρήσεών μας. Ο καλύτερος τρόπος να αναδειχθεί οποιαδήποτε περιοδικότητα είναι πιθανώς κρυμμένη μέσα στο σήμα είναι να υπολογίσουμε το φάσμα του σήματός μας, δηλαδή τον μετασχηματισμό Fourier αυτού. Βασικά, ο μετασχηματισμός Fourier αποσυνθέτει το σήμα σε ημιτονικά κύματα διαφόρων συχνοτήτων. Το φάσμα ενός χρονικά εξαρτώμενου σήματος δείχνει το πόσο έντονο είναι το σήμα σε μία δεδομένη συχνότητα.

Συχνότερα χρησιμοποιείται η συχνότητα  $f$  (μετρημένη σε κύκλους/μονάδα χρόνου, ή Hz εάν η μονάδα χρόνου είναι το second) αντί της κυκλικής συχνότητας  $\omega = 2\pi f$  (με μονάδες rad/μονάδα χρόνου), διότι έτσι αποφεύγονται οι σταθεροί όροι με τα  $\pi$  στον ορισμό του μετασχηματισμού Fourier. Η  $X(f)$  είναι γενικά μια μιγαδική συνάρτηση. Το μέτρο της  $X(f)$  και η φάση της  $\angle X(f)$  εκφράζουν το πλάτος και τη φάση των διαφόρων συνιστωσών συχνοτήτων του  $x(t)$ . Η συνάρτηση  $X(f)$  μερικές φορές αναφέρεται και ως το φάσμα του σήματος  $x(t)$ .

Στην πειραματική διαδικασία το μέτρο του φάσματος εκφράζει, πρακτικά, το πόσο ισχυρό είναι το σήμα σε κάποια συχνότητα. Από την άλλη, η φάση του φάσματος δείχνει το βάθος της υποεπιφανειακής ανωμαλίας. Έχουμε ήδη αναφέρει ότι βάθος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διαφοροποιούμενης συχνότητας.

Γενικά, η ανάλυση κατά Fourier είναι η πιο ακριβής διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων, η οποία επηρεάζεται έντονα από τα διάφορα είδη υποεπιφανειακών ανωμαλιών. Επίσης, δίνει την δυνατότητα για ποσοτική έρευνα πάνω στα διάφορα είδη υλικών. Τα διαγράμματα φάσης είναι πηγές σημαντικών πληροφοριών καθώς δεν εξαρτώνται από τυχόν ανομοιογενή θέρμανση του υλικού (στην περίπτωση ενεργής θερμογραφίας), ούτε από παρασιτικές αντανακλάσεις ούτε ακόμη και από άλλα είδη θερμικών σημάτων. Από την άλλη πλευρά, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier είναι συχνά άωφελος κυρίως λόγω του χαμηλού ρυθμού καταγραφής, σε μια σειρά θερμικών καταγραφών του αισθητήρα της κάμερας, ο οποίος έχει ως συνέπεια χαμηλή ανάλυση στον χώρο των συχνοτήτων. Η δυσκολία στην κατανόηση του μετασχηματισμού Fourier μας επιβάλλει την παραπάνω ανάλυση.

Όσον αφορά στον κυματικό μετασχηματισμό (wavelet transform), αυτός παρουσιάστηκε αρχικά από τον J.Morlet. Παρ' όλα αυτά, οι κύριοι αλγόριθμοι διακριτών κυματικών μετασχηματισμών (WT) χρεώνονται στον S.Mallat το 1988. Από τότε, η κυματική ανάλυση διαδόθηκε σε πολλούς τομείς επεξεργασίας δεδομένων. Η κυματική ανάλυση αποσυνθέτει το αρχικό σήμα σε μετατοπισμένες και κλιμακωμένες εκδόσεις του μητρικού κύματος. Από τα κύρια πλεονεκτήματα του κυματικού μετασχηματισμού είναι η ικανότητά του να εκτελεί τοπική ανάλυση για την αποκάλυψη ρωγμών. Επίσης, η διαφορά του με τον μετασχηματισμό Fourier είναι ότι διατηρεί την χρονική παράμετρο η οποία χάνεται στον DFT.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πριν την λεπτομερή ανάλυση της σειράς εργασιών που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής είναι απαραίτητο να αναφερθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί στα πλαίσιά της. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εκπόνηση μίας προκαταρκτικής θερμογραφικής μελέτης των κεντρικών πλατειών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ακολουθώς, η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού με σκοπό τη μέτρηση επιφανειών θερμογραφικών εικόνων με απώτερο σκοπό η έκταση της φθοράς να γίνει καλύτερα αντιληπτή.

### 3.2 ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

#### 3.2.1 Κριτήρια επιλογής της θερμοκάμερας

Είναι προφανές ότι οι θερμικές κάμερες είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλές εταιρίες που παράγουν διαφορετικού τύπου θερμικές κάμερες που εξυπηρετούν διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.

Καθώς αυξάνεται η ανάγκη για μη καταστροφικό και προληπτικό έλεγχο σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, αυξάνονται και οι δυνατότητες που παρέχουν οι θερμικές κάμερες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό.

Τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να προσέξουμε για την επιλογή του κατάλληλου θερμογραφικού συστήματος, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

#### Φορητότητα

Η φορητότητα και το βάρος της κάμερας είναι πολύ σημαντικά ανάλογα με την εφαρμογή και το μέρος που γίνεται η θερμική επιθεώρηση. Για παράδειγμα όταν μελετάται ο εξοπλισμός υψηλών τάσεων σε εγκαταστάσεις ή σε εργοστάσια το μέγεθος της κάμερας πρέπει να είναι μικρό για λόγους ασφάλειας.

#### Ευχρηστία

Είναι πολύ σημαντικό η κάμερα να είναι εύκολη ως προς τη χρήση και να διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας των θερμικών εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλείσεις από την πραγματικότητα αφού μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος.

### Ποιότητα κάμερας

Παράγοντας όπως η δυνατότητα μέτρησης μεγαλύτερου εύρους θερμοκρασιών και μέτρησης με διάφορα εργαλεία όπως μέτρηση σε σημείο (cross), μέτρηση σε ευρύτερη περιοχή (box), μέτρηση πάνω ή κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο (isotherm) είναι επίσης σημαντικοί και προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος δυνατοτήτων στη θερμική κάμερα.

### Απομακρυσμένος έλεγχος

Ανάλογα με την εφαρμογή, αν η θερμοκρασία της εξωτερικής περιοχής στην οποία επιθυμείται η μέτρηση είναι πολύ θερμή είναι σημαντικό να υπάρχει δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου (remote controlling)

### Αυτονομία

Η αυτονομία είναι ένας παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί πριν την επιλογή μία θερμικής κάμερας. Ειδικά όταν οι μετρήσεις γίνονται σε εξωτερικό χώρο χρειάζεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια τροφοδότησης από τις μπαταρίες καθώς η παροχή ρεύματος από το δίκτυο είναι δύσκολή.

### Τιμή

Σημαντικό κριτήριο είναι και η τιμή του θερμογραφικού οργάνου ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, αφού συνήθως το κόστος μίας θερμικής κάμερας είναι αρκετά υψηλό.

## 3.2.2 ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ

Η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις είναι της εταιρίας FLIR systems και ανήκει στη σειρά bxx. Είναι εύκολη στον χειρισμό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως:

#### Προληπτική συντήρηση:

- Ηλεκτρικά συστήματα. Αναγνώριση υπερφόρτωσης κυκλώματος πριν συμβεί.
- Μηχανικά συστήματα. Αποτροπή μηχανικών προβλημάτων.
- Εφαρμογές γενικής χρήσης. Παρακολούθηση υποσταθμών, γραμμών μεταφοράς κλπ.

Επιστήμη κατασκευών:

- Στέγαση. Αναγνώριση και απομόνωση σημείων εισόδου νερού γρήγορα και άμεσα.
- Κτηριακό κέλυφος. Πραγματοποίηση ελέγχων υπέρυθρης ενέργειας.
- Εντοπισμός υγρασίας. Εντοπισμός της πηγής της υγρασίας και του μεγέθους της μούχλας.
- Αποκατάσταση. Αξιολόγηση της αποκατάστασης ενός χώρου ώστε να είμαστε σίγουροι ότι είναι εντελώς στεγνός.

Ερευνα και ανάπτυξη:

- Οπτικοποίηση και μέτρηση της παραγόμενης θερμότητας για την βελτίωση των προϊόντων και των διαδικασιών κατασκευής τους.

Διαδικασία ελέγχου:

- Έλεγχος και παρακολούθηση θερμοκρασιών σε πραγματικό χρόνο.



**Εικόνα 3.1.** Η θερμοκάμερα bxx series.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της κάμερας είναι:

- Οπτικό πεδίο (FOV) :  $25^{\circ} \times 25^{\circ}$
- Ελάχιστη εστιακή απόσταση : 0,12m



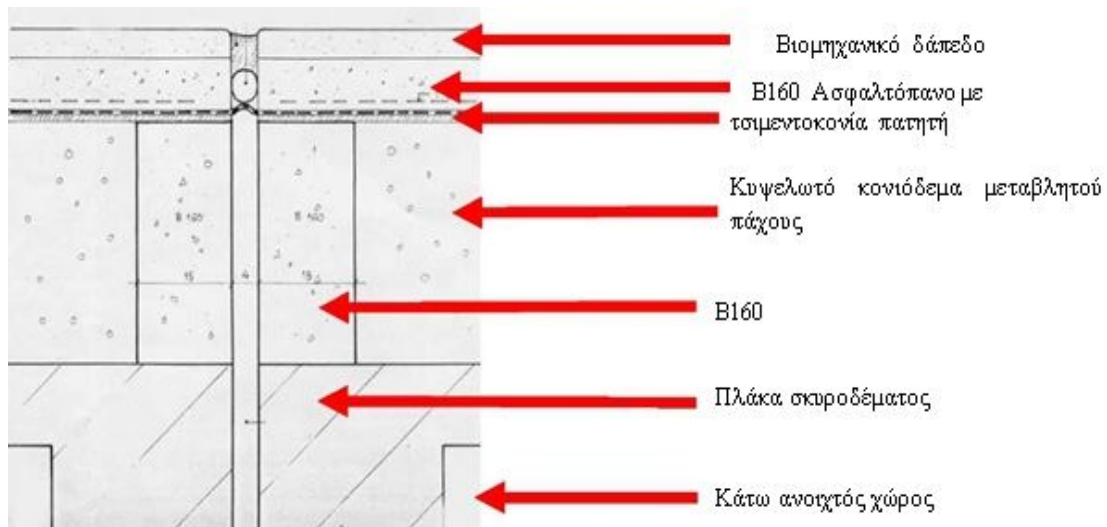
- Εστιακό μήκος : 10mm
- Χωρική ανάλυση (IFOV) : 3,12mrad
- Αριθμός F : 1,5
- Συχνότητα εικόνας : 9Hz
- Εστίαση : Χειροκίνητη

### 3.2.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥΝ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

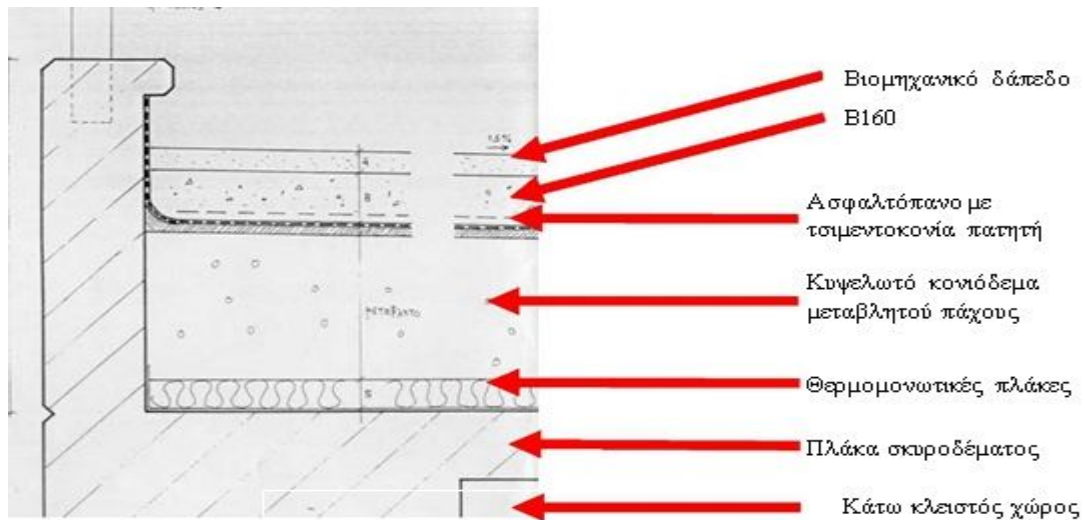
Η αρχική μελέτη των πλατειών προέβλεπε κατασκευή κτηρίων επάνω στις πλατείες για εξυπηρέτηση κοινού και φοιτητών. Η αρχικές μελέτες τροποποιήθηκαν και οι πλατείες διαμορφώθηκαν με βιομηχανικό δάπεδο. Όπως προκύπτει από την μελέτη εφαρμογής η τυπική διατομή των πλατειών περιλαμβάνει τα εξής υλικά (από κάτω προς τα πάνω):

1. Πλάκα σκυροδέματος
2. Κυψελωτό κονιόδεμα
3. Τσιμεντοκονία πατητή
4. Ασφαλτόπανο
5. Πλέγμα τύπου Δάρινγκ T131
6. B160
7. Βιομηχανικό δάπεδο

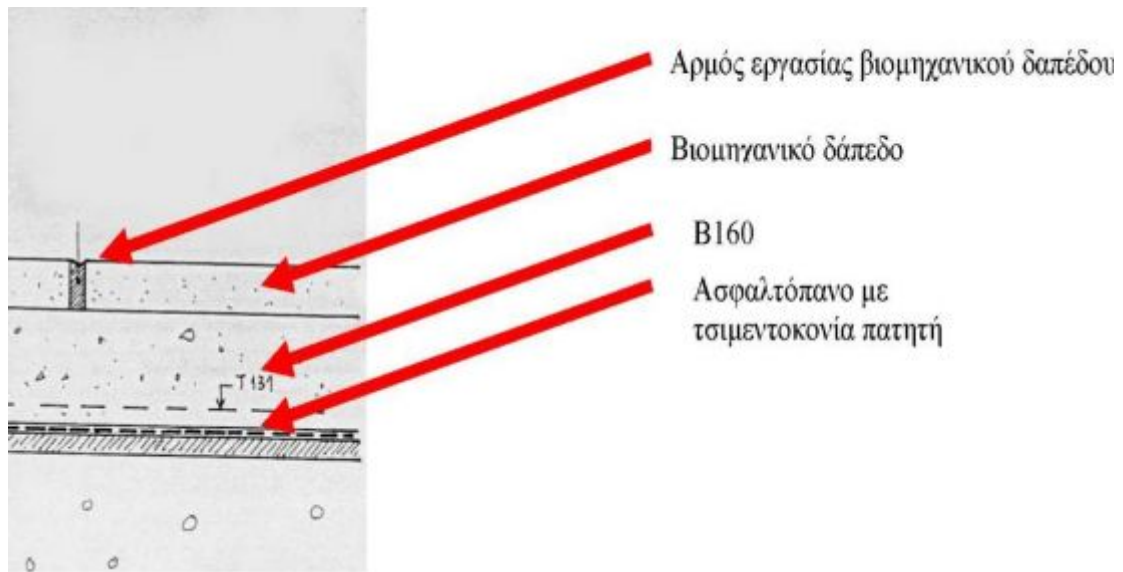
Τα υλικά από το κυψελωτό κονιόδεμα μέχρι το βιομηχανικό δάπεδο (2-7) ονομάζονται επιστρώσεις. Στους αρμούς εργασίας του βιομηχανικού δαπέδου έχει χρησιμοποιηθεί εποξειδική ρητίνη ενώ στους αρμούς διαστολής έχει χρησιμοποιηθεί κορδόνι πολυουρεθάνης βάσης τύπου T Ricomex με επικάλυψη μαστίχα τύπου T Ricomex. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι τομές των κατασκευαστικών λεπτομερειών.



Σχήμα 3.1. Τυπική τομή αρμού διαστολής και επιφάνειας επιστρώσεων

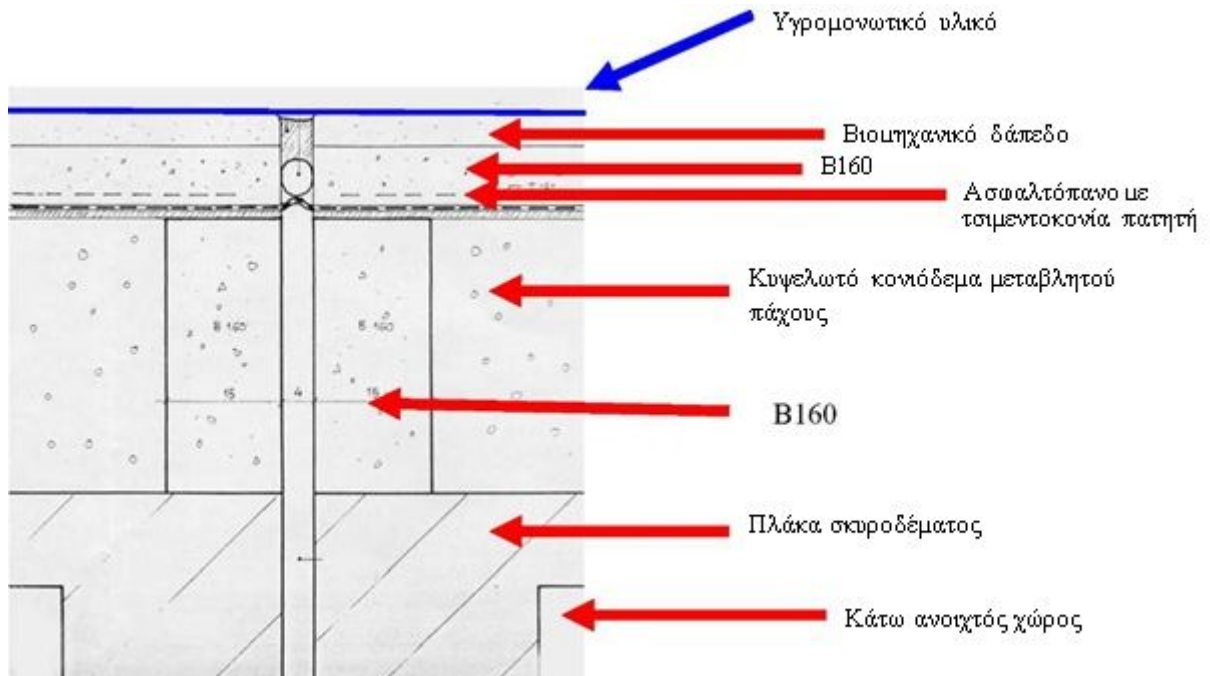


Σχήμα 3.2. Τυπική τομή ορίου επιστρώσεων των πλατειών



**Σχήμα 3.3.** Τυπική τομή αρμού εργασίας

Κατά τις χρονικές περιόδους 2000-2001 και 2001-2002 πραγματοποιήθηκαν επιστρώσεις σε συγκεκριμένα τμήματα των πλατειών για να προσφέρουν μόνωση. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η τυπική τομή αρμού διαστολής και επιφάνειας επιστρώσεων με υγρομονωτικό υλικό.



**Σχήμα 3.4.** Τυπική τομή αρμού διαστολής και επιφάνειας επιστρώσεων με υγρομονωτικό υλικό

### 3.2.4 ΛΗΨΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Για τη λήψη των θερμογραφικών εικόνων επιλέγει κατάλληλη ημέρα και ώρα ώστε τα αρχικά δεδομένα της μελέτης να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα. Λήψεις έγιναν σε όλα τα τμήματα των πλατειών τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν 27 τέτοια τμήματα και ελήφθησαν 87 θερμικές εικόνες.

Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ημερών που είχαν μέσες τιμές ηλιοφάνειας, υγρασίας και θερμοκρασίας κατά το μήνα Οκτώβριο.

Αναλυτικότερα οι λήψεις περιλαμβάνουν :

- 1) Φωτογραφικές εικόνες
- 2) Θερμογραφικές εικόνες γύρω κτιρίων
- 3) Θερμογραφικές εικόνες υπό κλίση για την ευρύτερη αποτύπωση των υπό μελέτη δομικών στοιχείων ώστε να γίνει αντιληπτή από τον παρατηρητή η ύπαρξη ή όχι εκπομπών και η έκτασή τους.
- 4) Θερμογραφικές εικόνες με όσο το δυνατόν μηδενική κλίση ώστε να αναλυθούν και να μετρηθεί η έκταση της βλάβης στο υπολογιστικό μέρος.
- 5) Τέλος, μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων ώστε να χρησιμοποιηθούν κατά το υπολογιστικό μέρος.

### 3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η ενεργητική θερμογραφία είναι μια προσέγγιση που απαιτεί αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας. Οι θερμικές εικόνες, που θα υποστούν επεξεργασία, προέρχονται από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις πλατείες της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Πρώτο μέλημα είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη θερμογραφική αποτύπωση των υπό μελέτη επιφανειών. Αυτές οι εικόνες θα υποστούν ψηφιακή επεξεργασία με απώτερο στόχο να προκύψουν συμπεράσματα από την θερμογραφική διαδικασία. Επίσης, μετά τη λήψη των θερμικών εικόνων χρησιμοποιήθηκε το ειδικό θερμογραφικό λογισμικό FLIR QuickReport 1.2 SP1 για να βελτιωθεί η θερμική απεικόνιση και να αφαιρεθούν οποιαδήποτε επιπρόσθετα στοιχεία μέτρησης που θα επηρέαζαν την επεξεργασία εικόνας.

Το ειδικό λογισμικό που αναπτύχθηκε για το στάδιο επεξεργασίας εικόνας ονομάζεται ThermoCalc. Η ανάλυση περιορίζεται στο χρωματικό μοντέλο RGB (Red, Green, Blue). Οι τρεις συνιστώσες που θα εξεταστούν είναι το κόκκινο χρώμα (red), το πράσινο χρώμα (green) και το μπλε χρώμα (blue).

Τα pixel τα οποία μας ενδιαφέρουν είναι αυτά που έχουν αποχρώσεις κόκκινου έως άσπρο. Για να τα ορίσουμε θα πρέπει να γνωρίζουμε τις τιμές ή τις αναλογίες κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος που συνθέτουν τον τελικό χρωματισμό τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CorelDRAW Graphics Suite X5 όπου με δειγματοληψία ικανού αριθμού pixel διαπιστώθηκε ότι τα εύρη τιμών για το κόκκινο πρέπει να είναι 210-255, για το πράσινο 0-255 και για το μπλε 0-255.

Το πρόγραμμα ThermoCalc το οποίο συντάχθηκε σε περιβάλλον java και συγκεκριμένα στο Netbeans IDE 7.1.1 αποτελείται από 2 αρχεία κώδικα (source code), το pixel και το ThermoCalc. Το αρχείο pixel αναγνωρίζει και ταυτοποιεί χρωματικά κάθε pixel και συγκρίνει pixel μεταξύ τους. Το αρχείο ThermoCalc διαβάζει όλα τα pixel, σχηματίζει εικόνα από το κατ επιλογήν ορθογώνιο, υπολογίζει την επιφάνεια που τα pixel είναι κόκκινα, δημιουργεί μία νέα εικόνα όπου τονίζονται με κόκκινο τα σημεία ενδιαφέροντος και με μπλε όλα τα υπόλοιπα και υπολογίζει την επιφάνεια με υψηλή θερμοκρασία.

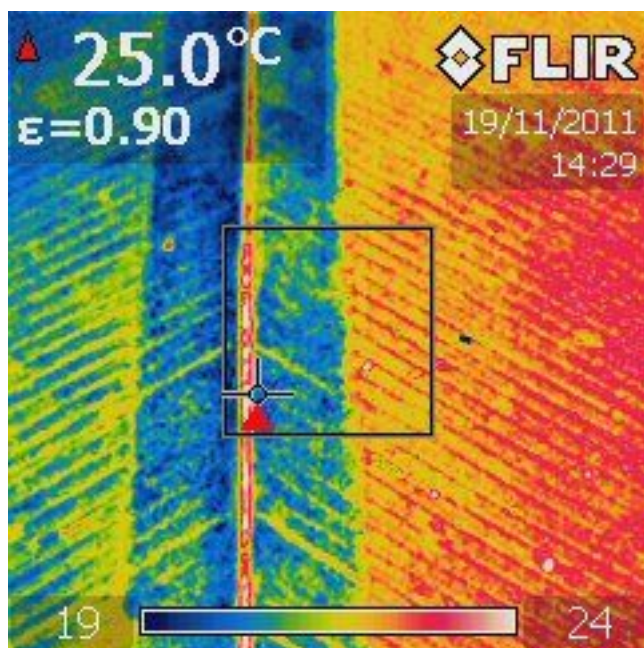
### 3.3.1 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία εκτέλεσης του προγράμματος είναι αρκετά εύκολη για οποιονδήποτε χρήστη. Αρχικά, ανοίγοντας το αρχείο ThermoCalc (με την προϋπόθεση ότι έχουμε αρχείο το εκτελέσιμο αρχείο jre-7u7-windowsi586.exe) επιλέγουμε την εικόνα που επιθυμούμε να επεξεργαστούμε. Στη συνέχεια, επιλέγουμε από μία έτοιμη πλατφόρμα της java το χρωματικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε, στην προκειμένη περίπτωση το RGB, και θέτουμε τα όρια που θέλουμε να κινούνται τα δομικά χρώματα των pixels. Έχουν ήδη επιλεγεί οι αρχικές τιμές (default) των χρωμάτων αυτές που προαναφέρθηκαν (210-0-0).

Ακολούθως, επιλέγουμε το πραγματικό εμβασό της υπό μελέτη εικόνας και εμφανίζονται 2 εικόνες στην οθόνη, η θερμική εικόνα που έχουμε επιλέξει και η επεξεργασμένη εικόνα στο κάτω μέρος της οποίας αναγράφεται το πραγματικό εμβασό της περιοχής με υψηλή θερμοκρασία. Στο στάδιο αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαγράψει χειροκίνητα μια συγκεκριμένη περιοχή και να λάβει ανάλογα αποτελέσματα στο κάτω μέρος της επεξεργασμένης εικόνας.

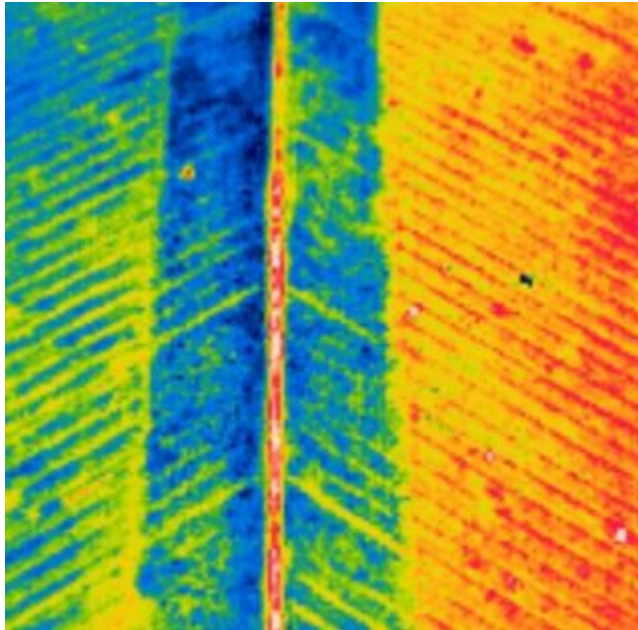
### 3.3.2 Εφαρμογή της διαδικασίας επεξεργασίας εικόνας

Βήμα 1<sup>ο</sup> : Επιλέγουμε τη θερμική εικόνα

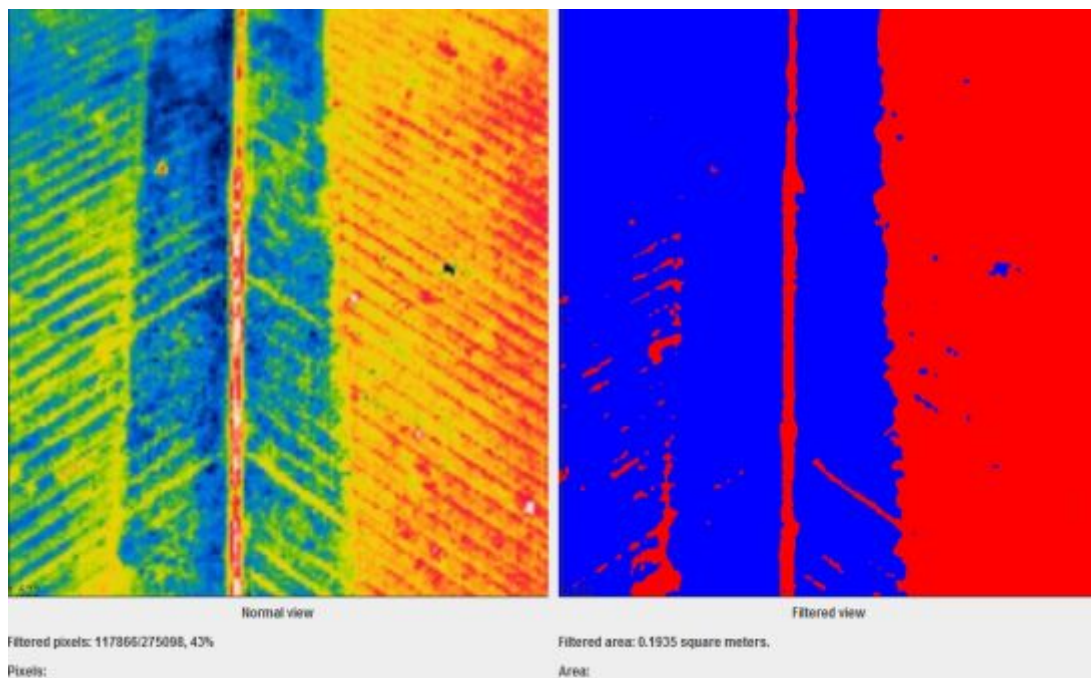




Βήμα 2<sup>ο</sup> : Χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα FLIR QuickReport 1.2 SP1 για να την «καθαρίσουμε».



Βήμα 3<sup>ο</sup> : Επεξεργάζομαστε την εικόνα πραγματικού εμβαδού 0,45m με το ThermoCalc και έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 4.1 Προκαταρκτικές πληροφορίες για τις μετρήσεις

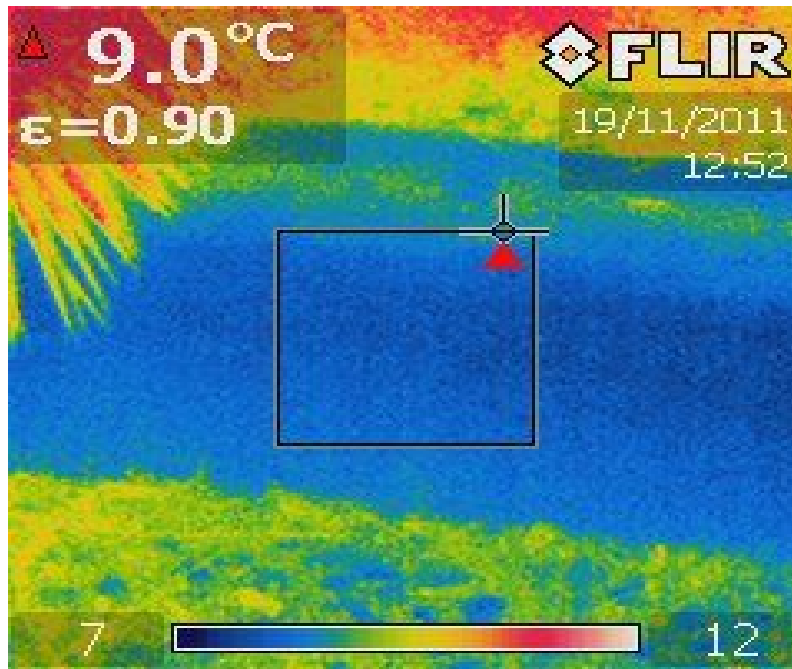
Από τις ληφθείσες θερμικές εικόνες σε συνδυασμό με την οπτική τους απεικόνιση εξάγονται συμπεράσματα για την κατάσταση των δομικών στοιχείων των πλατειών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται τα πιο χαρακτηριστικά σημεία που μετρήθηκαν και η επεξεργασμένη απεικόνιση τους.

### 4.2 Αναλυτική παρουσίαση μετρήσεων ανά σημείο

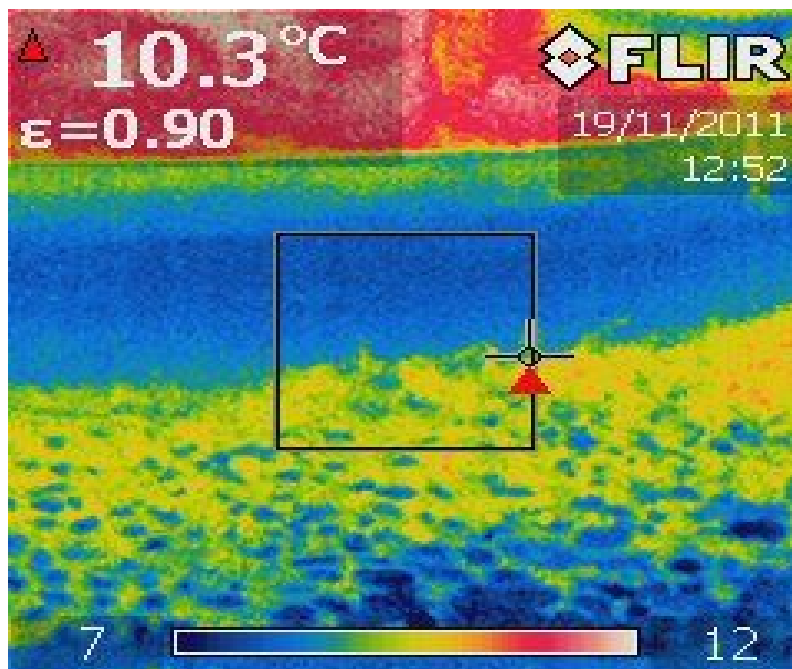
#### 4.2.1 Σημείο μέτρησης 1



**Εικόνα 4.1.** Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1

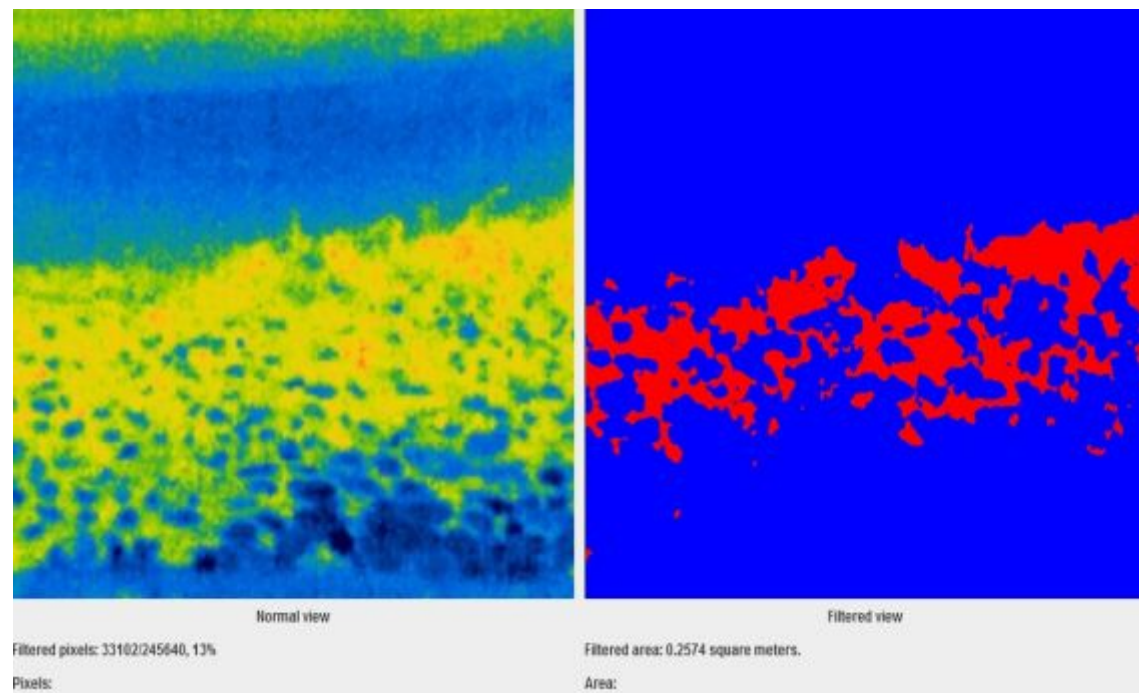


Εικόνα 4.1.1.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1



Εικόνα 4.1.2.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 1 (δάπεδο-πεζούλι)





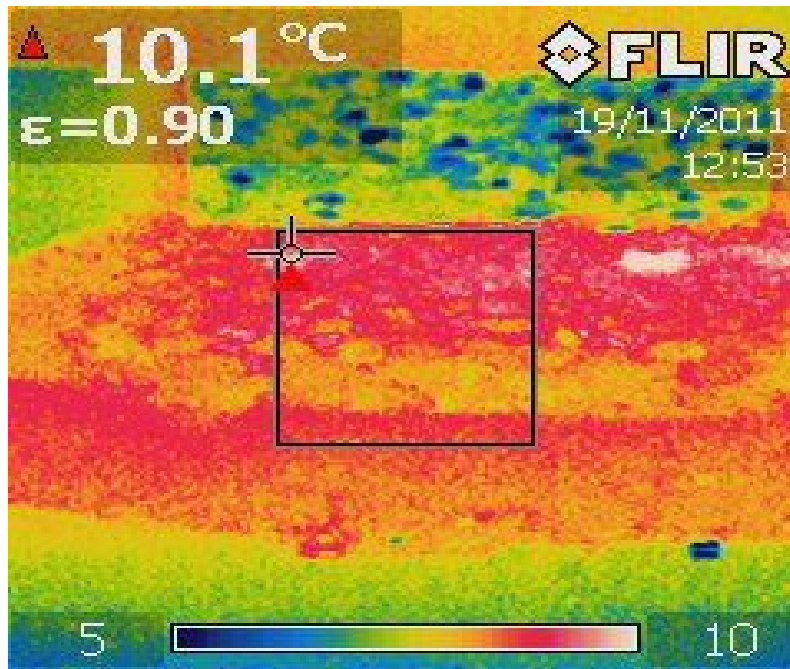
**Εικόνα 4.1.2. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 1 διαπιστώνεται ότι το σημείο 1 είναι αρκετά δροσερό και συνεπώς θερμικά άνετο για τους χρήστες.

