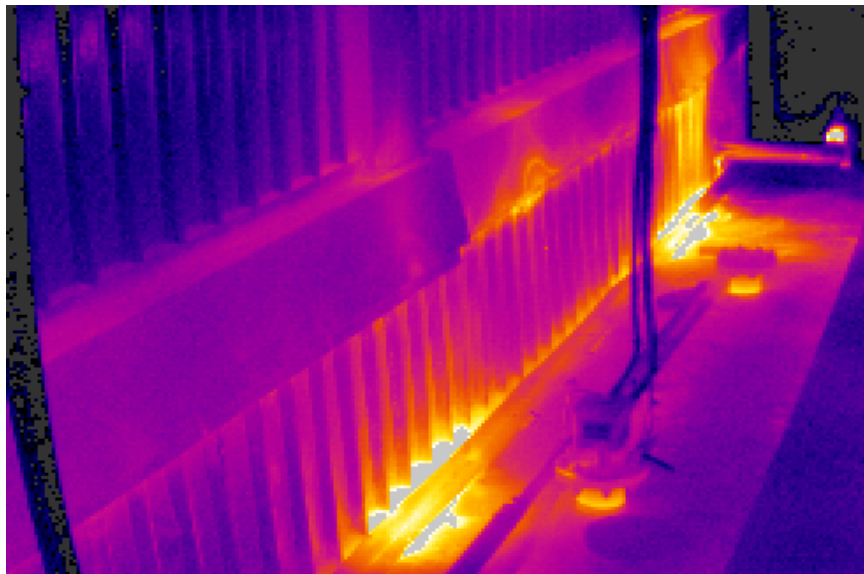


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :
« ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ »



ΑΪΒΑΛΙΩΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΕΜ : 5251

ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΕΜ : 5045

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΑΤΖΗΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :
« ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ »

ΑΪΒΑΛΙΩΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΕΜ : 5251
ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΕΜ : 5045

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΑΤΖΗΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Χατζηαθανασίου Βασίλη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ Α.Π.Θ., για την καθοδήγησή του, τις γνώσεις που μας προσέφερε καθώς και για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας.

Επίσης θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον κ. Χριστοδουλίδη Αχιλλέα Διπλ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και την εταιρία IRISTEM ENGINEERING για τις πολύτιμες γνώσεις, το υλικό που μας προσέφερε καθώς και για τον δανεισμό του απαραίτητου εξοπλισμού για τις πειραματικές μετρήσεις. Χωρίς τη πολύτιμη βοήθεια του, ίσως η παρούσα διπλωματική να μην είχε πραγματοποιηθεί.

Ακόμα ευχαριστούμε τον κ. Παρχαρίδη Στάθη και την εταιρία ISOLINE για την ευγενική χορηγία των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιήσαμε.

Τέλος, ευχαριστούμε τον καλό φίλο Μήγκο Κώστα για την πολύτιμη βοήθεια του, κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ.1
----------------------	--------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....σελ.2

1.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	σελ.2
1.1.1 Ραδιοκύματα (radiowaves).....	σελ.4
1.1.2 Μικροκύματα (microwaves).....	σελ.4
1.1.3 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation).....	σελ.4
1.1.4 Ορατή ακτινοβολία (visible light).....	σελ.5
1.1.5 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation).....	σελ.6
1.1.6 Ακτίνες Χ.....	σελ.6
1.1.7 Ακτίνες γ.....	σελ.7
1.2 Βασικοί νόμοι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	σελ.7
1.3 Αρχές μεταφοράς θερμότητας.....	σελ.10
1.3.1 Μεταφορά με αγωγή.....	σελ.10
1.3.2 Μεταφορά με συναγωγή.....	σελ.12
1.3.3 Μεταφορά με ακτινοβολία.....	σελ.14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ 15

2.1 Εισαγωγή στην υπέρυθρη θερμογραφία.....	σελ.15
2.2 Βασικές αρχές υπέρυθρης θερμογραφίας.....	σελ.16
2.3 Παράμετροι υπέρυθρης θερμογραφίας.....	σελ.17

2.3.1	Παράμετροι ακτινοβολίας σώματος.....σελ.17
2.3.2	Εξωτερικοί-Περιβαλλοντικοί παράμετροι.....σελ.18
2.3.3	Προσδιορισμός εκπεμπτικότητας ε.....σελ.18
2.4	Τεχνικές θερμογράφησης.....σελ.19
2.5	Θερμογραφικά απεικονιστικά συστήματα.....σελ.20
2.6	Γεωμετρική ανάλυση.....σελ.24
2.7	Απαιτήσεις ακριβής μέτρησης.....σελ.26
2.8	Συστήματα επεξεργασίας υπέρυθρων εικόνων.....σελ.27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ

ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....σελ.28

3.1	Γενικές εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας.....σελ.28
3.1.1	Ιατρική.....σελ.28
3.1.2	Κτιριακές εγκαταστάσεις.....σελ.28
3.1.3	Περιβάλλον.....σελ.29
3.1.4	Αεροδιαστημική.....σελ.29
3.1.5	Πετροχημικές εφαρμογές.....σελ.29
3.1.6	Ηλεκτρονικός εξοπλισμός.....σελ.29
3.1.7	Ποικίλες εφαρμογές.....σελ.30
3.2	Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....σελ.30
3.3	Κατηγοριοποίηση σφαλμάτων.....σελ.32
3.4	Σφάλματα και ηλεκτρική αντίσταση.....σελ.34
3.5	Παραδείγματα και εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας σε σφάλματα σταθμού παραγωγής.....σελ.35

3.5.1	Μετασχηματιστές ισχύος.....σελ.35
3.5.2	Εσωτερικό σφάλμα M/Σ ρεύματος σε γραμμή διανομής.....σελ.37
3.5.3	Σφάλμα στο σύστημα ελέγχου ρυθμιστή τάσης.....σελ.37
3.5.4	Μονωτήρες διέλευσης.....σελ.38
3.5.5	Κακές συνδέσεις.....σελ.40
3.5.6	Αποτυχία σύνδεσης γραμμών μεταφοράς λόγω λανθασμένης εγκατάστασης συνδέσμων σφηνών.....σελ.41
3.5.7	Αποτυχημένη σύνδεση συνδετήρα χαλκού με καλώδιο αλουμινίου.....σελ.42
3.5.8	Ασφάλειες.....σελ.42
3.5.9	Αποζεύκτης.....σελ.44
3.5.10	Υπερφορτισμένα κυκλώματα στο εσωτερικό σταθμού.....σελ.45
3.5.11	Ηλεκτρικές μηχανές.....σελ.46
3.6	Λέβητας.....σελ.47
3.6.1	Εισροή αέρα στο σύστημα της ατμογεννήτριας.....σελ.47
3.6.2	Χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας για τον εντοπισμό εισροής αέρα σε λέβητα και στρόβιλο.....σελ.50
3.6.3	Παραδείγματα υπέρυθρης θερμογραφίας σε σύστημα ατμογεννήτριας.....σελ.53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΙΡΑΜΑ-ΔΟΚΙΜΙΟ ΛΕΒΗΤΑ.....σελ.60

4.1	Εισαγωγή.....σελ.60
4.2	Δοκίμιο-Πειραματική διάταξη.....σελ.60

4.2.1	Μεταλλικό κιβώτιο.....	σελ.60
4.2.2	Μονωτικά υλικά.....	σελ.61
4.2.3	Μεταλλικό κέλυφος.....	σελ.64
4.2.4	Ηλεκτρική αντίσταση.....	σελ.65
4.3	Θερμοκάμερα δοκιμών.....	σελ.66
4.4	Πειραματική διαδικασία και συγκριτικές μελέτες.....	σελ.68
4.4.1	Πείραμα 1 : Συγκριτική μελέτη μονώσεων 3 και 5 cm.....	σελ.69
4.4.2	Πείραμα 2: Συγκριτική μελέτη βαμμένης άβαφης πλευράς - Προσδιορισμός εκπνευσιμότητας.....	σελ.76
4.4.3	Πείραμα 3: Σφάλμα μόνωσης.....	σελ.78
4.4.4	Πείραμα 4: Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου.....	σελ.81
4.4.5	Πείραμα 5: Προβληματική προσαρμογή μονωτικών.....	σελ.83
4.4.6	Πείραμα 6: Διαστολή υλικών.....	σελ.85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	σελ.88
---------------------------------------	---------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ.91
--------------------------	---------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....σελ 2

Σχήμα 1.1 : Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....σελ 3

Σχήμα 1.2 : Κατανομή του Planck.....σελ 8

Σχήμα 1.3 : Μεταφορά με αγωγή.....σελ 11

Σχήμα 1.4 : Μεταφορά με συναγωγή.....σελ 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ 15

Σχήμα 2.1 : Ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας.....σελ 21

Σχήμα 2.2 : Ραδιόμετρο σημείου, ραδιόμετρο σειράς
και ραδιόμετρο επιφανείας.....σελ 23

Σχήμα 2.3 : Εξάρτηση της ακρίβειας των μετρήσεων από το IFOV.....σελ 25

Σχήμα 2.4 : Γεωμετρική ανάλυση θερμοκάμεραςσελ 25

Σχήμα 2.5 : Παράμετροι θερμογραφικής λήψης.....σελ 26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ

ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....σελ 28

Σχήμα 3.1 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία αποζεύκτη.....σελ 33

Σχήμα 3.2 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία διακόπτη φορτίουσελ 34

Σχήμα 3.3 : Θερμογράμματα και φωτογραφία Μ/Σ.....σελ 36

Σχήμα 3.4 : Θερμογράμματα Μ/Σ.....σελ 36

Σχήμα 3.4 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία Μ/Σ ρεύματος.....σελ 37

Σχήμα 3.5 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία ρυθμιστών τάσης.....	σελ 38
Σχήμα 3.6 : Καταστροφή μονωτήρων διέλευσης	σελ 39
Σχήμα 3.7 : Θερμογράμματα κακών συνδέσεων σε γραμμές μεταφοράς.....	σελ 40
Σχήμα 3.8 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία κακής σύνδεσης σε γραμμή μεταφοράς.....	σελ 40
Σχήμα 3.9 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία σφήνας.....	σελ 41
Σχήμα 3.10 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία συνδέσμου χαλκού σε καλώδιο αργιλίου.....	σελ 42
Σχήμα 3.11 : Σφάλμα σε μαχαιρωτή ασφάλεια χαμηλής τάσης.....	σελ 43
Σχήμα 3.12 : Σφάλμα σε μπλοκ ασφαλειών.....	σελ 43
Σχήμα 3.13 : Θερμογράμματα ασφαλειών σε γραμμές μεταφοράς.....	σελ 44
Σχήμα 3.14 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία αποξεύκτη.....	σελ 44
Σχήμα 3.15 : Θερμογράμματα υπερφορτισμένων κυκλωμάτων.....	σελ 45
Σχήμα 3.16 : Υπερθερμασμένο κύκλωμα σε πίνακα PLC.....	σελ 45
Σχήμα 3.17 : Υπερθέρμανση δρομέα κινητήρα.....	σελ 46
Σχήμα 3.18 : Υπερφορτισμένη λειτουργία κινητήρα.....	σελ 46
Σχήμα 3.19 : (a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li01).....	σελ 53
Σχήμα 3.20 : (a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li02).....	σελ 54
Σχήμα 3.21 : (a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li03).....	σελ 55
Σχήμα 3.22 : (a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li04).....	σελ 56

Σχήμα 3.23 : (a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li05).....σελ	56
Σχήμα 3.24 : Υπέρυθρη εικόνα των καυτών σημείων στην κορυφή της πόρτας.....σελ	57
Σχήμα 3.25 : Καυτό σημείο στο τοίχωμα του λέβητα.....σελ	57
Σχήμα 3.26 : Θερμόγραμμα και φωτογραφία μόνωσης λέβητα.....σελ	58
Σχήμα 3.27 : Θερμόγραμμα αγωγών καυσίμου.....σελ	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΙΡΑΜΑ-ΔΟΚΙΜΙΟ ΛΕΒΗΤΑ.....σελ.60

Σχήμα 4.1 : Μεταλλικό κιβώτιο.....σελ	61
Σχήμα 4.2 : Πλάκα πετροβάμβακα.....σελ	61
Σχήμα 4.3 : Μόνωση πετροβάμβακα πάνω στο τοίχωμα του δοκιμίου.....σελ	63
Σχήμα 4.4 : Εξωτερικά κελύφη για μόνωση 3 και 5 cm.....σελ	64
Σχήμα 4.5 : Εξωτερικό κέλυφος.....σελ	65
Σχήμα 4.6 : Ηλεκτρική αντίσταση 1500 W.....σελ	65
Σχήμα 4.7 : Αντίσταση στο εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου-λέβητα.....σελ	66
Σχήμα 4.8 : Θερμοκάμερα IRI 4010.....σελ	67
Σχήμα 4.9 : Πειραματική διάταξησελ	69
Σχήμα 4.10 : Πλευρά μηδέν δοκιμίου.....σελ	70
Σχήμα 4.11 : Τοίχωμα δοκιμίου.....σελ	72
Σχήμα 4.12 : Ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα τοιχώματος.....σελ	72
Σχήμα 4.13 : Αντίσταση – Εσωτερικό τοίχωμα.....σελ	74
Σχήμα 4.14 : Πλευρά και σημείο πλέγματος.....σελ	76
Σχήμα 4.15 : Σφάλμα μόνωσης.....σελ	78

Σχήμα 4.16 : Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα.....σελ 81
Σχήμα 4.17 : Ελαττωματική προσαρμογή μονωτικών.....σελ 84
Σχήμα 4.18 : Διαστολή λαμαρίνας.....σελ 86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Θερμόγραμμα 4.1 : Μόνωση 5 cm.....	σελ 70
Θερμόγραμμα 4.2 : Μόνωση 3 cm.....	σελ 71
Θερμόγραμμα 4.3 : Εσωτερική-Εξωτερική πλευρά (3 cm).....	σελ 74
Θερμόγραμμα 4.4 : Εσωτερική-Εξωτερική πλευρά (5 cm).....	σελ 75
Θερμόγραμμα 4.5 : Βαμμένο - Άβαφο κομμάτι.....	σελ 77
Θερμόγραμμα 4.6 : Σφάλμα μόνωσης.....	σελ 79
Θερμόγραμμα 4.7 : Ισόθερμη καμπύλη σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 107 °C για σφάλμα μόνωσης.....	σελ 79
Θερμόγραμμα 4.8 : Σφάλμα μόνωσης (High Contrast).....	σελ 80
Θερμόγραμμα 4.9 : Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα.....	σελ 82
Θερμόγραμμα 4.10 : Ισόθερμη καμπύλη σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 102°C.....	σελ 83
Θερμόγραμμα 4.11 : Ελαττωματική προσαρμογή μονωτικών	σελ 84
Θερμόγραμμα 4.12 : Διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της γραμμής.....	σελ 85
Θερμόγραμμα 4.13 : Διαστολή άνω ακμής.....	σελ 86
Θερμόγραμμα 4.14 : Ισόθερμη ακμής σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 200°C.....	σελ 87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....σελ.2

Πίνακας 1.1 : Ζώνες μήκους κύματος διαφόρων χρωμάτων.....σελ 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΙΡΑΜΑ-ΔΟΚΙΜΙΟ ΛΕΒΗΤΑ.....σελ.60

Πίνακας 4.1 : Ιδιότητες πετροβάμβακα 3cm.....σελ 62

Πίνακας 4.2 : Ιδιότητες πετροβάμβακα 5cm.....σελ 63

Εισαγωγή

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η τεχνολογία της υπέρυθρης θερμογραφίας και οι εφαρμογές που έχει αυτή σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος ανίχνευσης θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται σε διάφορα αντικείμενα και εφαρμογές εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την λειτουργία τους.

Σκοπός της διπλωματικής, στα κεφάλαια που ακολουθούν, είναι η κατανόηση των βασικών αρχών της θερμογραφίας, ο προσδιορισμός των παραμέτρων για την ορθή χρήση της και η παρουσίαση των ποικίλων εφαρμογών της στην ηλεκτροπαραγωγή.

Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο ένα αναφέρονται οι βασικές αρχές και νόμοι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας.

Το κεφάλαιο δύο αναφέρεται στις βασικές αρχές και παραμέτρους της υπέρυθρης θερμογραφίας. Επίσης αναλύονται τα θερμογραφικά απεικονιστικά συστήματα και η επεξεργασία των υπέρυθρων εικόνων.

Στο κεφάλαιο τρία παρουσιάζονται οι ποικίλες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας και πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι εφαρμογές της σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο τέσσερα παρουσιάζεται πείραμα θερμογράφησης σε δοκίμιο προσομοίωσης λέβητα. Καταγράφεται η πειραματική διαδικασία, οι μετρήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα θερμογράμματα.

Στο κεφάλαιο πέντε αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγαμε, τα πλεονεκτήματα και οι δυσκολίες της υπέρυθρης θερμογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι μορφή ενέργειας και διαδίδεται στο χώρο μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που εκπέμπει η ύλη, λόγω των αλλαγών στη διάταξη των ηλεκτρονίων των ατόμων ή των μορίων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν ακόμη και στο κενό, αποτελούνται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, και τα δύο ταλαντούμενα και μάλιστα κάθετα μεταξύ τους.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και χαρακτηρίζονται από την συχνότητά τους ν και το μήκος κύματός τους λ . Τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογα και συγκεκριμένα συνδέονται σε ένα μέσο με την παρακάτω σχέση :

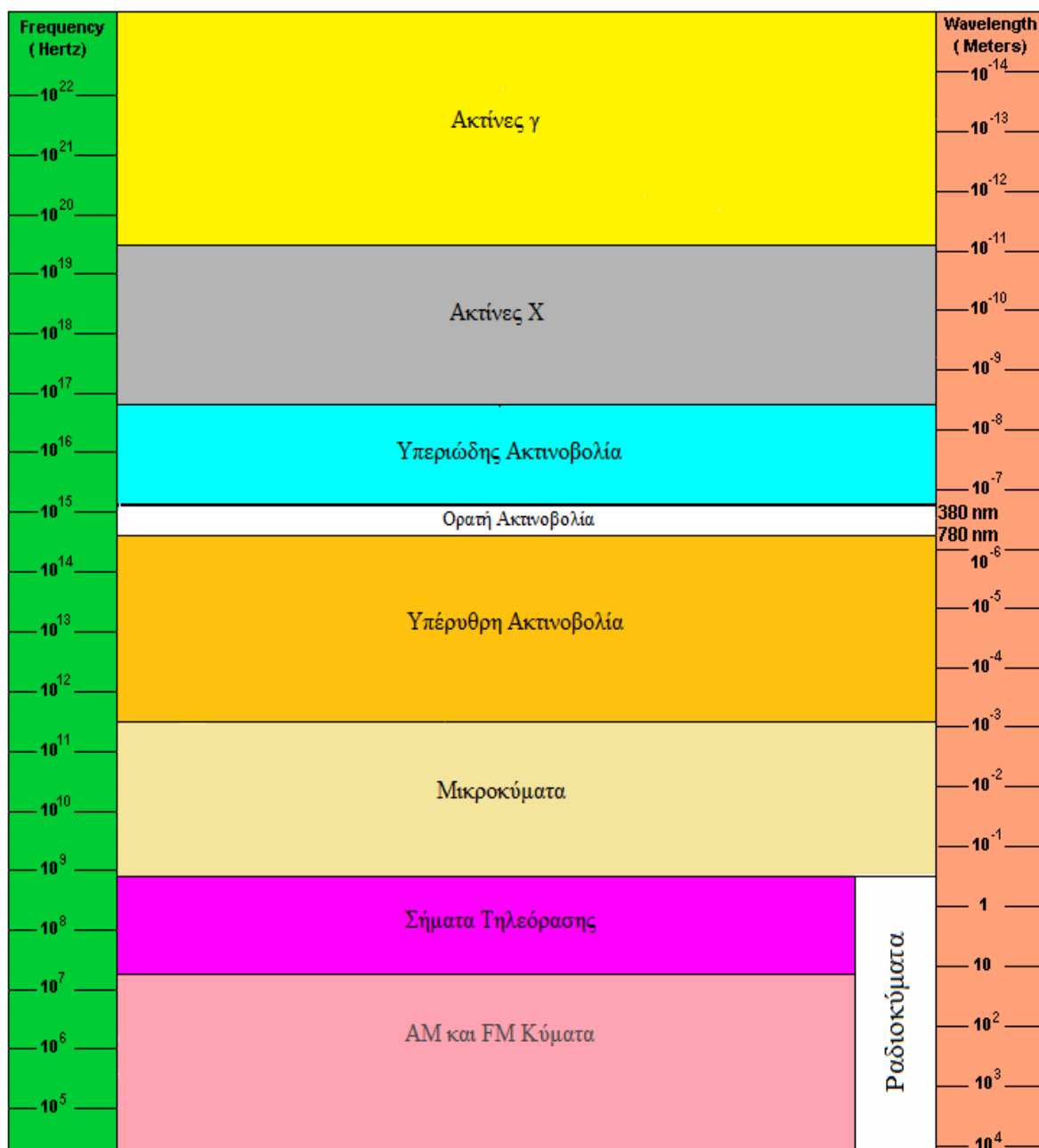
$$\lambda \cdot \nu = c$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο. Για το κενό είναι $c_0 = 2.998 \cdot 10^8$ m/s.

Η ενέργεια που μεταφέρουν τα κύματα αυτά αυξάνεται όσο μειώνεται το μήκος κύματός τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα υπέρυχνα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X και γ) να μεταφέρουν μεγάλη ενέργεια, γεγονός που έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αλληλεπίδραση των κυμάτων αυτών με τα υλικά σώματα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πρέπει να επισημάνουμε ότι επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών και μηκών κύματος. Η διανομή όλων των ακτινοβόλων ενεργειών μπορεί να σχεδιαστεί σε ένα διάγραμμα, γνωστό ως ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καλύπτει ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος: από λιγότερο των 10^{-10} μm για την κοσμική ακτινοβολία μέχρι 10^{10} μm (και περισσότερο) για τα κύματα ηλεκτρικής ισχύος. Περιλαμβάνει επίσης τις ακτίνες γ , τις ακτίνες X, την υπεριώδη

ακτινοβολία, το ορατό φως, την υπέρυθρη ακτινοβολία, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα.



Σχήμα 1.1. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

1.1.1 Ραδιοκύματα (radiowaves) :

Το εύρος του μήκους κύματός τους κυμαίνεται από 10^6 - 10^{10} μm . Τα ραδιοκύματα εκπέμπονται από τη Γη, τα κτίρια, τα αυτοκίνητα κι άλλα μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα. Πάνω στα ραδιοκύματα έχει βασιστεί η λειτουργία των ραντάρ, τα οποία ανιχνεύουν την παρουσία και την κίνηση σωμάτων που εκπέμπουν αυτού του τύπου την ακτινοβολία. Τα ραδιοκύματα, επίσης, είναι ευρέως γνωστά για την ικανότητά τους να μεταφέρουν ραδιοφωνικά σήματα και σήματα τηλεόρασης. Τα ραδιοφωνικά κύματα αποτελούνται από δύο ειδών εκπομπές, την AM (amplitude modulated waves) και την FM (frequency modulated waves). Τα FM κύματα έχουν μικρότερο μήκος κύματος από τα AM και μπορούν να εντοπιστούν από μεγάλα σώματα, όπως σπίτια, κτίρια και τούνελ. Αντίθετα, τα AM μπορούν να "αποφύγουν" τέτοια σώματα και να ταξιδέψουν σε πιο μεγάλες αποστάσεις. Ραδιοκύματα εκπέμπονται, επίσης, και από άλλα σώματα, όπως αστέρες και αέρια στο διάστημα (όπου και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της σύστασης των αντικειμένων αυτών).

1.1.2 Μικροκύματα (microwaves) :

Αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής ενέργειας. Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από 10^3 - 10^6 μm . Χρησιμοποιούνται από τους αστρονόμους για τον προσδιορισμό της δομής των γειτονικών γαλαξιών, καθώς και του δικού μας. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε αυτήν την ακτινοβολία στην κατασκευή φούρνων μικροκυμάτων, οι οποίοι μπορούν να θερμάνουν φαγητά, καθώς η ακτινοβολία αυτή απορροφάται από τις τροφές και τις θερμαίνει.

1.1.3 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation) :

Ο Hershel ήταν αυτός που ανακάλυψε πρώτος την υπέρυθρη ακτινοβολία, καθώς μελετούσε τις φασματικές ιδιότητες της ηλιακής ακτινοβολίας με την χρήση ενός πρίσματος. Οι παράλληλες ακτίνες του ήλιου πέφτοντας πάνω στο πρίσμα διασκορπίζονταν σε διαφορετικά χρώματα. Από σύμπτωση ή όχι, ένα θερμόμετρο βρισκόταν στο τραπέζι, όπου το ηλιακό φάσμα ήταν ορατό. Ο Hershel παρατήρησε ότι η θερμοκρασία που έδειχνε το θερμόμετρο αυξήθηκε, ακόμα και όταν το τοποθέτησε δίπλα στο ορατό φάσμα. Το φαινόμενο αυτό οδήγησε τον Hershel στο συμπέρασμα ότι πρέπει να

υπάρχει μια μη ορατή ακτινοβολία που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του θερμομέτρου. Επειδή το φαινόμενο παρατηρήθηκε δίπλα στην ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος, ο Hershel ονόμασε την ακτινοβολία αυτή infrared (υπέρυθρη).

Αυτού του τύπου η ακτινοβολία αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της θερμικής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματός της κυμαίνεται από $0.76 \mu\text{m} - 10^3 \mu\text{m}$. Το εύρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας διαχωρίζεται, επίσης, σε near-infrared ($0.76 \mu\text{m} \dots 1.5 \mu\text{m}$), σε shortwave infrared ($1.5 \mu\text{m} \dots 3 \mu\text{m}$), σε middle infrared ($3 \mu\text{m} \dots 5.5 \mu\text{m}$) και thermal infrared ($5.5 \mu\text{m} \dots 10^3 \mu\text{m}$).

Όλα τα σώματα που βρίσκονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτή του απολύτου μηδενός (273.15 K ή 0°C) εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία σε περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Έτσι υπέρυθρες μηχανές απεικόνισης συλλαμβάνουν τις υπέρυθρες ακτίνες που εκπέμπει το σώμα και δημιουργούν τα διαγράμματα θερμοκρασιακών διαφορών, που εμφανίζονται στην επιφάνεια του σώματος, (θερμογράφημα). Οι υπέρυθρες φωτογραφικές μηχανές δίνουν εικόνες από τις αόρατες υπέρυθρες ακτίνες και παρέχουν ακριβή ικανότητα εξ αποστάσεως μέτρησης θερμοκρασίας.

1.1.4 Ορατή ακτινοβολία (visible light) :

Είναι η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από $0.40 \mu\text{m} - 0.76 \mu\text{m}$. Το εύρος μήκους κύματος στα διάφορα χρώματα φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Χρώμα	Εύρος μήκους κύματος
Ιώδες	$0.40 - 0.44 \mu\text{m}$
Μπλε	$0.44 - 0.49 \mu\text{m}$
Πράσινο	$0.49 - 0.54 \mu\text{m}$
Κίτρινο	$0.54 - 0.60 \mu\text{m}$
Πορτοκαλί	$0.60 - 0.63 \mu\text{m}$
Κόκκινο	$0.63 - 0.76 \mu\text{m}$

Πίνακας 1.1. Ζώνες μήκους κύματος διαφόρων χρωμάτων

Το χρώμα μιας επιφάνειας εξαρτάται από την ικανότητα της επιφάνειας να ανακλά διάφορα μήκη κύματος. Για παράδειγμα μια επιφάνεια θα φαίνεται στο ανθρώπινο μάτι πορτοκαλί, όταν ανακλά τις ακτινοβολίες με μήκη κύματος από $0.60 - 0.63 \mu\text{m}$ και απορροφά τις υπόλοιπες.

1.1.5 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation) :

Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μήκος κύματος από $10^{-2} \mu\text{m} - 0.40 \mu\text{m}$. Έχει συχνότητα λίγο παραπάνω από αυτή του ορατού φωτός. Ωστόσο, η έντασή της είναι τέτοια που μπορεί να καταστρέψει ιστούς και κύτταρα. Ο ήλιος είναι μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και μικρές δόσεις αυτής της ακτινοβολίας βοηθούν στην παραγωγή της βιταμίνης D και προκαλούν το μαύρισμα του ανθρώπινου δέρματος. Η πολύωρη έκθεση, όμως, του ανθρώπου σε ακτινοβολία πλούσια σε υπεριώδεις ακτινοβολίες προκαλεί εγκαύματα, ηλιακές δερματίτιδες και σοβαρές βλάβες στα μάτια. Το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας, αλλά η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει προκαλέσει εξασθένηση του στρώματος του όζοντος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται επικίνδυνα οι δόσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας που βομβαρδίζει τη Γη και λαμβάνουν οι ζώντες οργανισμοί. Η υπεριώδης ακτινοβολία παράγεται και από τους λαμπτήρες φθορισμού. Χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική για αποστειρώσεις και για διάφορες θεραπείες, καθώς και από τους αστρονόμους για την παρατήρηση του ηλιακού συστήματος, του γαλαξία μας και άλλων περιοχών του σύμπαντος.

1.1.6 Ακτίνες X :

Το μήκος κύματος τους κυμαίνεται από $10^{-5} \mu\text{m} - 10^{-2} \mu\text{m}$. Αποτελεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεγάλης συχνότητας. Έχουν τέτοια διατρητική ικανότητα, ώστε να διαπερνούν εύκολα αρκετά υλικά και να καταστρέφουν ιστούς δέρματος πολλών ζώων. Αυτό μας έχει οδηγήσει στο να χρησιμοποιούμε τις ακτίνες X (με αρκετή φειδώ) ώστε να παρατηρούμε το ανθρώπινο σώμα. Βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην ιατρική (ακτινογραφίες). Είναι επικίνδυνες σε μεγάλες δόσεις, αλλά η ελεγχόμενη χρήση τους βοηθάει στην αναχαίτιση του καρκίνου.

1.1.7 Ακτίνες γ :

Τα μήκη κύματος αυτής της ακτινοβολίας εκτείνονται από 10^{-8} – 10^{-5} μm . Οι ακτίνες γ , που έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα και τα μικρότερα μήκη κύματος εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά, φυσικά ή τεχνητά. Επίσης, μεγάλοι επιταχυντές που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες για την κατανόηση της δομής της ύλης μπορούν να δώσουν ακτινοβολία γ . Αλλά η μεγαλύτερη πηγή ακτινών γ είναι το σύμπαν! Παράγει ακτινοβολία γ με όλους τους δυνατούς τρόπους. Οι ακτίνες αυτές έχουν μια εκπληκτική διατρητική ικανότητα. Μπορούν να διατρήσουν μια επιφάνεια τσιμέντου με πάχος 3 m!

1.2 Βασικοί νόμοι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του απολύτου μηδενός (273.15 K ή 0 °C), εκπέμπει ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις σ' ένα μεγάλο εύρος κύματος. Η ιδεατή επιφάνεια που μπορεί να εκπέμψει το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε μια δεδομένη θερμοκρασία είναι το μέλαν σώμα.

Το 1900 ο Planck όρισε το μέλαν σώμα (black body). Είναι μια ιδανική επιφάνεια, η οποία παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες :

- απορροφά όλη την προσπίπτουσα σ' αυτήν ακτινοβολία, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος ή τη διεύθυνση πρόσπτωσης.
- για οποιοδήποτε μήκος κύματος, εκπέμπει περισσότερη ενέργεια από οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια της ίδιας θερμοκρασίας.
- εκπέμπει ισότροπα, δηλαδή με την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις.

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, το μέλαν σώμα χρησιμοποιείται σαν επιφάνεια αναφοράς με την οποία συγκρίνονται οι ιδιότητες ακτινοβολίας των πραγματικών επιφανειών.

