



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μέτρηση της θερμοκρασίας συνδέσμων αγωγών ACSR με χρήση θερμοκάμερας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπούσης Θεοφάνης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μέτρηση της θερμοκρασίας συνδέσμων αγωγών ACSR με χρήση θερμοκάμερας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπούσης Θεοφάνης

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Μαΐου 2017

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Π. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2017

.....

Λαμπούσης Θεοφάνης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Λαμπούσης Θεοφάνης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη, Λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη του κατά την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Α. Πολυκράτη, Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ. και τον κ. Θ. Αθανασιάδη Υποψήφιο Διδάκτορα για τη συνεργασία και την ουσιαστική βοήθειά τους κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών επαφών και πιο συγκεκριμένα των στατικών ηλεκτρικών επαφών και οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτές, καθώς γίνεται και αναφορά στις διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης τους. Ακόμα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας και οι εφαρμογές της. Στη συνέχεια, αναλύεται διεξοδικά η έννοια της εκπεμπτικότητας και των παραμέτρων που έχουν επίδραση στην τιμή της. Οι μετρήσεις του συντελεστή εκπεμπτικότητας παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον τόσο σε θεωρητικές μελέτες όσο και σε τεχνολογικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που είναι η προσέγγιση της τιμής της εκπεμπτικότητας των ηλεκτρικών συνδέσμων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας κατά τη μέτρηση θερμοκρασίας τους μέσω κάμερας υπέρυθρων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε, και μια σύντομη περιγραφή των μερών που την αποτελούν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε μορφή πινάκων καθώς και τα θερμογραφήματα της κάθε μέτρησης .

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων και τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή γραφημάτων τα οποία σχολιάζονται και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' αυτά.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, ηλεκτρικές επαφές, δοκιμή υπερθέρμανσης, εκπεμπτικότητα, υπέρυθρη θερμογραφία, θερμοκάμερα, μέτρηση θερμοκρασίας

ABSTRACT

In the first chapter, the characteristics of electrical contacts, in particular the stationary electrical contacts, and the factors that affect them, are described and also measurement devices and their evaluation are reported. In addition, the basic principles of infrared thermography and its applications are presented. Then, the concept of emissivity and the parameters, that have influence on its value, are analyzed thoroughly. Emissivity measurements are of great interest for both theoretical studies and technological applications.

In the second chapter, the purpose of this thesis is presented, which is the estimation of the value of emissivity of electrical connectors that were studied under the experimental procedure, by measuring the temperature using an infrared camera.

In the third chapter, the experimental procedure and the experimental arrangement, which was used, with a brief description of its parts, are mentioned.

In the fourth chapter, all measurement results in table form and the thermograms of each measurement are listed.

In the fifth chapter, the measurements are analyzed and the results of this analysis are given in the form of graphs, which are discussed, and the conclusions drawn from them are presented.

Keywords: bolted connectors, electrical contacts, overheating test, infrared thermography, thermal camera, temperature measurement

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	9
1.1. Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι	9
1.2. Η οξείδωση και οι επικαθίσεις σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους	9
1.3. Η γαλβανική διάβρωση	10
1.4. Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών	11
1.5. Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών	12
1.5.1. Δοκιμή υπερθέρμανσης	12
1.5.2. Δοκιμή μηχανικής αντοχής	12
1.5.3. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα	12
1.6. Υπέρυθρη Ακτινοβολία	13
1.7. Υπέρυθρη Θερμογραφία	14
1.7.1. Δυνατότητες και Περιορισμοί	15
1.7.2. Παθητική και Ενεργητική Θερμογραφία	15
1.7.3. Εφαρμογές Υπέρυθρης Θερμογραφίας	17
1.8. Εκπεμπτικότητα υλικών	19
1.8.1. Ορισμός	19
1.8.2. Φάσμα εκπεμπτικότητας υλικών	20
1.8.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της εκπεμπτικότητας	21
1.8.3.1. Το υλικό	21
1.8.3.2. Η δομή επιφάνειας	21
1.8.3.3. Η θερμοκρασία	22
1.8.3.4. Η γωνία παρατήρησης	23
1.8.3.5. Το μήκος κύματος	25
1.8.3.6. Η γεωμετρία υλικού	26
1.8.4. Η επίδραση της εκπεμπτικότητας στη θερμογραφία	27
2. Σκοπός της Εργασίας	28
3. Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων	29
3.1. Η πειραματική διάταξη	29
3.2. Η πειραματική διαδικασία των μετρήσεων	31
4. Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας	32
4.1. Μετρήσεις για το δοκίμιο Νο.1	33
4.2. Μετρήσεις για το δοκίμιο Νο.2	45
5. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων – Σχόλια – Συμπεράσματα	57
5.1. Επεξεργασία μετρήσεων	57
5.1.1. Διαγράμματα για το δοκίμιο Νο.1	57
5.1.2. Διαγράμματα για το δοκίμιο Νο.2	59
5.2. Σχολιασμός των μετρήσεων – Συμπεράσματα	62
Βιβλιογραφία	64