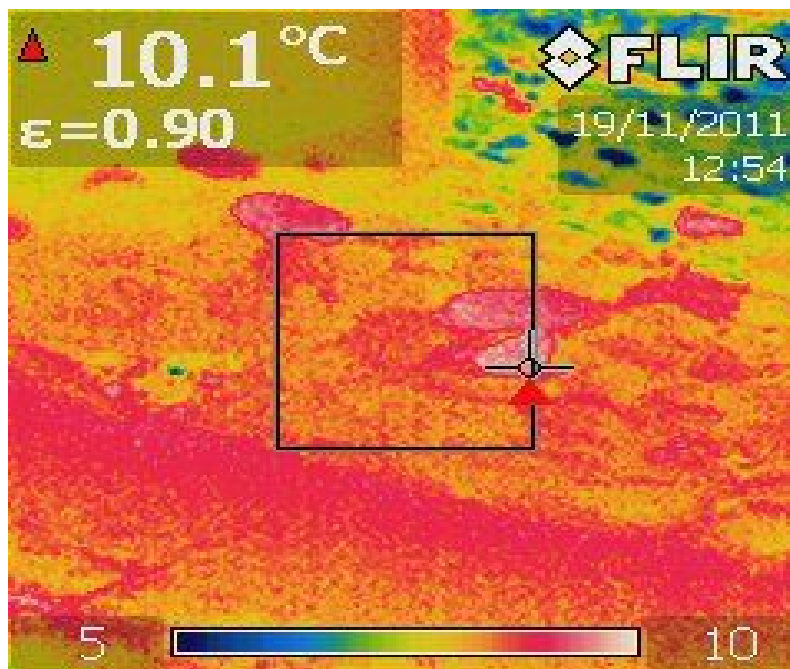
#### 4.2.2 Σημείο μέτρησης 2



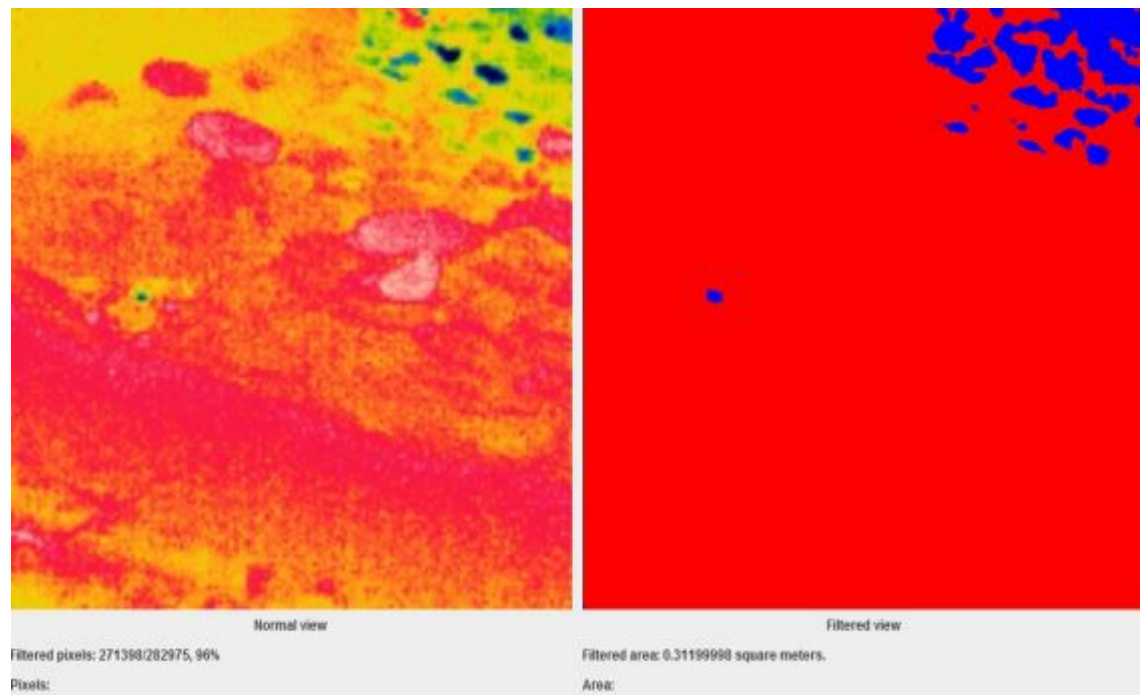
**Εικόνα 4.2.** Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2



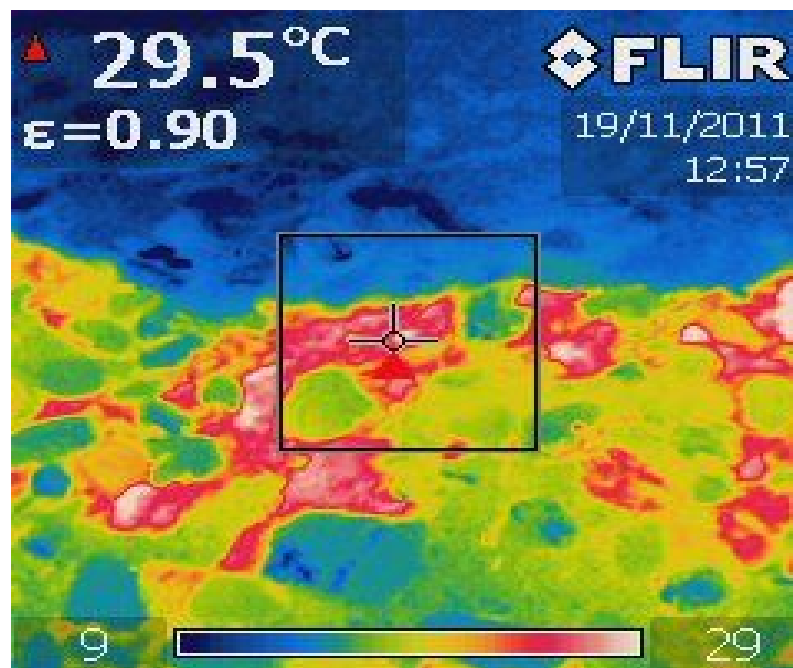
Εικόνα 4.2.1.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2



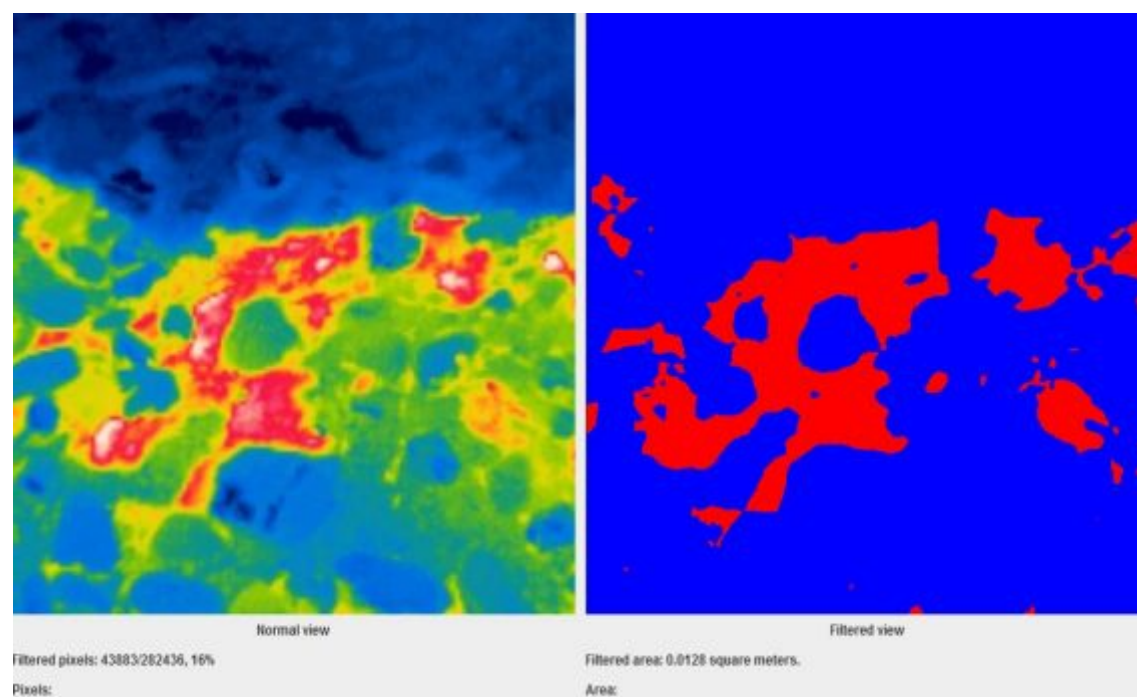
Εικόνα 4.2.2.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2 (λεπτομέρεια)



Εικόνα 4.2.2. Thermocalc



Εικόνα 4.2.3. THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 2 (λεπτομέρεια-δάπεδο)



**Εικόνα 4.2.3. Thermocalc**

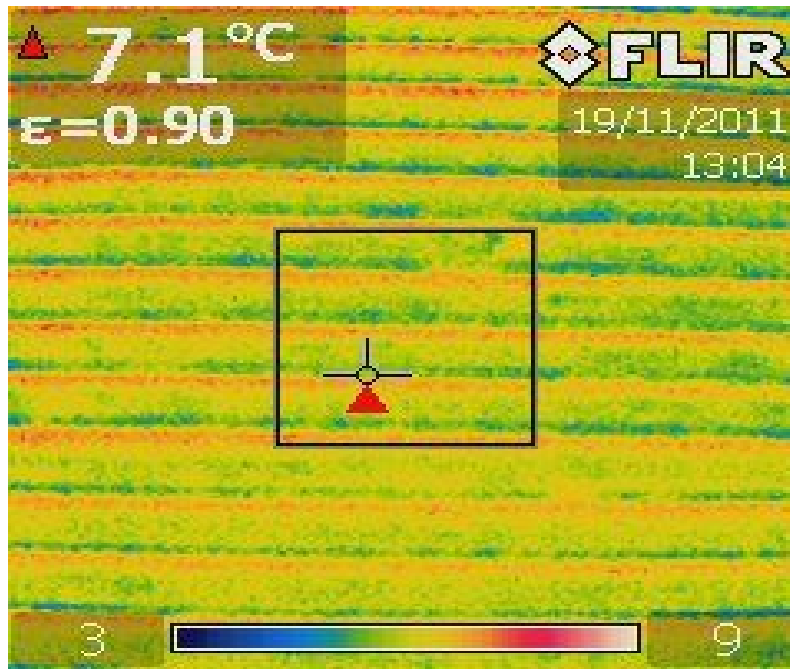
Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 2 είναι εμφανής η φθορά των καθισμάτων και του δαπέδου.

#### 4.2.3 Σημείο μέτρησης 3

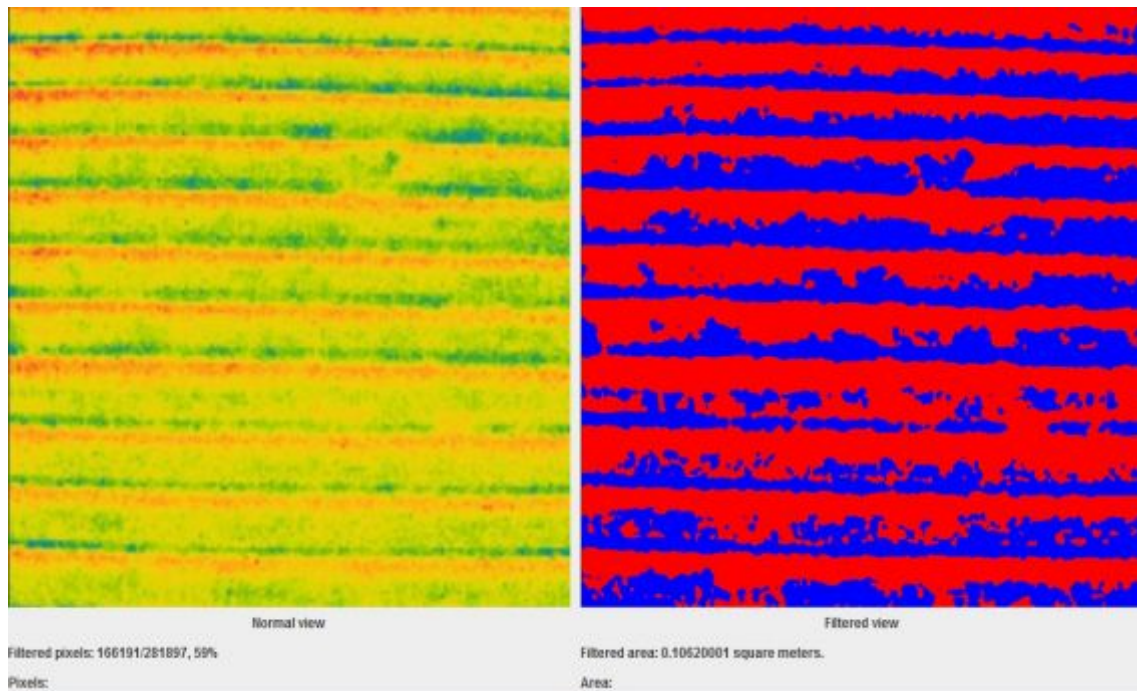


**Εικόνα 4.3. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 3**





Εικόνα 4.3.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 3



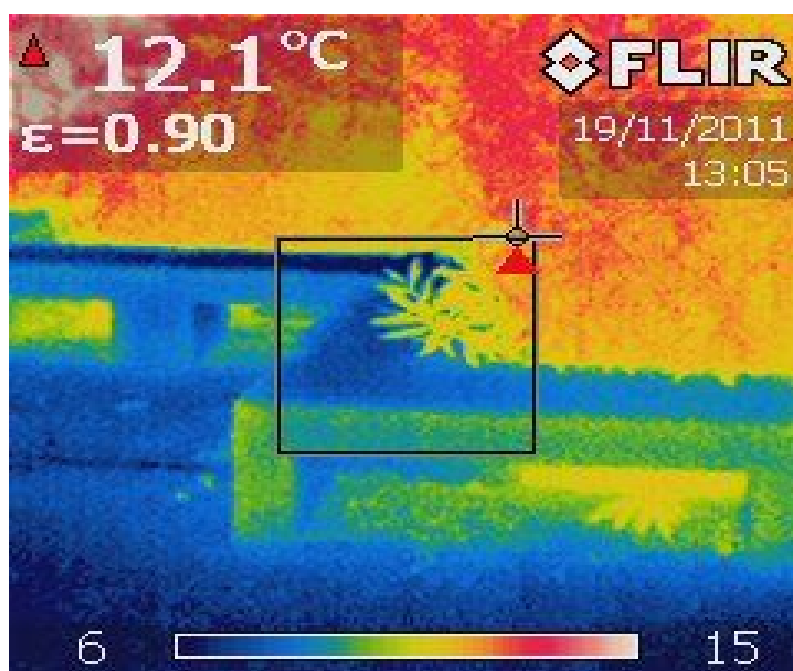
Εικόνα 4.3.Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 3 είναι εμφανής η φθορά στους αρμούς συστολής στο δάπεδο.

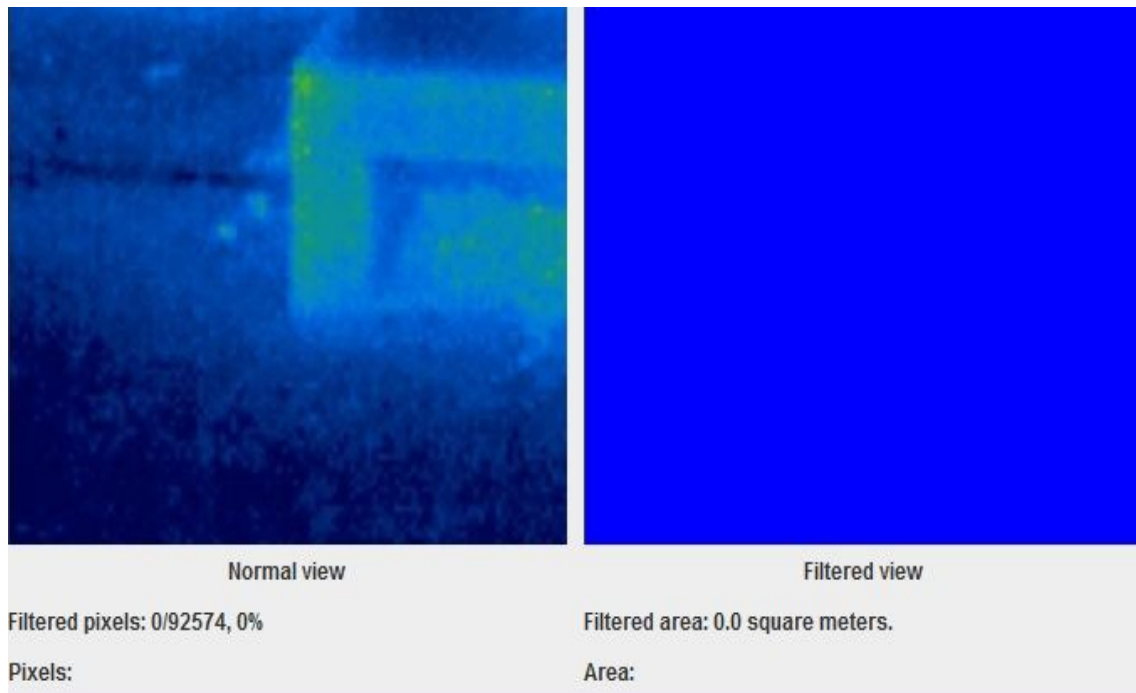
## 4.2.4 Σημείο μέτρησης 4



Εικόνα 4.4. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 4



Εικόνα 4.4.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 4



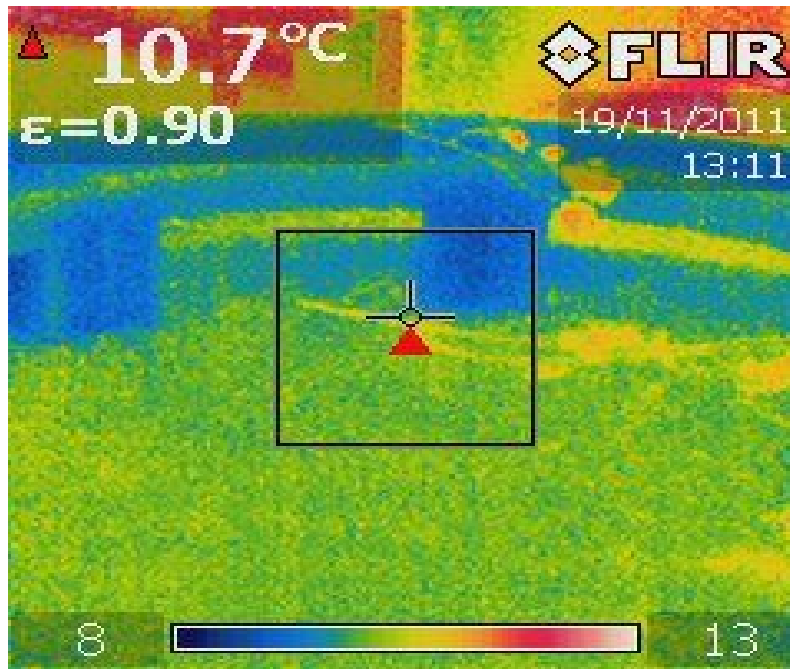
**Εικόνα 4.4. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 4 διαπιστώνεται ότι στις θέσεις όπου υπάρχει βλάστηση η θερμική άνεση των χρηστών είναι σημαντικά αυξημένη σε αντίθεση με περιπτώσεις όπως το σημείο μέτρησης 3.