Ο νόμος του Planck μας δίνει την ισχύ της ακτινοβολίας (ενέργεια) που εκπέμπεται από ένα σώμα συγκεκριμένης απόλυτης θερμοκρασίας T και συγκεκριμένου μήκους κύματος λ ανά μονάδα επιφάνειας :

$$W_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{hc/(\lambda k T)} - 1)} \cdot 10^{-6}$$

Όπου W_{λ} = η ακτινοβολία του μέλανος σώματος για μήκος κύματος λ (W/m^2)

c = η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

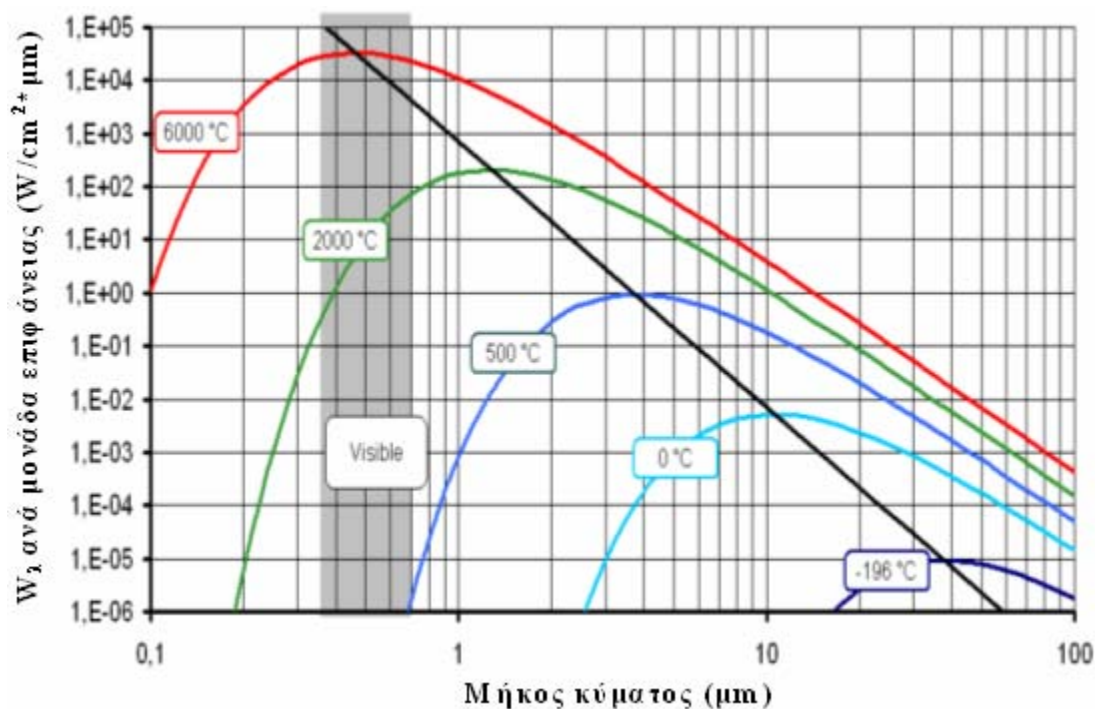
h = η σταθερά Planck ($6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

k = η σταθερά Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

T = απόλυτη θερμοκρασία μέλανου σώματος (K)

λ = μήκος κύματος (m)

Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή Planck για διάφορες θερμοκρασίες



Σχήμα 1.2 Κατανομή του Planck

Στον κάθετο άξονα δίνεται η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, ενώ στον οριζόντιο άξονα το μήκος κύματος λ . Το σχήμα δείχνει τις καμπύλες κατανομής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά θερμοκρασία μέλανος σώματος.

Από το διάγραμμα του Planck μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα :

- Η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι συνεχής συνάρτηση του μήκους κύματος. Αυξάνεται με το μήκος κύματος, φθάνει μια μέγιστη τιμή, και ενώ το μήκος κύματος συνεχίζει να αυξάνεται η ακτινοβολία μειώνεται, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας.
- Μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας εκπέμπεται σε μικρότερα μήκη κύματος, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.
- Για κάθε μήκος κύματος η ενέργεια που ακτινοβολείται αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann προκύπτει από την ολοκλήρωση του νόμου του Planck σε ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μας δίνει την ολική ισχύ που ακτινοβολείται από μια επιφάνεια σε μια θερμοκρασία T :

Για την ιδεατή περίπτωση του μέλανος σώματος ο νόμος των Stefan-Boltzmann είναι:

$$W = \sigma T^4 \text{ (W / m}^2\text{)}$$

Ενώ για την περίπτωση ενός κανονικού σώματος ο νόμος των Stefan-Boltzmann γίνεται:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \text{ (W / m}^2\text{)}$$

Όπου ϵ : η εκπεμπτικότητα του σώματος, η οποία κυμαίνεται από 0 – 1.

σ : σταθερά Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$)

T : η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (K)

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann, επί της ουσίας, εκφράζει την συσχέτιση της επιφανειακής θερμοκρασίας με την ενέργεια που εκπέμπει η επιφάνεια αυτή.

Ένας άλλος σημαντικός νόμος που διέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ο νόμος μετατόπισης του Wien. Ο συγκεκριμένος νόμος προκύπτει αν παραγωγίσουμε την εξίσωση του Planck ως προς λ , ενώ η θερμοκρασία T παραμένει σταθερή και στη συνέχεια εξισώσουμε το αποτέλεσμα με το μηδέν.

Ο νόμος μετατόπισης του Wien είναι :

$$\lambda_{\max} * T = b$$

όπου $\lambda_{\max}$: το μήκος κύματος της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας (μm)

T : η θερμοκρασία της επιφάνειας (K)

b : σταθερά εκτοπίσματος Wien ($2.897 \mu\text{m} / \text{K}$)

Ο νόμος μετατόπισης του Wien συσχετίζει άμεσα την επιφανειακή θερμοκρασία με το μέγιστο μήκος κύματος της εκπεμφθείσας ενέργειας. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που προκύπτουν από τον νόμο του Wien απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα κατανομής του Planck με την ευθεία γραμμή, η οποία ονομάζεται γραμμή μέγιστης ισχύος. Από την τομή της ευθείας με τις καμπύλες των διάφορων θερμοκρασιών οδηγούμαστε σε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα :

- Γνωρίζοντας ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου είναι $T = 5762 \text{ K}$, το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας θα είναι σε μήκος κύματος $\lambda_{\text{max}} = 0.50 \mu\text{m}$, το οποίο είναι κοντά στο μέσον της ορατής περιοχής του φάσματος.
- Επιφάνεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T = 298 \text{ K}$) το μέγιστο ακτινοβολίας που εκπέμπει είναι σε μήκος κύματος $9.72 \mu\text{m}$ που είναι στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.
- Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο πιο σημαντικά γίνονται τα μικρά μήκη κύματος, μέχρι που ένα σημαντικό μέρος της εκπεμφθείσας ακτινοβολίας να είναι στην ορατή περιοχή του φάσματος.

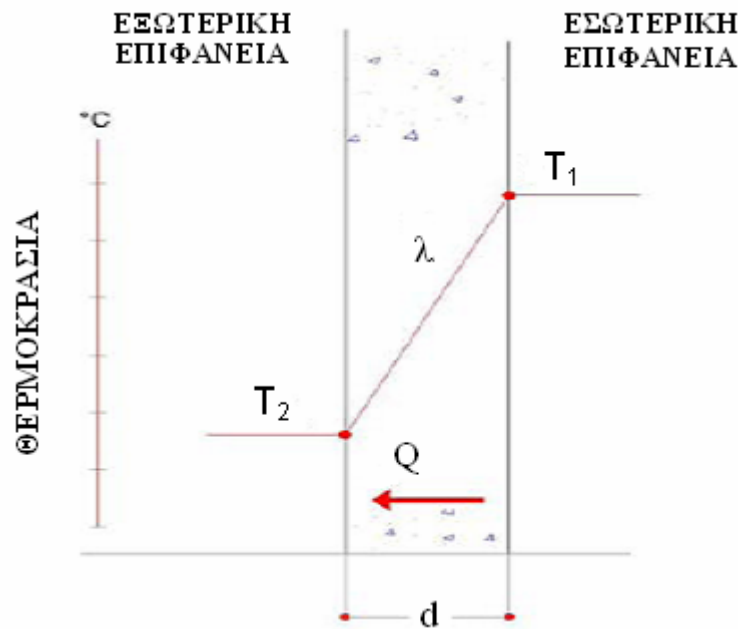
1.3 Αρχές μεταφοράς θερμότητας

Για την καλύτερη κατανόηση της υπέρυθρης θερμογραφίας που θα αναλυθεί στα παρακάτω κεφάλαια, παρατείνονται οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας.

1.3.1 Μεταφορά με αγωγή

Είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται σ'ένα στερεό ή σε ακίνητο ρευστό, όταν στο μέσο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση. Η θερμότητα μεταδίδεται δια μέσου της μάζας των σωμάτων. Όταν δυο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες έλθουν σε άμεση επαφή, η θερμότητα μεταδίδεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Στην αγωγή έχουμε μεταφορά ενέργειας από σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας σε σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας ενός υλικού, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων.

Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου των σωμάτων, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σώματος. Παράδειγμα καλών αγωγών είναι τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ [W/m*K] των υλικών είναι δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας των υλικών διαμέσου της μάζας τους.



Σχήμα 1.3 Μεταφορά με αγωγή

Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από πέτασμα, με συγκεκριμένη επιφάνεια για δεδομένο πάχος διατυπώνεται ως εξής.

$$Q = (\lambda/d) * A * (T_1 - T_2) * t$$

Όπου:

Q : η ποσότητα της θερμότητας, η οποία διέρχεται σε χρονικό διάστημα t από την μία πλευρά (μεγαλύτερης θερμοκρασίας) στην άλλη (μικρότερης θερμοκρασίας)

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

A : το εμβαδόν της επιφάνειας

T_1 : θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

T_2 : θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

d : το πάχος του υλικού

t : ο χρόνος ροής της θερμότητας

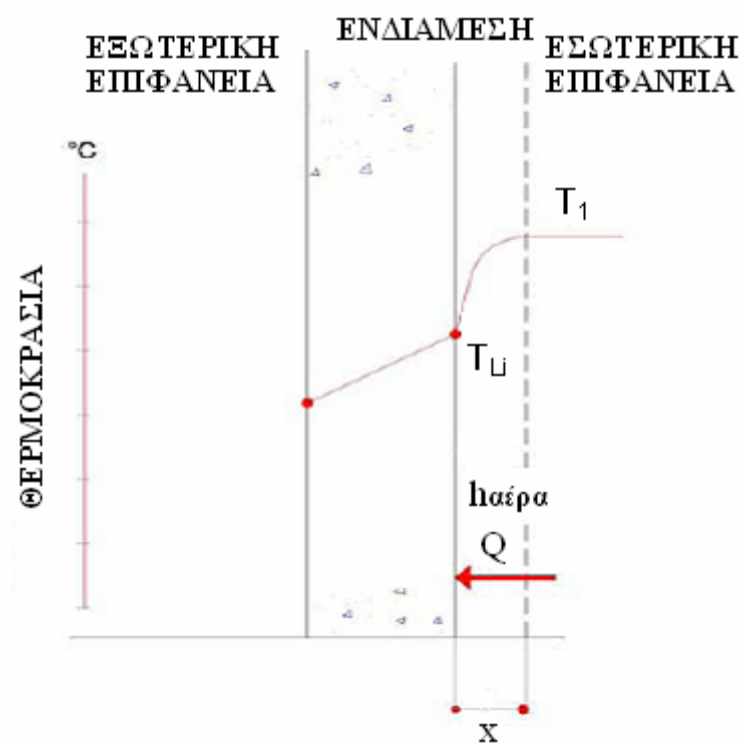
1.3.2 Μεταφορά με συναγωγή

Είναι η μετάδοση θερμότητας που πραγματοποιείται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού σε επαφή με την επιφάνεια, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία. Η συναγωγή είναι ένας σύνθετος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας. Η συνολική μεταφορά θερμότητας οφείλεται αφ' ενός στην ενέργεια που μεταφέρεται λόγω της κίνησης των μορίων και αφ' ετέρου στην ενέργεια που μεταφέρεται από την μακροσκοπική κίνηση του ρευστού.

Ανάλογα με την ροή του ρευστού η συναγωγή διακρίνεται σε :

- Ελεύθερη (φυσική) συναγωγή: η ροή είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται στις διαφορές πυκνότητας λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών στο ρευστό
- Εξαναγκασμένη συναγωγή: η ροή προκαλείται από εξωτερικά μέσα (ανεμιστήρες, αντλίες)
- Συνδυασμένη συναγωγή: όπου συνυπάρχουν η ελεύθερη και εξαναγκασμένη. Αντιστοιχεί στις περιπτώσεις που η ταχύτητα του ρευστού είναι μικρή, λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, ενώ οι δυνάμεις της άνωσης είναι μεγάλες.

Ο συντελεστής συναγωγής h [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$] εμπεριέχει όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συναγωγή. Εξαρτάται από τις διάφορες ιδιότητες του ρευστού όπως πυκνότητα, ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα, καθώς επίσης και από την γεωμετρία της επιφάνειας και τις συνθήκες της ροής.



Σχήμα 1.4 Μεταφορά με συναγωγή

Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως εξής :

$$Q = (h\alpha/x) * A * (T_1 - T_{Li})$$

Όπου:

Q : το ποσόν θερμότητας που διέρχεται από την εσωτερική επιφάνεια στην ενδιάμεση

h : ο συντελεστής συναγωγής

A : το εμβαδόν της επιφάνειας

T₁ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

T_{Li} : η θερμοκρασία της ενδιάμεσης επιφάνειας της κατασκευής

x : το πάχος του διακένου

1.3.3 Μεταφορά με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους, τη φύση της επιφάνειας και διάφορες άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη αποκλειστικά με αυτό τον τρόπο μεταφοράς. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Στο κενό μάλιστα η ακτινοβολία μεταφέρεται πιο αποτελεσματικά. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε ένα άλλο σώμα ή θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση θερμοκρασίας ενός σώματος.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα εκφράζεται ως εξής:

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

Όπου

q : εκπεμπόμενη ενέργεια [W/m^2]

ε : συντελεστής εκπομπής υλικού

σ : σταθερά Stefan – Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$)

T_s : απόλυτη θερμοκρασία του σώματος [K]

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως νόμος των Stefan – Boltzmann.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Εισαγωγή στην υπέρυθρη θερμογραφία

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται σε υλικά και εφαρμογές, εν γένει, και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή τους. Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος που σκοπό έχει την πρόληψη και την έγκυρη επιδιόρθωση ενός προβλήματος. Οι υπέρυθρες (IR) τεχνικές χρησιμοποιούνται κοινώς σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογίας, της ιατρικής και άλλων που θα αναφέρουμε παρακάτω.

Η υπέρυθρη θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι **κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός, εκπέμπει ενέργεια υπό τη μορφή ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις**. Η θερμογραφία ή η υπέρυθρη 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 μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες στο υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες.

Ένα θερμογραφικό σύστημα ανιχνεύει τα φωτόνια που διαφεύγουν από το υπό εξέταση αντικείμενο. Φωτόνια γεννώνται σε όλο τον όγκο του σώματος, αλλά η πιθανότητα να διαφύγουν του σώματος αυξάνεται όσο πιο κοντά στην επιφάνεια γεννώνται, γι' αυτό και συχνά η θερμογραφία αναφέρεται ως επιφανειακό φαινόμενο αν και στη πραγματικότητα είναι ογκομετρικό.

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 ενός μεγάλου εύρους ατελειών, σφαλμάτων, διαρροών σε διάφορα αντικείμενα ή εφαρμογές.

Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν μια υπέρυθρη κάμερα συνδεδεμένη με ένα υπέρυθρο ανιχνευτή που απεικονίζει τις διαφορές θερμικής ακτινοβολίας. Η εικόνα λαμβάνεται από τη θερμοκάμερα και ο τεχνικός εκτιμάει την κατάσταση στον υπολογιστή. Σύγχρονα θερμικά συστήματα χρησιμοποιούν αλγορίθμους για να παρέχουν ακριβή χαρακτηρισμό των ατελειών. Η θερμογραφική απεικόνιση μπορεί να περιλαμβάνει ενεργές ή παθητικές πηγές, όπως θερμάστρες ή ηλιακή ακτινοβολία.

Όπως προείπαμε, οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας είναι οι εξής τρεις: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι ο τρόπος που μας ενδιαφέρει στις περισσότερες των εφαρμογών, από την άποψη της μη καταστροφικής εξέτασης, καθώς οι IR κάμερες ανιχνεύουν την ακτινοβολούμενη θερμότητα.

2.2 Βασικές αρχές υπέρυθρης θερμογραφίας

Όπως προ είπαμε, όλα τα υλικά σε μια θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια – θερμική ακτινοβολία, η οποία μεταδίδεται στο χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένα άκρα βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες), οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Ο ρυθμός εκπομπής ενέργειας, Φ , ανά μονάδα επιφανειακής περιοχής του υλικού σχετίζεται με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας T , με βάση το νόμο των Stefan-Boltzmann :

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

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και ε η εκπεμπτικότητα του υλικού.

Ενώ σύμφωνα με το νόμο εκτοπίσματος του Wien :

$$\lambda_{\max} = b/T$$

$\lambda_{\max}$: μήκος κύματος της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας (μm)

και b : σταθερά εκτοπίσματος Wien ($2.897 \mu\text{m/K}$)

που συσχετίζει την επιφανειακή θερμοκρασία με το μέγιστο μήκος κύματος της εκπεμφθείσας ενέργειας.

Οι επιφανειακές θερμοκρασιακές μεταβολές, προκαλούμενες από εσωτερικές ανωμαλίες στο δοκίμιο, εξαρτώνται από τον τύπο, το μέγεθος και το βάθος των ανωμαλιών. Η επιφανειακή θερμοκρασία μετράται μέσω μέτρησης της εκπεμφθείσας ακτινοβολίας. Η ακριβής μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εξαρτάται από την επιφάνεια και τα χαρακτηριστικά του υλικού, όπως η εκπεμπτικότητα και από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η μεταγωγή, η θερμότητας ψύξης, η ατμοσφαιρική εξασθένιση και άλλες πηγές παρέμβασης.

2.3 Παράμετροι υπέρυθρης θερμογραφίας

2.3.1 Παράμετροι ακτινοβολίας σώματος

1. εκπεμπτικότητα ε : η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας
2. απορροφητικότητα α : η ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας
3. διαπερατότητα τ : η ικανότητα προσπέλασης της ακτινοβολίας μέσα από το σώμα
4. ανακλαστικότητα ρ : η ικανότητα ανάκλασης της ακτινοβολίας

Από το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα ισχύει : $\varepsilon + \rho + \tau = 1$.

Οι πιο κρίσιμες παράμετροι ακτινοβολίας είναι η εκπεμπτικότητα ε και η ανακλαστικότητα ρ για αυτό και επιβάλλεται πάντα ο προσδιορισμός τους. Η

διαπερατότητα τ συνήθως είναι μικρή ως μηδενική και δεν την λαμβάνουμε υπόψη μιας και τα σώματα που εξετάζουμε συνήθως είναι αδιαφανή. Σε αντίθετη περίπτωση όμως πρέπει να υπολογίζεται γιατί επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις.

2.3.2 Εξωτερικοί-Περιβαλλοντικοί παράμετροι

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη είναι η ύπαρξη εξωτερικών θερμικών πηγών στο χώρο των μετρήσεων, όπως θερμαντικά σώματα. Έτσι μετρήσεις κάτω από πολύ δυνατή ηλιοφάνεια είναι δυσχερείς, μιας και το ποσοστό των ανακλάσεων είναι πολύ υψηλό και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, με αποτέλεσμα αυτό που μετράμε να μην είναι αυτό που πραγματικά εκπέμπει το σώμα. Αν και πολλές φορές, η χρήση εξωτερικών θερμικών πηγών μας βοηθάει στη λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων (ενεργητική θερμογραφία). Αντίστοιχα, μετρήσεις κάτω από ισχυρή ψύξη (ισχυροί άνεμοι, σώματα κλιματισμού) μας οδηγούν σε εσφαλμένη εκτίμηση της θερμοκρασιακής κατάστασης του σώματος λόγω της βεβιασμένης ψύξης του.

2.3.3 Προσδιορισμός εκπεμπτικότητας ε

Η αρχή του Stefan-Boltzmann σχετίζει την επιφανειακή θερμοκρασία ενός αντικειμένου με την εκπεμφθείσα από αυτό ακτινοβολία. Η ικανότητα ακτινοβολίας είναι μια ιδιότητα επιφάνειας που εξαρτάται κυρίως από το υλικό, την τραχύτητα, την ύπαρξη επιφανειακών στρωμάτων και τον βαθμό πόλωσης της επιφάνειας. Η εκπεμπτικότητα είναι ο λόγος της ακτινοβολίας ενός σώματος σε μία δοσμένη θερμοκρασία προς την ακτινοβολία ενός σώματος που απορροφά όλη την ακτινοβολία, στην ίδια θερμοκρασία και κυμαίνεται μεταξύ 0 (για έναν τέλειο ανακλαστήρα) και 1 (για έναν τέλειο εκπομπό, το αποκαλούμενο μέλαν σώμα).

Επιφάνειες με χαμηλή ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας, λειτουργούν ως καθρέφτες και καθιστούν τις μετρήσεις δύσκολες, δεδομένου ότι οι εξωγενείς ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα θερμά γειτονικά σώματα διαταράσσουν τις μετρήσεις μέσω των ανακλάσεων. Διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται για να λύσουν το πρόβλημα της χαμηλής εκπεμπτικότητας ε . Συνηθέστερη όλων είναι η κάλυψη της επιθεωρούμενης επιφάνειας με ένα χρώμα υψηλής ικανότητας ακτινοβολίας (0.8 και άνω).

Στα μη μεταλλικά αντικείμενα η θερμογράφηση είναι εύκολη λόγω της υψηλής εκπεμπτικότητας των υλικών. Αντίθετα στα μεταλλικά και γυάλινα αντικείμενα είναι δύσκολη λόγω της χαμηλής και εξαρτώμενης από το μήκος κύματος εκπεμπτικότητας.

Έτσι είναι πολύ σημαντικό, πριν από κάθε θερμογράφηση, ο προσδιορισμός του ε ώστε να κάνουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις στη θερμοκάμερα, βάσει των οποίων θα κάνουμε τις μετρήσεις μας. Η απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική από τους θερμογράφους είναι αυτή με τη χρήση μιας μαύρης ταινίας. Σύμφωνα μ' αυτήν την τεχνική τοποθετούμε μια μαύρη ταινία στην επιφάνεια του σώματος που μας ενδιαφέρει και μετράμε πάνω της με τη θερμοκάμερα τη θερμοκρασία της, όπου γνωρίζουμε ότι το $\varepsilon=1$ (ορισμός μέλανος σώματος). Έπειτα εστιάζουμε με τη θερμοκάμερα στην ακάλυπτη περιοχή πάνω στην επιφάνεια του σώματος και αλλάζουμε την εκπεμπτικότητα στο όργανο μας, μέχρι αυτό να μας δείξει την ίδια θερμοκρασία που μετρήσαμε και στην ταινία. Η εκπεμπτικότητα ε , που προκύπτει για την ίδια θερμοκρασία T που βρήκαμε στη μαύρη ταινία, είναι η ζητούμενη εκπεμπτικότητα του σώματος. Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι το ε κατά τη θερμογράφηση μεταβάλλεται αλλάζοντας τη γωνία θερμογράφησης του αντικειμένου, δηλαδή το ε που μετράμε πάντα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη γωνία.

2.4 Τεχνικές θερμογράφησης

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τεχνικές, την ενεργητική και την παθητική. Η παθητική θερμογραφία εξετάζει τα υλικά και τις δομές που σε φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζουν διαφορετική (συντά υψηλότερη) θερμοκρασία από το περιβάλλον, ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογράφησης, ένα εξωτερικό ερέθισμα είναι απαραίτητο για να προκαλέσει τις σχετικές θερμικές διαφορές. Η παθητική θερμογραφία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε πλήθος εφαρμογών της βιομηχανίας, της προληπτικής συντήρησης, ιατρικής, δασικής πυρανίχνευσης, γεωργίας, βιολογίας, ανίχνευσης αερίων και στη μη καταστρεπτική δοκιμή. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, εντοπίζονται ασυνήθιστες θερμοκρασίες σε σχέση με το περιβάλλον και υποδεικνύουν σημεία που πιθανόν χρήζουν προσοχής.

Αντίθετα με την παθητική θερμογραφία, στην ενεργητική, ένα εξωτερικό ερέθισμα απαιτείται για να παράγει τις σχετικές διαφορές θερμοκρασίας που σε φυσιολογικές

συνθήκες δεν υπάρχουν. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτού του εξωτερικού ερεθίσματος (π.χ. χρόνος t_0 που εφαρμόζεται) επιτρέπουν ποσοτικούς χαρακτηρισμούς, όπως παραδείγματος χάριν το βάθος της ανιχνευμένης ατέλειας. Ανάλογα με το είδος του εξωτερικού ερεθίσματος έχουν αναπτυχθεί τα εξής είδη ενεργητικής θερμογραφίας:

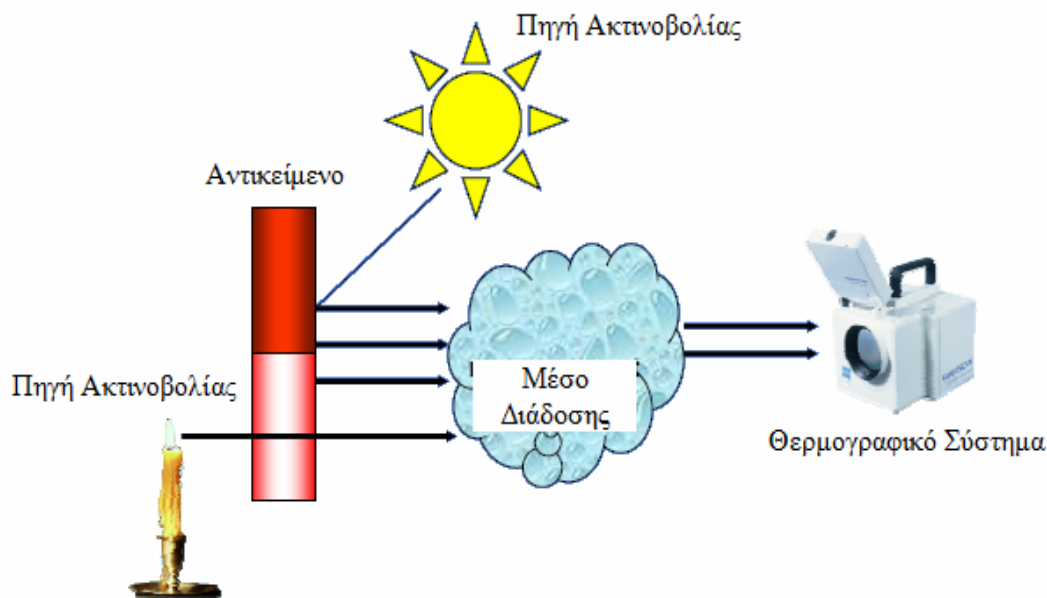
- *θερμογραφία παλμού*, όπου το ερέθισμα είναι ένας παλμός (κυρίως για λεπτά υλικά-πρόσκαιρη θερμογράφηση)
- *θερμογραφία βήματος*, όπου το ερέθισμα είναι ένα τετραγωνικό κύμα είτε σε μορφή βήματος είτε σε περιοδική διαδικασία.
- *Lockin θερμογραφία*, όπου ένα κύμα χαμηλής συχνότητας παράγεται στην επιφάνεια του δείγματος χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη λάμπα, ώστε αυτό το κύμα να πολλαπλασιάζεται και να διαχέεται μέσα σε όλο το υλικό.
- *Viobrothermography*, όπου το ερέθισμα είναι μηχανικές δονήσεις που εφαρμόζονται πάνω στο σώμα σε σταθερές συχνότητες.

Γενικά η παθητική θερμογραφία είναι απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, από την άλλη όμως, η ενεργητική θερμογραφία επεμβαίνει σε περιπτώσεις όπου η παθητική θερμογράφηση είναι αδύνατη, ενώ επίσης μας παρέχει τη δυνατότητα για ποσοτικούς προσδιορισμούς του σφάλματος.

2.5 Θερμογραφικά απεικονιστικά συστήματα

Ένας υπέρυθρος θερμικός απεικονιστής είναι μια φωτογραφική μηχανή που ανιχνεύει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ακτινοβολείται στην υπέρυθρη (IR) φασματική ζώνη από ένα αντικείμενο (του οποίου η θερμοκρασία πρέπει να μετρηθεί) και την μετατρέπει σε ένα ηλεκτρονικό σήμα. Συγκεκριμένα η ενέργεια ακτινοβολείται από το αντικείμενο μέσω ενός μέσου (συνήθως τον αέρα) και εν συνεχεία προσλαμβάνεται από το αισθητήριο σύστημα, όπου περνά πρώτα απ' τον φακό, το φίλτρο και τελικά καταλήγει σ' έναν υπέρυθρο ανιχνευτή ή σ' έναν εστιακό αισθητήρα σειράς - Focal Plane Array (FPA), οι

οποίοι μετατρέπουν την ακτινοβολία σε ηλεκτρονικό σήμα. Τα υπέρυθρα συστήματα πρώτης γενιάς, που είναι εξοπλισμένα με έναν απλό ενιαίο ανιχνευτή, χρησιμοποιούν επίσης έναν επιπλέον μηχανισμό scanning και για αυτόν τον λόγο καλούνται συμβατικά υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης (IR Scanning Radiometer-IRSR). Αντίθετα οι υπέρυθρες φωτογραφικές μηχανές με αισθητήρια στοιχεία FPA, αν και δεν περιλαμβάνουν μηχανισμό σκαναρίσματος, εντούτοις μας παρέχουν εικόνες αντίστοιχες μ'αυτές από ηλεκτρονικό σκανάρισμα, γι' αυτό και αναφέρονται συνήθως ως IRSR.



Σχήμα 2.1 Ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι μετρήσεις που γίνονται με τη βοήθεια των φασματικών ραδιομέτρων είναι γενικά βασισμένες στον νόμο του Planck που αναλύσαμε παραπάνω. Στις υπέρυθρες φωτογραφικές μηχανές αν και χαρακτηρίζονται συχνά ως ραδιόμετρα συνολικής ακτινοβολίας, η ικανότητα αίσθησης των ανιχνευτών τους περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο πλάτος του υπέρυθρου φάσματος.

Στην πραγματικότητα, οι υπέρυθροι ανιχνευτές εκτελούν μετρήσεις σε δύο διαφορετικές περιοχές της υπέρυθρης ζώνης: στην περιοχή μικροκύματος (short wave-SW) και σ' αυτήν των μακρών κυμάτων (long wave-LW). Η επιλογή της κατάλληλης φασματικής ζώνης (SW ή LW) εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες. Μερικές επιφάνειες έχουν υψηλότερη ικανότητα ακτινοβολίας στη περιοχή SW. Χαμηλού κόστους ανιχνευτές καθώς και θερμοηλεκτρικά ψυχόμενοι ανιχνευτές είναι επίσης διαθέσιμοι σε

αυτήν την ζώνη. Εντούτοις, παρά το σχετικά υψηλό ατμοσφαιρικό συντελεστή μετάδοσης, συνήθως η περιοχή SW μας παρέχει μετρήσεις υψηλότερης ακριβείας για αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός μέτρου. Από την άλλη στην περιοχή των μικροκυμάτων (LW) λόγω των υψηλών θερμικών διαφορών που παρουσιάζονται επιτυγχάνονται καλύτερες αποδόσεις των θερμογραφικών συστημάτων.

Ο ανιχνευτής είναι ο πυρήνας του θερμογραφικού συστήματος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι ανιχνευτές είναι οι αποκαλούμενοι ανιχνευτές φωτονίων, στους οποίους η δημιουργία ή η μεταφορά των ηλεκτρονίων συνδέεται άμεσα με την απορρόφηση φωτονίων. Το βασικό χαρακτηριστικό των ανιχνευτών φωτονίων είναι ότι έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (της τάξης των μικροδευτερολέπτων) αλλά απαιτούν ψύξη αρκετά κάτω από την περιβαλλοντική θερμοκρασία, ώστε να έχουν υψηλή ευαισθησία και γρήγορη ανίχνευση (εάν είναι απαραίτητο). Η ψύξη των αισθητήρων γίνεται συνήθως με υγρό άζωτο.