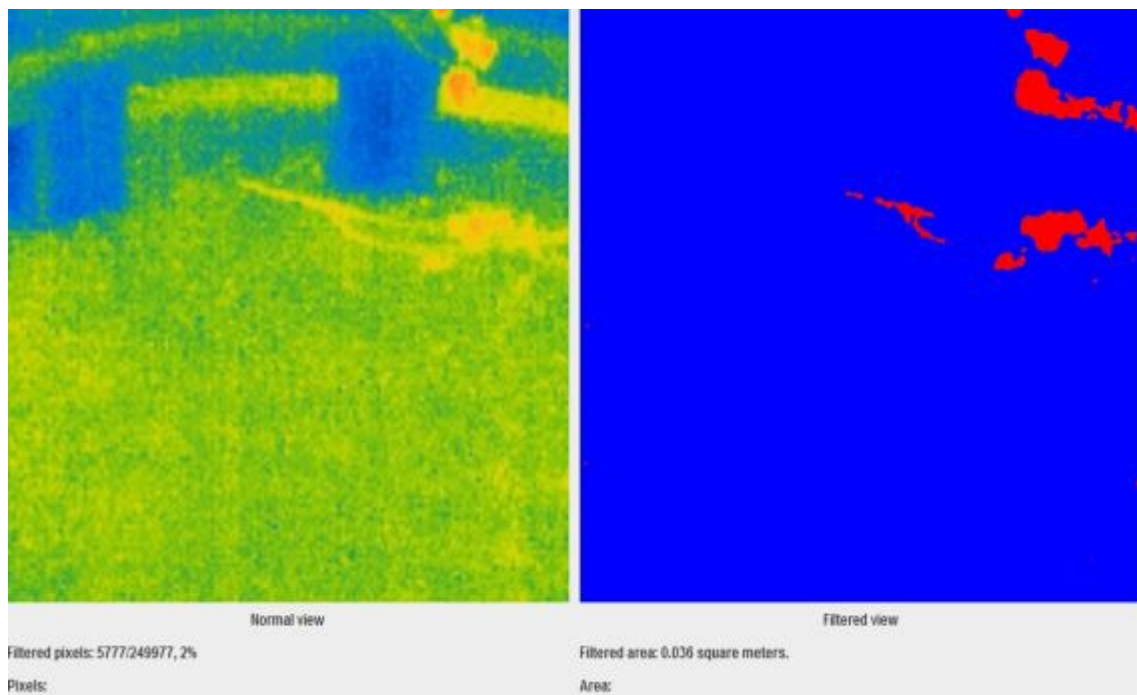
#### 4.2.5 Σημείο μέτρησης 5



**Εικόνα 4.5. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 5**



Εικόνα 4.5.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 5



Εικόνα 4.5.Thermocalc

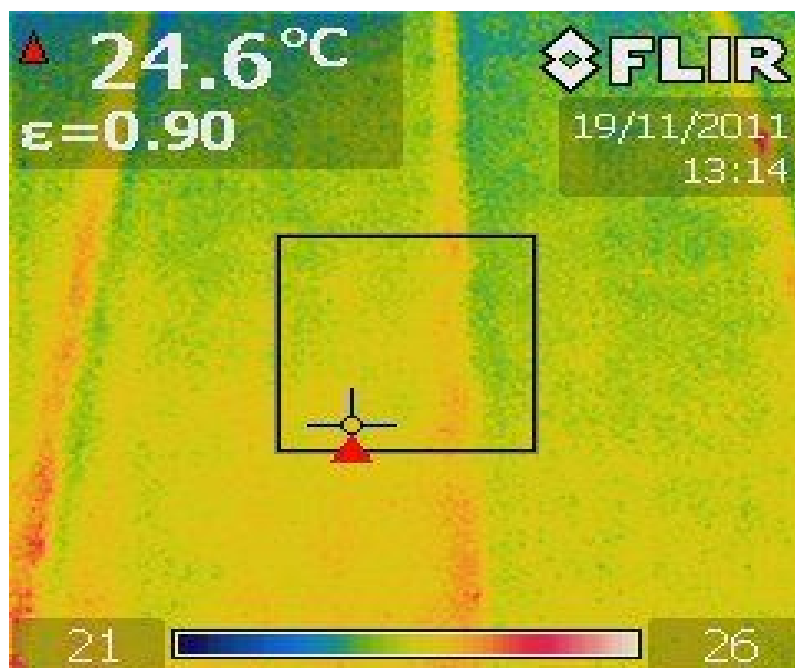
Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 5 διαπιστώνεται και πάλι ότι στις θέσεις όπου υπάρχει βλάστηση η θερμική άνεση των χρηστών είναι σημαντικά αυξημένη.



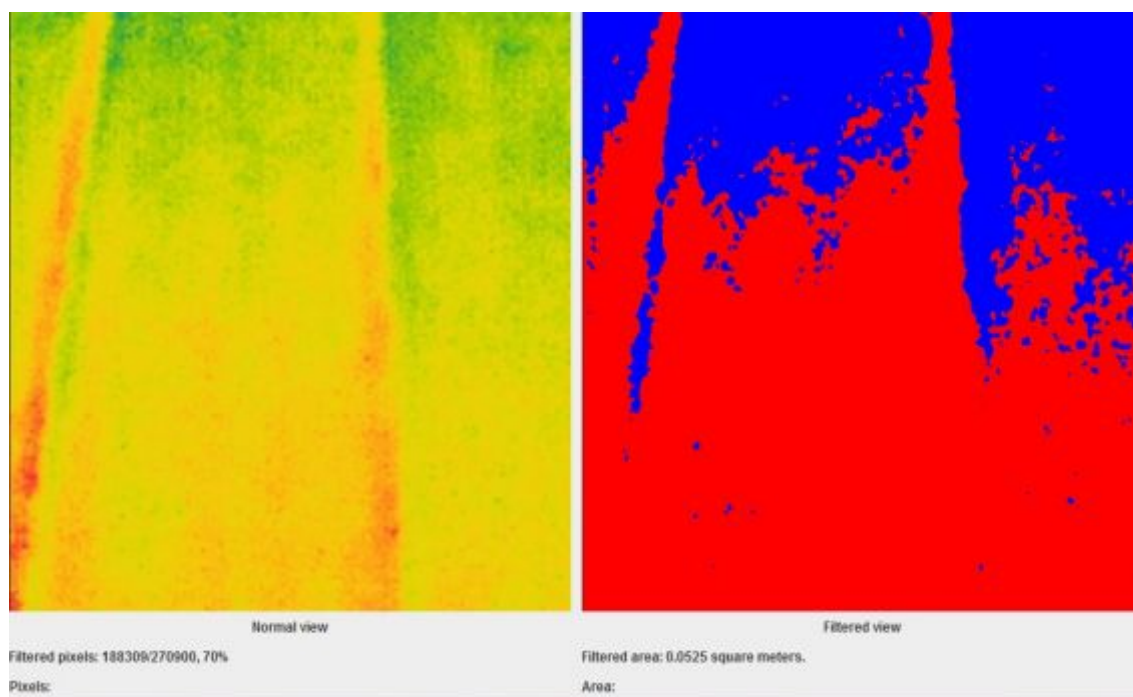
## 4.2.6 Σημείο μέτρησης 8



Εικόνα 4.8. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 8



Εικόνα 4.8.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 8



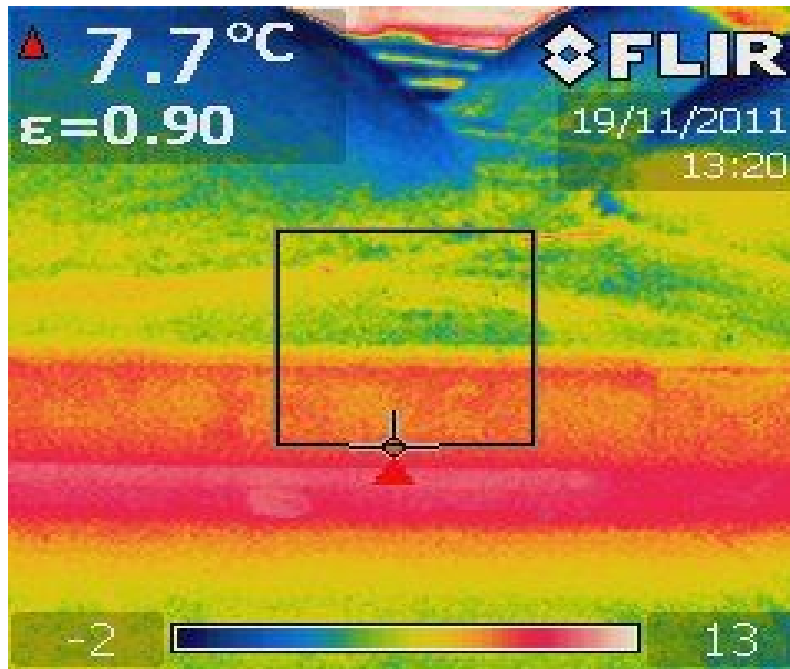
**Εικόνα 4.8. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 8 διαπιστώνεται σημαντική απώλεια στους αρμούς διαστολής του δαπέδου.

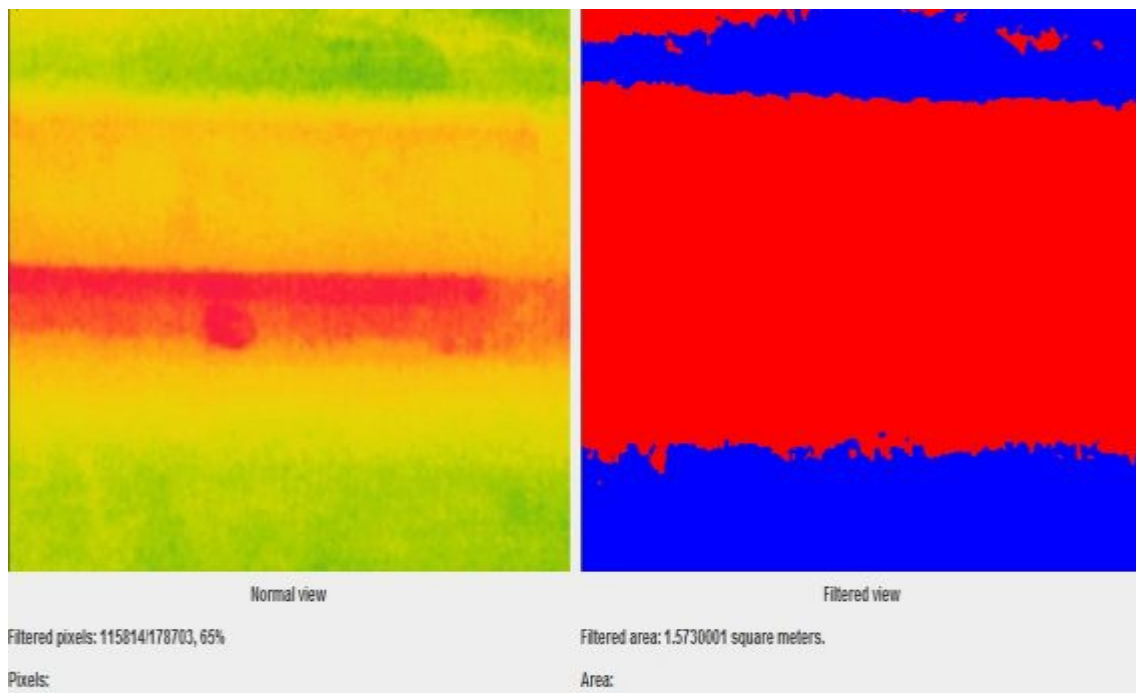
#### 4.2.7 Σημείο μέτρησης 9



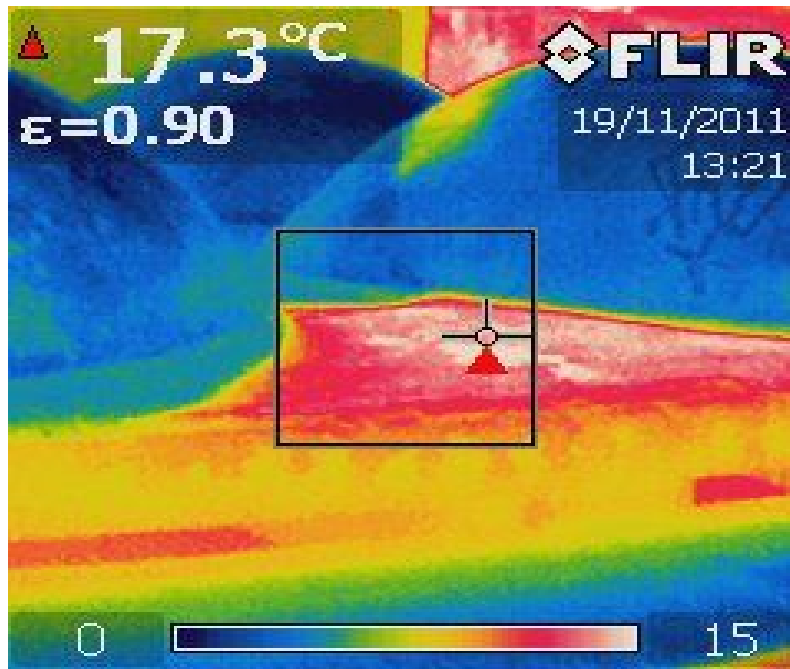
**Εικόνα 4.9.** Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 9



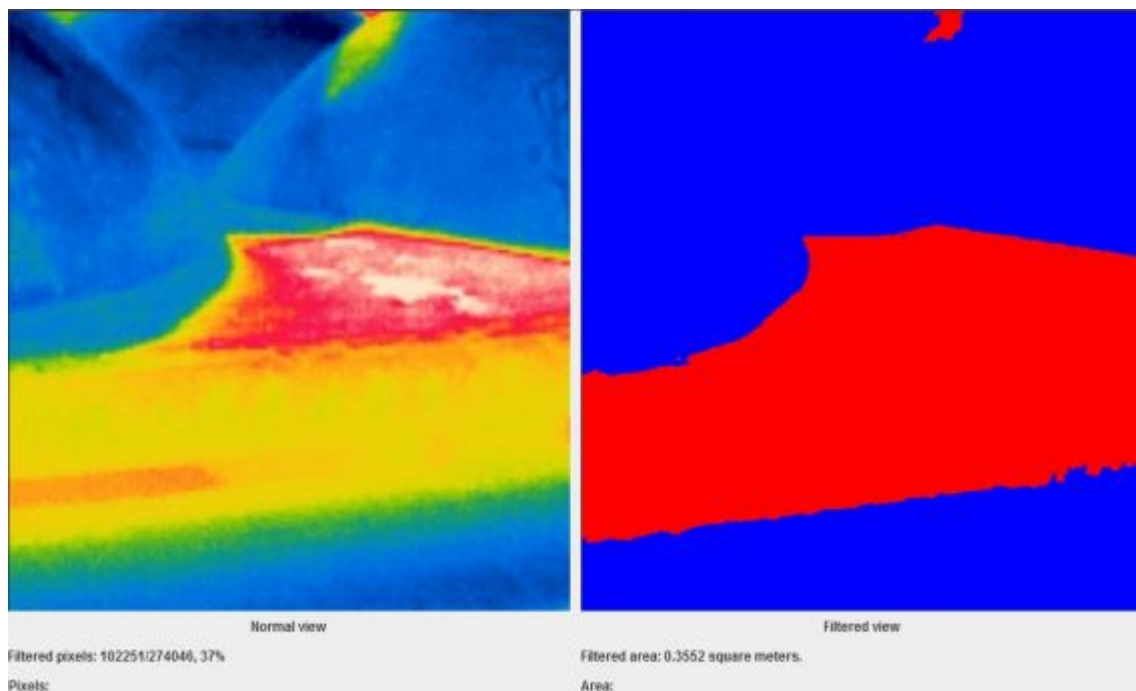
Εικόνα 4.9.1.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 9 (βόρεια όψη)



Εικόνα 4.9.1.Thermocalc



Εικόνα 4.9.2.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 9 (νότια όψη)



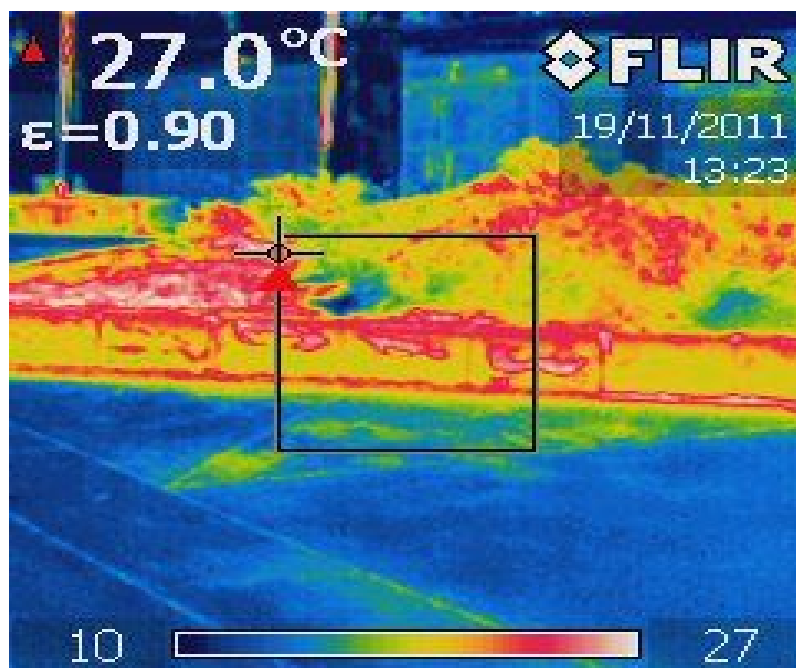
Εικόνα 4.9.2.Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 9 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή έδρασης των ημισφαιρίων και στη γειτνίαση της έδρασης με το δάπεδο της πλατείας.

## 4.2.8 Σημείο μέτρησης 10

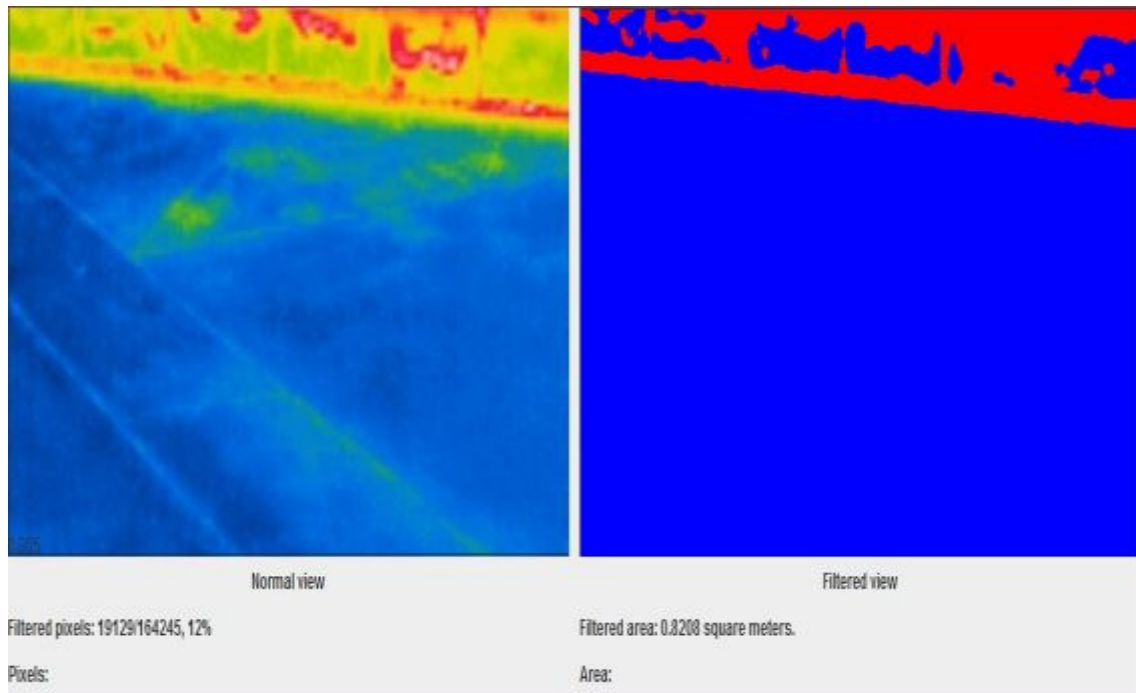


Εικόνα 4.10.Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 10



Εικόνα 4.10.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 10





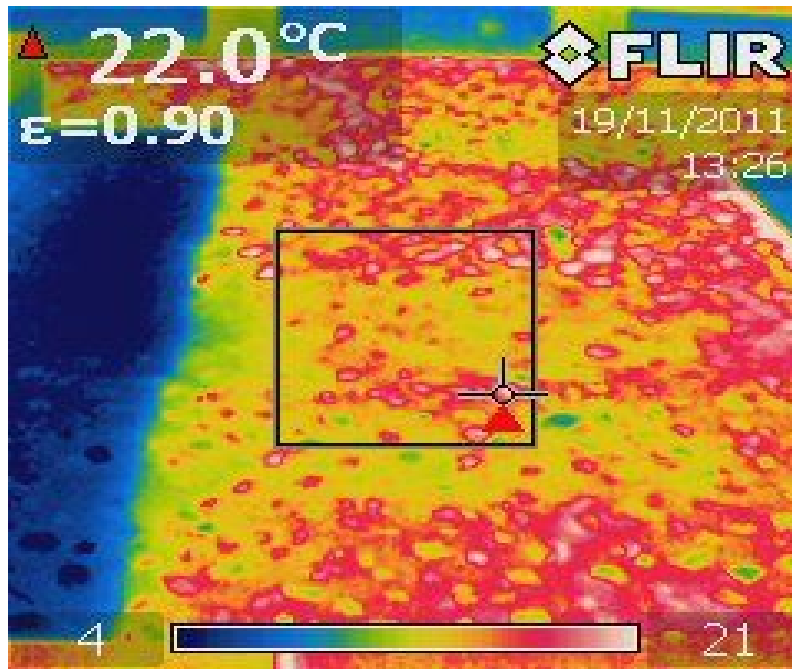
**Εικόνα 4.10. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 10 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στο σημείο αυτό λόγω της έλλειψης σκίασης στο συγκεκριμένο σημείο.

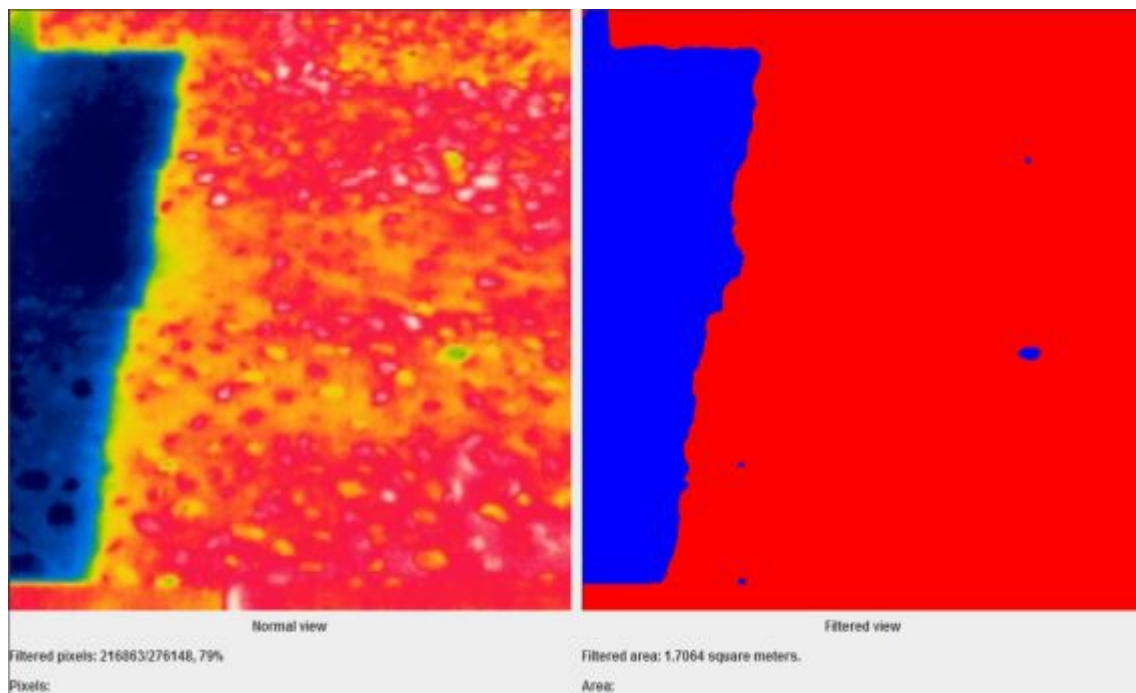
#### 4.2.9 Σημείο μέτρησης 12



**Εικόνα 4.12. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 12**



Εικόνα 4.12.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 12



Εικόνα 4.12.Thermocalc

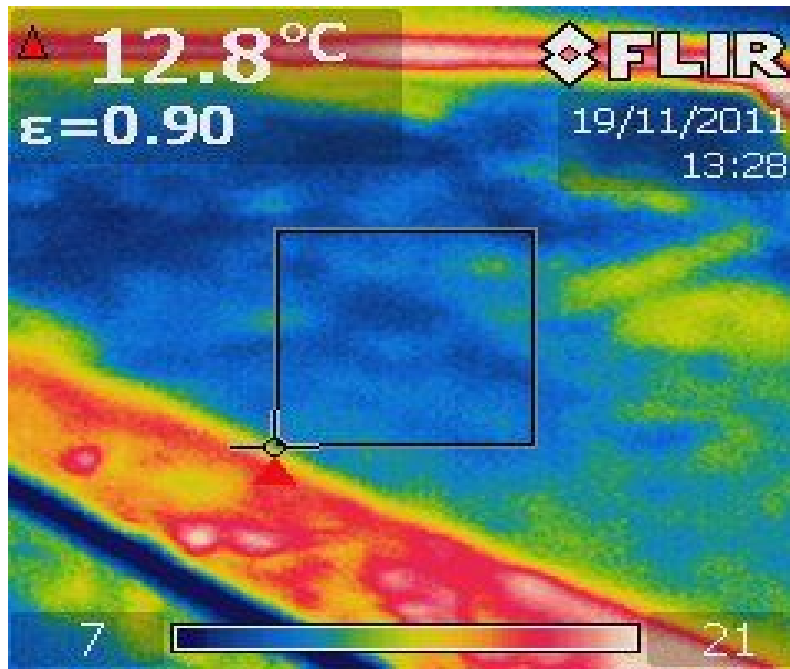
Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 12 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στο δάπεδο λόγω του υλικού κατασκευής του.

#### 4.2.10 Σημείο μέτρησης 13

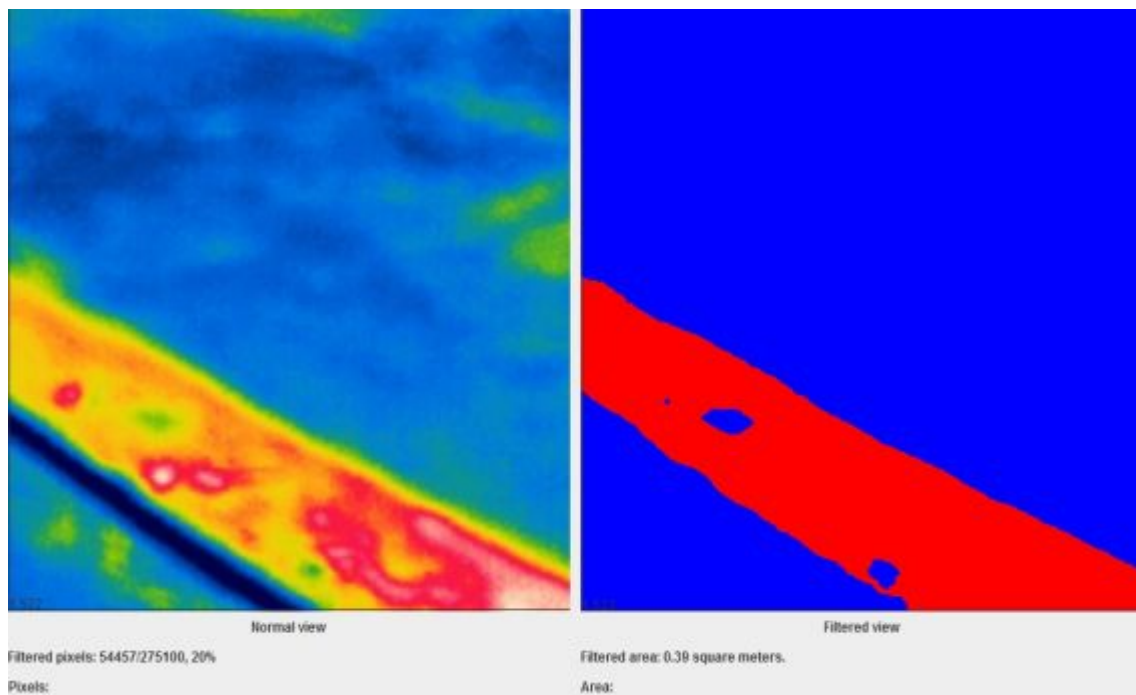


Εικόνα 4.13. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 13





Εικόνα 4.13.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 13



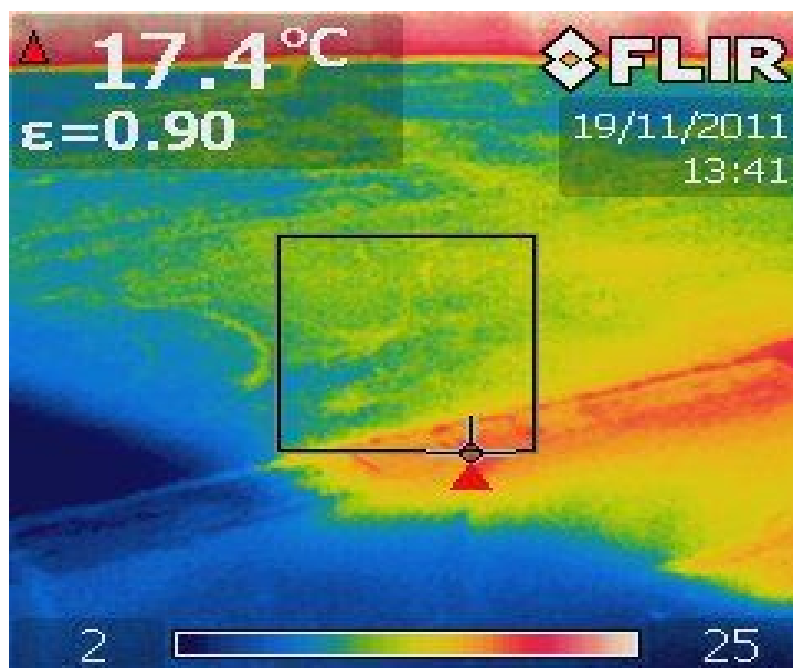
Εικόνα 4.13.Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 13 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες περιμετρικά της περιοχής λόγω της συσσώρευσης υγρασίας.

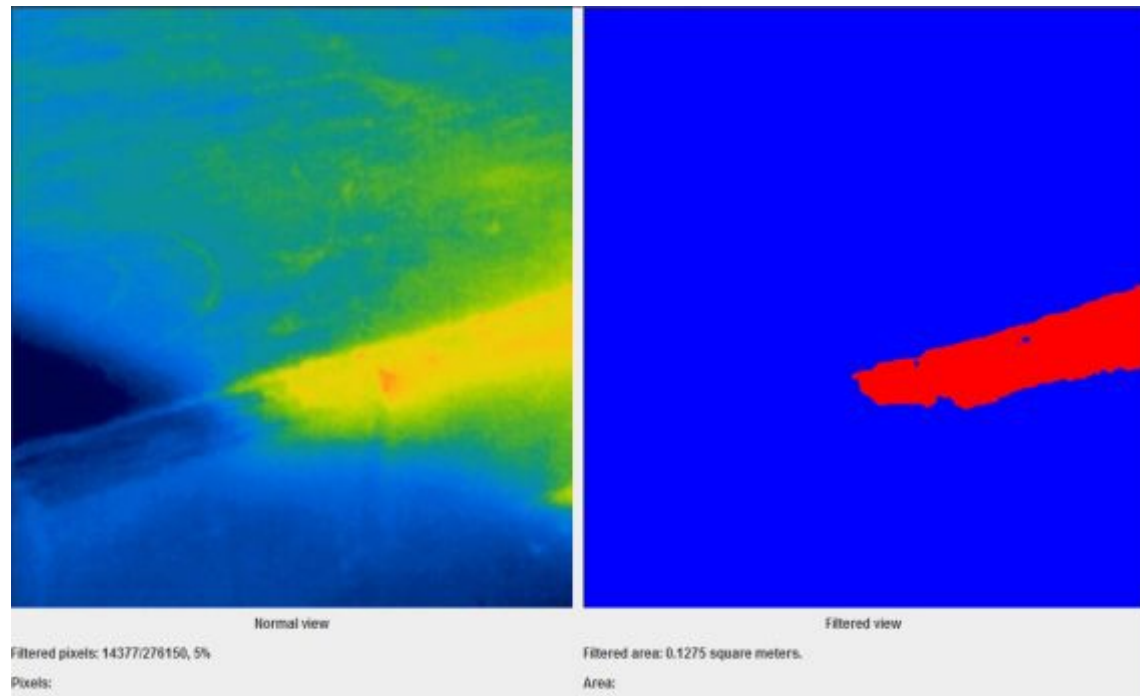
## 4.2.11 Σημείο μέτρησης 18



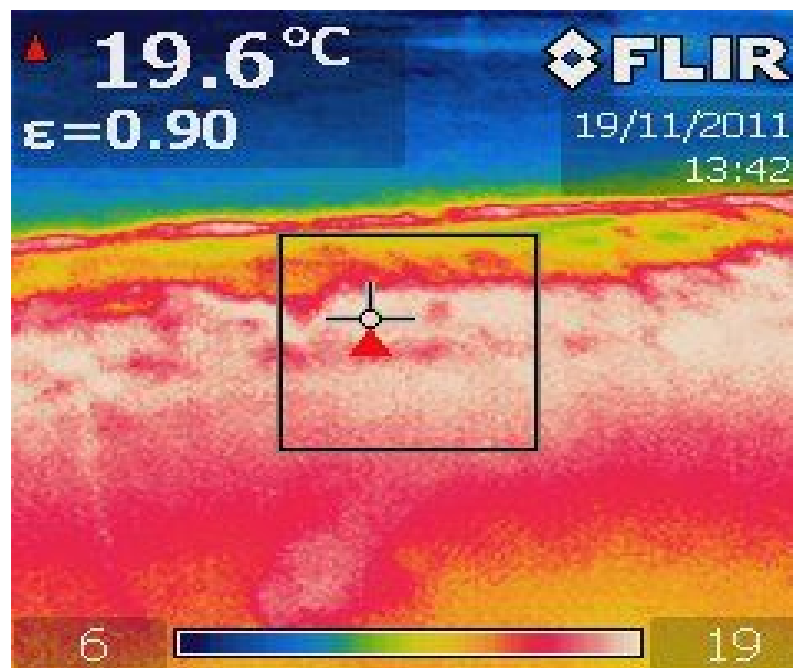
Εικόνα 4.18. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18



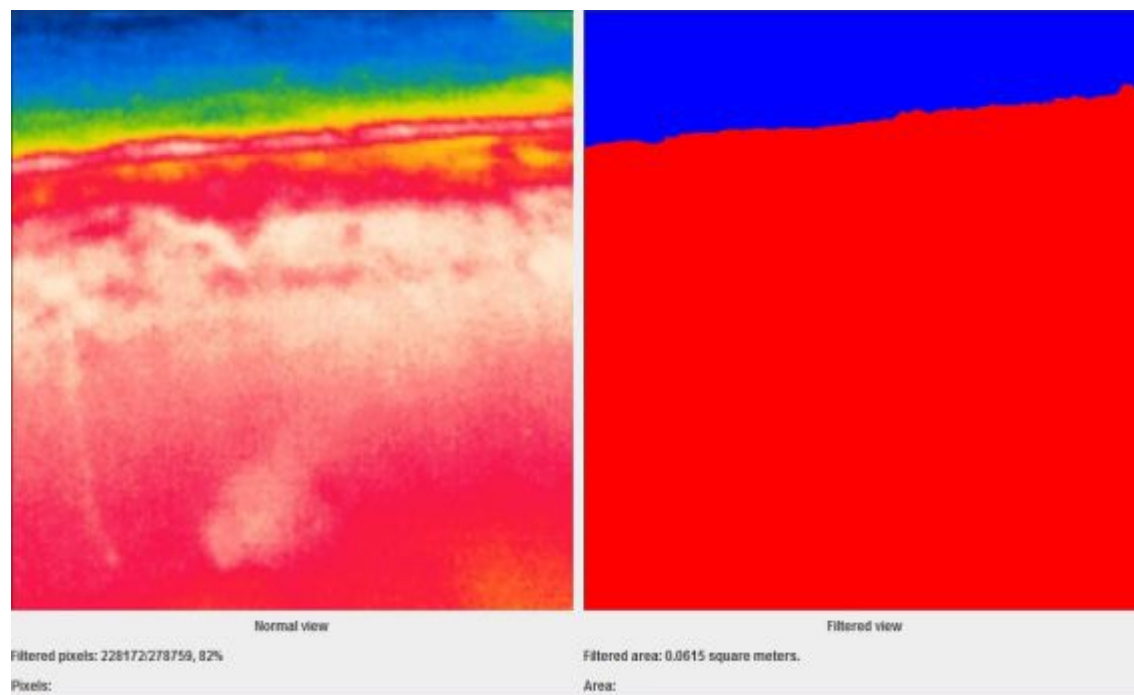
Εικόνα 4.18.1.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18



Εικόνα 4.18.1. Thermocalc



Εικόνα 4.18.2. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 18 (λεπτομέρεια)



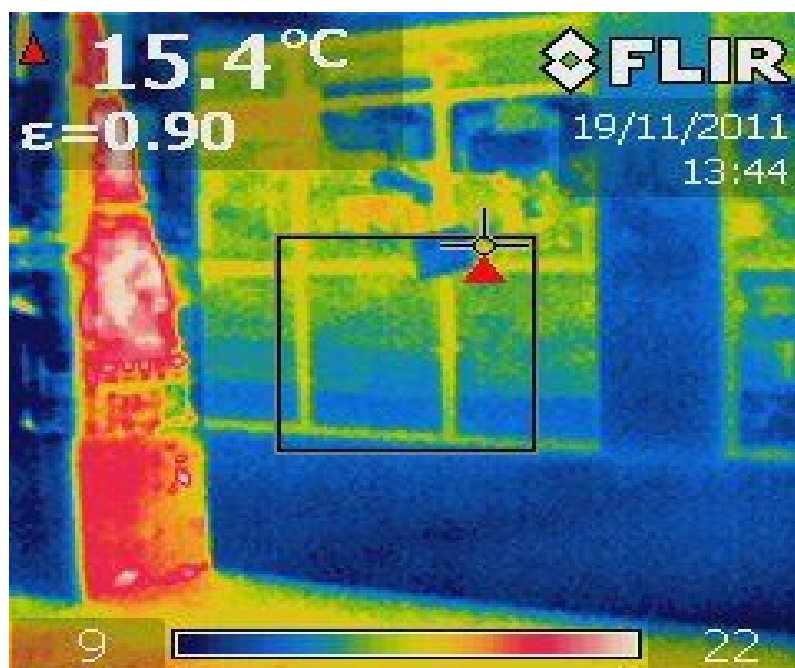
**Εικόνα 4.18.2. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 18 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στο τμήμα της περιοχής που έχει φθαρεί. Επίσης είναι εμφανής η διαφορά θερμοκρασίας του δομικού υλικού μεταξύ εκτεθειμένου και μη εκτεθειμένου στον ήλιο τμήματος.