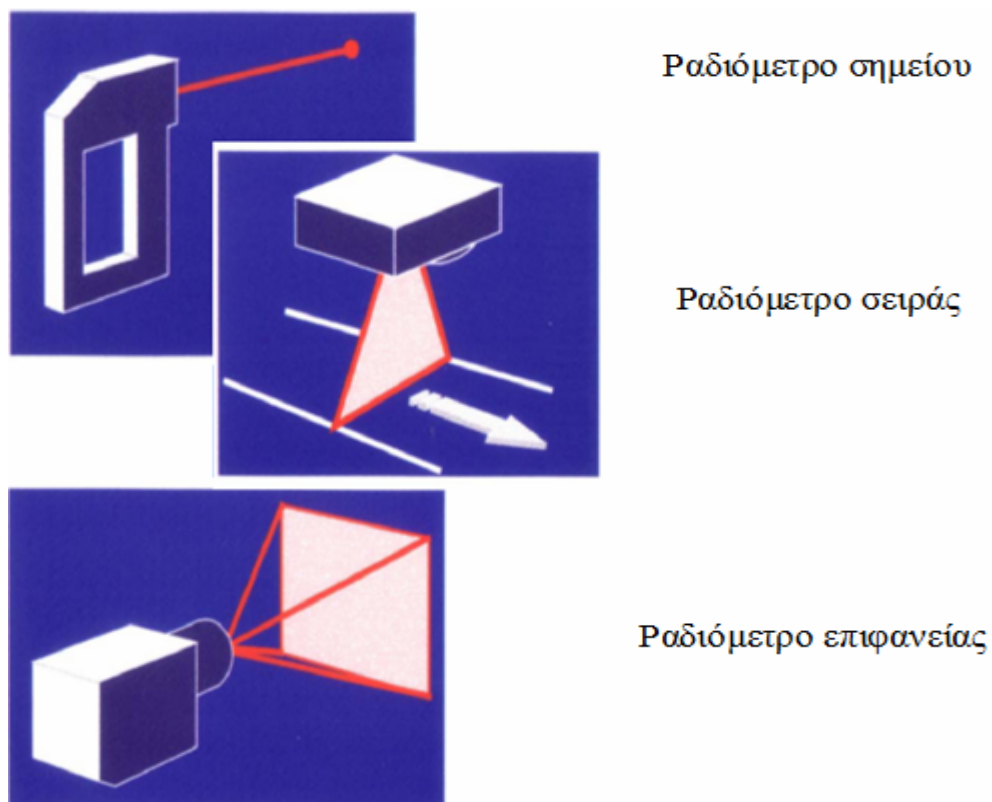
Όταν το αισθητήριο στοιχείο είναι ένας απλός ανιχνευτής ή ανιχνευτής σημείου, προκειμένου να λάβει την ενέργεια από διαφορετικά μέρη του οπτικού πεδίου (δηλ., για να ανιχνεύσει το αντικείμενο), ένας κατάλληλος ηλεκτρομηχανικός μηχανισμός ανίχνευσης πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Αυτός ο μηχανισμός ανίχνευσης μπορεί να αποτελείται από μετακινούμενους καθρέφτες ή από διαθλαστικά στοιχεία (όπως πρίσματα) ή από ένα συνδυασμό και των δύο. Για τη δυσδιάστατη απεικόνιση, ένας τέτοιος μηχανισμός επιτρέπει την ανίχνευση του αντικειμένου και στις κάθετες και στις οριζόντιες κατευθύνσεις. Τα υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης που ανιχνεύουν το αντικείμενο μόνο σε μια κατεύθυνση (μονοδιάστατο IRSR) είναι κατάλληλα είτε κατά τη μέτρηση των θερμοκρασιών αντικειμένων που κινούνται σε μία κάθετη κατεύθυνση ως προς την ανίχνευση, είτε λόγω της πολύ υψηλής ταχύτητας ανίχνευσης που παρουσιάζουν στη μελέτη των γρήγορων παροδικών φαινομένων.

Πριν φθάσει στον ανιχνευτή, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνά μέσω των ειδικά σχεδιασμένων φακών. Τα υλικά των φακών που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλή διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία όπως το γερμάνιο, το πυρίτιο, ή ο σάπφειρος. Επιπλέον, οι φακοί πρέπει να επικαλυφθούν με ένα κατάλληλο υλικό για να επιτρέψουν τη μέγιστη δυνατή μετάδοση IR. Η χρήση φίλτρων μας επιτρέπει, επίσης, να βλέπουμε μέσω ειδικών συνθηκών ή να μετράμε τη θερμοκρασία επιφανείας αντικειμένων όπως το γυαλί,

το πλαστικό, ή ακόμα και των φλογών. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ανάλογα την περίπτωση είτε χαμηλοπερατά είτε υψηλοπερατά.

Το εύρος των τιμών θερμοκρασίας που μετράει ένα τυπικό θερμογραφικό σύστημα κυμαίνεται περίπου από -20 ως $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, και μπορεί να επεκταθεί μέχρι $1500\text{--}2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ με τη χρησιμοποίηση ειδικών φίλτρων. Κάθε θερμοκάμερα προτού φτάσει στον αγοραστή πρέπει να τίθεται σε διαδικασία calibration (βαθμονόμηση) από τον κατασκευαστή. Το calibration είναι μια ειδική διαδικασία που γίνεται από τον κατασκευαστή με τη χρήση μελάνων σωμάτων αναφοράς και προσδιορίζει μέχρι ποια τιμή θερμοκρασίας μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια η θερμοκάμερα. Πέρα από τη θερμοκρασία του calibration η θερμοκάμερα συνεχίζει να καταγράφει τιμές αλλά με μειωμένη ακρίβεια. Σε κάθε παραγγελία θερμογραφικού συστήματος ο ενδιαφερόμενος πρέπει να ζητάει από τον κατασκευαστή το δελτίο αναφοράς του calibration.

Τα τρία βασικά είδη υπέρυθρων ραδιομέτρων όσον αφορά τη σάρωση φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2 Ραδιόμετρο σημείου, ραδιόμετρο σειράς και ραδιόμετρο επιφανείας

2.6 Γεωμετρική ανάλυση

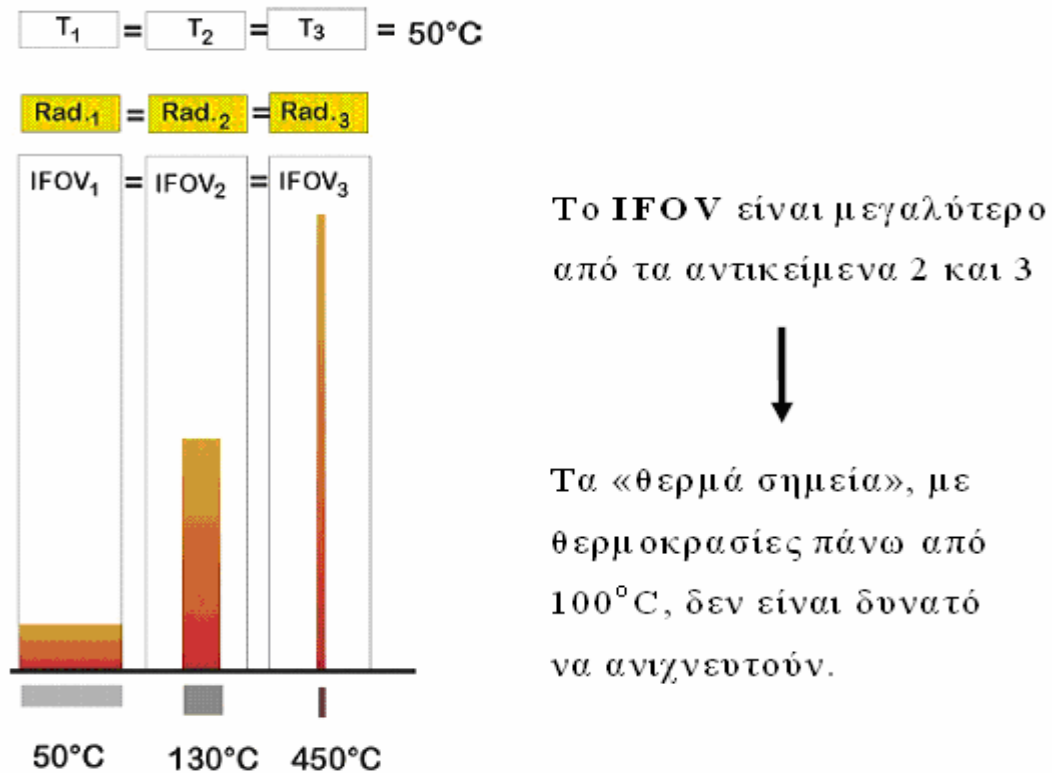
Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο κάθε απεικονιστικού συστήματος είναι η ανάλυση εικόνας. Η γεωμετρική ανάλυση εικόνας είναι η ικανότητα ενός συστήματος θερμικής απεικόνισης που ανιχνεύει και που μετρά ακριβώς τη θερμοκρασία, να απεικονίζει μικρά κομμάτια της επιφάνειας του αντικειμένου (ψεγάδια). Η ανάλυση καθορίζεται γενικά από χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, όπως το μέγεθος του και για τα συστήματα ανίχνευσης από το χρόνο απόκρισης.

Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί δύο σημαντικών παραμέτρων της γεωμετρικής ανάλυσης ενός συστήματος του IFOV και FOV.

Το **IFOV** (Instantaneous Field of View) σε ένα θερμόμετρο ακτινοβολίας καθορίζει το μέγεθος των σημείων-στόχων σε μία σάρωση γραμμής και αντιπροσωπεύει ένα pixel σε μια γραμμή ανίχνευσης ή θερμογράμματος και είναι μέτρο της χωρικής ανάλυσης. Το IFOV ορίζεται από τη διάσταση των ανιχνευτών δια το εστιακό μήκος των φακών.

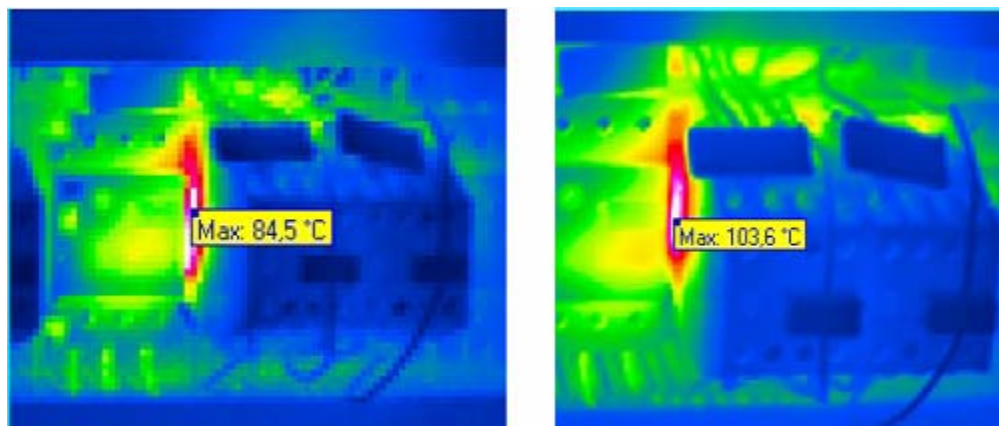
Το **FOV** (Field of View) εκφράζει το οπτικό πεδίο μέσα στο οποίο, το όργανο μας θα μετρήσει όλη την εισερχόμενη ενέργεια ακτινοβολίας. Το FOV σ' έναν υπέρυθρο ανιχνευτή καθορίζει τη γωνία σάρωσης και το μέγεθος του συνολικού πεδίου μιας εικόνας.

Όσο μεγαλύτερη είναι η γεωμετρική ανάλυση ενός συστήματος τόσο πιο ακριβή είναι τα θερμογράμματα. Αυξάνοντας την απόσταση από το αντικείμενο, αυξάνει και η συνολική επιφάνεια (FOV) που «βλέπει» η θερμοκάμερα, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο κάθε pixel του αισθητηρίου, δηλαδή μειώνεται αναλογικά η δυνατότητα της θερμοκάμερας να «δει» λεπτομέρειες. Γενικά για ακρίβεια στις μετρήσεις μας πρέπει το IFOV να είναι πάντα μικρότερο (ή το πολύ ίσο) από το μέγεθος του αντικείμενου. Σε διαφορετική περίπτωση, επειδή η θερμοκάμερα μετράει το μέσο όρο των θερμοκρασιών που αντιστοιχούν στο IFOV, οδηγούμαστε σε εσφαλμένες μετρήσεις, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3 Εξάρτηση της ακρίβειας των μετρήσεων από το IFOV

Παρατηρούμε ότι το θερμογραφικό σύστημα μετράει και τα τρία αντικείμενα στους 50 °C, αφού τα αντικείμενα 2 και 3 είναι μικρότερα από το IFOV και δεν μπορεί να μετρηθεί η πραγματική τους θερμοκρασία.



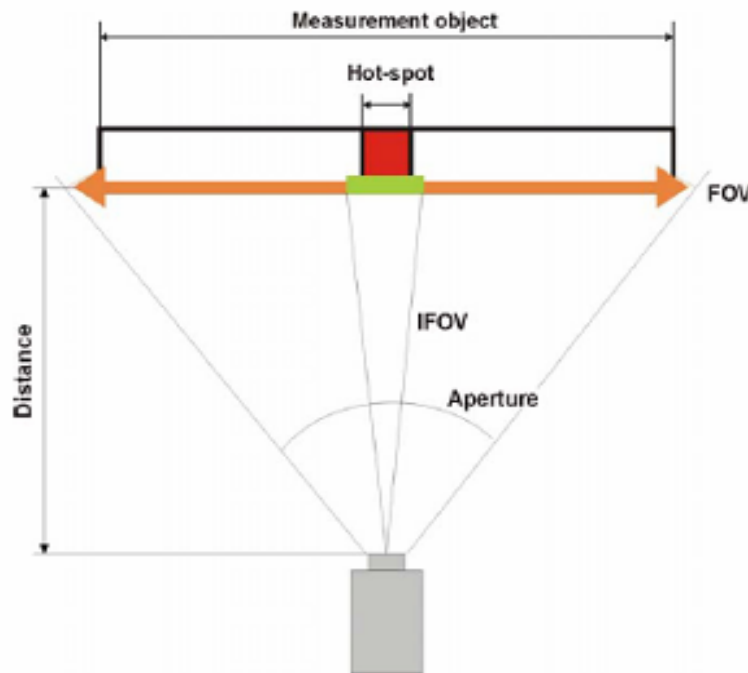
Ανιχνευτής 160 * 120 pixels

Ανιχνευτής 320 * 240 pixels

Σχήμα 2.4 Γεωμετρική ανάλυση θερμοκάμερας

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης με την αύξηση της γεωμετρικής ανάλυσης.

2.7 Απαιτήσεις ακριβούς μέτρησης



Σχήμα 2.5 Παράμετροι θερμογραφικής λήψης

- Η απόσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της ελάχιστης απόστασης εστίασης
- Ακριβής εστίαση
- Σωστή επιλογή θερμοκρασιακής κλίμακας (αυτόματα ή χειροκίνητα)
- Το FOV πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του μεγέθους του μετρούμενου αντικειμένου
- Το IFOV πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το $1/2.5$ του μεγέθους του θερμού σημείου για ακριβείς μετρήσεις

2.8 Συστήματα επεξεργασίας υπέρυθρων εικόνων

Η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από κάποιο σώμα ενισχύεται και μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρονικό τηλεοπτικό σήμα από μια μονάδα επεξεργασίας και παρουσιάζεται σε μόνιτορ. Αυτή η μονάδα εκτελεί όλους τους λειτουργικούς ελέγχους της υπέρυθρης- IR φωτογραφικής μηχανής. Οι θερμικές εικόνες μπορούν να καταγράφονται συνεχώς από ένα αναλογικό ή ψηφιακό όργανο καταγραφής βιντεοταινίας. Μετά από τη δοκιμή, τα καταγραμμένα στοιχεία μπορούν να επαναληφθούν από το playback και, εάν είναι απαραίτητο, να μετατραπούν από έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα. Η πλήρως αυτοματοποιημένη τεχνολογία απεικόνισης IR επιτρέπει επίσης απευθείας (on line) ψηφιοποίηση και επεξεργασία της καταγραφής. Η εμφάνιση και επεξεργασία των εικόνων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν ρύθμιση των σαρωτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, εξασφαλίζοντας κατά συνέπεια μεγαλύτερη ακρίβεια ανάλυσης. Μετά από την αναλογική-ψηφιακή μετατροπή, τα καταγραφέντα στοιχεία φορτώνονται σ' έναν υπολογιστή για πολυπλοκότερη ποσοτική ανάλυση.

Κατά το συσχετισμό της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τους ανιχνευτές που εκπέμπεται από τις τρεις βασικές πηγές (αντικείμενο, γειτονικά σώματα και ατμόσφαιρα), το λογισμικό επεξεργασίας εικόνων λαμβάνει υπόψη, μεταξύ άλλων, τις ακόλουθες παραμέτρους: θερμικό επίπεδο, συντελεστής ικανότητας ακτινοβολίας επιφάνειας, τύπος φακών, απόσταση λήψης, αέρας και περιβαλλοντική θερμοκρασία. Ο βασικός τρόπος παρουσίασης των εικόνων μέσω του υπολογιστή είναι γενικά μια χρωματισμένη εικόνα, όπου κάθε χρώμα συσχετίζεται με ένα εύρος θερμοκρασίας. Επίσης φαίνονται οι ισόθερμες καμπύλες, οι οποίες είναι γραμμές στο όριο μεταξύ δύο χρωμάτων που απεικονίζουν σημεία που έχουν την ίδια θερμοκρασία. Το λογισμικό επεξεργασίας εικόνων μας παρέχει θερμικά σχεδιαγράμματα, ιστόγραμμα συχνότητας θερμοκρασίας σε μια δεδομένη περιοχή, τις διαφορές θερμοκρασίας από διαφορετικές εικόνες, τα σημεία με τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία καθώς επίσης και δυνατότητα μεγέθυνσης και φιλτραρίσματος μιας εικόνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Γενικές εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές. Αποτελεί την κυριότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου (Non-Destructive Inspection). Καθημερινά νέοι και πρωτοποριακοί τρόποι χρήσης και εφαρμογής της αναπτύσσονται. Η θερμογραφία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση, όπου ένα πρόβλημα ή κατάσταση γίνεται αντιληπτό δια μέσου της θερμοκρασιακής διαφοράς στην επιφάνεια ενός σώματος.

Παρακάτω παραθέτουμε κάποιες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας, προσπαθώντας να καλύψουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερο κομμάτι από το ευρύ φάσμα των σύγχρονων εφαρμογών της :

3.1.1 Ιατρική

Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του καρκίνου του μαστού, αναπνευστικών ασθενειών (SARS) και της αρθρίτιδας. Εφαρμόζεται, επίσης, για τον εντοπισμό και την εκτίμηση τραυματισμών αθλητών καθώς και για την αποθεραπεία τους. Είναι επιπλέον χρήσιμη στην οδοντιατρική για τον έλεγχο της σωστής δομής και λειτουργίας των σαγονιών.

3.1.2 Κτιριακές εγκαταστάσεις

Βρίσκει εφαρμογή στην θερμική επιθεώρηση των κτιριακών εγκαταστάσεων προσδιορίζοντας την θερμική κατάστασή τους, τις διαρροές αέρα, τις απώλειες θερμότητας και ενέργειας. Επιπλέον, συμβάλει στον άμεσο και ακριβή εντοπισμό της ελλειπούς ή κατεστραμμένης μόνωσης, της υγρασίας, των διαρροών νερού, των ατελειών και πιθανών

κοιλοτήτων στα τοιχώματα και τις οροφές των κτιρίων, παρέχοντάς μας την δυνατότητα να επισκευάσουμε το όποιο πρόβλημα προτού αυτό επεκταθεί. Χρησιμοποιείται ευρέως στον προσδιορισμό της ευστάθειας του σκυροδέματος, την ανίχνευση και τον εντοπισμό καλωδίων και σωληνώσεων θέρμανσης που εκπέμπουν ακτινοβολία.

3.1.3 Περιβάλλον

Η χρήση υπέρυθρης θερμοκάμερας σε περιβαλλοντικές επιθεωρήσεις συντελεί στον εντοπισμό των περιοχών διάθεσης αποβλήτων καθώς και των παλαιών θαμμένων δεξαμενών στις βιομηχανικές περιοχές. Χρησιμεύει στην θερμική καταγραφή των υγρών αποβλήτων και την καταγραφή ρύπανσης σε βιομηχανικές και αστικές περιοχές. Εντοπίζει και ελέγχει τις διαρροές πετρελαίου σε εργοστάσια και πλοία.

3.1.4 Αεροδιαστημική

Χρησιμεύει στην ανίχνευση και τον εντοπισμό σημείων εισροής νερού ή αέρα στην καμπίνα του αεροσκάφους καθώς και πιθανών ρωγμών και διαβρώσεων στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνειά του. Χρησιμοποιείται, επίσης, στην επιθεώρηση της μηχανής, των φρένων και των άλλων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών του αεροσκάφους.

3.1.5 Πετροχημικές εφαρμογές

Η υπέρυθρη θερμογραφία βρίσκει εφαρμογές και στα διυλιστήρια. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των εγκαταστάσεων, της μόνωσης των καυστήρων και την ανίχνευση διαρροών. Επίσης, μας προσφέρει την δυνατότητα να επιθεωρήσουμε γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια τις σωληνώσεις, να αναλύσουμε και να αξιολογήσουμε την καύση, καθώς και την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των εναλλακτών θερμότητας.

3.1.6 Ηλεκτρονικός εξοπλισμός

Η υπέρυθρη θερμογράφηση σε συνδυασμό με την σωστή ερμηνεία των θερμογραφημάτων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό όπλο στα χέρια έμπειρων θερμογράφων για την επιθεώρηση και την αξιολόγηση υβριδικών μικροκυκλωμάτων. Μας δίνει την δυνατότητα για την ηλεκτρική και θερμική επιθεώρηση των συγκολλήσεων και

των ενώσεων των διάφορων στοιχείων πάνω σε ένα κύκλωμα, την αξιολόγησή τους και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων. Χρησιμοποιείται για τη θερμική χαρτογράφηση των ημιαγωγών.

3.1.7 Ποικίλες εφαρμογές

Ανιχνεύει την υπερθέρμανση στις κεραίες, τους οδηγούς κυμάτων, τα καλώδια και τις δομές πλαισίων. Χρησιμοποιείται από τις αρχές για τον εντοπισμό αγνοουμένων ενώ έχει εφαρμογή στην πυρόσβεση, καθώς εντοπίζει τις πυρκαγιές χαμηλής έντασης (προλαβαίνοντας τυχόν επέκτασή τους) σε δασικά εδάφη και ανθρώπους σε φλεγόμενα κτίρια συνδράμοντας σημαντικά στην έγκαιρη διάσωσή τους. Εφαρμόζεται και στην οδοποιΐα, καθώς εντοπίζει τις μη ομοιόμορφες πυκνότητες στην καυτή επίστρωση των διαφόρων μιγμάτων της ασφάλτου.

3.2 Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Ιστορικά, οι πρώτες εφαρμογές στην επαγγελματική θερμογραφία ξεκίνησαν από τις Εταιρείες Ηλεκτρικής Ενέργειας, με σκοπό την αύξηση διαθεσιμότητας της Παραγωγής, Υποσταθμών & Δικτύων και τη μείωση των απρόβλεπτων περιστατικών που, σε ορισμένες περιπτώσεις, κατέληγαν σε καταστροφή του εξοπλισμού και σε πυρκαγιές.

Η υπέρυθη θερμογραφία είναι η πλέον αναπτυσσόμενη και διαδεδομένη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου και διάγνωσης για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. Εφαρμόζεται σε όλες τις ηλεκτρικές και μηχανολογικές εγκαταστάσεις των σταθμών παραγωγής, συνδράμοντας στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την σωστή λειτουργία τους. Οι υπέρυθρες κάμερες εντοπίζουν, μετρούν και οπτικοποιούν τις κατανομές θερμότητας που αναπτύσσονται σε όλους τους τύπους ηλεκτρικών, μηχανολογικών και παραγωγικών συστημάτων πριν την αστοχία τους. Η ορθή ερμηνεία και εμπεριστατωμένη μελέτη των αποτελεσμάτων μας παρέχει την δυνατότητα να εντοπίσουμε έγκαιρα τα σφάλματα σε όλους τους τομείς των σταθμών, των υποσταθμών, των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος.

Ο κύριος στόχος κάθε σταθμού παραγωγής είναι η μείωση των θερμικών απωλειών, η εξοικονόμηση ενέργειας και η συνεπακόλουθη αύξηση του βαθμού απόδοσης. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που κάνει τόσο επιβεβλημένη την εκτεταμένη εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Συνάμα, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την αύξηση της αξιοπιστίας και την δραματική μείωση του χρόνου διακοπής της παραγωγής και της διανομής ενέργειας, σε περίπτωση σφάλματος.

Είναι, παγκοσμίως, γνωστό ότι στην ηλεκτρική βιομηχανία η θερμοκρασία είναι ένας άριστος δείκτης των συνθηκών λειτουργίας της και ως εκ τούτου της αξιοπιστίας και της μακροζωίας ενός ηλεκτρικού συστήματος. Η διακύμανση των φορτίων, τα υψηλά φορτία, οι δονήσεις, η καταπόνηση των μετάλλων, η παλαιότητα των υλικών και τα συγκεκριμένα λειτουργικά περιβάλλοντα όπως οι ακραίες περιβαλλοντικές θερμοκρασίες, ο αέρας, οι χημικές ουσίες ή οι ρύποι στην ατμόσφαιρα αυξάνουν τον αριθμό βλαβών στα ηλεκτρικά συστήματα, συντελώντας στην επιδείνωση και την ταχύτατη υποβάθμιση του ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού.

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού συντήρησης για την εκτενή επιθεώρηση όλου του εξοπλισμού ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Χρησιμεύει στην ηλεκτρική επιθεώρηση των κινητήρων, των γεννητριών, των πυκνωτών και του κέντρου ελέγχου. Χρησιμοποιείται στον εντοπισμό σφαλμάτων και υπερθέρμανσης των διακοπών ισχύος, των διακοπών φορτίου και των αποζευκτών. Ενώ, συντελεί στην προληπτική συντήρηση των μετασχηματιστών, των ζυγών, των γραμμών μεταφοράς και διανομής. Κατά συνέπεια, όταν εφαρμόζεται σε τακτική βάση, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτρέπει διακοπές υψηλού κόστους και καταστροφές σημαντικού εξοπλισμού ή εγκαταστάσεων.

Όλα τα καλώδια, οι ζυγοί και οι συνδέσεις τους, τα συστήματα διανομής και ο υπόλοιπος εξοπλισμός ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να ελεγχθούν για τα θερμά σημεία (hot spot) ή τις δυσαναλογίες θερμότητας που εμφανίζουν στην επιφάνειά τους. Έτσι έχουμε την δυνατότητα να προσδιορίσουμε μη ισορροπημένα φορτία, υψηλά ρεύματα ουδετέρου, να ανιχνεύσουμε κακές συνδέσεις, υπερφορτίσεις, καθώς επίσης και να εντοπίσουμε αστοχίες υλικών, ρωγμές στην επιφάνεια και ατέλειες στην μόνωση.

3.3 Κατηγοριοποίηση σφαλμάτων

Εξοπλισμός ή εξαρτήματα πριν "πέσουν" σε κατάσταση βλάβης, θερμαίνονται πάνω από το όριο, που είναι το φυσιολογικό ή εμφανίζουν σταδιακά αυξανόμενη απόκλιση από το κανονικό θερμοκρασιακό τους προφίλ. Η θερμογραφία, όταν εφαρμόζεται συστηματικά, είναι δυνατό να παρακολουθήσει την εξέλιξη του σφάλματος και να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη στιγμή και το σημείο που συνιστάται να γίνει η κατάλληλη τεχνική διορθωτική επέμβαση. Η δουλειά του θερμογράφου είναι να προσδιορίσει, να καταγράψει και να αναλύσει τις ενδείξεις της ανώμαλης μεταφοράς θερμότητας στον ηλεκτρικό εξοπλισμό ή τα συστατικά του, κατηγοριοποιώντας σε βαθμό προτεραιότητας τις βλάβες και τα σφάλματα που εντόπισε, προκειμένου στη συνέχεια να προβεί στην έγκαιρη επισκευή ή άμεση αντικατάσταση του εξοπλισμού.

Οι εξειδικευμένοι θερμογράφοι, εκτελούν τις επιθεωρήσεις του εξοπλισμού των σταθμών και προσδιορίζουν το επίπεδο κρισιμότητας σε κάθε ανιχνευμένη ανωμαλία. Αυτά τα επίπεδα, σε κάθε περίπτωση καθορίζονται, ως επί το πλείστον, από τη μέγιστη άνοδο της θερμοκρασίας πέρα από μια προκαθορισμένη θερμοκρασία αναφοράς. Το επίπεδο 1 είναι το κρισιμότερο και απαιτεί την αμεσότερη προσοχή. Τα επίπεδα επικινδυνότητας καθορίζονται ως εξής:

Κρίσιμο πρόβλημα-επίπεδο επικινδυνότητας 1: οποιοδήποτε πρόβλημα που προσδιορίζεται ως κίνδυνος ασφάλειας, ή άμεση απειλή για την αξιοπιστία του συστήματος.

Ενέργεια που απαιτείται: άμεση επισκευή. Ο ηλεκτρολόγος πρέπει να λάβει άμεσα διορθωτικά μέτρα για την επιδιόρθωση της βλάβης. Η διορθωτική ενέργεια σ' αυτό το επίπεδο για λόγους ασφαλείας γίνεται με απόζευξη φορτίου.

Σοβαρό πρόβλημα-επίπεδο επικινδυνότητας 2: πρόβλημα που μπορεί να εξελιχθεί σε επικίνδυνο παράγοντα για την αξιοπιστία του συστήματος.

Ενέργεια που απαιτείται: επισκευή στο άμεσο μέλλον. Ο τεχνικός πρέπει να επιβλέπει περιοδικά τη βλάβη μέχρι να επισκευαστεί και να υποβάλλει γραπτή αναφορά.

Πρόβλημα μεσαίας κρισιμότητας-επίπεδο επικινδυνότητας 3: πρόβλημα που δεν αποτελεί άμεση απειλή για το προσωπικό ή την αξιοπιστία του συστήματος.

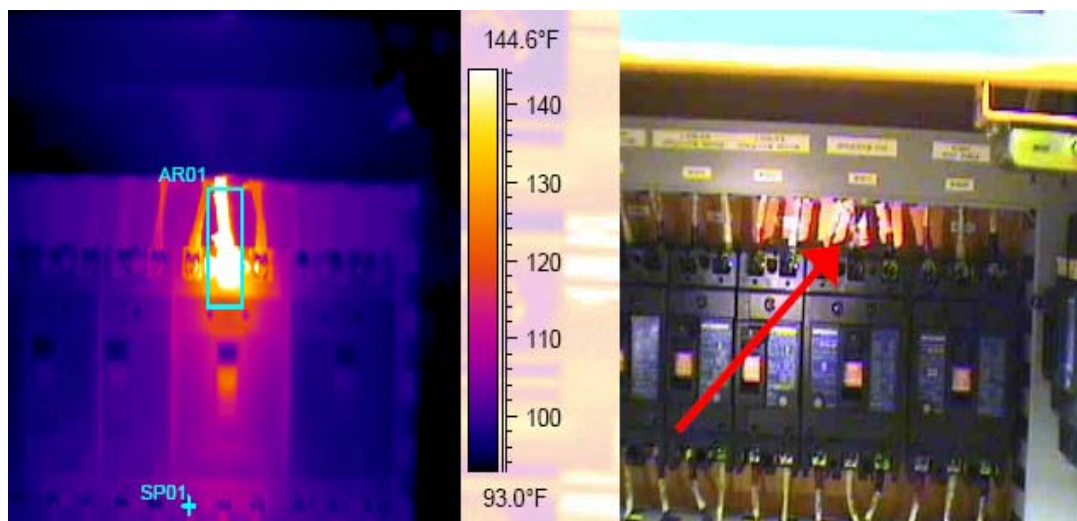
Ενέργεια που απαιτείται: προγραμματισμός επισκευής. Αυτός ο τύπος προβλήματος είναι λιγότερο πιθανό να είναι άμεσα επικίνδυνος για το προσωπικό ή καταστρεπτικός για το σύστημα.

Πρόβλημα χαμηλής κρισιμότητας-επίπεδο επικινδυνότητας 4: πρόβλημα που απαιτεί τη στοιχειώδη προσοχή από το τεχνικό προσωπικό.

Ενέργεια που απαιτείται: επισκευή ως τμήμα της κανονικής συντήρησης. Αυτός ο τύπος προβλήματος είναι σχεδόν απίθανο να είναι επικίνδυνος για το προσωπικό ή καταστρεπτικός για το σύστημα.

Ακολουθούν δύο παραδείγματα κατηγοριοποίησης σφαλμάτων σε σταθμό παραγωγής.