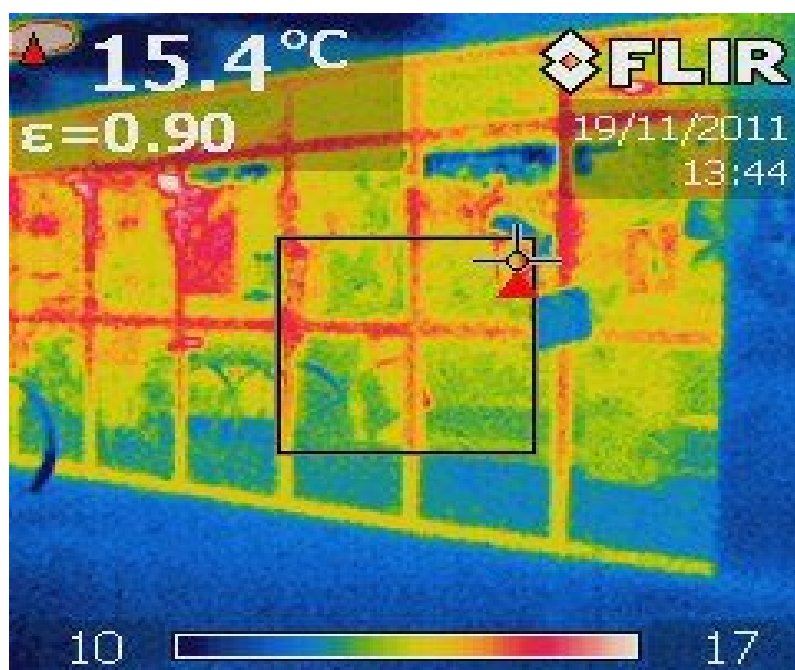
#### 4.2.12 Σημείο μέτρησης 19



**Εικόνα 4.19. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19**



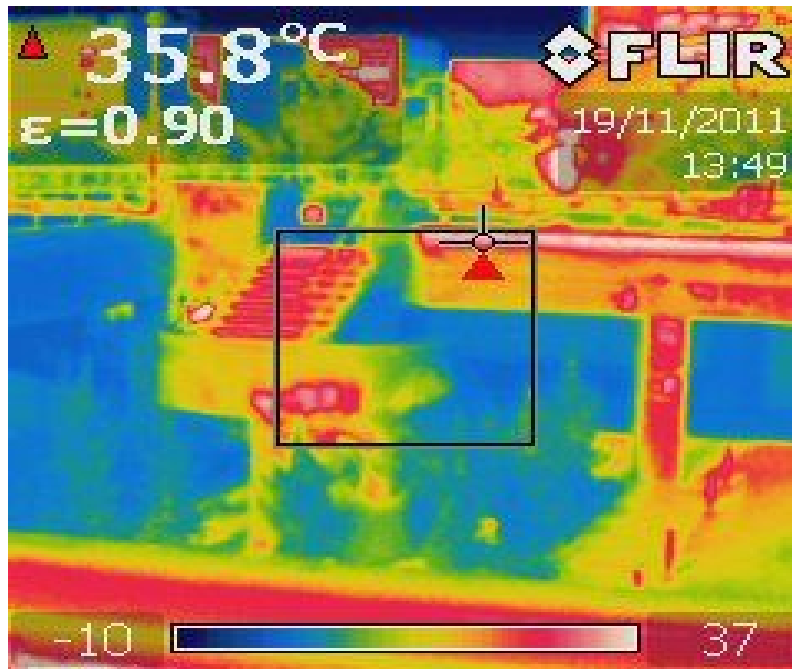
Εικόνα 4.19.1.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19



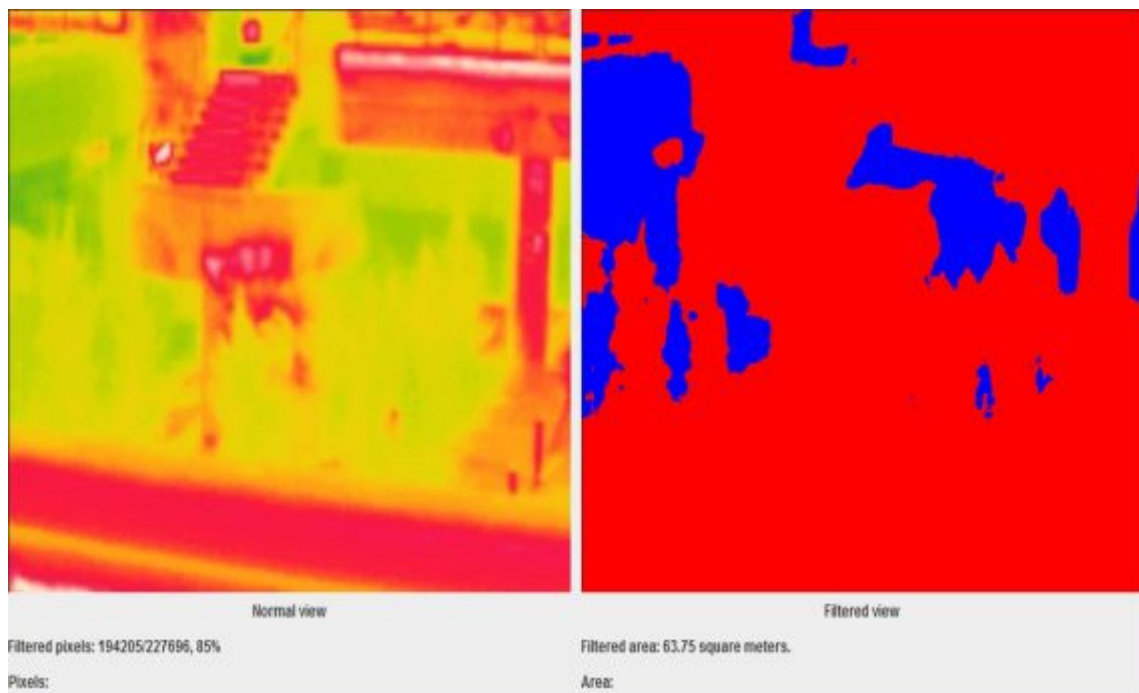
Εικόνα 4.19.2.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 19



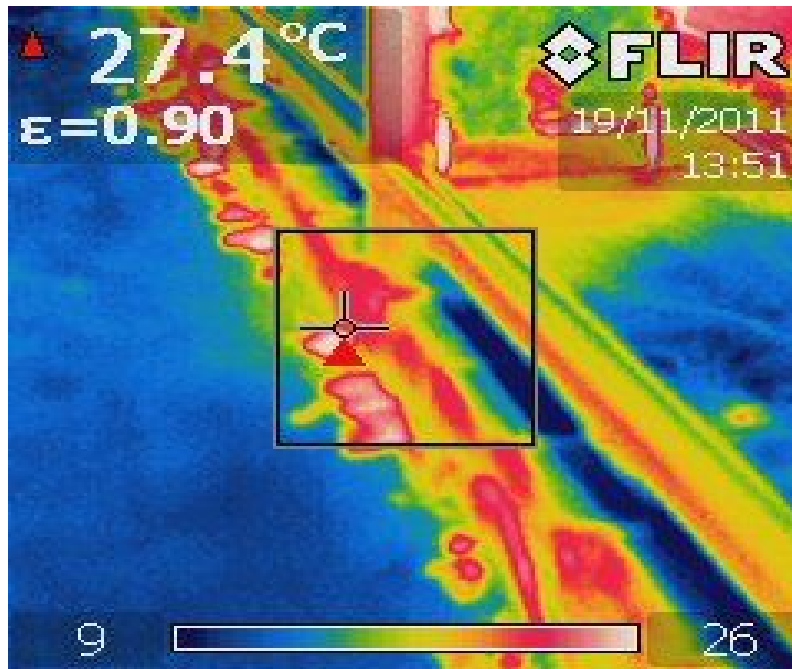




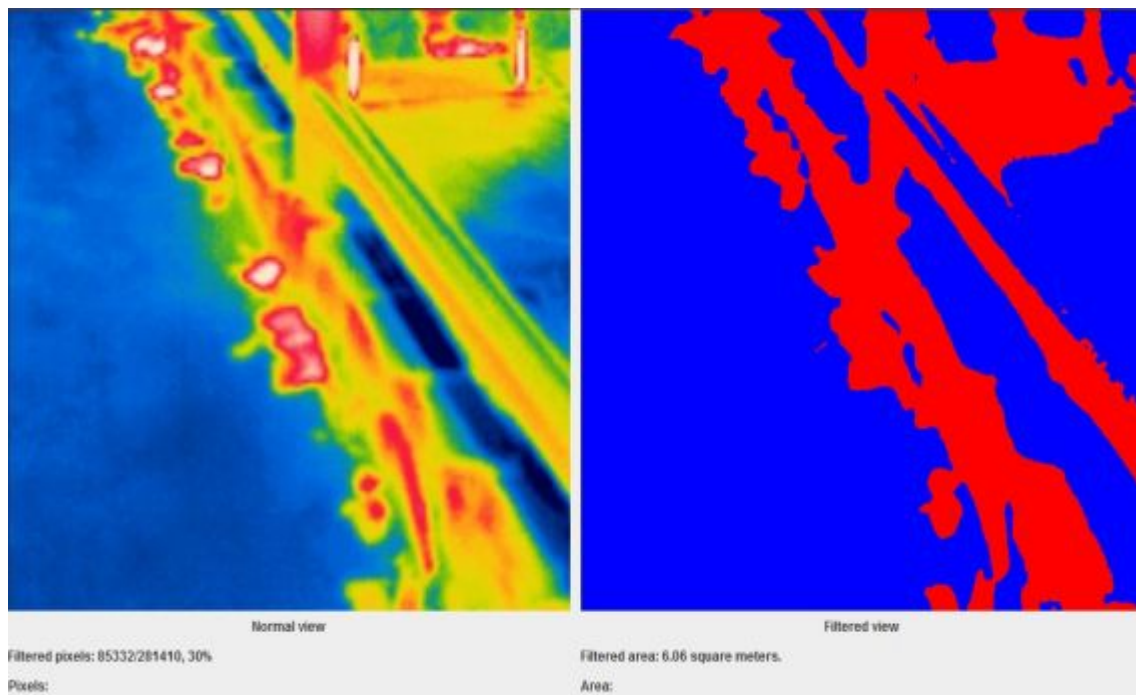
Εικόνα 4.20.1.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20



Εικόνα 4.20.1.Thermocalc

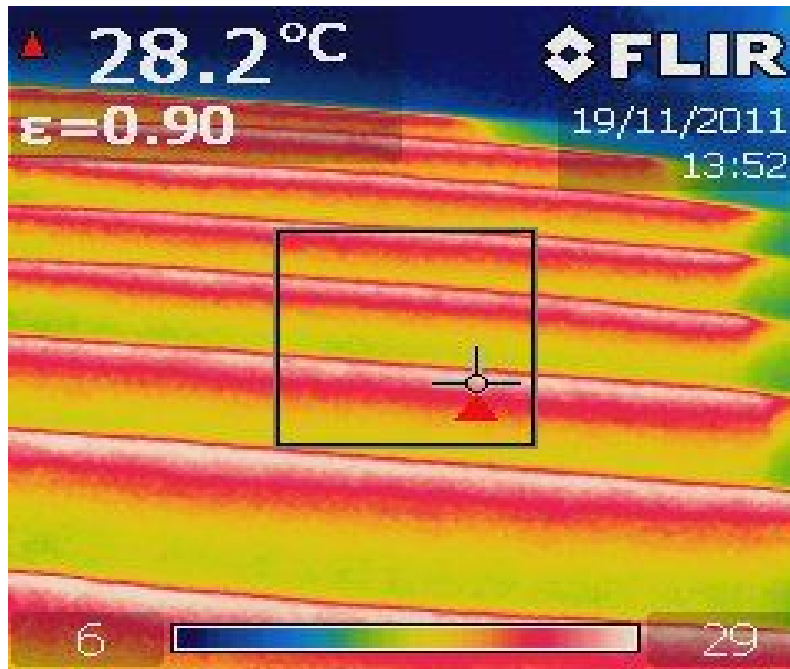


Εικόνα 4.20.2.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20 (λεπτομέρεια 1)

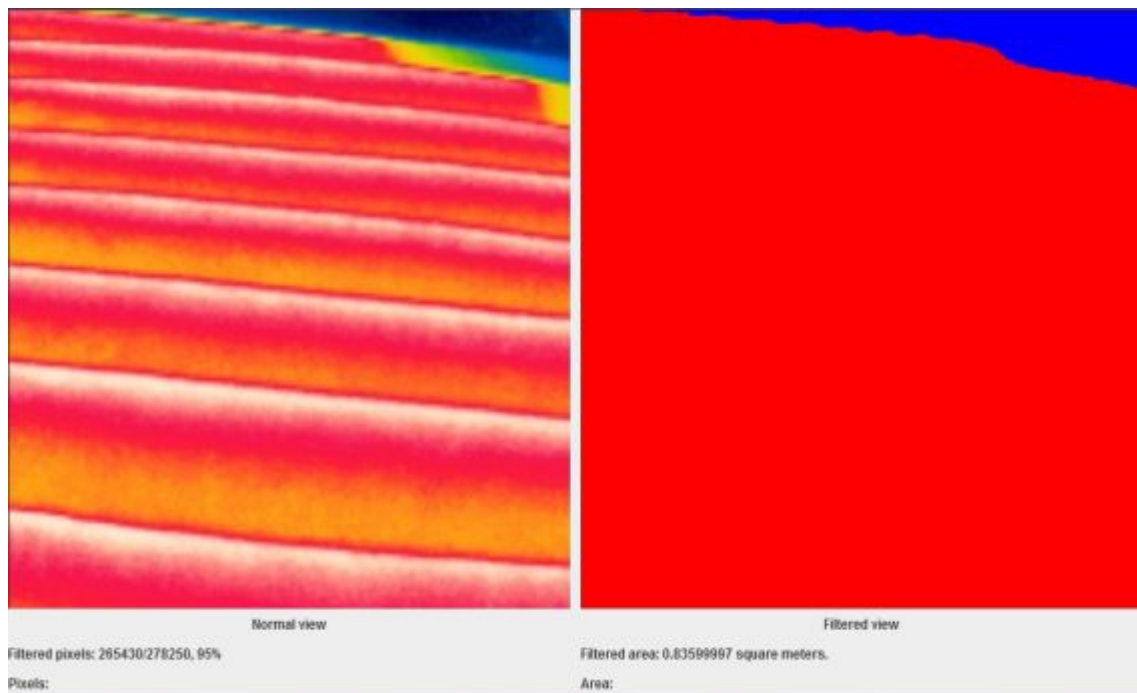


Εικόνα 4.20.2.Thermocalc

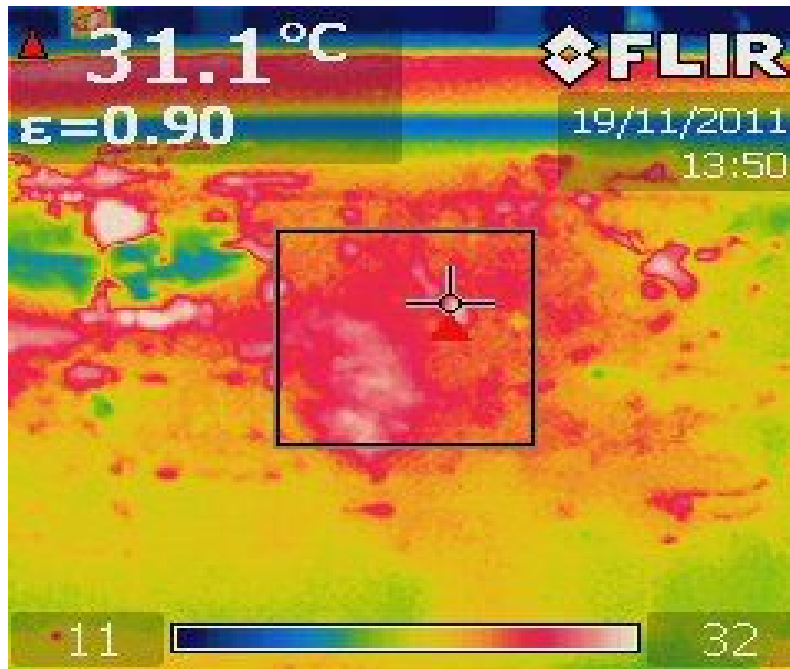




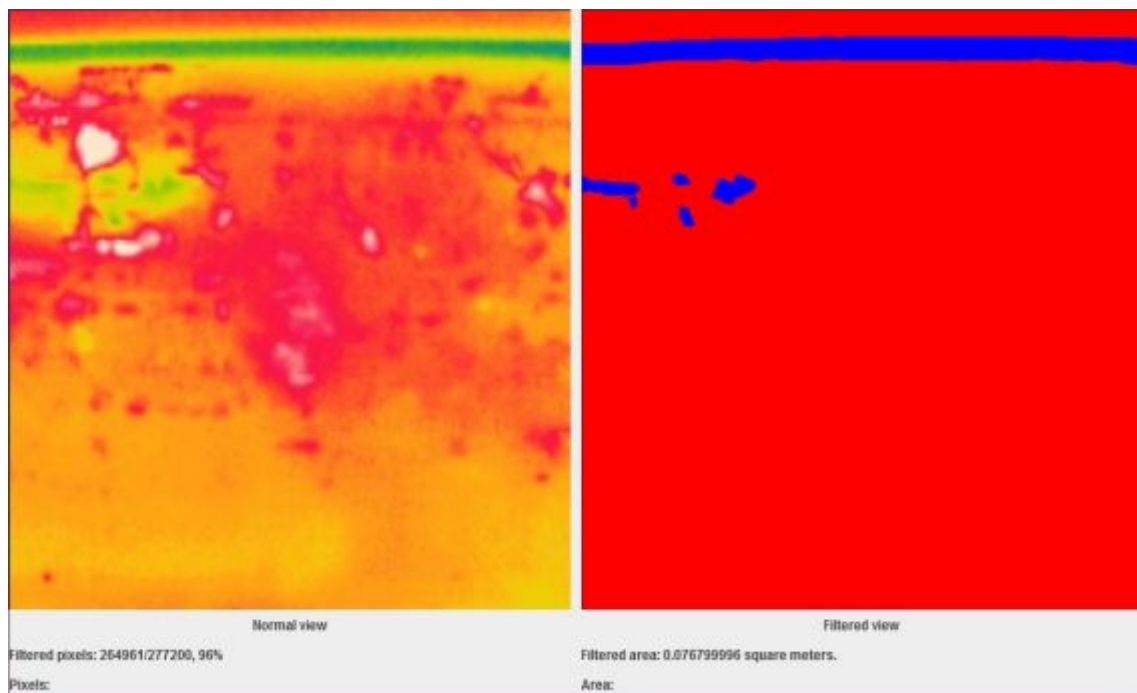
Εικόνα 4.20.3.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20 (λεπτομέρεια 2)



Εικόνα 4.20.3.Thermocalc



Εικόνα 4.20.4. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 20 (λεπτομέρεια 3)



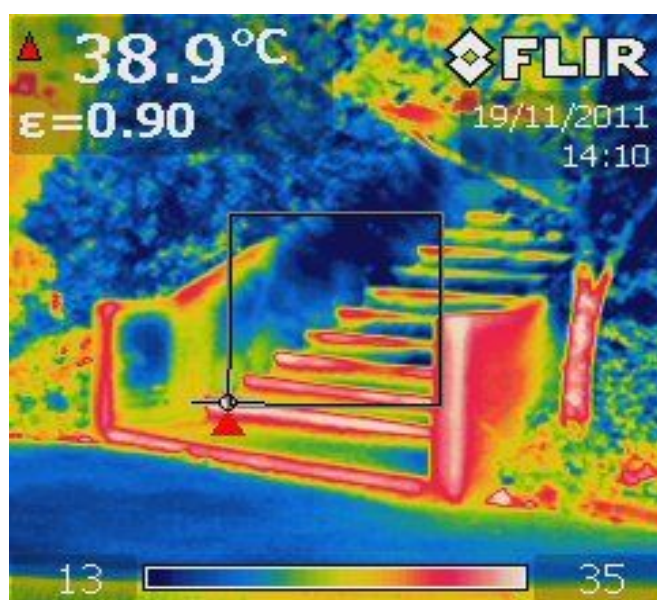
Εικόνα 4.20.4. Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 20 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στις θέσεις όπου έχουμε μεταλλικά στοιχεία καθώς και αφισοκόλληση και γκράφιτι.

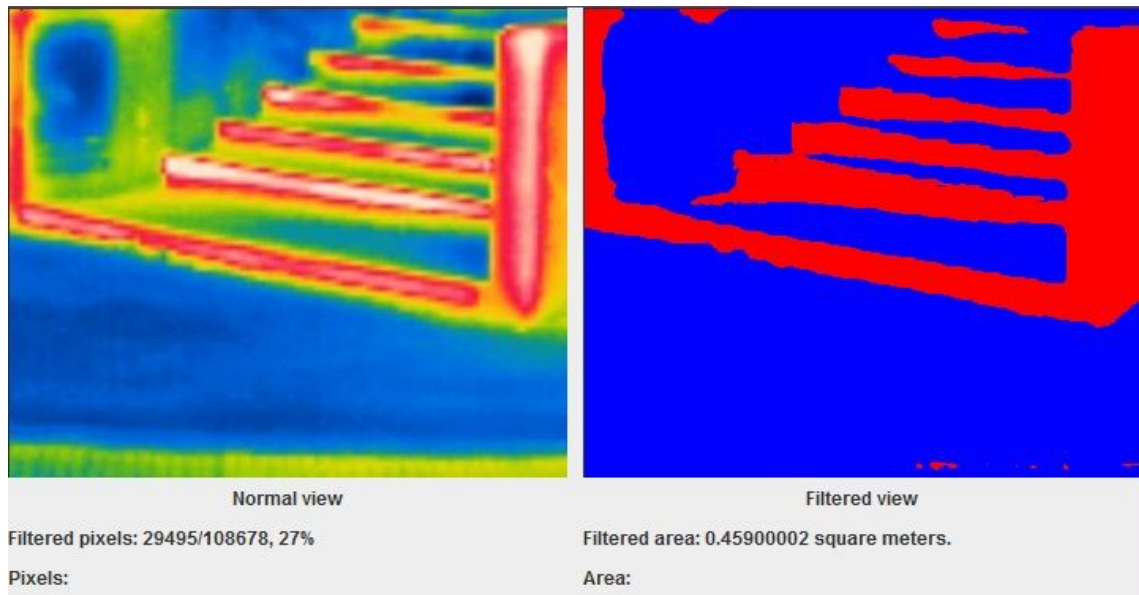
## 4.2.14 Σημείο μέτρησης 24



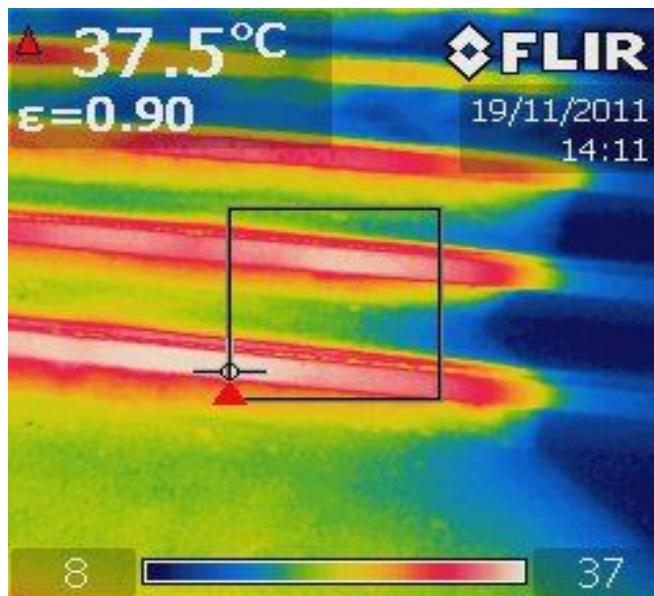
Εικόνα 4.24. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24



Εικόνα 4.24.1.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24

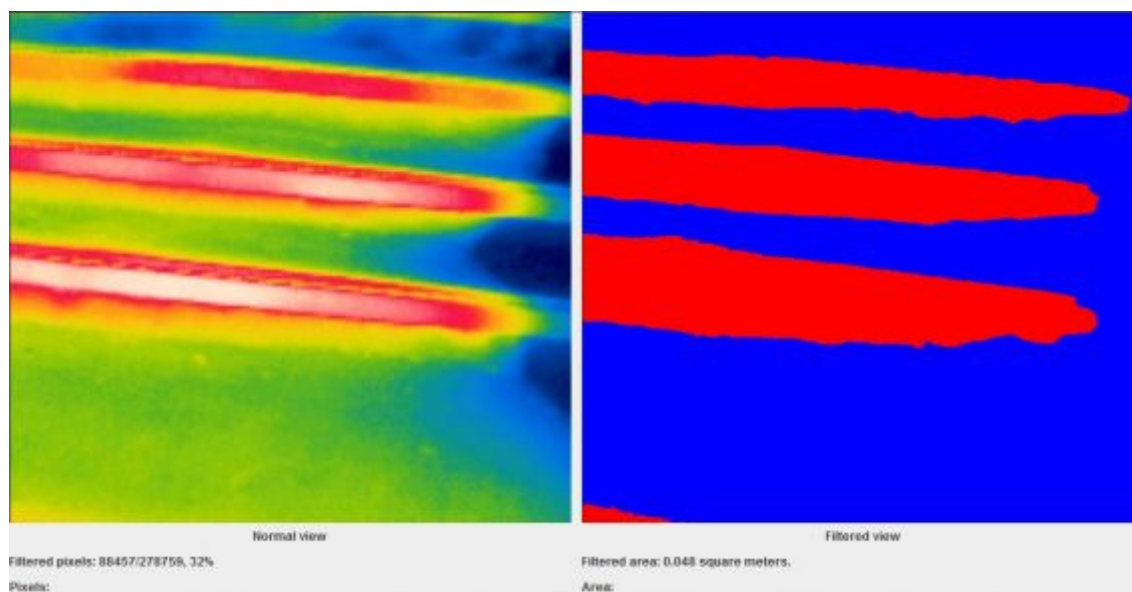


Εικόνα 4.24.1. Thermocalc



Εικόνα 4.24.2. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 24





#### Εικόνα 4.24.2. Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 24 καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες στα σκαλοπάτια που φέρουν μεταλλική επένδυση καθώς και στα σημεία που στερούνται επαρκούς σκίασης.

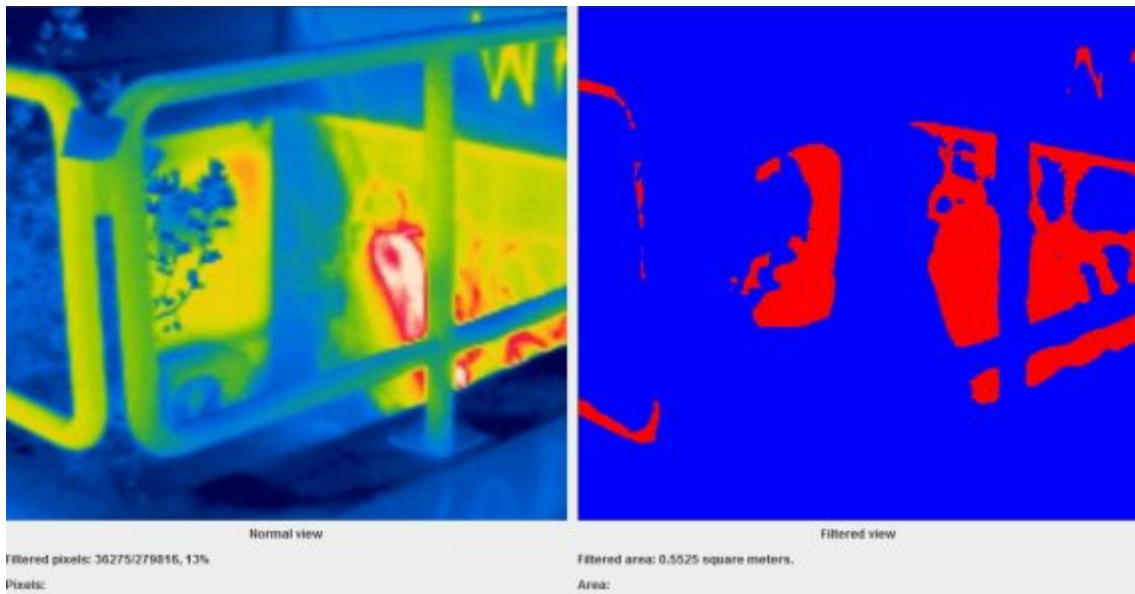
#### 4.2.15 Σημείο μέτρησης 25



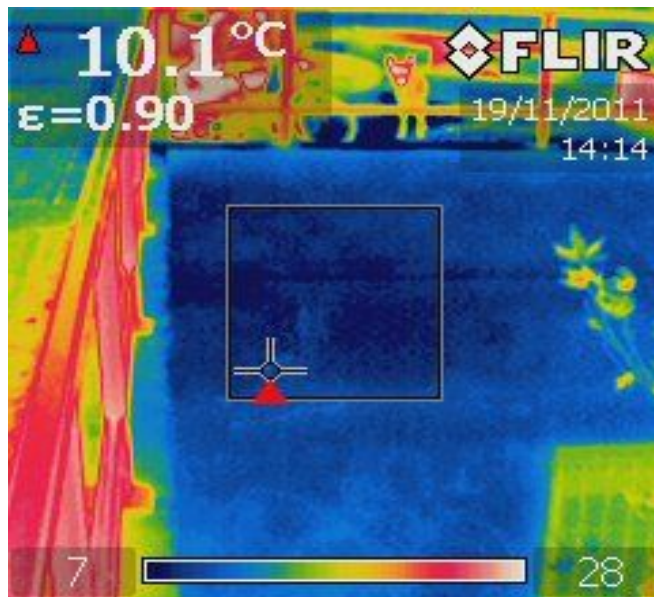
Εικόνα 4.25. Οπτική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25



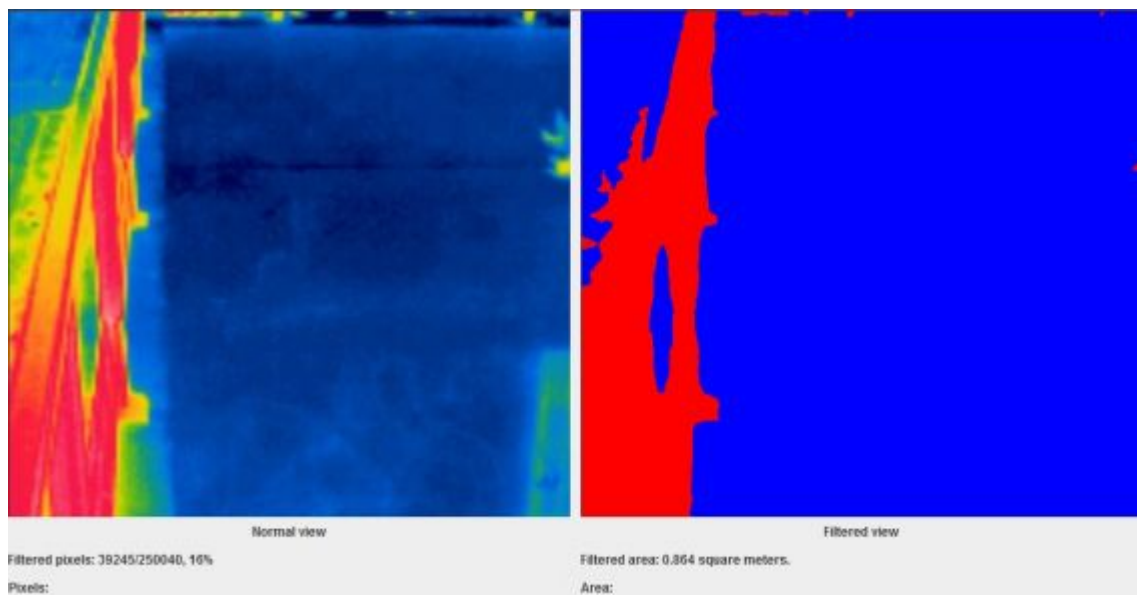
Εικόνα 4.25.1. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25



Εικόνα 4.25.1. Thermocalc



Εικόνα 4.25.2.THERM. Θερμική απεικόνιση σημείου μέτρησης 25 (λεπτομέρεια)



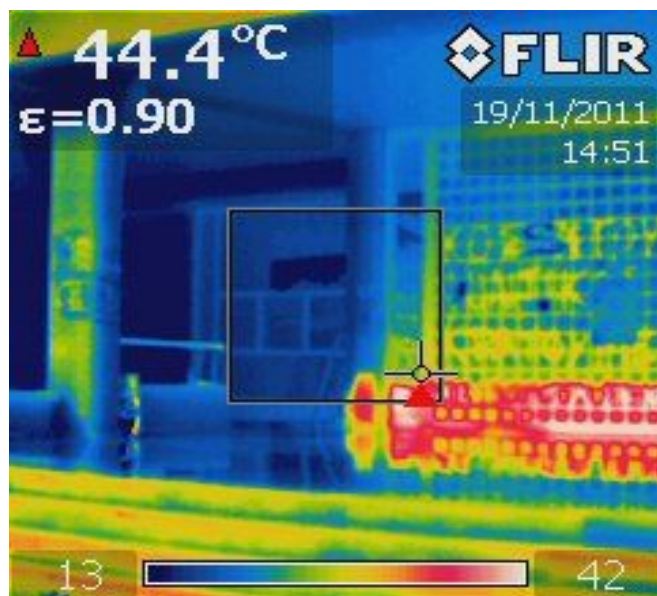
Εικόνα 4.25.2.Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 25 είναι εμφανής η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εκτεθειμένης και μη εκτεθειμένης στον ήλιο περιοχής.

## 4.2.16 Σημείο μέτρησης 37

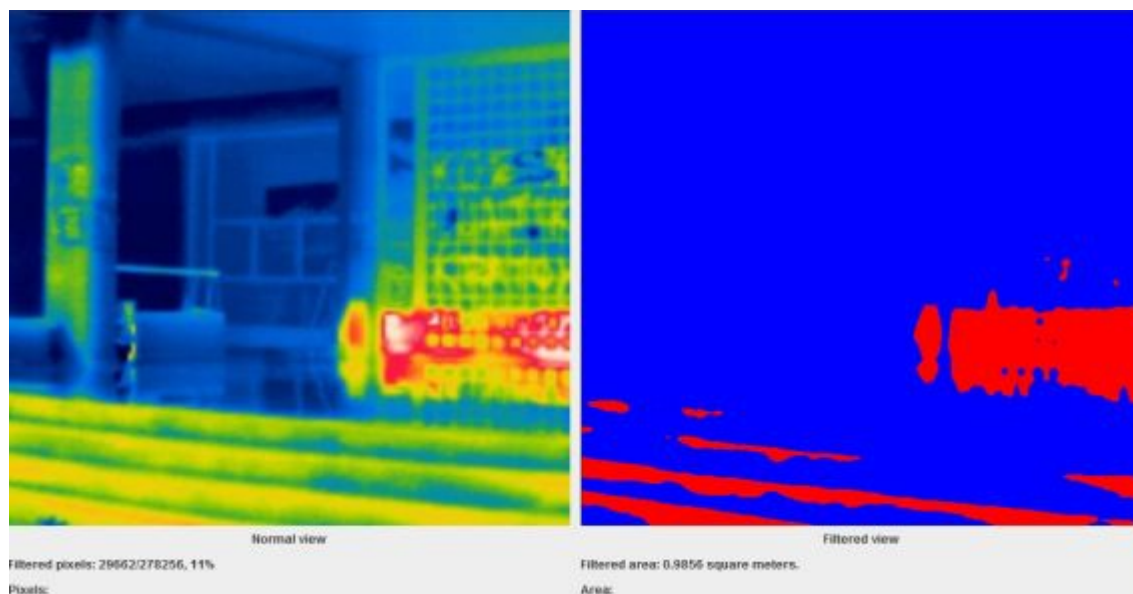


Εικόνα 4.37. Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 37



Εικόνα 4.37.THERM. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 37

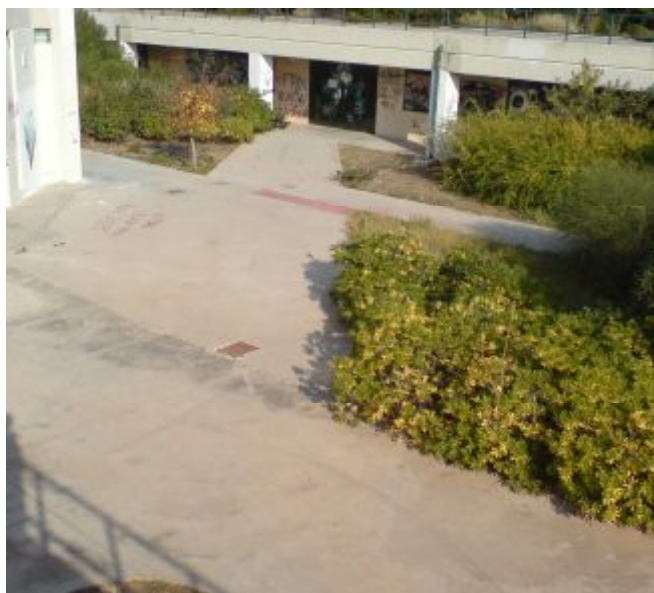




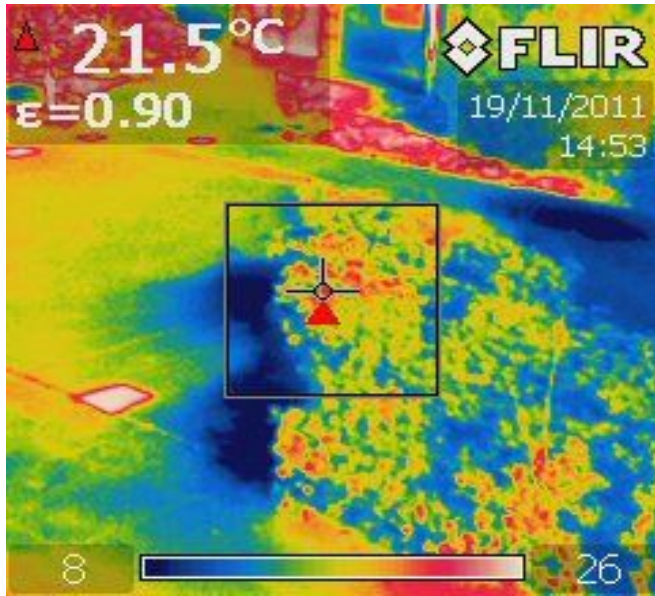
**Εικόνα 4.37. Thermocalc**

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 37 είναι εμφανής η θερμική άνεση του χώρου (με εξαίρεση την αφισκοκόλληση).