Πρόβλημα σε αποζεύκτη



Σχήμα 3.1 Θερμόγραμμα και φωτογραφία αποζεύκτη

Θερμό σημείο : 459 °F – 237.22 °C

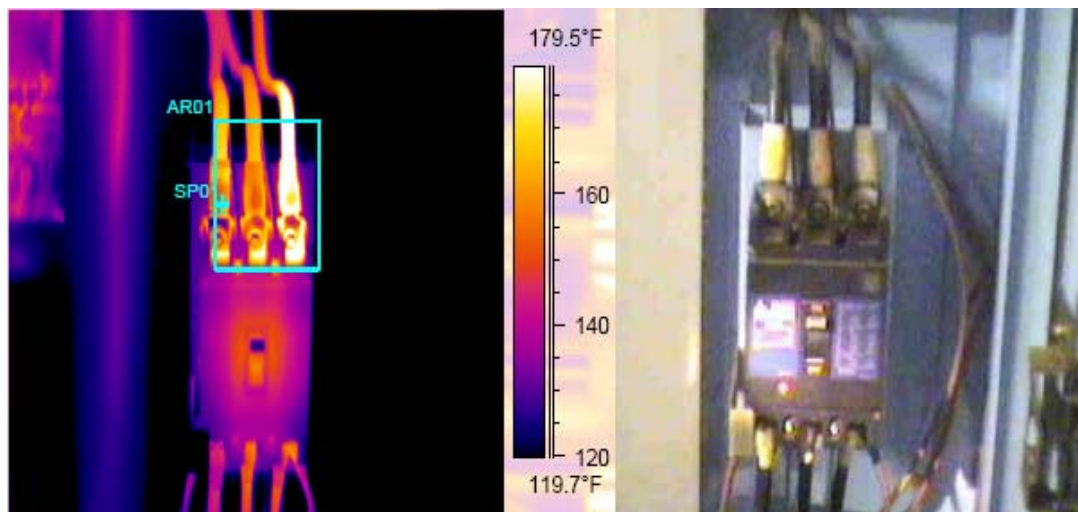
Θερμοκρασία αναφοράς : 101 °F – 38.3 °C

Θερμοκρασιακή διαφορά: 358 °F – 181.1 °C

Κρίσιμο πρόβλημα-επίπεδο 1

Άμεση επισκευή

Πρόβλημα σε διακόπτη φορτίου



Σχήμα 3.2 Θερμόγραμμα και φωτογραφία διακόπτης φορτίου

Θερμό σημείο : 203 °F – 95 °C

Θερμοκρασία αναφοράς : 156 °F – 68.89 °C

Θερμοκρασιακή διαφορά: 47 °F – 8.3 °C

Σοβαρό πρόβλημα-επίπεδο 2

Επισκευή στο άμεσο μέλλον

3.4 Σφάλματα και ηλεκτρική αντίσταση

Πολλές πυρκαγιές στη βιομηχανία σχετίζονται άμεσα με τα ελαττωματικά ηλεκτρικά συστατικά. Η αρχή πίσω από μια ηλεκτρική βλάβη είναι πολύ απλή, δεδομένου ότι μια σύνδεση επιδεινώνεται όταν η αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού φορτίου αυξάνεται. Όπως είναι γνωστό η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό σύστημα προκαλεί την έκλυση θερμότητας λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης. Με το χρόνο, τα συστατικά και οι επιφάνειες επαφών του ηλεκτρικού συστήματος επιδεινώνονται. Με την επιδείνωση προκαλείται αυξανόμενη ηλεκτρική αντίσταση και, κατά συνέπεια, αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας. Η θερμότητα που εκλύεται στο σημείο του σφάλματος συνεπάγεται την άνοδο της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό, και παρουσιάζεται στην υπέρυθρη εικόνα ως θερμό σημείο (hot spot).

Η ατέλεια επιφέρει άμεσες αλλαγές στη θερμική κατάσταση της συστατικής επιφάνειας του υλικού, λόγω του ποσού θερμότητας που παράγεται, καθώς και στις ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας του συστατικού. Αυτές οι βλάβες, εάν δεν ανιχνευθούν άμεσα και δεν επισκευαστούν εγκαίρως, οδηγούν στην καταστροφή των ηλεκτρικών συστημάτων και ενδεχομένως σε μη σχεδιασμένες διακοπές και απώλειες παραγωγής.

3.5 Παραδείγματα και εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας σε σφάλματα σταθμού παραγωγής

3.5.1 Μετασχηματιστές ισχύος

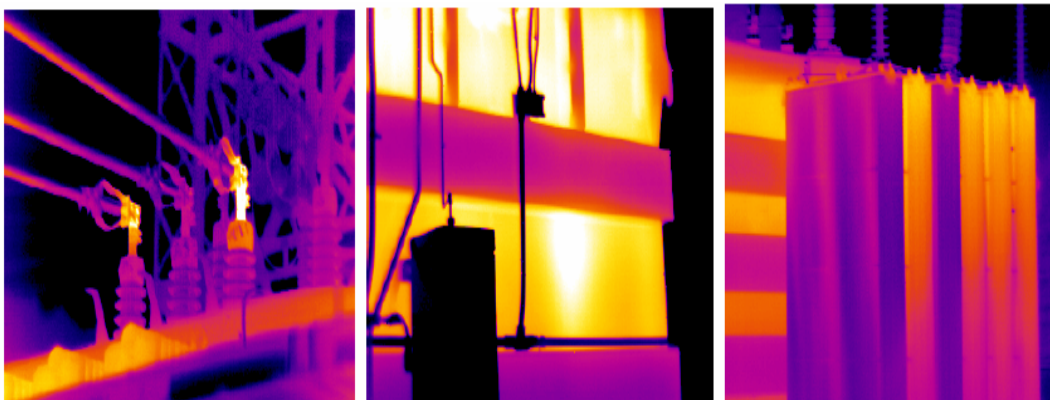
Η ηλεκτρική επιθεώρηση των μετασχηματιστών ισχύος, τάσης, έντασης καθώς και των ρυθμιστών τάσης συνιστά μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας σε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων στο πρωτεύων και το δευτερεύων του μετασχηματιστή, για τον εντοπισμό της θερμοκρασίας και του επιπέδου ελαίου (για Μ/Σ ελαίου), καθώς επίσης και για τους μονωτήρες διέλευσης και την σύνδεσή τους με τον Μ/Σ. Η ορθή ερμηνεία των θερμογραφημάτων και η σύγκρισή τους με τα θερμικά πρότυπα συμβάλει στην παρακολούθηση του επιπέδου λαδιού στους μετασχηματιστές ισχύος, τον προσδιορισμό της θερμικής κατάστασής τους και τον εντοπισμό σφαλμάτων στα συστατικά τους μέρη. Η συστηματική επιθεώρησή τους αποκτά ιδιαίτερη σημασία, αν αναλογιστούμε ότι μικρές διαφοροποιήσεις στο επίπεδο του λαδιού μπορούν να επηρεάσουν σε κρίσιμο σημείο την θερμοκρασία των Μ/Σ και του υπόλοιπου εξοπλισμού ισχύος.

Παρακάτω παρατείνονται εικόνες και θερμογράμματα από την υπέρυθρη θερμογράφιση ενός μετασχηματιστή ισχύος. Η θερμοκάμερα εντοπίζει τις διαφορές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του Μ/Σ καταδεικνύοντας την κρίσιμη κατάσταση στο tapchanger.



Σχήμα 3.3 Θερμογράμματα και φωτογραφία Μ/Σ

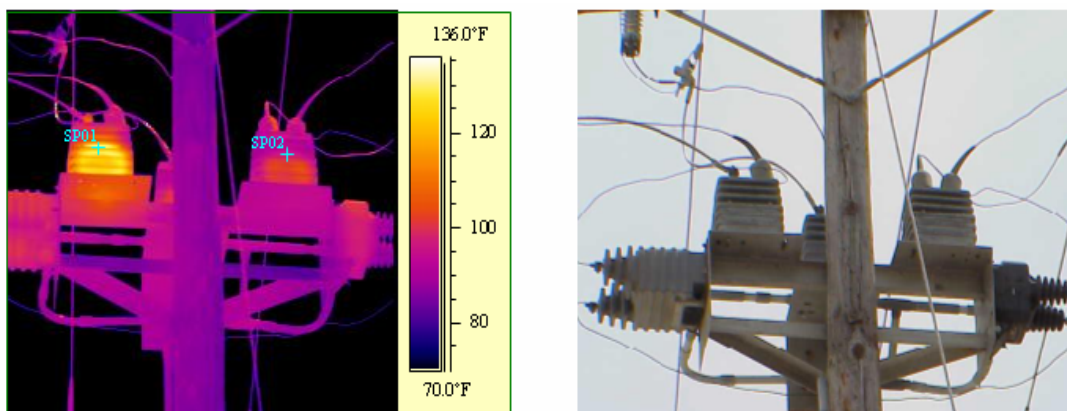
Με την βοήθεια των θερμογραφημάτων και την σωστή ερμηνεία τους, μπορούμε να εντοπίσουμε προβλήματα συνδέσεων στους μονωτήρες του μετασχηματιστή, δυσλειτουργία της ψύξης του και σφάλματα που μετατρέπουν μέρη του μετασχηματιστή σε καλό αγωγό. Η άμεση επιδιόρθωση αυτών των προβλημάτων είναι απαραίτητη για την σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του μετασχηματιστή, διαφορετικά προκαλούν την πρόωμη καταπόνηση του μετασχηματιστή, επιδείνωση της μονάδας και δραματική μείωση του βαθμού απόδοσής της.



Σχήμα 3.4 Θερμογράμματα Μ/Σ

3.5.2 Εσωτερικό σφάλμα Μ/Σ ρεύματος σε γραμμή διανομής

Η υπέρυθρη επιθεώρηση σε ένα κύκλωμα τροφοδότη γραμμής μας βοηθάει να εντοπίσουμε θερμά σημεία (hotspots) και πιθανά σφάλματα στους μετασχηματιστές ρεύματος σε μια τριφασική παροχή. Υπάρχουν τρεις μετασχηματιστές ρεύματος ένας για κάθε φάση που εξυπηρετεί τον καταναλωτή. Ένας μετασχηματιστής ρεύματος παρακολουθεί το ποσό έντασης ρεύματος ή φορτίου ανά φάση που ο πελάτης καταναλώνει. Είναι απαραίτητοι, προκειμένου να τιμολογηθεί ο πελάτης για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον εντοπισμό αυτού του προβλήματος είμαστε σε θέση να προγραμματίσουμε την αφαίρεση του μετασχηματιστή που παρουσιάζει το hotspot, λόγω ενός πιθανού εσωτερικού σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπουμε την διακοπή λειτουργίας σε αυτόν τον τομέα μετασχηματιστών ρεύματος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται το θερμόγραμμα και η εικόνα του υπερθερμασμένου μετασχηματιστή ρεύματος.

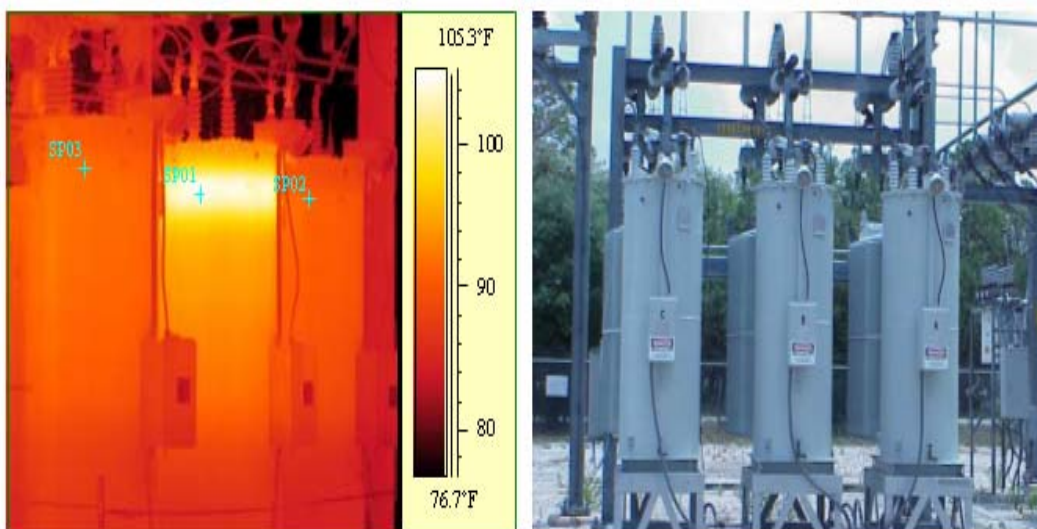


Σχήμα 3.4 Θερμόγραμμα και φωτογραφία Μ/Σ ρεύματος

3.5.3 Σφάλμα στο σύστημα ελέγχου ρυθμιστή τάσης

Ο έλεγχος της θερμικής κατάστασης του λαδιού και των συστατικών μερών ενός ρυθμιστή τάσης αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στις εγκαταστάσεις μιας ηλεκτρικής βιομηχανίας. Η επιθεώρηση διαπίστωσε ότι ο ρυθμιστής τάσης δεν θα μπορούσε να αυξήσει ή να χαμηλώσει την τάση. Ένα συστατικό μέσα στον ηλεκτρονικό έλεγχο είχε καταστραφεί. Αυτή η αποτυχία έστειλε ένα μικτό σήμα να

αυξηθεί και να μειωθεί η τάση συγχρόνως. Κατά συνέπεια, ο ρυθμιστής τάσης, αδυνατώντας να μεταφράσει σωστά το σήμα από το σύστημα ελέγχου, υπερθερμάνθηκε, αναγκάζοντας το λάδι να θερμανθεί και να παράγει την παρακάτω θερμική υπογραφή. Η σημασία αυτού του ρυθμιστή στο σύστημα κατέστησε επιτακτική την ανάγκη άμεσης αντικατάστασης του εξοπλισμού προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση. Η μη έγκαιρη επίλυση του προβλήματος θα είχε ως συνέπεια την καταστροφή του ίδιου του ρυθμιστή και συνεπακόλουθα στην διακοπή της μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η υπερθέρμανση του μεσαίου ρυθμιστή τάσης.



Σχήμα 3.5 Θερμόγραμμα και φωτογραφία ρυθμιστών τάσης

3.5.4 Μονωτήρες διέλευσης

Συγκεκριμένα στους μονωτήρες διέλευσης, η υπέρυθρη θερμογραφία ανιχνεύει τυχόν ρωγμές στην εξωτερική επιφάνειά τους, ελέγχοντας παράλληλα και την θερμοκρασία των τοιχωμάτων τους. Σε περίπτωση που παρατηρήσουμε μια ανεξήγητα υψηλή θερμοκρασία σε σχέση με τον μετασχηματιστή ή τους άλλους μονωτήρες, απαιτείται να προχωρήσουμε σε περαιτέρω επιθεώρηση του εσωτερικού των μονωτήρων, προκειμένου να εντοπίσουμε την αιτία της υπερθέρμανσης. Η υπερθέρμανση μπορεί να οφείλεται είτε στη ανάπτυξη υψηλής αντίστασης στην σύνδεση των μονωτήρων με τις φάσεις των μετασχηματιστών, είτε σε κακή σύνδεση του μονωτήρα με τον μετασχηματιστή, είτε και σε κακή σύνδεσή

των ίδιων των αγωγών με τον μονωτήρα. Η ανάπτυξη υψηλής θερμότητας στο εσωτερικό των μονωτήρων διέλευσης οδηγεί στην τήξη των αγωγών, καθώς επίσης και την καταστροφή των συστατικών και των τοιχωμάτων των μονωτήρων. Παρακάτω απεικονίζονται μερικές από τις ζημιές που υφίστανται οι συνδέσεις μονωτήρων διέλευσης μετασχηματιστών.

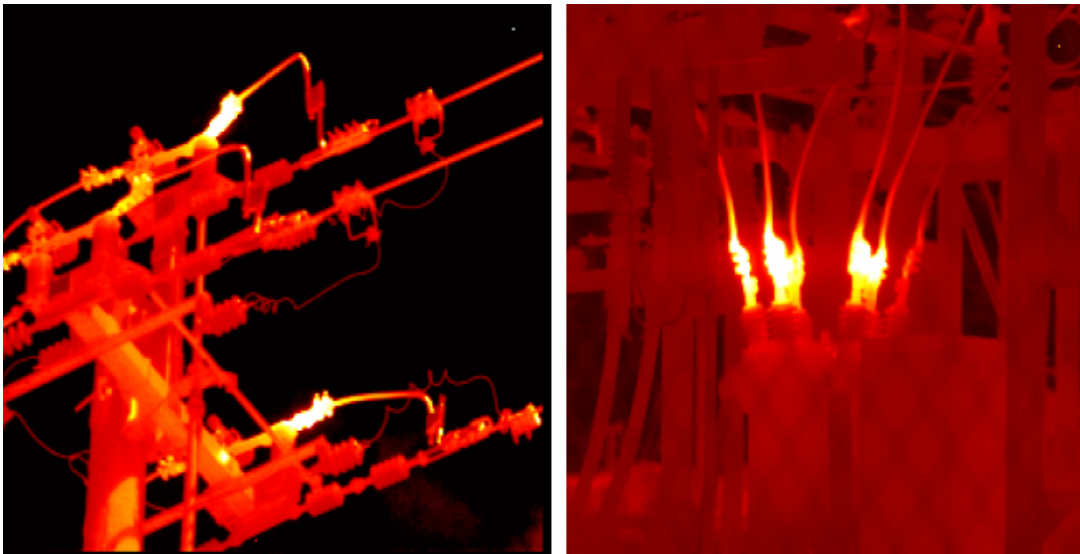


Σχήμα 3.6 Καταστροφή μονωτήρων διέλευσης

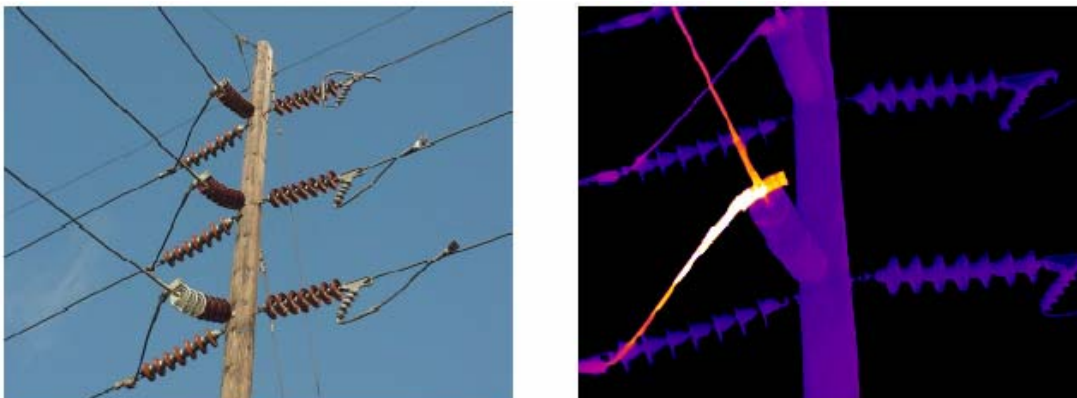
Η μη έγκυρη διάγνωση του σφάλματος και μη άμεση επιδιόρθωσή του οδηγεί σε μια πλήρη αποτυχία σύνδεσης με το πρωτεύων ή το δευτερεύων του μετασχηματιστή, ενώ είναι πιθανόν να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στον μετασχηματιστή. Η καταστροφή των μονωτήρων και του μετασχηματιστή με την σειρά τους έχει καταστρεπτικές συνέπειες στην ασφάλεια του προσωπικού της εγκατάστασης και προκαλεί την αναγκαστική διακοπή της λειτουργίας της μονάδας παραγωγής, συνεπάγοντας μεγάλη οικονομική ζημιά.

3.5.5 Κακές συνδέσεις

Με την χρήση της θερμοκάμερας μπορούμε να ελέγξουμε και να ανιχνεύσουμε κακές συνδέσεις στον υποσταθμό, τις γραμμές μεταφοράς και στο σύστημα διανομής στους καταναλωτές, αποφεύγοντας την διακοπή της παραγωγής και της διανομής ισχύος. Οι κακές αυτές συνδέσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στο πέρασμα του χρόνου, τις καιρικές συνθήκες, την ατμοσφαιρική ρύπανση, την θερμότητα και σε ακατάλληλες συνδέσεις μεταξύ μετάλλων.



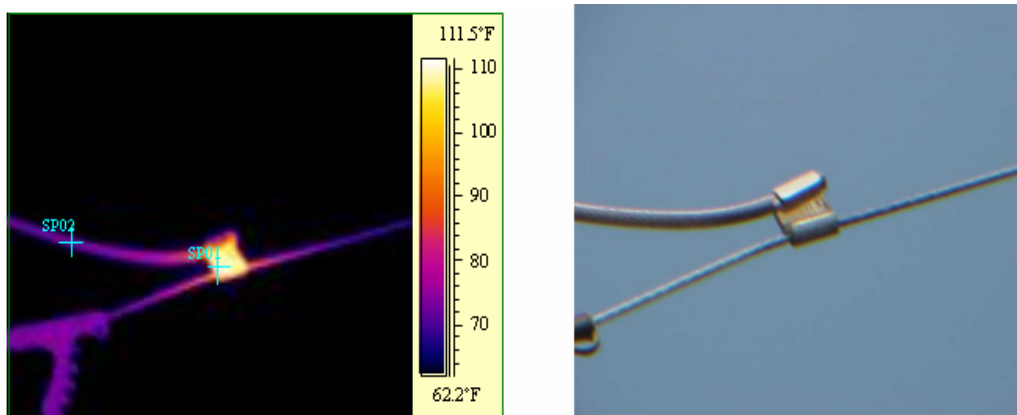
Σχήμα 3.7 Θερμογράμματα κακών συνδέσεων σε γραμμές μεταφοράς



Σχήμα 3.8 Θερμόγραμμα και φωτογραφία κακής σύνδεσης σε γραμμή μεταφοράς

3.5.6 Αποτυχία σύνδεσης γραμμών μεταφοράς λόγω λανθασμένης εγκατάστασης συνδέσεων σφηνών

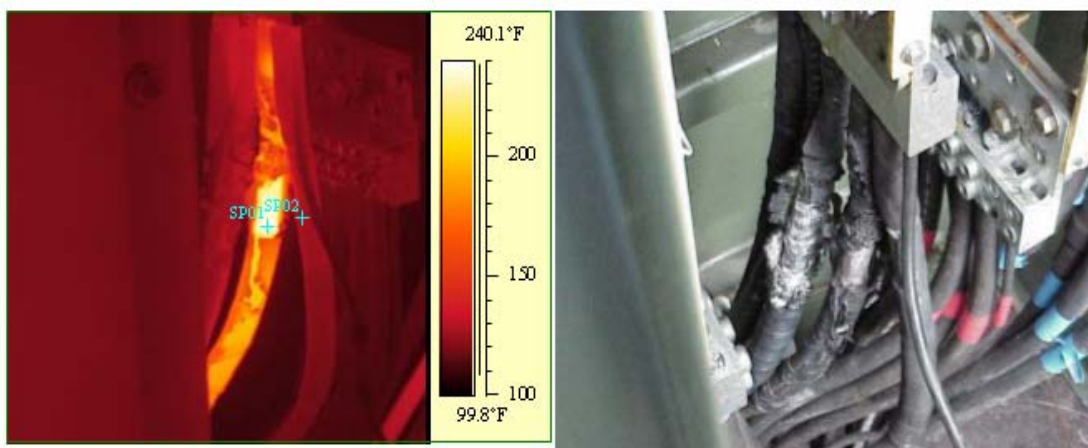
Η υπέρυθρη θερμογραφία βρίσκει εφαρμογή όχι μόνο στην επιθεώρηση του ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού ενός σταθμού, αλλά, όπως έχουμε ήδη αναφέρει και προηγουμένως, και στην επίβλεψη και τον εντοπισμό ατελειών στις γραμμές μεταφοράς και τις ποικίλες συνδέσεις που πραγματοποιούνται σε αυτές. Κατά τη διάρκεια μιας μηνιαίας υπέρυθρης επιθεώρησης ενός υποσταθμού διανομής, μια σύνδεση σφηνών εμφανίστηκε ως hot spot στην εισερχόμενη γραμμή μεταφοράς 69 kV στον υποσταθμό. Ένας άλτης που συνδέει τον αποζεύκτη των 69 kV με την εισερχόμενη γραμμή συνδέθηκε με σφήνα λάθους μεγέθους. Αυτό προκάλεσε μια χαλαρότητα στην σύνδεση του άλτη στη γραμμή, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση στο συγκεκριμένο σημείο, όπως είναι φανερό στο θερμογράφημα της σύνδεσης που παραθέτουμε παρακάτω. Η αντικατάσταση της ανάρμοστης σύνδεσης με σφήνα σωστού μεγέθους αποτελεί την μόνη λύση. Εάν το πρόβλημα δεν διορθωνόταν η σύνδεση αλτών θα μπορούσε να καεί με αποτέλεσμα να βγει εκτός η μια φάση του υποσταθμού και έτσι θα λειτουργούσε με μόνο δύο φάσεις. Κατά συνέπεια, ο αποζεύκτης θα άνοιγε το κύκλωμα διακόπτοντας την μεταφορά, αυτό θα προκαλούσε μια μεγάλη διακοπή ρεύματος στους καταναλωτές, μέχρι να εντοπιστεί το πρόβλημα, να γίνουν οι αναγκαίες εργασίες επιδιόρθωσής του και να κλείσει το κύκλωμα πάλι. Και φυσικά αυτό θα οφείλονταν στην χρήση λανθασμένων σφηνών σύνδεσης. Παρακάτω φαίνεται η αποτυχημένη σύνδεση της γραμμής με τον αποζεύκτη λόγω της χρήσης λάθους μεγέθους σφήνας.



Σχήμα 3.9 Θερμόγραμμα και φωτογραφία σφήνας

3.5.7 Αποτυχημένη σύνδεση συνδετήρα χαλκού με καλώδιο αλουμινίου

Κατά την διάρκεια τυπικής υπέρυθρης επιθεώρησης μετασχηματιστή, αγωγοί καλωδίων στο δευτερεύον του Μ/Σ εμφάνισαν θερμό σημείο (hotspot) σε μια σύνδεση. Κατά την οπτική επιθεώρηση παρατηρήθηκε ότι μια άλλη συναρμογή ήταν υπερθερμασμένη. Η ανωμαλία σε αυτό το καλώδιο οφείλεται στο φορτίο καθώς επίσης και στην αποτυχία της συναρμογής. Η συναρμογή είναι χαλκός με επίστρωμα. Το επίστρωμα επιδεινώθηκε λόγω της πτύχωσης που εμφάνισε και της θερμότητας που παράγεται από το φορτίο στον αγωγό. Σε αυτό το σημείο, η διάβρωση άρχισε να ενισχύεται μεταξύ της συναρμογής χαλκού και του καλωδίου αλουμινίου, προκαλώντας μια ανεπαρκή σύνδεση. Η μοναδική λύση του προβλήματος είναι η αντικατάσταση της συναρμογής χαλκού με αντίστοιχη αλουμινίου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται το θερμόγραμμα και η φωτογραφία μιας συναρμογής συνδέσμων χαλκού σε καλώδιο αργιλίου.

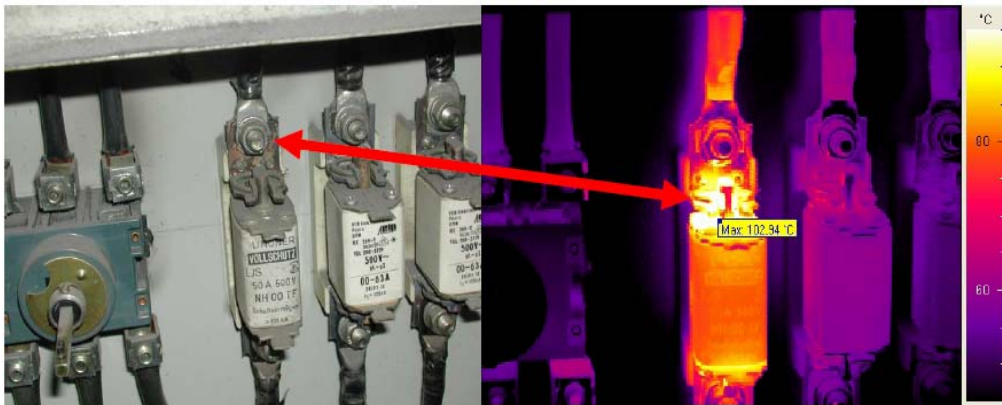


Σχήμα 3.10 Θερμόγραμμα και φωτογραφία συνδέσμου χαλκού σε καλώδιο αργιλίου

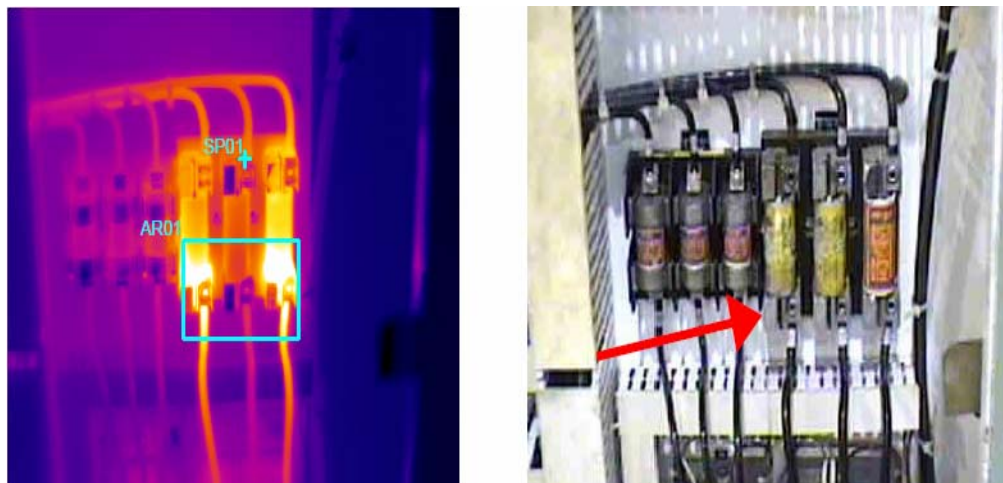
3.5.8 Ασφάλειες

Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται και για την επιθεώρηση των ασφαλειών, εντοπίζοντας σφάλματα σε αυτές, όπως την χαλαρότητα των υλικών και την μη σωστή εφαρμογή του καπακιού της ασφάλειας στην βάση της. Και τα δύο προβλήματα μπορεί να οφείλονται είτε σε λάθος κατασκευαστικό είτε σε λάθος κατά την εγκατάσταση της ασφάλειας. Με την υπέρυθρη επιθεώρηση έχουμε την δυνατότητα να εντοπίσουμε αυτά τα προβλήματα καθώς και πιθανές ρωγμές στην επιφάνεια της ασφάλειας, αποφεύγοντας

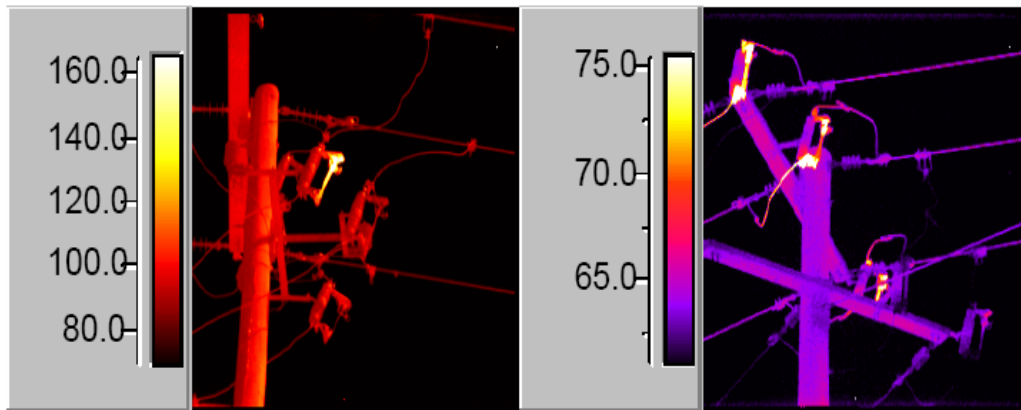
ενδεχόμενη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου, που με την σειρά του συνεπάγεται έκλυση θερμότητας και την καταστροφή τελικά της ασφάλειας σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 3.11 Σφάλμα σε μαχαιρωτή ασφάλεια χαμηλής τάσης



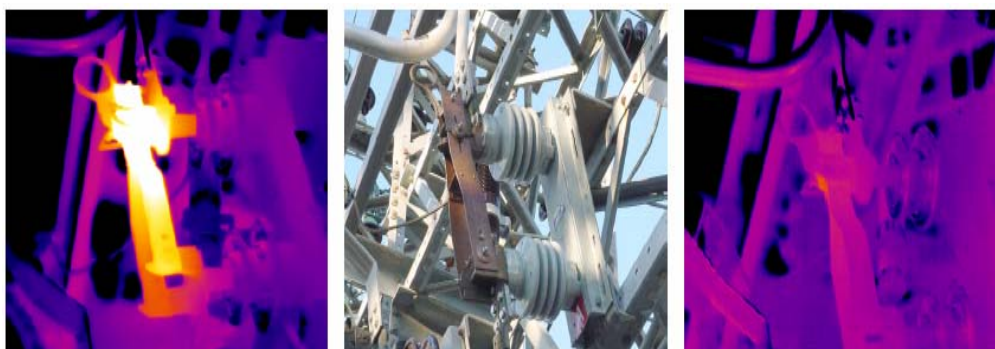
Σχήμα 3.12 Σφάλμα σε μπλοκ ασφαλειών



Σχήμα 3.13 Θερμογράμματα ασφαλειών σε γραμμές μεταφοράς

3.5.9 Αποξεύκτης

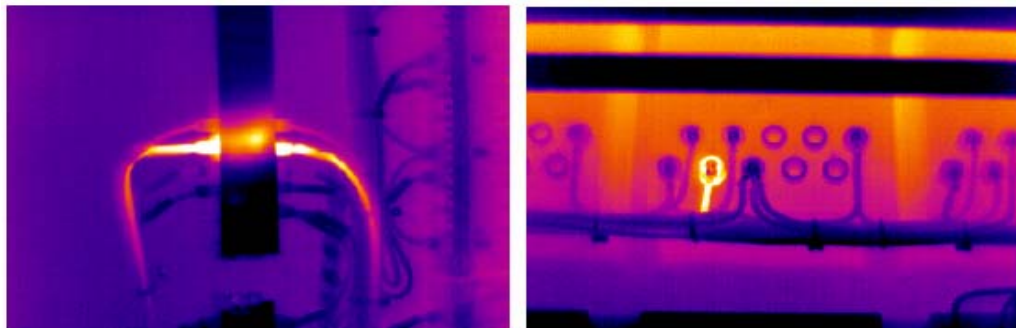
Η χρήση της θερμοκάμερας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιθεώρηση της ομαλής λειτουργίας των αποξευκτών, την ανίχνευση υπερφόρτισή τους και χαλαρών συνδέσεων σε αυτούς. Ο καθαρισμός τους, η ρυθμισή τους και η λίπανσή τους είναι απαραίτητοι μέθοδοι για την συντήρησή τους. Ωστόσο, σε ακραίες περιπτώσεις οδηγούμαστε στην αντικατάστασή τους.