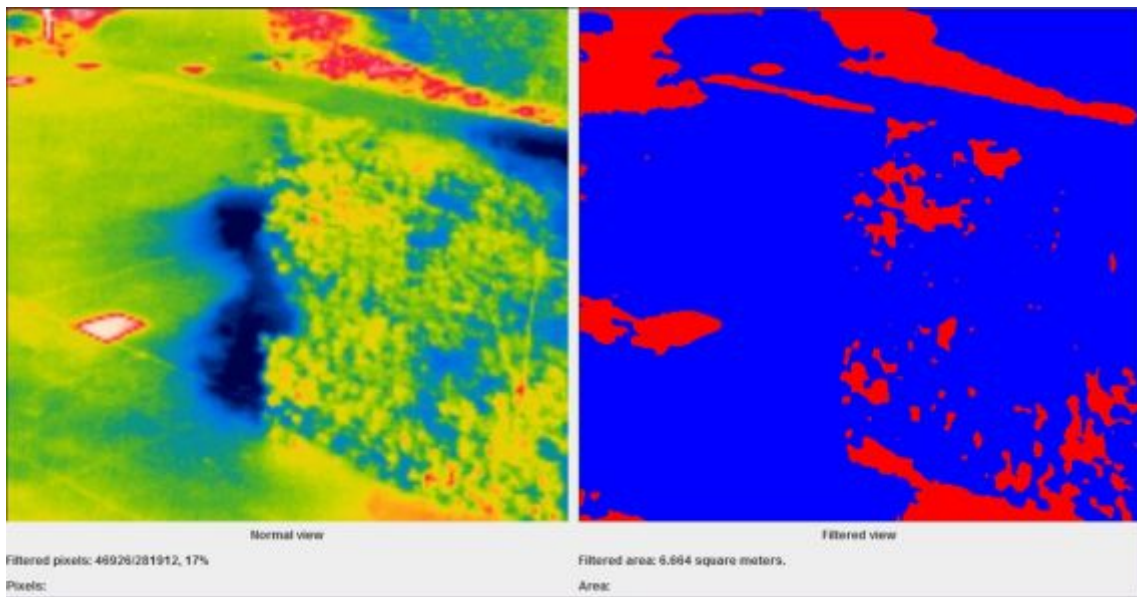
#### 4.2.17 Σημείο μέτρησης 39



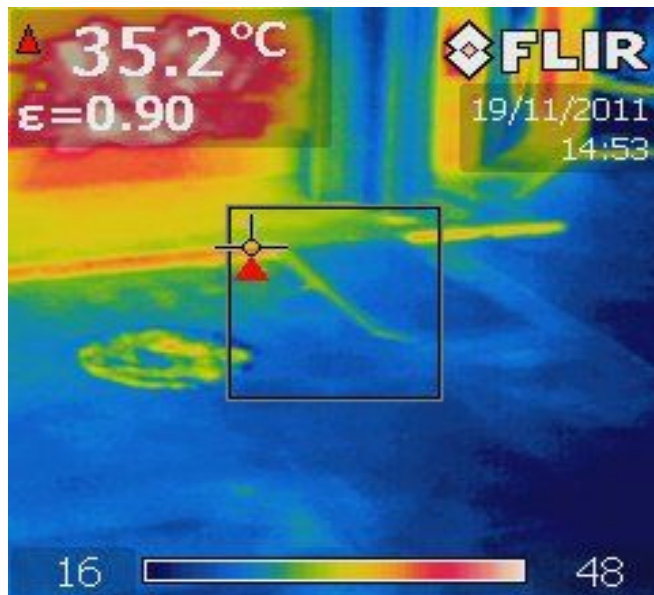
**Εικόνα 4.39. Οπτική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39**



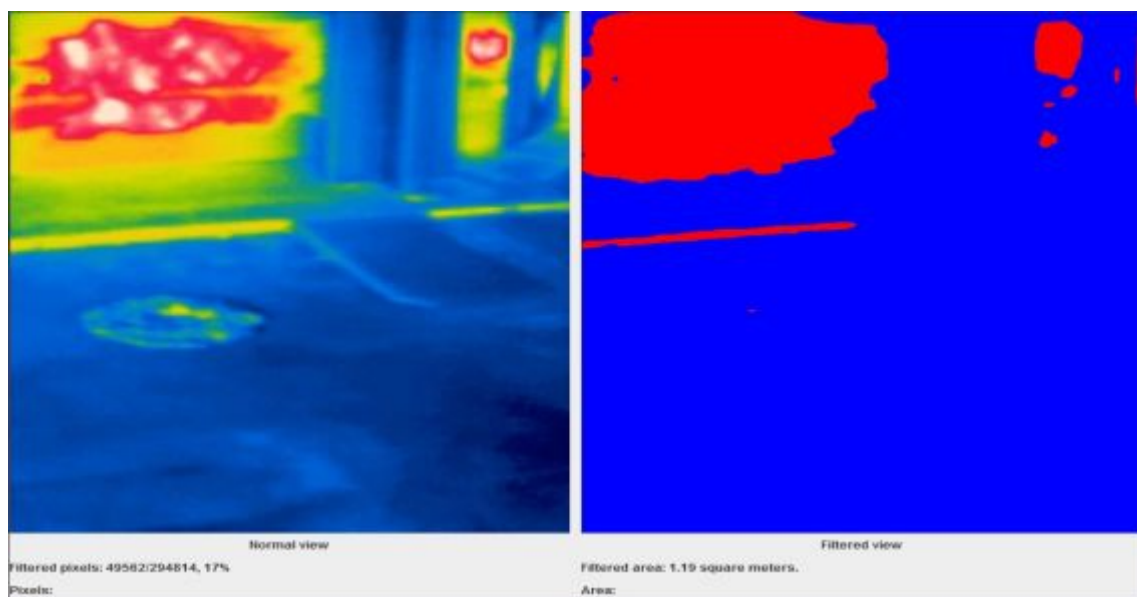
Εικόνα 4.39.1. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39



Εικόνα 4.39.1. Thermocalc



Εικόνα 4.39.2. Θερμική απεικόνιση του σημείου μέτρησης 39 (λεπτομέρεια)



Εικόνα 4.39.2. Thermocalc

Από τη σύγκριση της οπτικής απεικόνισης και της αντίστοιχης θερμικής του σημείου 39 είναι εμφανής η θερμική άνεση του χώρου (με εξαίρεση την αφισκόλληση και μικρό τμήμα καλυμμένο με ξηρόφυτα).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε επιλεγμένες θέσεις των πλατειών της Πολυτεχνειούπολης προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Πρωτίστως, το συμπέρασμα που προκύπτει από τη διπλωματική αυτή είναι ότι το μοντέλο επεξεργασίας των θερμικών εικόνων που δομήθηκε λειτουργεί και παρέχει μία ρεαλιστική και ακριβή εικόνα της έκτασης της θερμικής επιρροής στα υπό μελέτη δομικά στοιχεία.
- Οι πλατείες της Πολυτεχνειούπολης παρουσιάζουν μωσαϊκό θερμικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώθηκαν νησίδες υψηλών θερμοκρασιών στις θέσεις που καλύπτονται με δομικά υλικά (λιθοδομές, πλάκες κ.α.). Η θερμική τους κατάσταση διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των δομικών υλικών, το χρώμα και την τραχύτητα της επιφάνειάς τους. Δροσερές συνθήκες διαμορφώνονται στις θέσεις με αρδευόμενη βλάστηση, γεγονός το οποίο αποδίδεται τόσο στη βλάστηση όσο και στις φυσιολογικές διεργασίες των φυτών. Αντίθετα, θέσεις καλυπτόμενες με ξηροφυτικό πράσινο παρουσιάζουν δυσμενέστερες συνθήκες θερμοκρασίας αέρα, δηλαδή ψυχρότερες κατά τη χειμερινή και θερμότερες κατά θερινή περίοδο του έτους.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σκίαση ως μέσο δροσισμού κατά το θέρος. Διαπιστώθηκε δηλαδή ότι σκιαζόμενες θέσεις παρουσιάζουν ευμενέστερες συνθήκες από αντίστοιχες ηλιαζόμενες, ανεξαρτήτως μορφών εδαφοκάλυψης.
- Αξίζει να σημειωθεί η θερμική συμπεριφορά των αίθριων όπου στις θέσεις αυτές οι τιμές της θερμοκρασίας είναι υψηλότερες κατά τη χειμερινή και χαμηλότερες κατά τη θερινή περίοδο του έτους, συγκρινόμενες με άλλες μορφές εδαφοκάλυψης. Η θερμική αυτή συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στη μορφή της φυτοκάλυψης και ιδιαίτερα στις συνθήκες ηλιασμού της. Η αύξηση δε της θερμοκρασίας του αίθριου, κατά τη θερμή περίοδο του έτους, υπερβαίνει και την αντίστοιχη της παρακείμενης δομημένης περιοχής, η οποία λόγω σκίασης (δενδροστοιχίες κ.α.) εμφανίζεται δροσερότερη.
- Στην περιμετρική ζώνη των πλατειών και πιο συγκεκριμένα στις θέσεις που βρίσκονται παραπλήσια της δομημένης περιοχής, παρατηρούνται αυξημένες τιμές θερμοκρασίας σε σύγκριση με το φυτοκαλυμμένο εσωτερικό του τμήμα κατά το χρονικό διάστημα 13.00 έως 17.00. Αυτό αποδίδεται τόσο στην αραιή βλάστηση όσο και στην ελλιπή άρδευσή του.
- Η παρουσία φυτοκάλυψης και ιδιαίτερα οι διαφορετικές μορφές σύνθεσης της βλάστησης, συντελούν σημαντικά στη διατήρηση της ισορροπίας των θερμουγρομετρικών συνθηκών τόσο στους ζεστούς όσο και στους υγρούς μήνες του έτους. Απλά διαφοροποιούνται οι ώρες κατά τις οποίες οι πλατείες δύνανται να προσφέρουν την καλύτερη θερμική αίσθηση στους χρήστες. Ουσιαστικά κατά τη χειμερινή περίοδο από τις 12.00 ως τις 17.00 η θερμική αίσθηση είναι καλύτερη, συνεπώς εκείνη την ώρα πρέπει να προάγεται η επισκεψιμότητά τους. Αντιθέτως το καλοκαίρι η κατάσταση αντιστρέφεται, διότι οι κυριαρχούσες βιοκλιματικές συνθήκες καθιστούν το χώρο λιγότερο ευχάριστο στο χρήστη σε σχέση με τις πρώτες πρωινές ώρες και τις απογευματινές ώρες μετά τις 18.00.
- Η μορφή της εδαφοκάλυψης επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος. Απαιτείται λοιπόν, άμεση αποκατάσταση των τμημάτων των πλατειών όπου αναπτύσσονται νησίδες υψηλών θερμοκρασιών.
- Για τη διαμόρφωση ευνοϊκότερων συνθηκών θερμικής αίσθησης απαιτείται η διαμόρφωση των χώρων με δενδρώδη βλάστηση, έτσι ώστε μέσω της σκίασης που

δημιουργεί το φύλλωμα των δέντρων να επιτυγχάνεται μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο χώρο.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ****ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Ο. Ζώγου, "Θερμομετρία-Θερμογραφία", Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος 2007.
2. Ξ. Κακάτσιος, "Μετάδοση θερμότητας", Αθήνα 2004.
3. Β. Χατζηαθανασίου, "Μετάδοση θερμότητας", Θεσσαλονίκη 2005.
4. Α. Σκορδάς, Β. Αναστασόπουλος, "Ψηφιακή επεξεργασία σήματος και εικόνας
5. Α. Ντελόπουλος, "Συστήματα πολυμέσων και εικονική πραγματικότητα", Θεσσαλονίκη 2006.
6. Ξ. Κακάτσιος, "Μετάδοση θερμότητας", Αθήνα 2004.
6. Β. Γαργανουράκης, "Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας", Ηράκλειο 2009.
7. Τ. Φιλίππας, Α. Ρεσβάνης, "Θεμελιώδης πανεπιστημιακή φυσική Μέρος 3<sup>ο</sup>", μετάφραση βιβλίου των Alonso και Finn, Αθήνα 1979.
8. Α. Μπροκαλάκης, "Τα χρωματικά μοντέλα RGB και HSV", 2005.

**ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. X. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing", New York, USA 2001.
2. M. Sharlon, "Active thermography: An overview of methods and their applications in use today", Conway, USA.
3. D. Finley, "Thermal radiation: Blackbody radiation, the Stefan-Boltzmann law and the Planck formula for spectral radiance", 2003.
4. Fluke bxx series, users' manual, 2007.
5. H. Stokman, T. Gevers, "Selection and fusion of color models for image feature detection", Amsterdam, Netherlands 2007.
6. Savitch Walter, "Absolute Java", 2008
7. C.Gonzalez, R. Woods, " Digital image processing", 2002.

---

8. B Wiecek, "Review on thermal image processing for passive and active thermography", Lodz, Poland 2005.

#### **ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ**

1. <http://en.wikipedia.org/>
2. <http://www.freebookspot.es/>
3. <http://www.onlinefreebooks.net/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΚΩΔΙΚΑΣ ThermoCalc

PIXEL

```
import java.awt.Color;

/* creates a pixel object */
public class Pixel implements Comparable<Color>{
    int red, green, blue;

    public Pixel(int pixel) {
        red = (pixel >> 16) & 0xff;
        green = (pixel >> 8) & 0xff;
        blue = (pixel >> 0) & 0xff;
    }

    /* compares 2 pixels */
    public int compareTo(Color c) {
        if (red==c.getRed()) {
            if (green==c.getGreen()) {
                return blue-c.getBlue();
            } else return green-c.getGreen();
        } else return red-c.getRed();
    }
}
```



ThermoCalc

```
import java.awt.*;
import java.awt.event.InputEvent;
import java.awt.event.MouseEvent;
import java.awt.event.MouseListener;
import java.awt.event.MouseMotionListener;
import java.awt.image.BufferedImage;
import java.awt.image.PixelGrabber;
import java.io.File;
import javax.imageio.ImageIO;
import javax.swing.*;

/* Calculates area with high temperature */
public class ThermoCalc extends JFrame{
    Image image;
    int[][] buffer;
    int filteredPixels;
    float scale;

    JLabel pixelsLbl=new JLabel("Pixels: ");
    JLabel areaLbl=new JLabel("Area: ");

    public class View extends JPanel implements MouseListener, MouseMotionListener {
        Image img;
        boolean drag;
        int mouseX, mouseY;
        int mouseX1,mouseX2,mouseY1,mouseY2;

        public View(String text, Image image) {
            addMouseListener(this);
            addMouseMotionListener(this);
            setPreferredSize(new
Dimension(image.getWidth(rootPane),image.getHeight(rootPane)));
            img=image;
        }

        /* draws the image and the selection rectangle */
```

```
public void paintComponent(Graphics g) {
    g.drawImage(img,0,0,rootPane);
    g.drawLine(mouseX, 0, mouseX, getHeight());
    g.drawLine(0, mouseY, getWidth(), mouseY);
    g.drawString(""+mouseX+"", "+mouseY, mouseX, mouseY);

    if (drag) {
        g.setColor(Color.black);
        int x = Math.min(mouseX1, mouseX2);
        int y = Math.min(mouseY1, mouseY2);
        int w1 = Math.abs(mouseX2 - mouseX1);
        int w2 = Math.abs(mouseY2 - mouseY1);

        /* draws cross */
        g.drawLine(mouseX2, 0, mouseX2, getHeight());
        g.drawLine(0, mouseY2, getWidth(), mouseY2);
        g.drawString(""+mouseX2+"", "+mouseY2, mouseX2, mouseY2);
        pixelsLbl.setText("Pixels: "+w1*w2);
        areaLbl.setText("Area: "+w1*w2*scale+" sm");
        g.setXORMode(Color.white);
        g.drawRect(x, y, w1, w2);
    }
}

@Override
public void mouseClicked(MouseEvent e) {
}

@Override
public void mousePressed(MouseEvent e) {
    mouseX1 = mouseX2 = e.getX();
    mouseY1 = mouseY2 = e.getY();
    drag=true;
}

@Override
public void mouseReleased(MouseEvent e) {
```

```
    drag=false;
}

@Override
public void mouseEntered(MouseEvent e) {
}

@Override
public void mouseExited(MouseEvent e) {
}

@Override
public void mouseDragged(MouseEvent e) {
    if ((e.getModifiers() & InputEvent.BUTTON1_MASK) != 0) { // LMB drag
        mouseX = e.getX();
        mouseY = e.getY();
        repaint(); // only repaint - no recomputation
    }
}

@Override
public void mouseMoved(MouseEvent e) {
    mouseX=e.getX();
    mouseY=e.getY();
    repaint();
}
}

public ThermoCalc() {
    super();
    setDefaultCloseOperation(EXIT_ON_CLOSE);
    setResizable(false);

    File file=getFile();
    try {
        image = ImageIO.read(file);
        buffer=getImagePixels();
    }
}
```

```
} catch (Exception ex) {
    System.exit(0);
}
setTitle(file.getName()+" "+image.getWidth(this)+"x"+ image.getHeight(this));
setLayout(new BorderLayout());
JPanel centerPanel=new JPanel();
centerPanel.setLayout(new GridLayout(1,2,10,0));

centerPanel.add(new View("Normal view",image));
/* filtered view */
Color col=getColor(new Color(210,0,0));
centerPanel.add(new View("Filtered view",draw(col)));

add(centerPanel,BorderLayout.CENTER);

/* calculations */
JPanel bottomPanel=new JPanel();
bottomPanel.setLayout(new GridLayout(3,2,10,0));

JPanel normal=new JPanel();
JPanel filtered=new JPanel();
normal.setLayout(new FlowLayout());
filtered.setLayout(new FlowLayout());

normal.add(new JLabel("Normal view"));
filtered.add(new JLabel("Filtered view"));

bottomPanel.add(normal);
bottomPanel.add(filtered);

/* calculate red pixels, red area */
int percentage=(int)
Math.round((filteredPixels*100.0)/(image.getWidth(this)*image.getHeight(this)));
bottomPanel.add(new JLabel("Filtered pixels: "+filteredPixels+" / "+image.getWidth(this)*image.getHeight(this)+" "+percentage+"%"));
add(bottomPanel,BorderLayout.SOUTH);
float area=0;
```

```
String value=JOptionPane.showInputDialog("Original area (square meters): ",
area);
area=Float.parseFloat(value)*percentage/100.0f;
bottomPanel.add(new JLabel("Filtered area: "+area+" square meters."));
scale=area/(image.getWidth(this)*image.getHeight(this));

bottomPanel.add(pixelsLbl);
bottomPanel.add(areaLbl);

pack();
setLocationRelativeTo(null);
setVisible(true);
}

/* create filtered image */
private BufferedImage draw(Color value) {
    BufferedImage img=new
BufferedImage(image.getWidth(this),image.getHeight(this),BufferedImage.TYPE_INT_
BGR|BufferedImage.TRANSLUCENT);
    Graphics g=img.getGraphics();
    filteredPixels=0;
    for (int x=0; x<buffer.length; x++) {
        for (int y=0; y<buffer[x].length; y++) {
            Pixel p=new Pixel(buffer[x][y]);
            if (p.compareTo(value)>=0) {
                g.setColor(Color.RED);
                filteredPixels++;
            }
            else g.setColor(Color.BLUE);
            g.drawLine(x,y,x,y);
        }
    }
    return img;
}

/* sets the threshold colour */
private Color getColor(Color defColor)
{
```

```
return JColorChooser.showDialog(
    new JFrame(),
        "Choose Threshold Color",
        defColor);
}

/* reads all pixels from an image and creates an array of them */
public int[][] getImagePixels()
{
    PixelGrabber grabber;

    int[] pixels = new int[image.getWidth(this) * image.getHeight(this)];
    int[][] img=new int[image.getWidth(this)][image.getHeight(this)];

    try
    {
        grabber = new PixelGrabber(image, 0, 0, image.getWidth(this),
            image.getHeight(this), pixels, 0, image.getWidth(this));
        grabber.grabPixels(0);

    }
    catch (InterruptedException e)
    {
        System.out.println("error");
        System.out.println(e.getMessage());
    }

    /* make the [][] array from the [] pixels array */
    int i=0;
    for (int y=0; y<image.getHeight(this); y++) {
        for (int x=0; x<image.getWidth(this); x++) {
            img[x][y]=pixels[i++];
        }
    }
    return img;
}
```

```
/* reads the image file */  
public File getFile() {  
    JFileChooser fileChooser = new JFileChooser(System.getProperty("user.dir"));  
    fileChooser.setDialogTitle("Choose an image file");  
    int returnVal = fileChooser.showOpenDialog(this);  
    if(returnVal != JFileChooser.APPROVE_OPTION) return null; // cancelled  
  
    return fileChooser.getSelectedFile();  
}  
  
public static void main(String[] args) {  
    new ThermoCalc();  
}  
}
```

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

**ΣΧΕΔΙΑ**