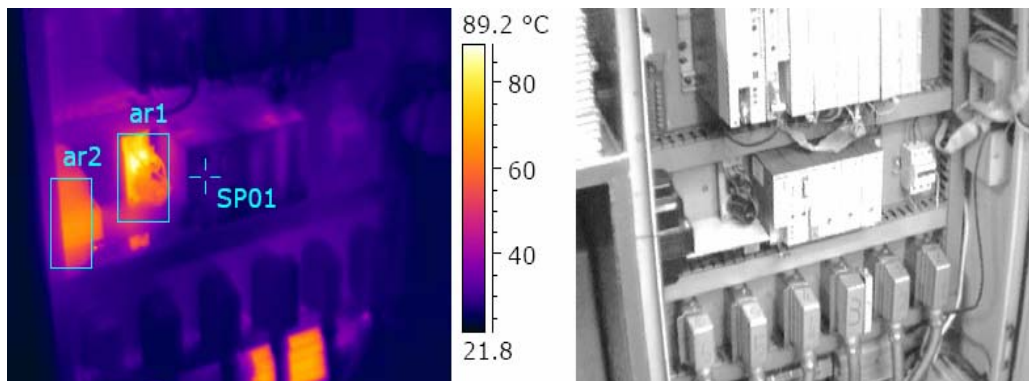
Σχήμα 3.14 Θερμόγραμμα και φωτογραφία αποξεύκτη

3.5.10 Υπερφορτισμένα κυκλώματα στο εσωτερικό σταθμού

Στο εσωτερικό ενός υποσταθμού, η ανίχνευση υπερφορτισμένων κυκλωμάτων στο σύστημα ελέγχου σε συνδυασμό με τον εντοπισμό χαλαρών ή ακατάλληλων συνδέσεων, φθαρμένων καλωδίων και κακής μόνωσης των συσκευών, αποτελούν εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας.



Σχήμα 3.15 Θερμογράμματα υπερφορτισμένων κυκλωμάτων

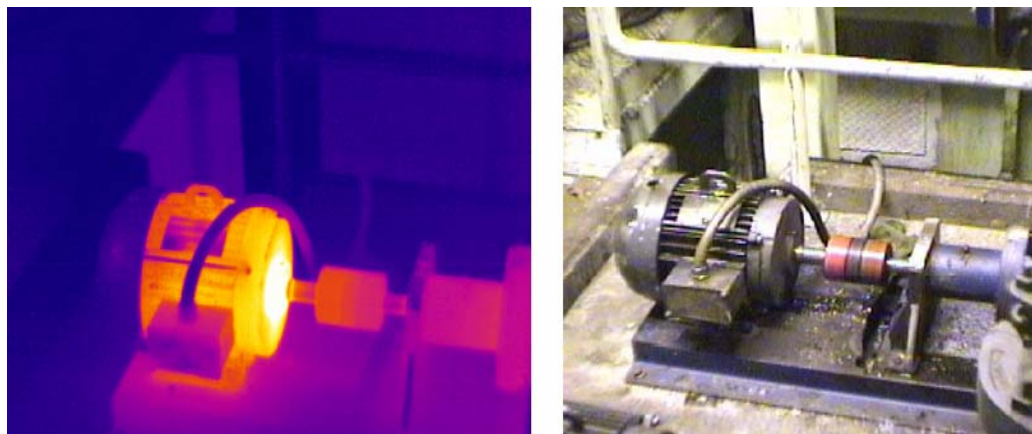


Σχήμα 3.16 Υπερθερμασμένο κύκλωμα σε πίνακα PLC

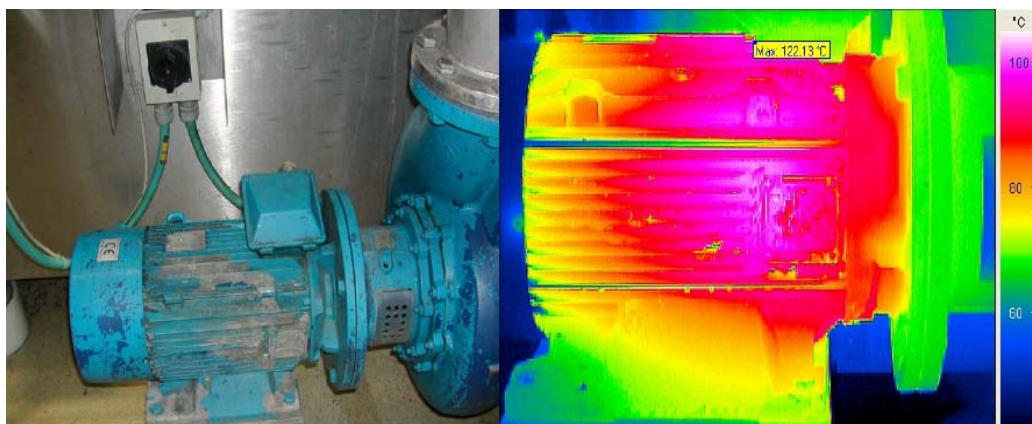
3.5.11 Ηλεκτρικές μηχανές

Η ηλεκτρική επιθεώρηση των ηλεκτρικών μηχανών με την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας και η μελέτη του θερμικού σχεδίου τους συντελούν στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης της μηχανής και την επέκταση της διάρκειας ζωής τους.

Εντοπίζει διελλασματικές βλάβες στον πυρήνα του στάτη συντελώντας στον ποιοτικό έλεγχο κατά την διάρκεια επισκευών στον πυρήνα του. Με την χρήση της θερμοκάμερας έχουμε την δυνατότητα να παρακολουθήσουμε την αποτελεσματικότητα των επισκευών στις κατεστραμμένες περιοχές της μηχανής. Ενώ μας παρέχει μια θερμική εικόνα του στάτη και του πυρήνα του, η οποία αποτελεί μόνιμη καταγραφή της θερμικής κατάστασης της μηχανής, και την χρησιμοποιούμε σαν θερμικό πρότυπο με το οποίο συγκρίνουμε τα διάφορα θερμογραφήματα που λαμβάνουμε σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας της.



Σχήμα 3.17 Υπερθέρμανση δρομέα κινητήρα



Σχήμα 3.18 Υπερφορτισμένη λειτουργία κινητήρα

3.6 Λέβητας

Ο λέβητας αποτελεί την καρδιά κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγάλο θερμικό περιεχόμενό του και η ανάγκη περιορισμού των θερμικών απωλειών του, τον καθιστούν από θερμογραφικής απόψεως ως ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο για έρευνα.

Η θερμογραφία εφαρμόζεται στην επιθεώρηση των εξωτερικών τοιχωμάτων του λέβητα για πιθανές ρωγμές, καταγράφει θερμοκρασίες στις περιοχές του λέβητα που δεν μπορούν να ελεγχθούν, εντοπίζοντας τις ατέλειες στη μόνωση και τις θερμότερες περιοχές στο εξωτερικό του λέβητα, όπου μπορούν να εμφανιστούν ζημιές. Συνδράμει στην δημιουργία θερμικών προτύπων στον λέβητα και τους σωλήνες του, καταγράφοντας την θερμοκρασία επιφάνειάς τους κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ή όταν ο λέβητας είναι σε εφεδρεία. Η προσεκτική και λεπτομερής ερμηνεία των θερμογραφημάτων του εξοπλισμού ψύξης συμβάλει στην ανίχνευση ατελειών στην μόνωσή του, απωλειών και την εν γένει αξιολόγησή του. Επιπλέον, η επιθεώρηση των καυστήρων για την διάδοση της φλόγας, την διαχείριση των καυσίμων και την συγκέντρωση των καυσαερίων σε συνδυασμό με την εξέταση των προτύπων καύσης αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Κατά τη σύγκριση των θερμογραφημάτων, τα οποία λαμβάνουμε κατά την διάρκεια της επιθεώρησης, με τα θερμικά πρότυπα του λέβητα ανιχνεύουμε διαρροές αερίου και περιοχές εισροής παρασιτικού αέρα, προβαίνοντας στην άμεση επισκευή τους αποφεύγοντας δυσάρεστες συνέπειες, όπως την μείωση της απόδοσης του λέβητα και ολόκληρης της μονάδας παραγωγής.

3.6.1 Εισροή αέρα στο σύστημα της ατμογεννήτριας

Η μείωση της εισροής του περιβαλλοντικού αέρα στο σύστημα των ατμογεννητριών παραμένει ένα σοβαρό πρόβλημα μεταξύ εκείνων που πρέπει να λυθούν, για την εξασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας του λέβητα και του μηχανικού εξοπλισμού.

Εισροές αέρα στον αεροθερμαντή μειώνουν την θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα καύσης, επιδρώντας αρνητικά στην διαδικασία της καύσης, με αποτέλεσμα την μείωση της

αποδοτικότητας του συστήματος. Πιθανές διαρροές στις σωληνώσεις του υπερθερμαντή και στους θερμοσωλήνες στα τοιχώματα του λέβητα, προκαλούν την πρόωρη εκτόνωση (μείωση της πίεσης) του ατμού, με συνέπεια φτωχότερους τεχνικούς και οικονομικούς δείκτες του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι εισροές αέρα και οι ανάμειξή του με τα αέρια προϊόντα της καύσης αναγκάζουν τους ανεμιστήρες ελκυσμού της καπνοδόχου να υπερφορτωθούν, απαιτώντας μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία τους.

Οι εισροές αέρα στον θάλαμο καύσης και τα υπόλοιπα μέρη της ατμογεννήτριας προκαλούν ανεπιθύμητες αυξομειώσεις στην έξοδο του συστήματος. Σύμφωνα με τους κανονισμούς λειτουργίας των ατμογεννητριών, οι εισροές παρασιτικού αέρα στο τμήμα της ατμογεννήτριας από τον υπερθερμαντή ως την έξοδό της δεν πρέπει να υπερβούν το 5% για λέβητες αερίου και πετρελαίου, που έχουν μια έξοδο ατμού λιγότερο από 420 t/h, και το 3% για τον ίδιο τύπο λεβήτων που έχουν υψηλότερη ισχύ. Τα αντίστοιχα επίπεδα για λέβητες άνθρακα είναι 8 % και 5%, αντίστοιχα. Ενώ, οι εισροές αέρα στο τμήμα μεταξύ του οικονομητήρα και των ανεμιστήρων ελκυσμού δεν πρέπει να υπερβούν το 10% και 25% αντίστοιχα.

Η εισροή αέρα στο σύστημα του στροβίλου αποτελεί, επίσης, ένα σημαντικό πρόβλημα. Η αύξησή της, πάνω από το επιτρεπόμενο όριο, είναι μεταξύ των βασικών παραγόντων που προκαλούν αύξηση της πίεσης του ατμού (που αποβάλλεται από τον στροβίλο και εισέρχεται στον συμπυκνωτή) σε σχέση με την κανονική τιμή της, η οποία με την σειρά της οδηγεί σε μείωση της ισχύος εξόδου του συστήματος και της οικονομικής απόδοσης της μονάδας. Αύξηση πίεσης στο συμπυκνωτή 1 kPa (0,01 atm), για στροβίλους που έχουν μια αρχική πίεση ατμού 13-24 MPa, προκαλεί την μείωση του βαθμού απόδοσης κατά 0.8% έως 0.9%. Αυτή η μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται για μια μονάδα ισχύος 100 MW σε περίπου 5×10^6 kWh ετησίως, και σε οικονομικές απώλειες περίπου 55.000 €. Το γεγονός αυτό κάνει αναγκαίο να λάβουμε ιδιαίτερα αυστηρές απαιτήσεις για την σωστή λειτουργία του συστήματος των στροβίλων. Σύμφωνα με τους κανονισμούς λειτουργίας, η εισροή αέρα στο σύστημα του στροβίλου για μια μονάδα ισχύος 100-300 MW δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15-30 kg/h.

Οι πραγματικές εισροές αέρα, που εμφανίζονται στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, είναι συχνά επάνω από τα πρότυπα επίπεδα. Ωστόσο, οι προσπάθειες

ελέγχου συναντούν ιδιαίτερες δυσκολίες, δεδομένου ότι ένας μεγάλος αριθμός λειτουργικών ελέγχων πρέπει να πραγματοποιηθεί σε όλο τον βασικό εξοπλισμό (μονάδα στροβίλων, θάλαμος καύσης, υπερθερμαντή, αναθερμαντή, μύλοι, LUVΟ, θερμοσωλήνες του λέβητα, συμπυκνωτής κ.α.), καθώς επίσης και ότι ένας περιορισμένος αριθμός μεθόδων είναι ικανός να ανιχνεύσει τις εισροές αέρα κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού.

Η συστηματική μέτρηση του ρυθμού ροής, της θερμοκρασίας και της πίεσης του ατμού στις σωληνώσεις της ατμογεννήτριας (θερμοσωλήνες, υπερθερμαντή, LUVΟ κ.α.) αποτελεί μια μέθοδο για την ανίχνευση διαρροών ατμού και εισροών αέρα στον κύκλο του ατμού. Επιπλέον, η ανάλυση της σύνθεσης των (καυσαερίων), η περίσσεια O_2 στα καυσαέρια πριν και μετά LUVΟ, καθώς και η πίεση του αέρα καύσης που διοχετεύεται προς τους καυστήρες, αποτελούν λειτουργικές παραμέτρους για τον έλεγχο εισόδου παρασιτικού αέρα στο λέβητα. Όσον αφορά τον θάλαμο καύσης, τα σημεία εισροής παρασιτικού αέρα ανιχνεύονται παρακολουθώντας την εκτροπή της φλόγας στις εστίες ή με τη χρήση ανεμόμετρου. Σε αυτή την περίπτωση η ατμογεννήτρια πρέπει να λειτουργεί σε υπερφόρτιση. Όσο πολύπλοκοι και σχετικά λεπτομερείς είναι οι παραπάνω μέθοδοι, περιορίζονται στην ανίχνευση της διαρροής χωρίς να μας δίνουν την δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.

Οι χαρακτηριστικές θέσεις όπου, ο αέρας μπορεί να εισρεύσει στο σύστημα της ατμογεννήτριας είναι τα τρύπια σημεία στην επένδυση του λέβητα, οι ρωγμές στις πόρτες του καυστήρα και οι χαλαρές ενώσεις μεταξύ των φύλλων χάλυβα της επικάλυψης. Η κακή στεγανοποίηση των αγωγών αναρρόφησης καυσαερίων των μύλων στα σημεία ένωσής τους με το λέβητα (σχισίματα, κενά) και η φθορά του υλικού στεγανοποίησης των κώνων στα συρτάρια καυσαερίων των μύλων επιτρέπουν την είσοδο του παρασιτικού αέρα. Όσον αφορά τα LUVΟ, η κακή στεγανοποίησή τους σε συνδυασμό με την κακή στεγανοποίηση των αγωγών καυσαερίων αποτελούν σημεία εισροής του περιβαλλοντικού αέρα στο σύστημα της ατμογεννήτριας, επηρεάζοντας τον βαθμό απόδοσης της μονάδας.

Τα κακώς σφραγισμένα μέρη των βαλβίδων, οι ενώσεις των φλαντζών, οι αντλίες συμπύκνωσης, οι συμπυκνωτές και οι γραμμές δειγματοληψίας αξίζουν συστηματικής παρακολούθησης, καθώς είναι κύρια σημεία εισόδου περιβαλλοντικού αέρα στο σύστημα. Μεγάλη διαφορά πίεσης κοντά στα 10^5 Pa μπορεί να προκαλέσει σημαντικές εισροές.

Εντούτοις, η ικανότητα εντοπισμού των σημείων εισροής αέρα είναι πολύ δύσκολη. Αυτά τα σημεία καθορίζονται συνήθως από την οπτική εξέταση σε έναν σταματημένο στρόβιλο, κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής υδραυλικής πίεσης του διάκενου ατμού ή μιας δοκιμής ατμού υπερσυμπίεσης.

Τα συστήματα που έχουν πολλές διακλαδώσεις κάνουν δύσκολη και χρονοβόρα την ανίχνευση των σημείων εισροής αέρα, μέσω των δοκιμών πίεσης. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος έχει ανεπαρκή ευαισθησία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η μονάδα στροβίλου είναι σε κρύα κατάσταση. Η διόρθωση των κακώς σφραγισμένων θέσεων, που ανιχνεύονται από τις δοκιμές πίεσης, δεν εγγυάται ότι η πίεση του αέρα θα παραμείνει αμετάβλητη, δεδομένου ότι η περιοχή των πιθανών εισροών μπορεί να επεκταθεί αρκετά, ως αποτέλεσμα άλλων στοιχείων του θερμικού κυκλώματος.

3.6.2 Χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας για τον εντοπισμό εισροής αέρα σε λέβητα και στρόβιλο

Οι υπάρχουσες μέθοδοι για τον εντοπισμό των θέσεων εισροής αέρα στο σύστημα της ατμογεννήτριας ενός θερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι ανεπαρκώς αποτελεσματικές, δεδομένου ότι η χρήση τους απαιτεί ο εξοπλισμός να διακόπτεται απαραίτητα για την πραγματοποίηση των τεχνικών διαγνωστικών ελέγχων. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι είναι πολύ χρονοβόρες και κοπιαστικές, ενώ η χρήση τους συνεπάγεται μια σημαντική μείωση του συντελεστή χρησιμοποίησης του θερμικού εξοπλισμού, και κατά συνέπεια, των οικονομικών δεικτών του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επ' αυτού, έχουν αναπτυχθεί δραστηριότητες, από το 2003 και έπειτα, για τον εντοπισμό εισροών αέρα μέσω θερμογράφησης, χρησιμοποιώντας προηγμένο εξοπλισμό θερμικής απεικόνισης. Αυτή η μέθοδος είναι βασισμένη, όπως προ είπαμε, στο γεγονός ότι κάθε σώμα εκπέμπει υπέρυθρη (θερμική) ακτινοβολία. Δεδομένου ότι αυτή η ακτινοβολία εξαρτάται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος, αυτή η θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί και να απεικονιστεί ως θερμική εικόνα- θερμόγραμμα. Αυτό μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε την απόκλιση της θερμοκρασίας από το κανονικό της επίπεδο, κατά τη διάρκεια ενός ελέγχου, και αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο της θερμογραφίας, δίνοντας

τις απαραίτητες πληροφορίες για την πραγματική φυσική κατάσταση του σώματος-λέβητα (το αποκαλούμενο θερμικό πορτρέτο).

Η ανάλυση αυτών των πληροφοριών, ακολουθώντας μια ειδική διαδικασία, μας επιτρέπει να εντοπίσουμε τα ψεγάδια του υπό εξέταση εξοπλισμού. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στον περιορισμό της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα στα αποτελέσματα της έρευνας. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ειδικού λογισμικού, οι λειτουργίες του οποίου επιτρέπουν στον ερευνητή να αναλύσει τα θερμογράμματα, να καθορίσει τις ελάχιστες, μέγιστες και ενδιάμεσες θερμοκρασίες σε περιοχές που έχουν διαφορετικές μορφές. Επιπλέον, να κατασκευάσει ισόθερμες καμπύλες και ιστογράμματα σε περιοχές του δείγματος που χαρακτηρίζονται από μια μικρή διαφορά θερμοκρασίας, η οποία προκαλείται από την εισροή του σχετικά κρύου περιβαλλοντικού αέρα, μέσω ενός σημείου διαρροής (όπως τρύπας, ρωγμής, σχισμής) και στο οποίο η θερμοκρασία του υλικού μειώνεται σε σύγκριση με άλλες περιοχές. Αυτή η μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι χαμηλή, αλλά οι εξοπλισμοί θερμικής απεικόνισης που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλή ευαισθησία (μέχρι και $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$) επιτρέποντας μας να ανιχνεύσουμε αυτήν την μείωση.

Η χρήση του εξοπλισμού θερμικής απεικόνισης για την ανίχνευση και τον εντοπισμό εισροών αέρα στον εξοπλισμό των στροβίλων έχει τα δικά της χαρακτηριστικά γνωρίσματά, τα οποία προέρχονται από τις συνθήκες λειτουργίας των στροβίλων ατμού και τις φυσικές ιδιότητες του ατμού που εισέρχεται στα πτερύγια. Δύο αξιοσημείωτα στοιχεία είναι ότι :

- (i) το εσωτερικό ρευστό λειτουργίας (ατμός) μπορεί να έχει μια θερμοκρασία ίση με αυτήν του περιβαλλοντικού αέρα και ότι
- (ii) μία αντίθετη κλίση θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί. Για παράδειγμα μπορεί η περιβαλλοντική θερμοκρασία να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία επιφάνειας του δείγματος (συμπυκνωτές ατμού-στροβίλων μαζί με τον εξοπλισμό τους).

Το εύρος των τοπικών ανωμαλιών θερμοκρασίας εξαρτάται από τη διαφορά των θερμοκρασιών μεταξύ του ρευστού λειτουργίας (ατμού) και του περιβαλλοντικού αέρα. Έχοντας αυτό υπόψη, προτείνεται μια συνδυαστική μέθοδο για τον τεχνικό έλεγχο του μηχανολογικού εξοπλισμού της αμογεννήτριας και του συστήματος στροβίλων. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση των τεχνικών θερμικής απεικόνισης και των

στοιχείων της μη καταστρεπτικής θερμικής δοκιμής, η οποία βασίζεται στις ροές θερμότητας που δημιουργούν τις επιφανειακές θερμοκρασιακές διαφορές πάνω από τις εσωτερικές ανωμαλίες.

Είναι μεγάλης σημασίας ότι η υπέρυθρη θερμογραφία, που υποστηρίζεται από την χρήση ενός ιδιαίτερα ευαίσθητου εξοπλισμού θερμικής απεικόνισης, είναι σε θέση να ανιχνεύσει όχι μόνο τις ήδη υπάρχουσες ρωγμές αλλά και τις κρυμμένες (αρχικές) αποκλίσεις της κατάστασης του υπό εξέταση σώματος από την πρότυπη κατάστασή του.

Οι μη ορατές ρωγμές που προκαλούνται από την καταστροφή του υλικού των τοίχων ή από μια αλλαγή στο πάχος τους δεν είναι διαμπερείς ρωγμές. Τα ψεγάδια αυτά συνεπάγονται την τοπική αλλαγή της θερμοκρασίας – ως αποτέλεσμα ενός συγκεκριμένου μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας– στην εξωτερική επιφάνεια του υπό εξέταση εξοπλισμού.

Η ανάλυση της εκπομπής θερμότητας των απόκρυφων ρωγμών στην επιφάνεια του εξοπλισμού αποτελεί τον πυρήνα των μη καταστρεπτικών διαγνωστικών τεχνικών της κατάστασης της ατμογεννήτριας και του εξοπλισμού της. Η ανάλυση αυτή σε συνδυασμό με τον θερμογραφικό έλεγχο, εκτός από την ανίχνευση των ρωγμών, μας επιτρέπει να προβλέψουμε και την ανάπτυξή τους.

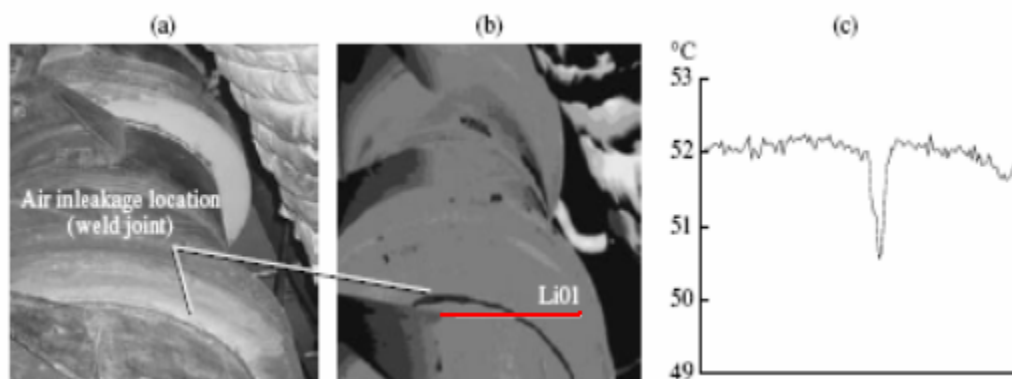
Όντας μια δραστηριότητα πολλών παραμέτρων, η θερμογραφία απαιτεί ότι οι μετρήσεις που γίνονται στο αντικείμενο πραγματοποιούνται με έναν σχεδιασμένο τρόπο, και ότι τα θερμογράμματα λαμβάνονται σε προσδιορισμένα διαστήματα του χρόνου. Η συγκριτική ανάλυση θερμογραμμάτων, συμπεριλαμβανομένου και του αρχικού θερμικού πορτρέτου, μπορεί να αποκαλύψει εγκαίρως την ανάπτυξη μιας εσωτερικής ρωγμής και ως εκ τούτου, να προβλέψει την πιθανότητα του μετασχηματισμού της σε σημείο διαρροής.

Γενικά οι επιθεωρήσεις του εξοπλισμού της ατμογεννήτριας χωρίζονται σε επιθεωρήσεις προ-διακοπής λειτουργίας και μετά-διακοπής λειτουργίας, ενώ απαιτείται τουλάχιστον μια ετήσια υπέρυθρη επιθεώρηση. Αυτές οι επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται από το προσωπικό υποστήριξης των εγκαταστάσεων. Η ανάλυση των θερμικών απεικονίσεων και η ερμηνεία τους μπορούν να προειδοποιήσουν το προσωπικό συντήρησης σχετικά με την ανάπτυξη προβλημάτων και βοηθούν στη λήψη σωστών αποφάσεων σχετικά με σχεδιασμό της διορθωτικής ενέργειας ή της επισκευής.

Οι επιθεωρήσεις λεβήτων περιλαμβάνουν την πυρίμαχη ύλη, τη μόνωση και πραγματοποιούνται για φόρτιση της μονάδας μεγαλύτερη του 80%. Η πραγματική επιθεώρηση σχεδιάζεται εκ των προτέρων και παίρνει συνήθως από τρεις έως πέντε ώρες, ανάλογα με το μέγεθος της μετρούμενης μονάδας και τον αριθμό ανωμαλιών που ανιχνεύονται. Ενώ, είναι γεγονός ότι κάτω από συστηματικό έλεγχο (θερμογραφίες) ο χρόνος των επιθεωρήσεων και το κόστος των ζημιών μειώνεται.

3.6.3 Παραδείγματα υπέρυθρης θερμογραφίας σε σύστημα ατμογεννήτριας

Παρακάτω δίνονται μερικά παραδείγματα εφαρμογών θερμοκάμερας για πειραματικό εντοπισμό εισροών αέρα στο σύστημα της ατμογεννήτριας των θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

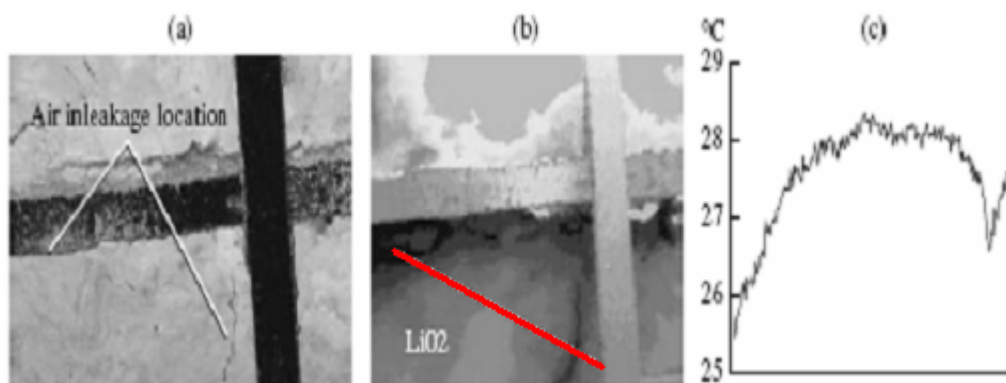


Σχήμα 3.19

(a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li01)

Στο σχήμα 3.19 φαίνονται φωτογραφίες και θερμογράμματα ενός σημείου συγκόλλησης μιας σωλήνωσης (διαμέτρου 600 mm) της μονάδας μετά τον συμπυκνωτή. Το διάγραμμα θερμοκρασίας (c), που μετρήθηκε κατά μήκος μιας γραμμής που διασχίζει τη συγκόλληση, εμφανίζει μια ευδιάκριτη βύθιση στη σκοτεινή περιοχή από 52,4°C σε 50,5°C. Η τοπική ψύξη του μετάλλου σημειώνεται στη θέση στην οποία ο περιβαλλοντικός αέρας (έχοντας μια θερμοκρασία μεταξύ 28 έως 30° C) εισρέει στη

σωλήνωση. Θερμογράμματα μιας άλλης συγκόλλησης της σωλήνωσης δεν αποκάλυψαν καμία μείωση της θερμοκρασίας, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία εισροή αέρα εκεί. Αυτά τα αποτελέσματα πιστοποιούν ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό εισροών αέρα ακόμη και σε χαμηλή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και της επιφάνειας του υλικού.



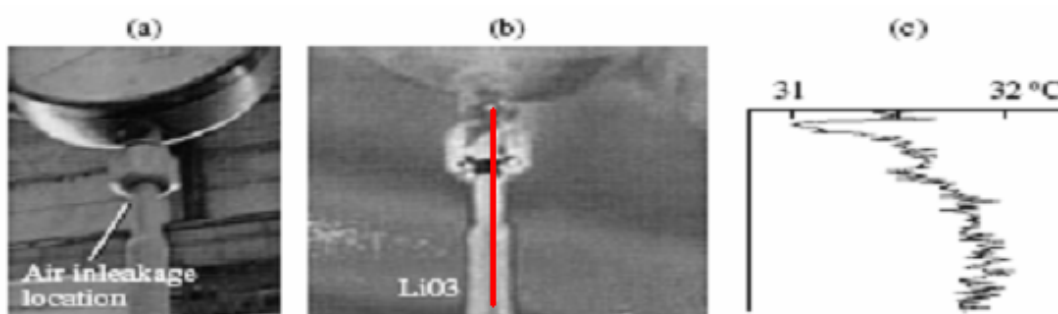
Σχήμα 3.20

(a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (LiO2)

Ενδιαφέροντα αποτελέσματα παρατηρούνται από την εξέταση της επένδυσης του λέβητα. Το θερμόγραμμα της εξωτερικής επιφάνειας της καμίνου φαίνεται στο σχήμα 3.20. Δείχνει ότι η επιφάνεια είναι κρύα σε δύο μέρη ένα από τα οποία είναι κοντά σε μια ρωγμή. Τα θερμογράμματα αναλύθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των παραμέτρων, δεδομένου ότι μια τοπική αύξηση στο πάχος ή μια βελτίωση στα χαρακτηριστικά της θερμομόνωσης μπορούν να σημαίνουν μια μείωση στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας και όχι μία τοπική εισροή αέρα.

Οι απότομες βυθίσεις στο σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας (c) καταδεικνύουν, με επαρκή ακρίβεια, τις θέσεις στις οποίες ο αέρας εισρέει στην επένδυση. Η βύθιση στο σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας (c) αφορά τη θέση της ρωγμής, όπου η θερμοκρασία επιφάνειας μειώνεται από 28,5°C σε 25,4°C. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση του θερμογράμματος και του σχεδιαγράμματος θερμοκρασίας επιτρέπουν τον εντοπισμό των θέσεων, στις οποίες έχουμε εισροή του περιβαλλοντικού αέρα.

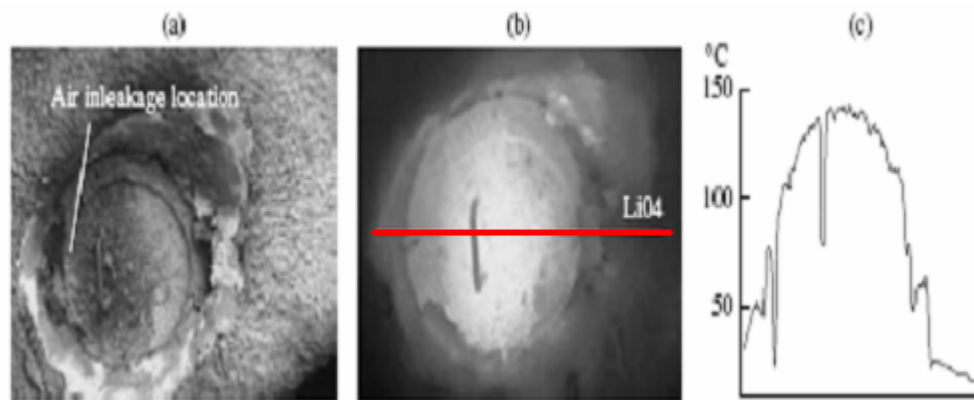
Η χρήση του υπέρυθρου εξοπλισμού απεικόνισης κατέστησε, επίσης, πιθανό να ανιχνευτούν εισροές αέρα σε συμπυκνωτή, που λειτουργεί σε μια πίεση $0,95 \times 10^5 \text{ Pa}$, μέσω της κακώς σφραγισμένης σύνδεσης που ενώνει τον μετρητή σε έναν σωλήνα του συμπυκνωτή (σχήμα 3.21). Το σκοτεινό σημείο κοντά στην ένωση και η τοπική βύθιση στο σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας (c) από $32,2^\circ\text{C}$ σε $31,0^\circ\text{C}$ δείχνουν τη θέση στην οποία ο περιβαλλοντικός αέρας που έχει μια θερμοκρασία περίπου 30°C εισέρχεται στον συμπυκνωτή.



Σχήμα 3.21

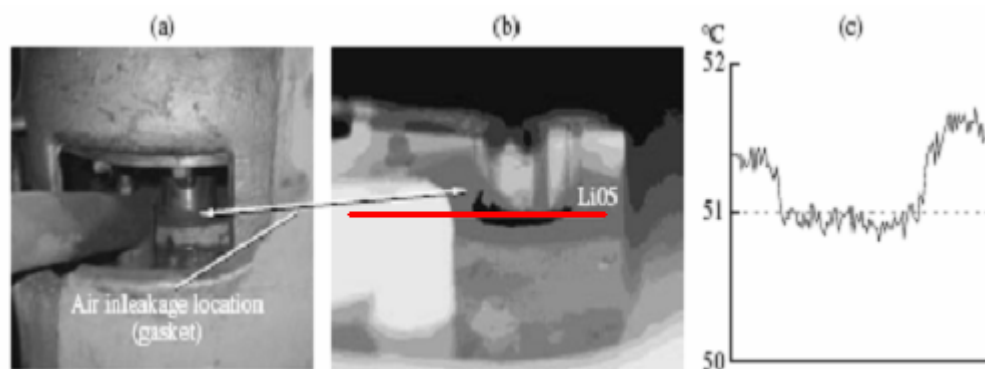
(a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li03)

Τοπικές εισροές αέρα εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια υπέρυθρης απεικόνισης στο σημείο όπου ένα μεταλλικό κομμάτι τοποθετήθηκε ως μάλωμα στην επένδυση της επιφάνειας του λέβητα (σχήμα 3.22), καθώς επίσης και στον άξονα της αντλίας του συμπυκνωτή (σχήμα 3.23). Σε αυτές τις περιπτώσεις πάλι, τα θερμογράμματα των επιφανειών και ειδικά τα σχεδιαγράμματα θερμοκρασίας (c) εμφανίζουν καθαρά την τοπική ψύξη του υλικού, λόγω της εισροής σχετικά κρύου αέρα.



Σχήμα 3.22

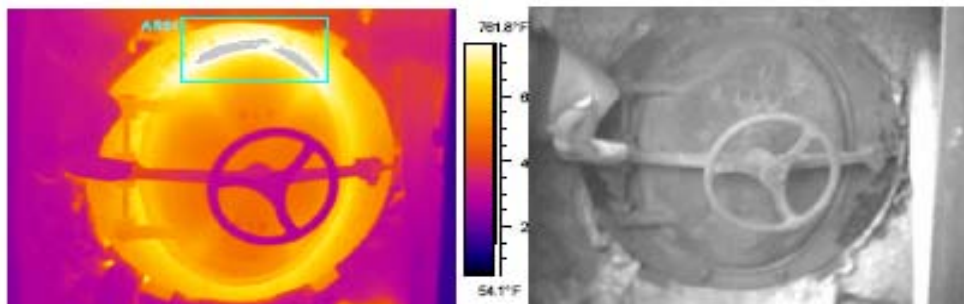
(a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li04)



Σχήμα 3.23

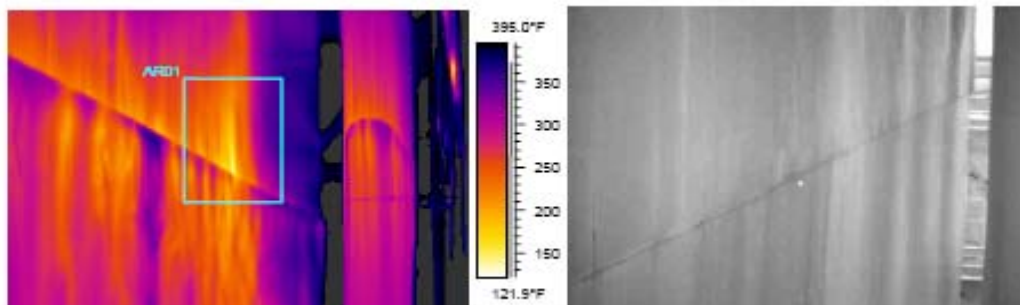
(a) φωτογραφία, (b) θερμόγραμμα, (c) διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της κόκκινης γραμμής (Li05)

Η μόνωση του λέβητα και τα περιβλήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού της ατμογεννήτριας επιθεωρούνται ως προς την θερμοκρασιακή ομοιομορφία των επιφανειών τους, υποδεικνύοντας ρωγμές στο περίβλημα και τυχόν διακοπή της μόνωσης. Μια χαρακτηριστική επιθεώρηση λεβήτων φαίνεται στο σχήμα 3.24, όπου το θερμό σημείο οφείλεται σε έλλειψη ή αστοχία μόνωσης.



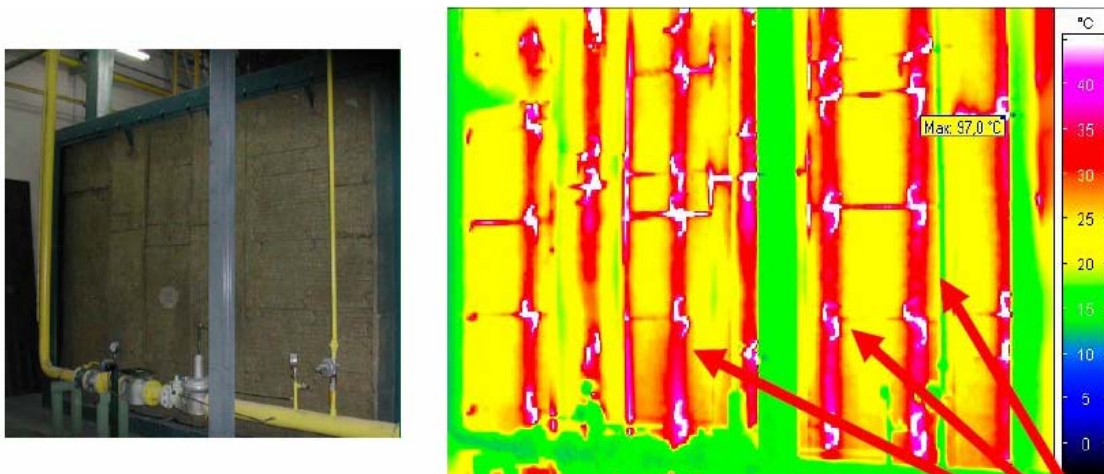
Σχήμα 3.24 Υπέρυθρη εικόνα των καυτών σημείων στην κορυφή της πόρτας.

Τα θερμά σημεία που ανιχνεύονται, κατά τη διάρκεια των υπέρυθρων επιθεωρήσεων, μπορούν να ποικίλουν στο μέγεθος, τη μορφή, και τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη περιοχή, η οποία επιθεωρείται. Ένα θερμό σημείο, όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.25, μπορεί να εμφανίζει υψηλή-κρίσιμη θερμοκρασία, αλλά λόγω της θέσης στην οποία βρίσκεται, μπορεί να μην είναι σημαντικό πρόβλημα και να μην απαιτεί απαραίτητα άμεση επισκευή. Στην περίπτωση μας, όμως, το μονωτικό περίβλημα είναι διαβρωμένο και αποχρωματισμένο, με αποτέλεσμα την ανίχνευση χαμηλής θερμοκρασίας που οφείλεται σε μια οριζόντια ρωγμή κατά μήκος του περιβλήματος του λέβητα.



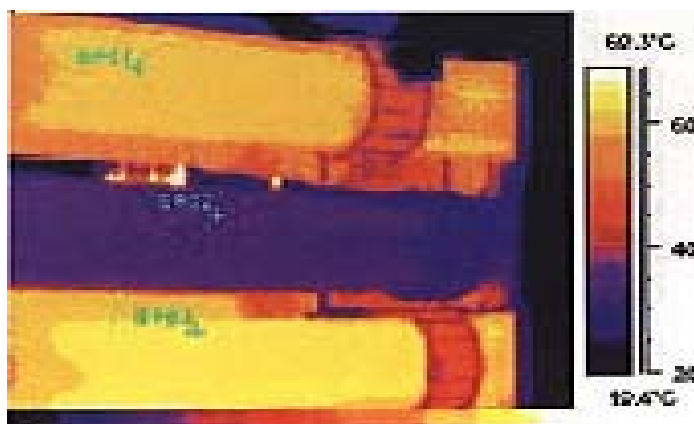
Σχήμα 3.25 Καυτό σημείο στο τοίχωμα του λέβητα

Επίσης, στο σχήμα 3.26 από το θερμογράφημα μπορούμε να εντοπίσουμε τις απώλειες θερμικής ενέργειας που οφείλονται στην κακή μόνωση του δοχείου του λέβητα.



Σχήμα 3.26 Θερμόγραμμα και φωτογραφία μόνωσης λέβητα

Τα κονιοποιημένα καύσιμα μεταφέρονται από τους μύλους στον καυστήρα μέσω αγωγών με αέρα θερμοκρασίας $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτός ο αέρας θερμαίνει τους αγωγούς καυσίμων και αυξάνει τη θερμοκρασία των επιφανειών τους. Κατά τη σύγκριση των θερμοκρασιών όλων των αγωγών καυσίμων/αέρα, ο αγωγός με τη σχετικά χαμηλότερη θερμοκρασία δείχνει και την ανωμαλία. Η χαμηλή θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού υποδεικνύει την ύπαρξη προβλήματος στην ροή του κονιοποιημένου καυσίμου δια μέσου του αγωγού. Στο παρακάτω θερμόγραμμα (σχήμα 3.27) σε έναν από τους αγωγούς δεν υπάρχει ροή άνθρακα με αποτέλεσμα οι σωλήνες να εμφανίζουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο μεσαίος σωλήνας που δεν έχει καμία ροή άνθρακα είναι ο πιο κρύος ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$) έναντι των άλλων δύο (61 - $65\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 3.27 Θερμόγραμμα αγωγών καυσίμου

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παραπάνω πιστοποιούν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου θερμικής απεικόνισης για την ανίχνευση ανωμαλιών σε λέβητα και στρόβιλο. Τα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης μεθόδου, που αναφέραμε για τον ανωτέρω σκοπό, είναι τα ακόλουθα:

- (i) επιτρέπει στα κακώς σφραγισμένα μέρη του εξοπλισμού να είναι γρήγορα ανιχνεύσιμα
- (ii) επιτρέπει στον εξοπλισμό να εξεταστεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του (χωρίς να τερματιστεί η λειτουργία του)
- (iii) επιτρέπει στις μη ορατές ρωγμές να ανιχνευθούν, π.χ. σε ένα στρώμα της μόνωσης ή στις όχι προσιτές θέσεις
- (iv) είναι λιγότερο κοπιαστική η εργασία
- (v) ταχύτερη εξέταση-εξοικονόμηση χρόνου

Το κέρδος από τη χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας, για την πραγματοποίηση τακτικών διαγνωστικών ελέγχων του εξοπλισμού των σταθμών παραγωγής, είναι εκατομμύρια ευρώ. Στοιχεία που αναφέρονται σε ξένες δημοσιεύσεις δείχνουν ότι οι οικονομικές απώλειες μπορούν να μειωθούν πολύ, ενώ τα χρήματα που ξοδεύονται για την πραγματοποίηση δραστηριοτήτων θερμικής απεικόνισης αποσβένονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑ-ΔΟΚΙΜΙΟ ΛΕΒΗΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Όπως προείπαμε μία από τις πιο χρήσιμες και ενδιαφέροντες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι οι επιθεωρήσεις λεβήτων. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα τοιχώματα του λέβητα είναι μεγάλες και η ανάγκη για μείωση των θερμικών απωλειών πολύ σημαντική.

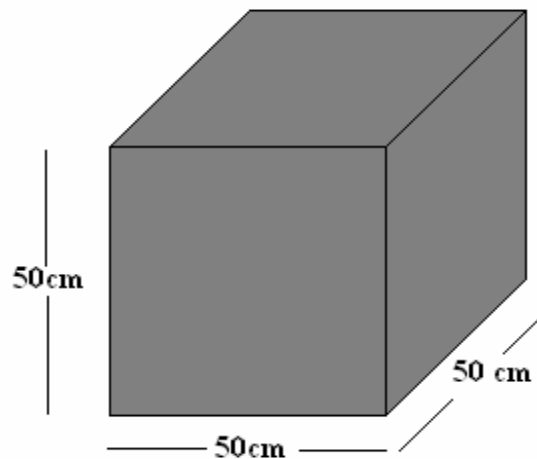
Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ένα πείραμα υπέρυθρης θερμογραφίας που εκτελέστηκε με στόχο μια εντελώς προσεγγιστική προσομοίωση ενός λέβητα. Σκοπός της προσομοίωσης-πείραμα είναι η μέτρηση των θερμικών απωλειών, η αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών του λέβητα, καθώς και η επιθεώρηση της πειραματικής διάταξης για τυχόν ελαττώματα-διαρροές. Επιπλέον, η καλύτερη κατανόηση της υπέρυθρης θερμογραφίας, μέσω της πρακτικής εφαρμογής που περιλαμβάνει προσδιορισμό των παραμέτρων, ρυθμίσεις θερμοκάμερας, επεξεργασία των θερμογραμμάτων και ισόθερμων στον υπολογιστή με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.

4.2 Δοκίμιο-Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα μεταλλικό κιβώτιο, τα μονωτικά υλικά, ένα μεταλλικό κέλυφος και μια ηλεκτρική αντίσταση.

4.2.1 Μεταλλικό κιβώτιο

Κατασκευάσαμε ένα μεταλλικό κύβο από λαμαρίνα χάλυβα πάχους 1mm, διαστάσεων 50x50x50 cm. Η κατασκευή αυτή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, προσομοιώνει την εστία του λέβητα.



Σχήμα 4.1 Μεταλλικό κιβώτιο

Οι τρεις παράπλευρες επιφάνειες είναι σταθερές, ενώ η μια παράπλευρη, η άνω και η κάτω πλευρά είναι αποσπώμενες βιδωτές.

4.2.2 Μονωτικά υλικά

Για να προσομοιώσουμε τη μόνωση του λέβητα, τοποθετήσαμε στα τοιχώματα του μεταλλικού κιβώτιου μόνωση πετροβάμβακα που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος για τη θερμομόνωση λεβήτων, λόγω της υψηλής αντοχής του σε μεγάλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 4.2 Πλάκα πετροβάμβακα

Οι ενισχυμένες πλάκες πετροβάμβακα είναι ένα φυσικό ινώδες προϊόν, που προέρχεται από ηφαιστιογενή πετρώματα, όπως ο βασάλτης, ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης και ο βωξίτης. Το μίγμα λιώνει σε ηλεκτρικό φούρνο στους 1520°C, ινοποιείται με περιστροφική κίνηση και οι παραγόμενες ίνες αποκτούν την συνεκτικότητα τους με προσθήκη συγκολλητικής ρητίνης ανθεκτικής σε υψηλή θερμοκρασία. Η υδροαπωθητικότητα επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό των ινών με ειδικές πυριτικές ενώσεις.

Ο πετροβάμβακας είναι θέρμο-ηχομονωτικό υλικό εξαιρετικής πυραντοχής έως τους 750 °C. Έχει διαστατική σταθερότητα, είναι χημικώς αδρανές, οι ιδιότητες του διατηρούνται αμετάβλητες στο χρόνο και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη παρασίτων.

Για τη διάταξη μας χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά πάχη πετροβάμβακα 3 και 5 cm, έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για τα δύο διαφορετικά πάχη. Παρακάτω, δίνονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες των μονώσεων έτσι όπως τις παρέχει ο κατασκευαστής.

Πετροβάμβακας 3cm

Μηχανικές και Φυσικές Ιδιότητες			
Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	DIN/ EN
Πυκνότητα (ρ)	50	kg/m ³	
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας λ_D στους 10 °C	0.035	W/(m*K	EN 12667
	0.030	Kcal/m h °C	
Κατηγορία Ακαυστότητας	A1		EN 13501-2
Θερμοκρασία Λειτουργίας	750	°C	DIN 4102
Αντοχή σε εφελκυσμό παράλληλα των όψεων	14	kPa	EN 1608
Συντελεστής Ατμοδιαπερατότητας μ	1		EN 12086
Βραχυχρόνια απορρόφηση νερού με μερική εμβάπτιση	<1	kg/m ²	EN 1609
Μακροχρόνια απορρόφηση νερού με μερική εμβάπτιση	<3	kg/m ²	EN 12087
Αντίσταση Ροής Αέρα	31	kPa s/m ²	EN 29053

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες πετροβάμβακα 3cm

Πετροβάμβακας 5cm

Μηχανικές και Φυσικές Ιδιότητες

Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδα μέτρησης	DIN/ EN
Πυκνότητα (ρ)	40	kg/m ³	
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας λ_D στους 10 °C	0.035	W/(m*K	EN 12667
	0.030	Kcal/m h °C	
Κατηγορία Ακουστότητας	A1		EN 13501-2
Θερμοκρασία Λειτουργίας	750	°C	DIN 4102
Αντοχή σε εφελκυσμό παράλληλα των όψεων	12	kPa	EN 1608
Συντελεστής Ατμοδιαπερατότητας μ	1		EN 12086
Βραχυχρόνια απορρόφηση νερού με μερική εμβάπτιση	<1	kg/m ²	EN 1609
Μακροχρόνια απορρόφηση νερού με μερική εμβάπτιση	<3	kg/m ²	EN 12087
Αντίσταση Ροής Αέρα	15	kPa s /m ²	EN 29053

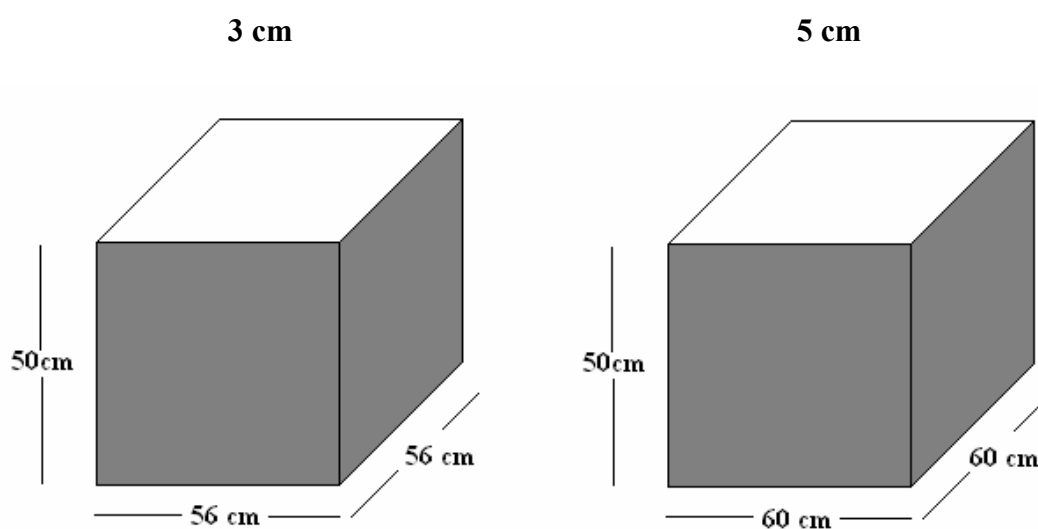
Πίνακας 4.2 Ιδιότητες πετροβάμβακα 5cm



Σχήμα 4.3 Μόνωση πετροβάμβακα πάνω στο τοίχωμα του δοκιμίου

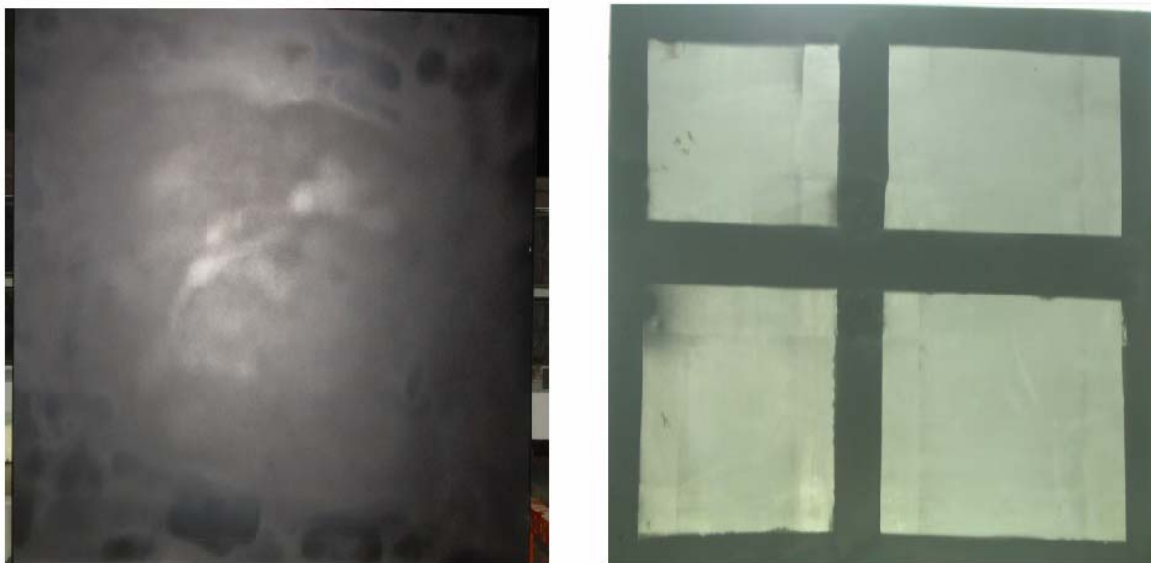
4.2.3 Μεταλλικό κέλυφος

Κατασκευάσαμε, επίσης, δύο κελύφη από λαμαρίνα χάλυβα 1 mm, ένα για την μόνωση των 3cm και ένα για των 5 cm. Κάθε κέλυφος αποτελείται από τέσσερις πλευρές διαστάσεων 50x56 cm (3cm) και 50x60 cm (5cm) και ουσιαστικά εφαρμόζουν στις παράπλευρες μονώσεις-επιφάνειες του δοκιμίου, προσομοιώνοντας τα εξωτερικά τοιχώματα του λέβητα.



Σχήμα 4.4 Εξωτερικά κελύφη για μόνωση 3 και 5 cm

Στο πάνω και στο κάτω μέρος της κατασκευής, τοποθετήσαμε δύο πλάκες λαμαρίνας πάχους 1 mm διαστάσεων 70x70 cm για καλύτερη στήριξη. Τα εξωτερικά κελύφη του δοκιμίου είναι αυτά που μας ενδιαφέρουν περισσότερο από θερμογραφικής απόψεως, μιας και πάνω σ' αυτά θα μετρήσουμε θερμοκρασίες με τη θερμοκάμερα. Δηλαδή επιθυμούμε υψηλή εκπεμπτικότητα ϵ και χαμηλές ανακλάσεις, κάτι που σε καμιά περίπτωση δε μας εξασφαλίζει η μεταλλική κατασκευή μας. Για αυτό το λόγο βάψαμε τις δύο από τις τέσσερις πλευρές κάθε κελύφους με μαύρο σπρέι ματ που μας εξασφαλίζει ϵ της τάξης άνω του 0.98 και χαμηλές ανακλάσεις. Ενώ, τις άλλες δύο πλευρές τις βάψαμε σε μορφή πλέγματος, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες, με σκοπό να εξετάσουμε τις διαφοροποιήσεις στο βαμμένο και άβαφο κομμάτι κατά τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.5 Εξωτερικό κέλυφος

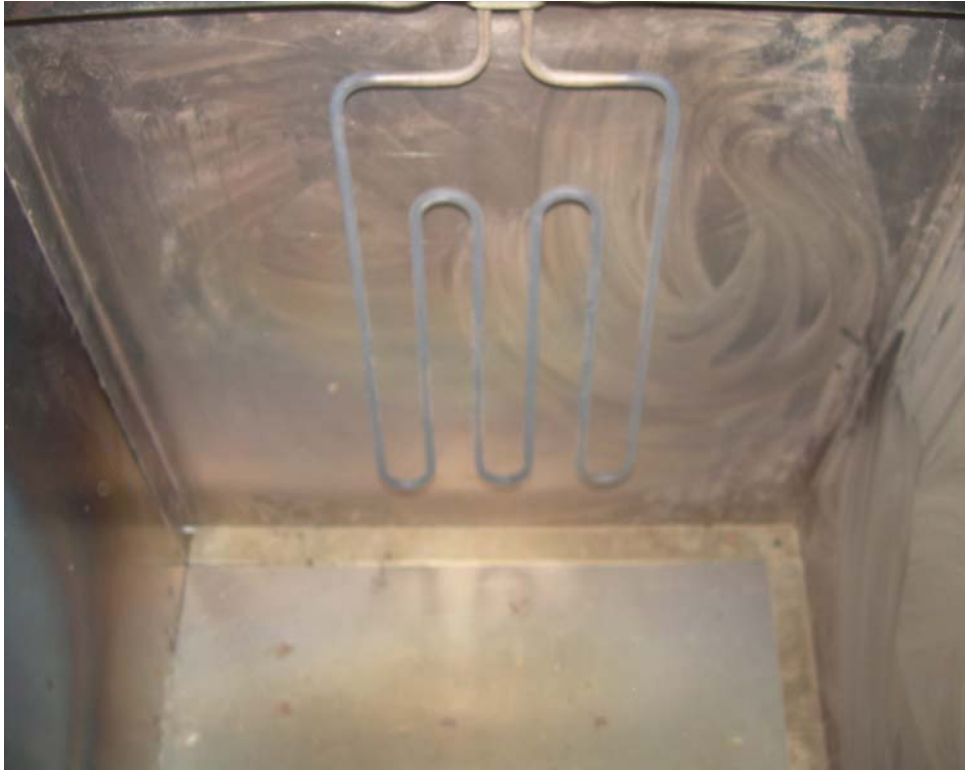
4.2.4 Ηλεκτρική αντίσταση

Χρησιμοποιήσαμε μια ηλεκτρική αντίσταση μαλακού χαλκού 1500 Watt, τροφοδοσίας 220 Volt, η οποία φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 4.6 Ηλεκτρική αντίσταση 1500 W

Τοποθετήσαμε την ηλεκτρική αντίσταση κολλητά σ' ένα από τα εσωτερικά τοιχώματα του δοκιμίου, όπως φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία, με σκοπό να προσομοιώσουμε τους θερμοσωλήνες του λέβητα, οι οποίοι βρίσκονται πάνω στα τοιχώματα του.



Σχήμα 4.7 Αντίσταση στο εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου-λέβητα

4.3 Θερμοκάμερα δοκιμών

Η διεξαγωγή του πειραματικών μετρήσεων (θερμογραφίες) πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της θερμοκάμερας IRI 4010 της Irisys, η οποία φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Σχήμα 4.8 Θερμοκάμερα IRI 4010

Παρακάτω παραθέτουμε τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά της θερμοκάμερας έτσι όπως δίνονται από τον κατασκευαστή.

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- Διαστάσεις 230 mm x 120 mm x 135 mm
- Βάρος 0.75 kg
- Αισθητήριο: άψυκτο μικροβολτόμετρο γεωμετρικής διακριτικότητας 160 x 120 pixels
- Γωνία θέας (FOV) $20^{\circ} \times 15^{\circ}$
- Χειροκίνητη εστίαση
- Ελάχιστη απόσταση εστίασης 30 cm
- Φασματική απόκριση $8 \mu\text{m}$ με $14 \mu\text{m}$
- Μετρούμενο εύρος θερμοκρασίας από -10°C έως 250°C
- Ένδειξη σε $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$ και K

- Ακρίβεια $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ της πραγματικής θερμοκρασίας
- Ρύθμιση εκπεμπιμότητας ε από 0.2 έως 1.0 σε βήματα του 0.01 με αντιστάθμιση θερμοκρασίας χώρου (ambient)
- Οθόνη έγχρωμη LCD 3.5 ιντσών
- 4x ψηφιακό ζουμ

Η επεξεργασία των θερμογραμμάτων έγινε με τη χρήση του λογισμικού IRISYS 4000 Series Imager. Η χρήση του λογισμικού μας δίνει τη δυνατότητα για επεξεργασία των εικόνων, δημιουργία ισόθερμων, προσδιορισμός θερμότερου και ψυχρότερου σημείου, αλλαγή του εύρους κλίμακας της θερμοκρασίας, αλλαγή της χρωματικής παλέτας κ.α. Η χρήση του λογισμικού και η επεξεργασία των εικόνων είναι αναπόσπαστο κομμάτι της υπέρυθρης θερμογραφίας και παίζει καθοριστικό ρόλο για τη σωστή ερμηνεία των θερμογραμμάτων.

4.4 Πειραματική διαδικασία και συγκριτικές μελέτες

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο κτίριο Βεργίνα της πολυτεχνικής σχολής του ΑΠΘ. Η θερμοκρασία δωματίου, κατά την διάρκεια του πειράματος, ήταν $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το δοκίμιο, καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος, ήταν τοποθετημένο μακριά από πηγές θερμότητας, οι οποίες θα είχαν άμεση επίδραση στα θερμογραφήματα που λάβαμε και, κατά συνέπεια, θα μας οδηγούσαν σε λάθος ερμηνείες και σε εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων.

Παρακάτω αναφέρουμε τον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος και την συγκριτική μελέτη μεταξύ των διαφόρων δοκιμών που πραγματοποιήσαμε.

Τοποθετήσαμε την ηλεκτρική αντίσταση των 1500 W στην εσωτερική πλευρά του δοκιμίου, στην πλευρά την οποία ονομάσαμε πλευρά μηδέν. Αξίζει να αναφερθεί, ότι η ηλεκτρική αντίσταση τοποθετήθηκε με τέτοιον τρόπο, ώστε να είναι σε επαφή με το εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση της ηλεκτρικής αντίστασης με τους θερμοσωλήνες ενός λέβητα. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, η πηγή θερμότητας (ηλεκτρική αντίσταση) παρέμεινε στην ίδια θέση.



Σχήμα 4.9 Πειραματική διάταξη

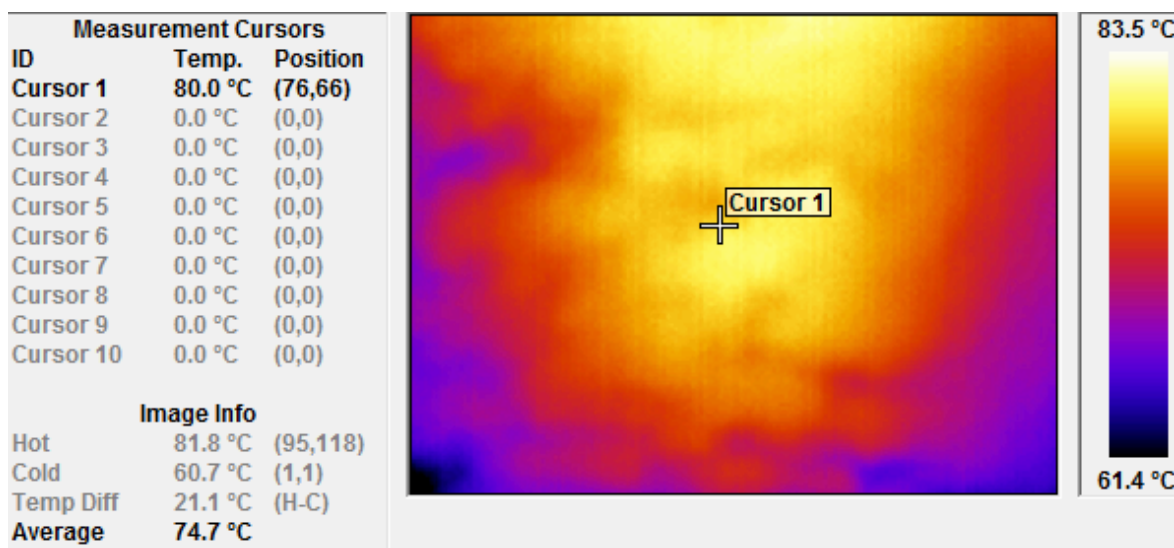
4.4.1 Πείραμα 1 : Συγκριτική μελέτη μονώσεων 3 και 5 cm

Κατά τη δοκιμή αυτή, προσπαθήσαμε να συγκρίνουμε τη θερμομονωτική ικανότητα των μονώσεων πετροβάμβακα για πάχη 3 και 5 cm, πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία για κάθε μόνωση ξεχωριστά. Και στις δύο περιπτώσεις συνδέσαμε την αντίσταση στη τροφοδοσία των 220V και αναμέναμε μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία των εξωτερικών τοιχωμάτων, δηλαδή να επέλθει η θερμική ισορροπία. Κατά τη διάρκεια της αναμονής και ενώ η θερμοκρασία των τοιχωμάτων αυξάνονταν μετρούσαμε ανά τακτά χρονικά διαστήματα τη θερμοκρασία, μέχρι που διαπιστώσαμε με τη πάροδο μίας ώρας, ότι η θερμοκρασία σταμάτησε να αυξάνεται, συνέπεια της θερμικής ισορροπίας που είχε επέλθει.

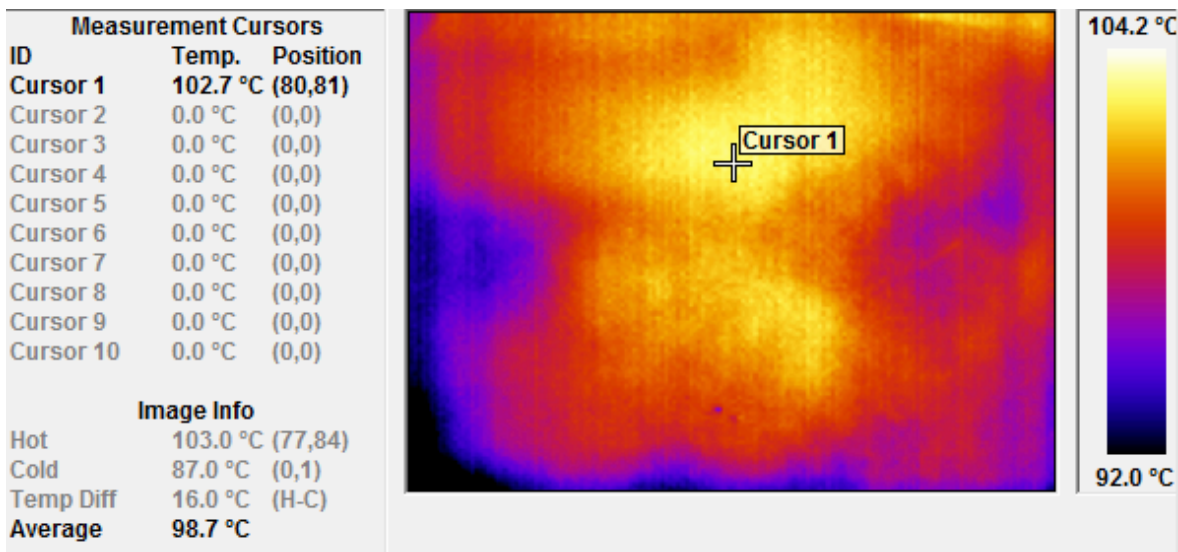


Σχήμα 4.10 Πλευρά μηδέν δοκιμίου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις για τα δύο διαφορετικά πάχη μόνωσης



Θερμόγραμμα 4.1 Μόνωση 5 cm



Θερμόγραμμα 4.2 Μόνωση 3 cm

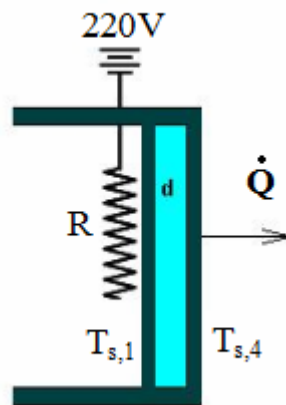
Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των παραπάνω θερμογραμμάτων της πλευράς μηδέν του δοκιμίου που βρίσκεται η αντίσταση, η μονωτική ικανότητα της μόνωσης των 5cm είναι πολύ καλύτερη σε σχέση μ' αυτήν των 3cm. Η θερμοκρασία πάνω στη πλευρά για μόνωση 3 cm φτάνει τους 102.7 °C, 22 βαθμούς περισσότερο από τους 80 °C που έχουμε για τη μόνωση των 5cm. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού πρόκειται για το ίδιο υλικό μόνωσης και το μόνο που αλλάζει είναι το πάχος.

Υπολογισμός θερμικών απωλειών

Παρακάτω θα υπολογίσουμε τη ροή θερμικής ισχύος μέσα από το τοίχωμα του δοκιμίου για τα δύο διαφορετικά πάχη μόνωσης. Με τη βοήθεια των θερμογραμμάτων θα προσδιορίσουμε τις θερμοκρασίες των επιφανειών του δοκιμίου που μας χρειάζονται για τον θεωρητικό υπολογισμό της θερμικής ισχύος.

Θεωρητικός υπολογισμός ροής θερμικής ισχύος

Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε το σύνθετο τοίχωμα του δοκιμίου του οποίου της θερμικές απώλειες θέλουμε να υπολογίσουμε για τα δυο διαφορετικά πάχη μόνωσης.



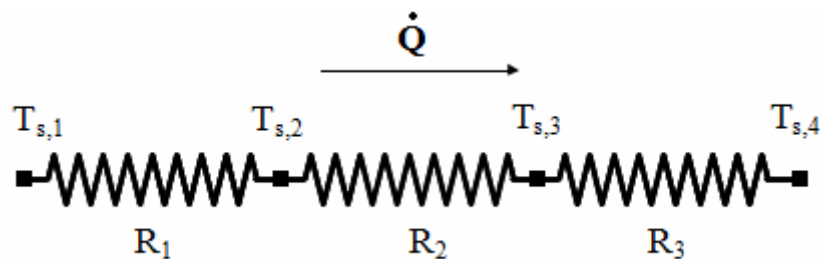
Σχήμα 4.11 Τοίχωμα δοκιμίου

Παρακάτω δίνεται το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα του τοιχώματος του δοκιμίου :

R_1 : η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας της εσωτερικής λαμαρίνας πάχους 1 mm

R_2 : η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας της μόνωσης

R_3 : η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας της εξωτερικής λαμαρίνας πάχους 1 mm



Σχήμα 4.12 Ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα τοιχώματος

Για σύνθετο επίπεδο τοίχωμα, όπως το δικό μας, η θερμική ροή Q' δίνεται από τον τύπο:

$$Q' = (T_{s,1} - T_{s,4}) / R$$

Όπου $R = R_1 + R_2 + R_3$, σύνδεση σε σειρά όπως φαίνεται και στο ισοδύναμο

Υπολογισμός αντίστασης αγωγιμότητας R

Η θερμική αντίσταση αγωγιμότητας δίνεται από τον τύπο:

$$R_{\alpha\gamma} = L / (\lambda * A)$$

L: το πάχος του υλικού

λ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

A: εμβαδό της επιφάνειας

R₁- Εσωτερική πλευρά τοιχώματος

πάχος λαμαρίνας L= 0.001 m

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χάλυβα $\lambda=58.15 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

εμβαδό A=0.5*0.5=0.25 m²

$$\rightarrow R_1=6.87 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

R₂- Μόνωση πετροβάμβακα

πάχος πετροβάμβακα L= 0.03 m

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πετροβάμβακα $\lambda=0.035 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

εμβαδό A=0.5*0.5=0.25 m²

$$\rightarrow R_2=3.42 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

πάχος πετροβάμβακα L= 0.05 m

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πετροβάμβακα $\lambda=0.035 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

εμβαδό A=0.5*0.5=0.25m²

$$\rightarrow R_2=5.71 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

R₃- Εξωτερική πλευρά τοιχώματος

πάχος λαμαρίνας L= 0.001 m

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χάλυβα $\lambda=58.15 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

εμβαδό A=0.5*0.5=0.25 m²

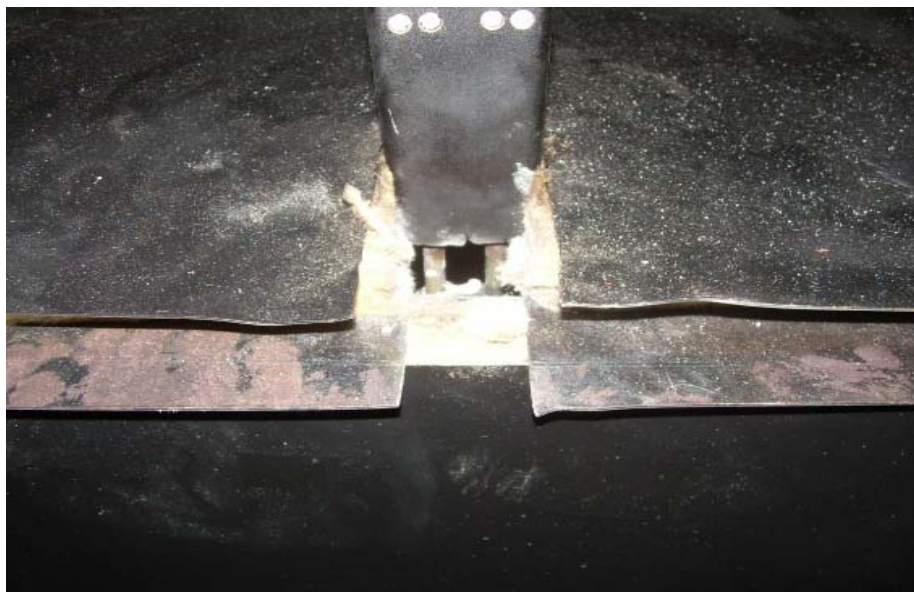
$$\rightarrow R_3=6.87 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Για τη συνολική αντίσταση R, όπως δείξαμε παραπάνω ισχύει: $R= R_1+ R_2+ R_3$ (σε σειρά)

$$\rightarrow R_{3\text{cm}}=6.87 \cdot 10^{-5}+3.42+6.87 \cdot 10^{-5}=3.4201 \text{ }^{\circ}\text{C/W (πετροβάμβακας 3cm)}$$

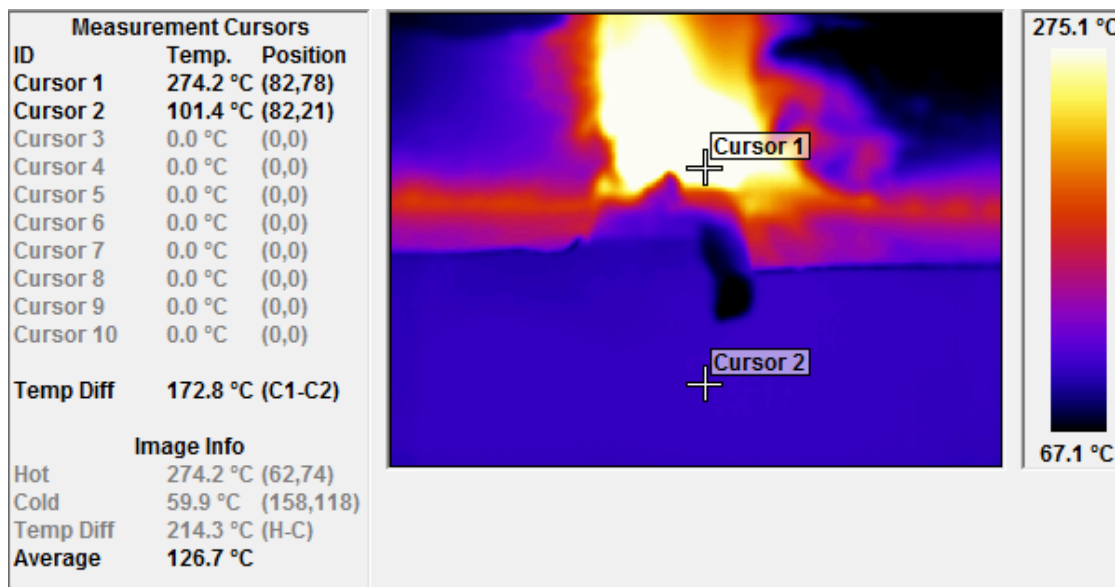
$$\rightarrow R_{5\text{cm}}=6.87 \cdot 10^{-5}+5.71+6.87 \cdot 10^{-5}=5.7101 \text{ }^{\circ}\text{C/W (πετροβάμβακας 5cm)}$$

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία στην εσωτερική λαμαρίνα του δοκιμίου, ανοίξαμε λίγο το καπάκι του δοκιμίου, όπως φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία, και εστίασαμε με τη θερμοκάμερα πάνω στην ηλεκτρική αντίσταση, η οποία εφάπτεται στο εσωτερικό τοίχωμα και κατά συνέπεια έχουν την ίδια θερμοκρασία.



Σχήμα 4.13 Αντίσταση – Εσωτερικό τοίχωμα

Ισχύς απωλειών μόνωσης 3 cm



Θερμόγραμμα 4.3 Εσωτερική-Εξωτερική πλευρά (3 cm)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω θερμόγραμμα, η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος $T_{s,1}$ είναι $274.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cursor 1), ενώ η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος $T_{s,4}$ είναι $101.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cursor 2).

Έτσι έχουμε:

$$R_{3\text{cm}} = 3.4201\text{ }^{\circ}\text{C/W} \text{ (όπως την υπολογίσαμε παραπάνω)}$$

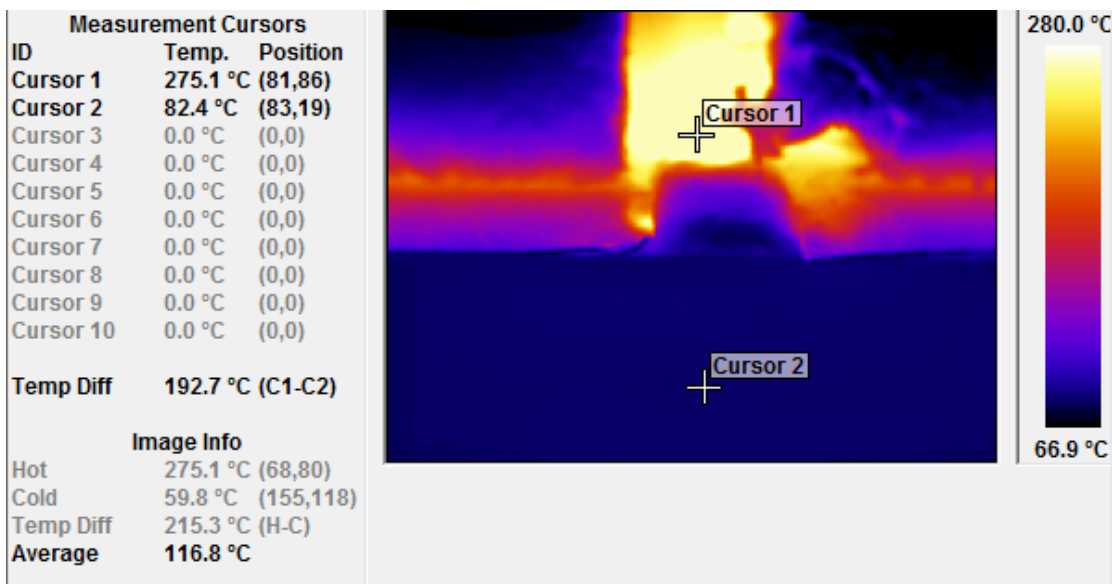
$$T_{s,1} = 274.2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{s,4} = 101.4\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rightarrow Q' = (T_{s,1} - T_{s,4}) / R$$

$$Q' = 274.2 - 101.4 / 3.4201 = \mathbf{50.524\text{ W}}$$

Ισχύς απωλειών μόνωσης 5 cm



Θερμόγραμμα 4.4 Εσωτερική-Εξωτερική πλευρά (5 cm)

Από το θερμόγραμμα βλέπουμε ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος $T_{s,1}$ είναι $275.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cursor 1), σχεδόν ίδια με το προηγούμενο θερμόγραμμα (3cm), ενώ η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος $T_{s,4}$ είναι $82.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cursor 2).

Έτσι έχουμε:

$$R_{3\text{cm}} = 5.7101 \text{ } ^\circ\text{C/W} \text{ (όπως την υπολογίσαμε παραπάνω)}$$

$$T_{s,1} = 275.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{s,4} = 82.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow Q' = (T_{s,1} - T_{s,4}) / R$$

$$Q' = 275.1 - 82.4 / 5.7101 = \mathbf{33.747 \text{ W}}$$

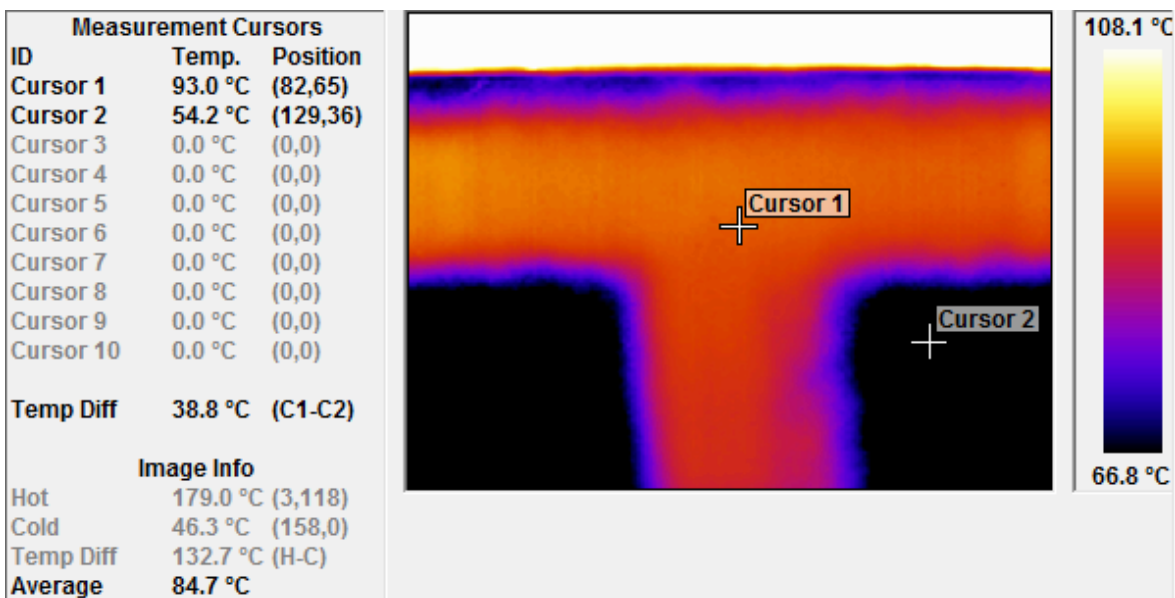
Διαπιστώνουμε ότι για τη μόνωση των 3cm οι θερμικές απώλειες είναι μεγαλύτερες από αυτές της μόνωσης των 5 cm. Για τη μόνωση των 3cm έχουμε $Q' = 50.524 \text{ W}$, ενώ για τη μόνωση των 5cm έχουμε $Q' = 33.747 \text{ W}$.

4.4.2 Πείραμα 2: Συγκριτική μελέτη βαμμένης άβαφης πλευράς - Προσδιορισμός εκπνευσιμότητας

Σ' αυτό το πείραμα, χρησιμοποιώντας μόνωση 3 cm, θερμογραφήσαμε μία εκ των δύο πλευρών του δοκιμίου που βάναμε σε μορφή πλέγματος, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να παρατηρήσουμε τη διαφοροποίηση των μετρήσεων μεταξύ του βαμμένου και του άβαφου κομματιού.



Σχήμα 4.14 Πλευρά και σημείο πλέγματος



Θερμόγραμμα 4.5 Βαμμένο - Άβαφο κομμάτι

Στο παραπάνω θερμόγραμμα έχουμε μαρκάρει τη θερμοκρασία δύο σημείων, ένα επάνω στο σταυρό στο βαμμένο κομμάτι και ένα επάνω στο άβαφο κομμάτι. Παρατηρούμε ότι το σημείο πάνω στο βαμμένο κομμάτι έχει θερμοκρασία 93 °C, ενώ το σημείο στο άβαφο κομμάτι έχει 54.2 °C. Δηλαδή εμφανίζουν διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = 38.8$ °C κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό να συμβαίνει στη πραγματικότητα, αφού πρόκειται για δυο σημεία της ίδιας πλευράς που λογικά θα έπρεπε να έχουν περίπου την ίδια θερμοκρασία.

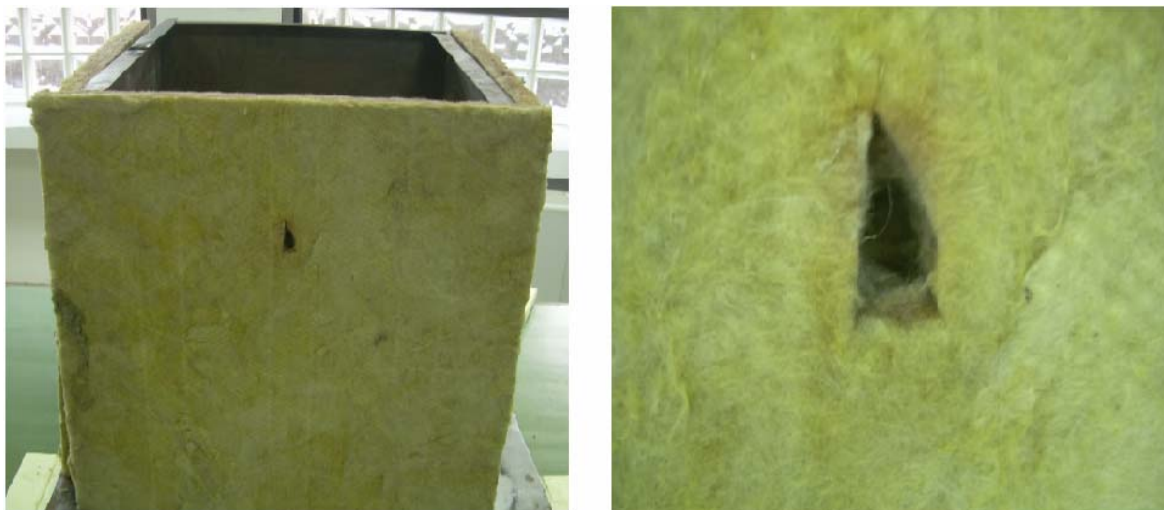
Στο κεφάλαιο δύο επισημάναμε πόσο σημαντικός είναι ο προσδιορισμός της εκπεμπτικότητας ϵ του εξεταζόμενου αντικείμενου, πριν από κάθε θερμογράφιση. Μεταλλικά αντικείμενα και κατασκευές, όπως το δοκίμιο μας, παρουσιάζουν πολύ χαμηλή εκπεμπτικότητα ϵ (0.3-0.4) και είναι δύσκολο να θερμογραφηθούν. Για το λόγο αυτό, βάψαμε το δοκίμιο με μαύρο σπρέι ώστε να επιτύχουμε μεγάλη εκπεμπτικότητα της τάξης του 0.98 και άνω. Έτσι είναι λογικό, όταν μετράμε τα δύο σημεία να εμφανίζουν αυτή τη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας, μιας και οι ρυθμίσεις που κάναμε στη θερμοκάμερα μας ήταν για εκπεμπτικότητα υλικού 0.98, δηλαδή για μετρήσεις στη βαμμένη επιφάνεια. Για να μετρούσαμε σωστά στο άβαφο κομμάτι, θα έπρεπε να εισάγουμε στη θερμοκάμερα τον αντίστοιχο συντελεστή εκπεμπτικότητας ϵ που αντιστοιχεί στη λαμαρίνα.

Στη συνέχεια μετρήσαμε τη θερμοκρασία επάνω στο σταυρό και σύμφωνα με τον τρόπο που εξηγήσαμε στο κεφάλαιο δύο προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε τον

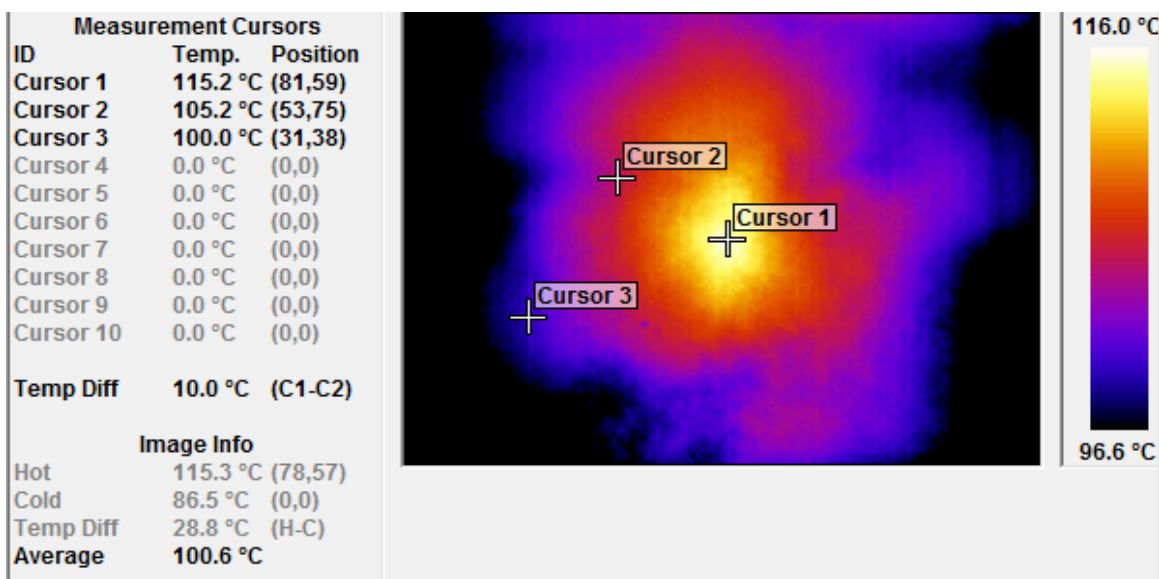
συντελεστή ε της λαμαρίνας. Στοχεύσαμε με τη θερμοκάμερα στο άβαφο κομμάτι του δοκιμίου μεταβάλλοντας την εκπεμπτικότητα, μέχρις ότου να μετρήσουμε θερμοκρασία ίδια μ' αυτήν που μετρήσαμε επάνω στο βαμμένο κομμάτι. Ο συντελεστής που αντιστοιχεί σ' αυτήν τη θερμοκρασία είναι ο συντελεστής ε του υλικού μας, που στην προκειμένη περίπτωση τον υπολογίσαμε 0.34. Η πολύ χαμηλή τιμή εκπεμπτικότητας εξηγεί και την μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο σημεία του θερμογράμματος.

4.4.3 Πείραμα 3: Σφάλμα μόνωσης

Σ' αυτό το πείραμα, τοποθετήσαμε στη πλευρά μηδέν που βρίσκεται η αντίσταση ένα κομμάτι μόνωσης 3 cm με μια τρύπα-διαρροή στην επιφάνειά της, όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες, με σκοπό να συγκρίνουμε τα αντίστοιχα θερμογράμματα της μόνωσης χωρίς σφάλμα και της εσφαλμένης μόνωσης. Και σ' αυτήν τη δοκιμή, οι μετρήσεις έγιναν αφού επήλθε η θερμική ισορροπία στο δοκίμιο.

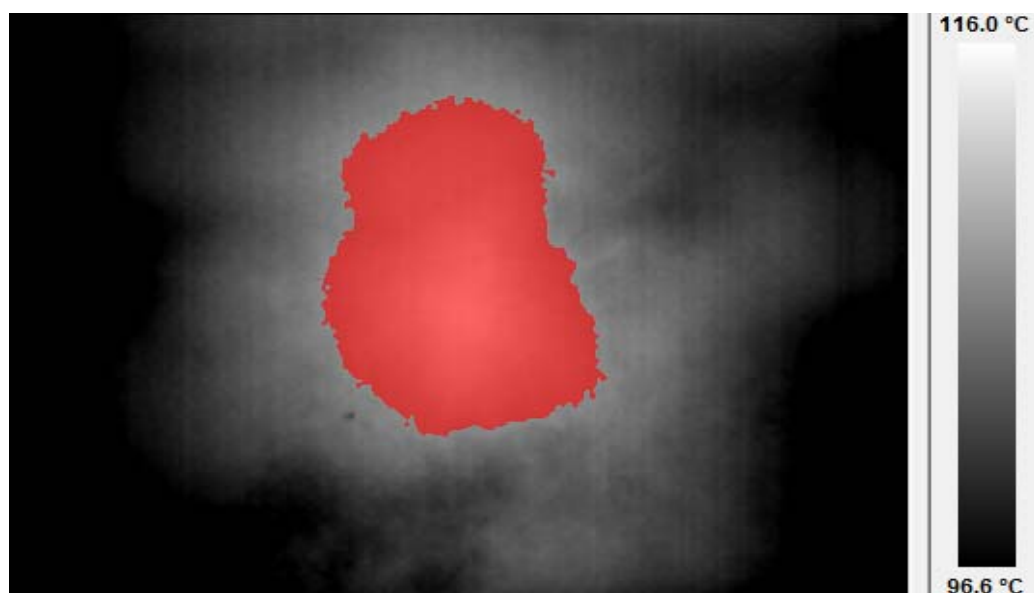


Σχήμα 4.15 Σφάλμα μόνωσης



Θερμόγραμμα 4.6 Σφάλμα μόνωσης

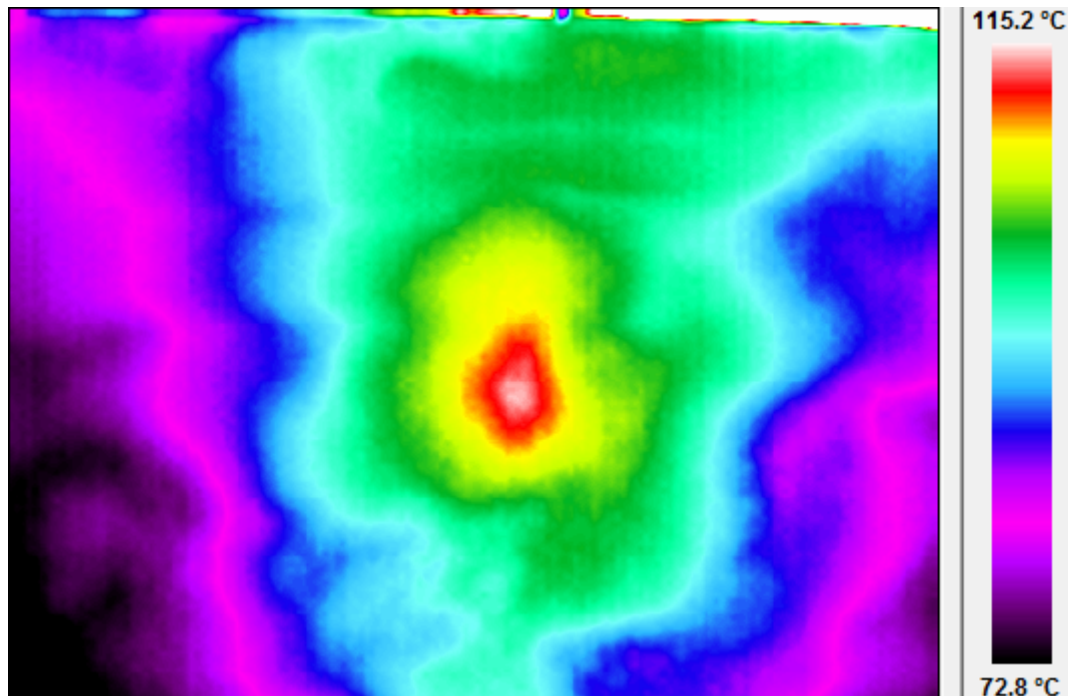
Από το παραπάνω θερμόγραμμα είναι ευδιάκριτη η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος του σφάλματος σε σύγκριση με την μόνωση χωρίς σφάλμα (θερμόγραμμα 4.2). Βλέπουμε ότι η θερμοκρασία φτάνει μέχρι και τους 115.2 °C πάνω στο σφάλμα, ενώ παρατηρούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε απ' αυτό η θερμοκρασία πέφτει και πλησιάζει αυτήν της αρχικής μόνωσης (χωρίς σφάλμα) 100 °C.



Θερμόγραμμα 4.7 Ισόθερμη καμπύλη σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 107 °C για σφάλμα μόνωσης

Στην παραπάνω ισόθερμη καμπύλη, παρατηρούμε με έντονο κόκκινο χρώμα όλα τα σημεία με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 107 °C, τα οποία όπως φαίνεται βρίσκονται στη κοντινή περιοχή του σφάλματος.

Παρακάτω απεικονίζεται πάλι το σφάλμα μόνωσης με χρωματική παλέτα high contrast, αντί για ironbow που είχαμε παραπάνω.



Θερμόγραμμα 4.8 Σφάλμα μόνωσης (High Contrast)

Θεωρητικός υπολογισμός θερμικών απωλειών δια μέσου της οπής

Για τις θερμικές απώλειες, ομοίως με τους θεωρητικούς υπολογισμούς του πειράματος ένα, ισχύει :

$$Q' = (T_{s,1} - T_{s,4}) / R$$

$$R_{\alpha\gamma} = L / (\lambda * A) , R = R_1 + R_2 + R_3 \text{ σύνδεση σε σειρά}$$

Όπως υπολογίσαμε στο πείραμα ένα, οι θερμικές αντιστάσεις της λαμαρίνας (R_1 και R_3) έχουν αμελητέα τιμή ($6.87 \cdot 10^{-5} \text{ C/W}$) και δεν τις λαμβάνουμε υπόψη.

Οπότε $R = R_2$ όπου R_2 η αντίσταση αγωγιμότητας του ακίνητου αέρα στην οπή.

R_2 - ακίνητος αέρας

πάχος οπής : $L = 0.03 \text{ m}$

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ακίνητου αέρα $\lambda = 0.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (για τις θερμοκρασίες του πειράματος)

εμβαδό $A = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

$\rightarrow R_2 = 2140 \text{ }^\circ\text{C/W}$

Οι θερμικές απώλειες, δια μέσου της οπής, για θερμοκρασίες $T_{s,1} = 274.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (εσωτερικό τοίχωμα, θερμόγραμμα 4.3) και $T_{s,4} = 115.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (εξωτερικό τοίχωμα στο σημείο της οπής, θερμόγραμμα 4.6) είναι :

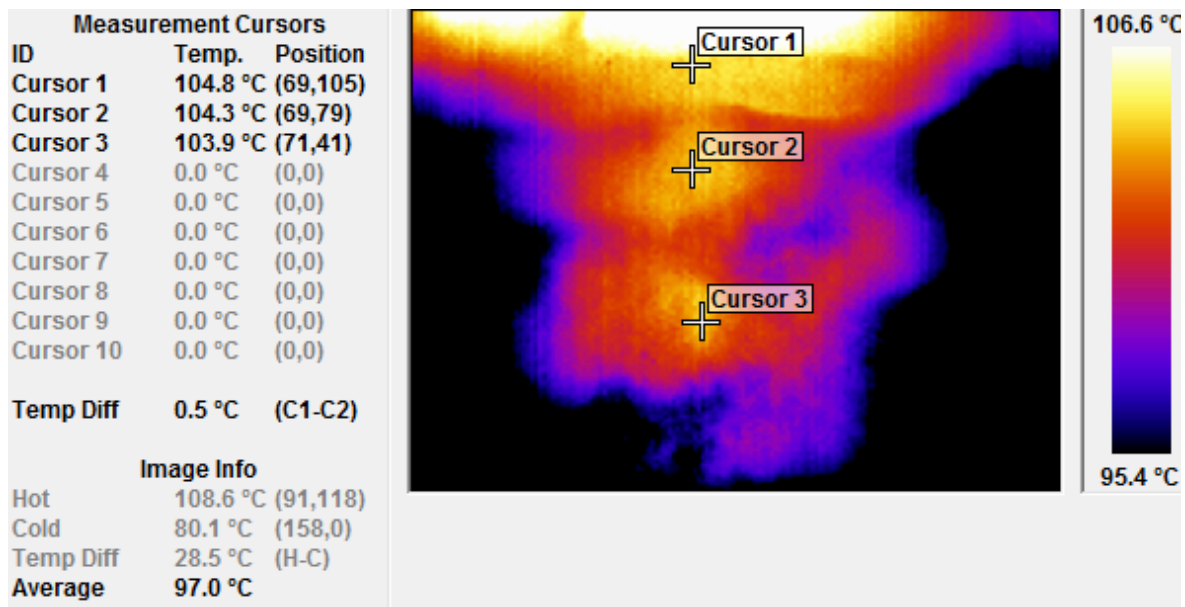
$Q' = 0.074 \text{ W}$

4.4.4 Πείραμα 4: Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα του δοκιμίου

Σ' αυτή τη δοκιμή, δημιουργήσαμε στο εσωτερικό τοίχωμα της πλευράς μηδέν που βρίσκεται η αντίσταση, τρεις τρύπες-διαρροές 13mm, 10mm και 6 mm, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Σκοπός της δοκιμής είναι η προσομοίωση σφάλματος στο τοίχωμα του λέβητα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα θερμογράμματα της δοκιμής χωρίς σφάλμα. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για μόνωση πετροβάμβακα 3cm.

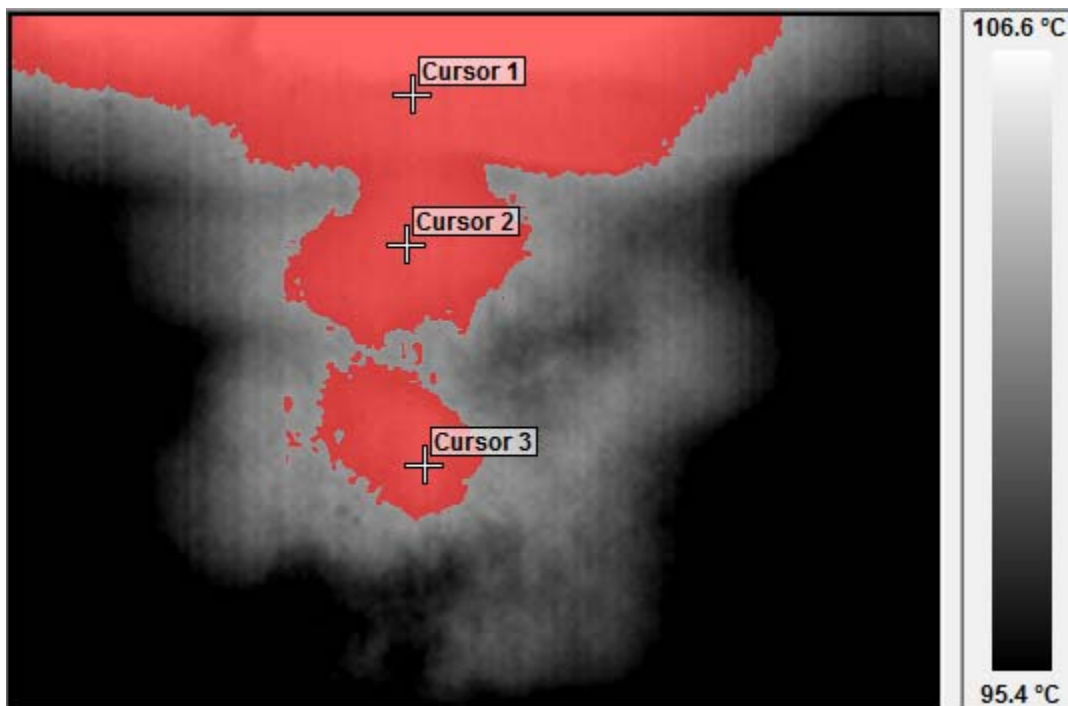


Σχήμα 4.16 Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα



Θερμόγραμμα 4.9 Σφάλμα στο εσωτερικό τοίχωμα

Στο παραπάνω θερμόγραμμα βλέπουμε τις θερμοκρασίες των τριών οπών της εσωτερικής λαμαρίνας. Οι μεταξύ τους θερμοκρασιακές διαφορές είναι πολύ μικρές, στην άνω οπή διαμέτρου 13 mm μετρήσαμε 104.8 °C (cursor 1), στη μεσαία οπή διαμέτρου 10 mm 104.3 °C (cursor 2) και στην κάτω διαμέτρου 6 mm μετρήσαμε 103.9 °C (cursor 3). Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασιακή απόκλιση από το αρχικό θερμικό πρότυπο του δοκιμίου (θερμόγραμμα 4.2) είναι πολύ μικρή, της τάξεως των 2.5 °C. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η θερμική αντίσταση της λαμαρίνας, όπως την υπολογίσαμε παραπάνω, είναι αμελητέα ($6.87 \cdot 10^{-5}$ °C/W) σε σχέση με αυτή της μόνωσης του πετροβάμβακα ($R_2 = 3.42$ °C/W), λόγω του μικρού πάχους (1 mm) και του μεγάλου συντελεστή αγωγιμότητας λ . Κατά συνέπεια, η λαμαρίνα επηρεάζει ελάχιστα την θερμομονωτική ικανότητα του δοκιμίου, όπως και τα σφάλματα πάνω σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, στο αντίστοιχο θερμόγραμμα του πειράματος 3 (θερμόγραμμα 4.6), η θερμοκρασιακή απόκλιση φτάνει τους 12-13 °C από την πρότυπη κατάσταση, πράγμα που αποδεικνύει ότι η θερμομονωτική ικανότητα του δοκιμίου οφείλεται αποκλειστικά στη μόνωση του πετροβάμβακα.

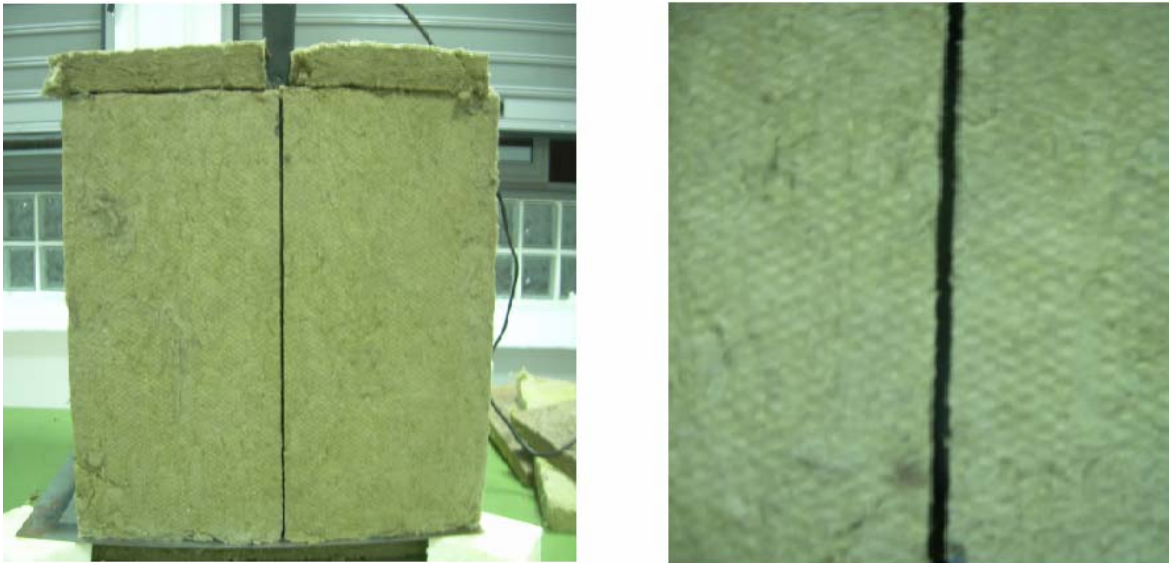


Θερμόγραμμα 4.10 Ισόθερμη καμπύλη σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 102°C

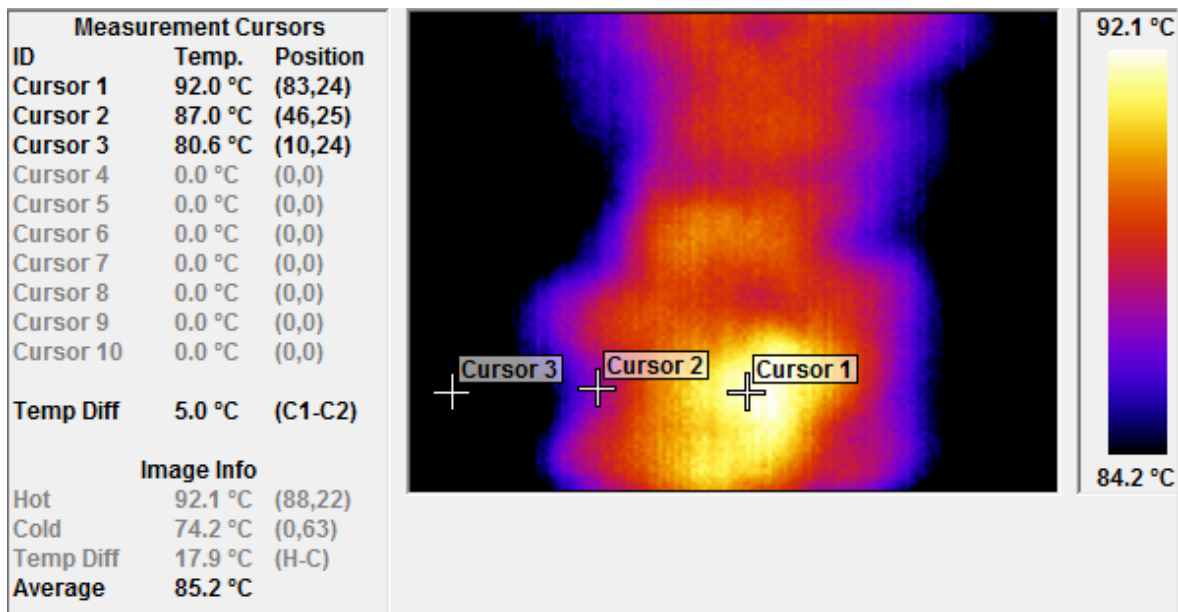
Στην παραπάνω ισόθερμη, με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα σημεία με θερμοκρασίες άνω των 102 °C, η οποία είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του δοκιμίου στην πρότυπη κατάσταση. Στην ισόθερμη, όπως φαίνεται, περιέχονται και οι τρεις οπές στο εσωτερικό τοίχωμα της λαμαρίνας.

4.4.5 Πείραμα 5: Προβληματική προσαρμογή μονωτικών

Σ' αυτή τη δοκιμή τοποθετήσαμε στο τοίχωμα της πλευράς μηδέν δύο πλάκες πετροβάμβακα πάχους 5cm, οι οποίες δεν κάνουν τέλεια προσαρμογή, όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες. Σκοπός της δοκιμής είναι να καταγράψουμε τις θερμικές απώλειες κατά μήκος της ελαττωματικής ένωσης.



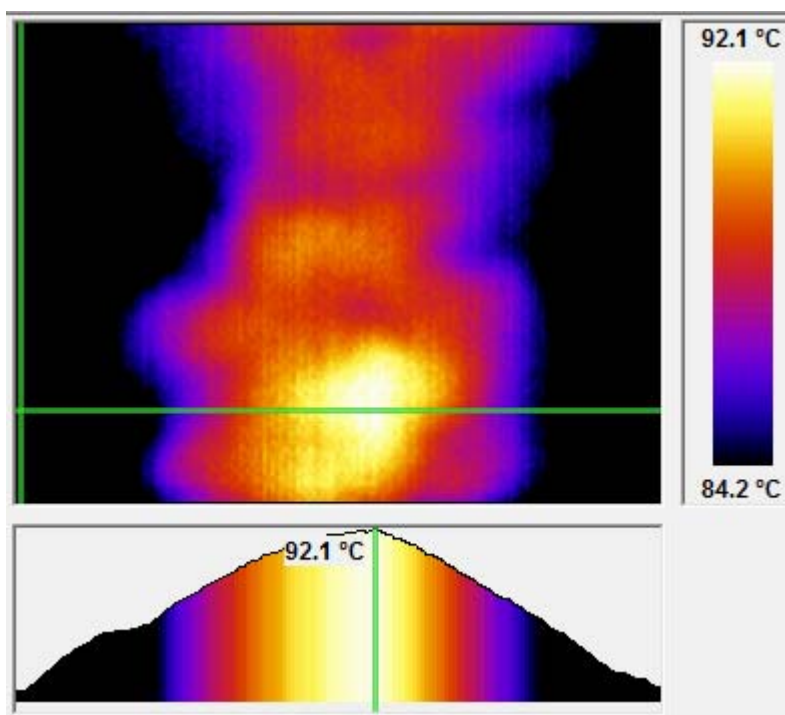
Σχήμα 4.17 Ελαττωματική προσαρμογή μονωτικών



Θερμόγραμμα 4.11 Ελαττωματική προσαρμογή μονωτικών

Από το θερμόγραμμα παρατηρούμε την αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος του διακένου μεταξύ των δύο μονωτικών πλακών. Η θερμοκρασία πάνω στο σφάλμα φτάνει

τους 92°C σε αντίθεση με τους 80°C που μετρήσαμε στο θερμογράμμα της αρχικής μόνωσης (θερμογράμμα 4.1).



Θερμογράμμα 4.12 Διάγραμμα θερμοκρασίας κατά μήκος της γραμμής

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η θερμοκρασία των σημείων μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τη περιοχή του σφάλματος.

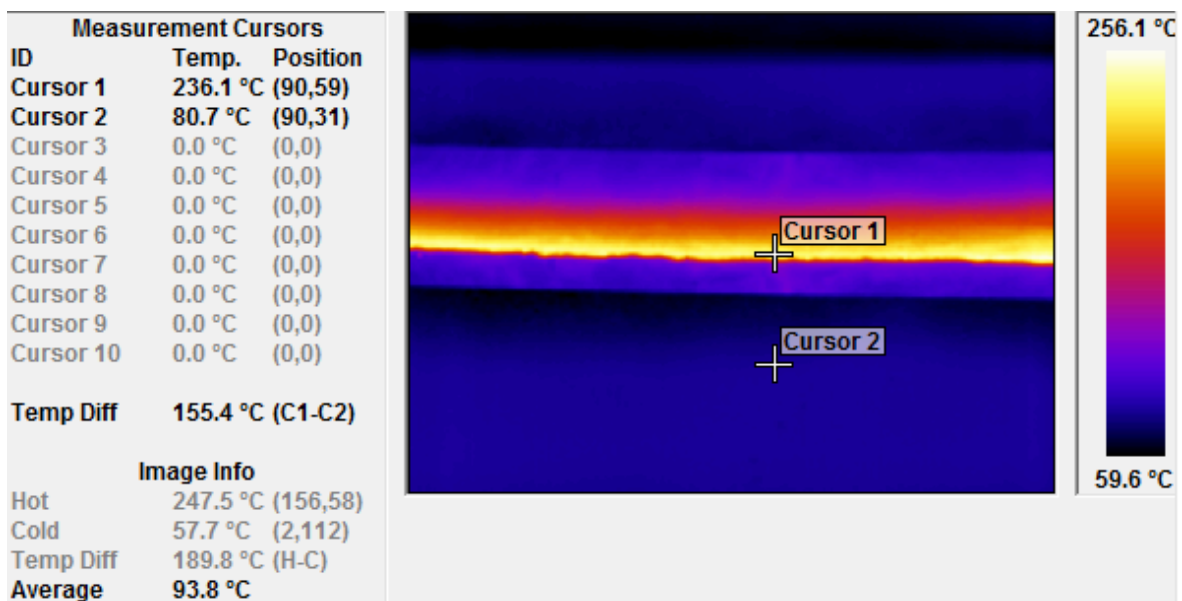
4.4.6 Πείραμα 6: Διαστολή υλικών

Με τη συμπλήρωση χρονικού διαστήματος μεγαλύτερο των δύο ωρών αδιάλειπτης λειτουργίας του δοκιμίου-λέβητα, παρατηρήθηκαν φαινόμενα διαστολής στα κομμάτια λαμαρίνας της κατασκευής, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα κατά τόπους το δοκίμιο να χάνει τη στεγανότητα του και κατά συνέπεια να αυξάνονται οι θερμικές απώλειες, όπως φαίνεται στα θερμογράμματα που ακολουθούν.



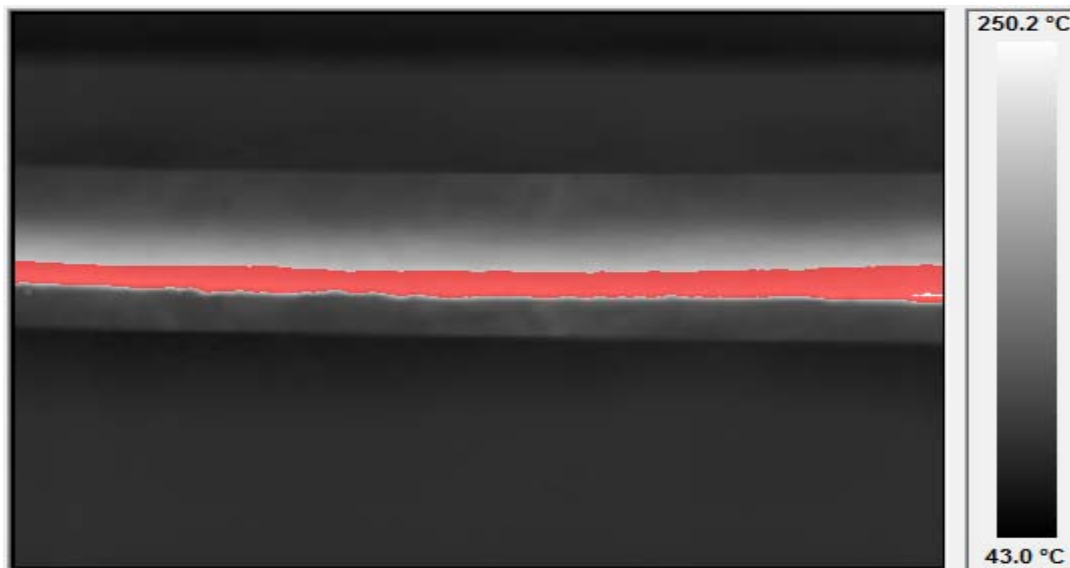
Σχήμα 4.18 Διαστολή λαμαρίνας

Στη παραπάνω φωτογραφία βλέπουμε την κακή επαφή της άνω ακμής του δοκιμίου με την υπόλοιπη κατασκευή λόγω της διαστολής.



Θερμόγραμμα 4.13 Διαστολή άνω ακμής

Στο παραπάνω θερμόγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η προβληματική επαφή στην άνω ακμή του δοκιμίου λόγω της διαστολής. Παρατηρούμε τη μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ενός σημείου πάνω στην ακμή ($236.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε σχέση με ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια του τοιχώματος ($80.7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Επίσης, από τη παρακάτω ισόθερμη για σημεία θερμοκρασίας μεγαλύτερη των $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα οι έντονες θερμικές απώλειες κατά μήκος της ακμής.



Θερμόγραμμα 4.14 Ισόθερμη ακμής σημείων θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 200°C

Από τις παραπάνω υπέρυθρες επιθεωρήσεις φαίνεται ότι η μέτρηση μιας θερμοκρασίας ή η παρατήρηση ενός θερμογράμματος δεν αρκεί για να μας οδηγήσει σε κάποιο συμπέρασμα. Η σύγκριση με την πρότυπη κατάσταση του υπό εξέταση αντικειμένου αποτελεί τον ασφαλέστερο τρόπο για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων. Κατά συνέπεια, η δημιουργία βιβλιοθηκών θερμικών προτύπων κρίνεται επιβεβλημένη για την αποτελεσματική εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας στο χώρο της ηλεκτρικής βιομηχανίας. Με τον τρόπο αυτό, σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης για την καλύτερη αποτίμηση της κρισιμότητας του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο προληπτικής συντήρησης στα χέρια του μηχανικού. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία είναι από τους κύριους λειτουργικούς παράγοντες που καταδεικνύουν την κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, η εφαρμογή της είναι ευρέως διαδεδομένη στο χώρο της ηλεκτρικής βιομηχανίας.

Κανένα ηλεκτρικό σύστημα δεν παρουσιάζει 100% αποδοτικότητα. Οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, οι απότομες διακυμάνσεις του φορτίου και η παλαιότητα του εξοπλισμού προκαλούν την υποβάθμισή του. Η κατανόηση των βασικών αρχών απώλειας ενέργειας σε συνδυασμό με τη μελέτη των θερμογραφημάτων συντελούν στον εντοπισμό των σφαλμάτων.

Η γνώση και η εμπειρία του θερμογράφου, καθώς επίσης και οι δυνατότητες του θερμογραφικού συστήματος αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την ανίχνευση ανωμαλιών, την εκτίμηση της σοβαρότητάς τους και τη λήψη ορθών αποφάσεων για την επισκευή τους.

Συμπερασματικά, από την ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια, παρακάτω αναφέρονται τα κύρια πλεονεκτήματα – χαρακτηριστικά που κάνουν την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας απαραίτητη στο χώρο της ηλεκτροπαραγωγής:

- Εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος. Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος προληπτικής συντήρησης που σκοπό έχει τον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων, προτού οδηγήσουν στην καταστροφή του εξοπλισμού και την διακοπή της παραγωγής. Συντελεί στην αύξηση της διάρκειας ζωής των πάγιων εγκαταστάσεων της ηλεκτροπαραγωγής.
- Αύξηση του κέρδους. Μας δίνει την δυνατότητα επιθεώρησης του εξοπλισμού χωρίς διακοπή της παραγωγής. Επίσης, συστηματικές υπέρυθρες επιθεωρήσεις μειώνουν αισθητά το χρόνο και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού. Το κόστος

μιας ανεπιθύμητης διακοπής παραγωγής είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από μια σχεδιασμένη διακοπή συντήρησης.

- Αποτελεσματικότερη συντήρηση. Ο ακριβής και γρήγορος εντοπισμός του προβλήματος ελαχιστοποιεί το χρόνο που απαιτείται για την συντήρηση. Η συντήρηση εστιάζεται στα διορθωτικά μέτρα και όχι στην ανίχνευση του προβλήματος.
- Ανίχνευση μη ορατών σφαλμάτων. Η υπέρυθη θερμογραφία είναι ικανή να ανιχνεύει σφάλματα, τα οποία δεν είναι ορατά δια γυμνού οφθαλμού (κακές επαφές, υπερφορτίσεις κ.α.). Στο χώρο της ηλεκτρικής βιομηχανίας, η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί μας επιτρέπει τον εντοπισμό σφαλμάτων σε πρωταρχικό στάδιο και την άμεση επισκευή τους. Τις περισσότερες φορές, όταν ένα σφάλμα γίνει ορατό η κατάσταση είναι μη αναστρέψιμη και επικίνδυνη για την ευστάθεια του συστήματος.
- Γρήγορες επιθεωρήσεις. Τα σύγχρονα θερμογραφικά συστήματα χαρακτηρίζονται από μικρούς χρόνους απόκρισης, καθώς δεν χρειάζεται να έρθουν σε θερμική ισορροπία με το υπό εξέταση αντικείμενο.
- Πιο αποτελεσματικές επιθεωρήσεις. Τα ηλεκτρικά προβλήματα συνεπάγονται, συνήθως, αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία ανιχνεύεται εύκολα και σε σύντομο χρονικό διάστημα από τα σύγχρονα θερμογραφικά συστήματα.
- Μέτρηση χωρίς επαφή. Μας επιτρέπει να μετράμε σημεία υψηλής θερμοκρασίας (μη μετρήσιμα από τεχνικές επαφής) και σημεία δύσκολης πρόσβασης, καθώς το αντικείμενο επιθεωρείται από απόσταση.
- Ασφάλεια. Η αποτυχία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για την ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης. Η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας δίνει την δυνατότητα επιθεωρήσεων συντήρησης από απόσταση και με ασφάλεια. Καθώς επίσης, η υπέρυθη ακτινοβολία είναι αβλαβής για την υγεία του ανθρώπου.

Ωστόσο, η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες και μειονεκτήματα, τα οποία απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και αντιμετώπιση, όπως :

- Η ικανότητα επιθεώρησης και ανίχνευσης σφάλματος σε ένα περιορισμένο βάθος κάτω από την εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου.
- Προβλήματα εκπεμπτικότητας. Θερμογραφήσεις αντικειμένων με συντελεστή εκπεμπτικότητας μικρότερο του 0.5 (π.χ μέταλλα) είναι ανακριβείς και αναποτελεσματικές.
- Προβλήματα ανακλάσεων. Θερμογραφήσεις σε υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, που πραγματοποιούνται κοντά σε πηγές υψηλής θερμότητας (ηλιακή ακτινοβολία, θερμαντικά σώματα), οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα της θερμικής κατάστασης του υπό εξέτασης αντικειμένου.
- Εξασθένιση ακτινοβολίας μεταξύ αντικειμένου και θερμοκάμερας. Η ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του αέρα και σκεδάζεται από πλήθος σωματιδίων, όπως καπνός, σκόνη.
- Όπως και κάθε απεικονιστικό σύστημα έτσι και υπέρυθρα απεικονιστικά συστήματα δεν είναι απόλυτα ακριβείς. Η απόκλιση ενός τυπικού θερμογραφικού συστήματος ανέρχεται συνήθως στο $\pm 2\%$.
- Υψηλό κόστος. Το κόστος των θερμογραφικών συστημάτων ανέρχεται σε χιλιάδες ευρώ, ενώ είναι ευαίσθητα και επιρρεπείς σε βλάβες.

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι, κατά μέσο όρο, για κάθε 1 ευρώ που ξοδεύεται για την προληπτική συντήρηση μέσω υπέρυθρης θερμογραφίας, η ηλεκτρική βιομηχανία κερδίζει 4 ευρώ από τα υλικά και τις εργασίες που θα απαιτούνταν για την επισκευή της βλάβης.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Χατζηαθανασίου Βασίλης επίκουρος καθηγητής THMMY ΑΠΘ**, «Μετάδοση Θερμότητας Σημειώσεις», THMMY ΑΠΘ, τμήμα εκδόσεων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2004
- [2] **Χατζηαθανασίου Βασίλης επίκουρος καθηγητής ΑΠΘ**, «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Σημειώσεις», THMMY ΑΠΘ, έκδοση υπηρεσία δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη 2004
- [3] **Πέτρος Ντοκόπουλος καθηγητής THMMY ΑΠΘ**, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», εκδόσεις Παρατηρητής
- [4] **IRISTEM ENGINEERING, Αχιλλέας Χ. Χριστοδουλίδης**, Διπλ. Ηλεκτρολόγος-Μηχανικός, Ειδικές Εφαρμογές Μηχανικής-Θερμογραφικά Συστήματα-Εφαρμοσμένη Υπέρυθρη Θερμογράφηση
- [5] **IRISTEM ENGINEERING, Αχιλλέας Χ. Χριστοδουλίδης**, «Προγνωστική Συντήρηση», InfraTec
- [6] **Αιμ. Κορωναίος καθ. ΕΜΠ, Υπ. Δρ. Γ.-Φ. Σαργέντης**, «Θερμογραφία-Διερεύνηση των δυνατοτήτων της θερμογραφίας στην θερμική συμπεριφορά των κτιρίων», Εργαστήριο τεχνικών υλικών Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ, Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών
- [7] **Κουτσομπίδης Νικόλαος**, «Παράμετροι που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης των θερμικών μονάδων», Τομέας λειτουργίας
- [8] **Maintenance Technology Magazine**, «Cost/Benefits Analysis of Infrared Programs», June 2001
- [9] **Dan Playforth**, «Infrared Thermography Electrical Inspections»
- [10] **X. Maldague**, «Introduction to NDT by Active Infrared Thermography», Electrical and Computing Engineering Department Université Laval, Quebec City (Que.) Canada
- [11] **Bob Turnbull and Steve McConnell**, «How infrared thermography helps Southern California Edison improve grid reliability», Southern California Edison, Alhambra
- [12] **Ron Newport**, «Electrical System Reliability utilizing Infrared Thermography»
- [13] **James Dan Roark**, System Operations Technician, «Infrared inspections of electric substations: the importance of developing a plan», Knoxville Utilities Board (KUB), Tennessee System Operations department

- [14] **Giovanni Maria Carlomagno and Luigi de Luca**, «Infrared Thermography for Flow Visualization and Heat Transfer Measurements», Università di Napoli "Federico II"
- [15] **Keith B. May**, «Predictive Maintenance Inspections–Boilers in Fossil Power Plants», Entergy Services, Inc., InfraMation 2003
- [16] **James Dan Roark**, System Operations Technician, «Critically of oil level of power transformers and regulators», Knoxville Utilities Board (KUB), Tennessee System Operations department
- [17] **Richard G. Strmiska**, Sumter Electric Cooperative, «Five uncommon component anomalies», Sumterville, Florida, InfraMation 2002
- [18] **Richard Bjornson**, «Generator step-up transformer, low voltage bushing overheating event», Seabrook Nuclear Power Station, Seabrook
- [19] **Jeff Sullivan**, «Infrared diagnostic of substation feeder problems», Mississippi Power Company
- [20] **V. P. Vavilov, V. G. Demin, V. V. Shiryaev, and D. A. Nesteruk**, «Trends in Using Passive Thermal Imaging Diagnostics in Power Engineering and Industry», Introscopy Research Institute of Tomsk Polytechnical University, Tomsk, Russia June 3, 2003
- [21] **Performance Optimiser**, «Centre for power efficiency and environmental protection», September 2000
- [22] **A. A. Avdeev, V. I. Zhingel', A. P. Merkushov, and L. V. Kozhevnikov**, «A Method for Detecting Air Inleakages in Boilers and Turbines Using an Infrared Imager», All-Russia Research Institute of Nuclear Power Engineering Federal State Unitary Enterprise (FGUP VNIAM)
- [23] **R. Cabello, J. Navarro-Esbri, R. Llopis, E. Torrella**, «Infrared Thermography as a Useful Tool to Improve Learning in Heat Transfer Related Subjects», Int. J. Engng Ed. Vol. 22, No 2, pp. 373-380, TEMPUS Publications 2006