1. Εισαγωγή

1.1. Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι

Οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών αποτελούν βασικό τμήμα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και διακρίνονται σε μόνιμους και λύομενους. Μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι είναι αυτοί που τα δύο αγώγιμα μέρη τους συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοχλιών, για παράδειγμα οι συνδέσεις των καλωδίων μέσω των ακροδεκτών τους, οι συνδέσεις μεταξύ των ζυγών και οι συνδέσεις σε κυκλώματα γειώσεων σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας. Ενώ, λύομενοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που μπορεί κανείς να χειριστεί μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης. Οι λύομενοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι ή οι ηλεκτρικές επαφές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις *στατικές ηλεκτρικές επαφές* (stationary electrical contacts), που είναι οι επαφές οι οποίες δεν έχουν ισχύ διακοπής, δηλαδή μπορούν να χειρίζονται μόνο όταν το κύκλωμα έχει τεθεί εκτός τάσης μέσω ενός διακόπτη, όπως οι επαφές ενός αποξεύκτη ή ενός γειωτή και στις *ηλεκτρικές επαφές*, που έχουν ισχύ διακοπής και χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα τους να διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να υφίστανται καταστροφικές συνέπειες στη συμπεριφορά τους από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά το χειρισμό του φορτίου, όπως συμβαίνει με τις επαφές των διακοπών ισχύος και των διακοπών φορτίου.

Μία λύομενη σύνδεση δύο αγωγών, η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται ηλεκτρική επαφή. Η παραπάνω λύομενη σύνδεση αποτελείται από δύο μέρη, την κινητή και τη σταθερή επαφή. Ως ανοικτή επαφή θεωρείται, όχι μόνο αυτή που έχει τεθεί λόγω χειρισμού στη θέση εκτός, αλλά και εκείνη στην οποία τα δύο μέρη έχουν μονωθεί ηλεκτρικά λόγω ξένων επικαθίσεων, κυρίως σκόνη και οξείδια. Η δύναμη η οποία συγκρατεί τα δύο μέρη της επαφής μεταξύ τους καλείται δύναμη σύσφιξης των επαφών.

Για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης του ρεύματος, τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι ηλεκτρικές επαφές έχουν μεγάλη ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, για το λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων δεν είναι μεγάλη και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές, που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Οι παραμορφώσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στον λύομενο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά ότι μέσω αυτών των περιοχών γίνεται διέλευση του ρεύματος. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την επιφάνεια σύσφιξης. Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

1.2. Η οξείδωση και οι επικαθίσεις σε επαφές διακοπών και η σημασία της θερμοκρασίας στην αύξηση του πάχους τους

Ο πιο σοβαρός μηχανισμός αποσύνθεσης, ο οποίος βλάπτει τους μηχανικούς συνδέσμους, είναι η οξείδωση των ηλεκτρικών επαφών εντός των ορίων της διεπαφής. Η παρουσία οξυγονούχων ατμοσφαιρών και η συνεχής οξείδωση των μεταλλικών επαφών μπορεί να προκαλέσει ταχεία αύξηση στην αντίσταση της επαφής σε μία υψηλή τιμή ακόμα κι αν η τιμή αυτή κρατήθηκε χαμηλά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επιπλέον, η αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης καθώς και ο κύριος λόγος κακής λειτουργίας μιας ηλεκτρικής επαφής είναι οι επικαθίσεις. Οι επικαθίσεις, ανάλογα με τη σύνθεση τους, διακρίνονται σε χημικές ενώσεις, όπως τα οξειδία μετάλλου της επαφής και σε διάφορα παρασιτικά στοιχεία, όπως η σκόνη και οι υδρατμοί. Οι επικαθίσεις διακρίνονται ανάλογα με το πάχος τους σε επικαθίσεις με πάχος λίγων ατόμων, όπως ένα στρώμα μίας ή δύο στοιβάδων μορίων νερού, σε προστατευτικές επικαθίσεις, οι οποίες είναι χημικές ενώσεις που δεν αυξάνονται όταν αποκτήσουν ένα μικρό πάχος και θεωρείται ότι προστατεύουν την επιφάνεια της επαφής, και σε επικαθίσεις που είναι χημικές ενώσεις όπου το πάχος τους αυξάνει με το χρόνο.

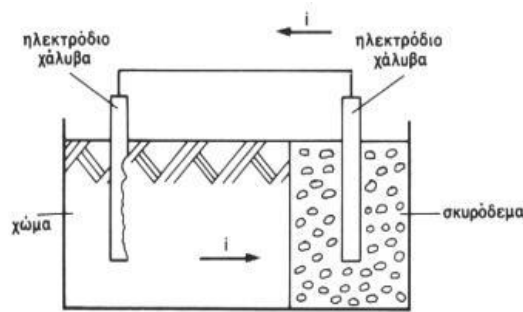
Η επίδραση της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων και γενικά επικαθίσεων στις επαφές παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το φαινόμενο ανακυκλώνεται κατά τη σειρά που απεικονίζεται στο σχήμα 1.2-1.



Σχήμα 1.2-1: Απλοποιημένη παράσταση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δημιουργία οξειδίων

1.3. Η γαλβανική διάβρωση

Η γαλβανική διάβρωση είναι ένας μηχανισμός υποβάθμισης της ποιότητας και της αξιοπιστίας της επαφής που εμφανίζεται στις διμεταλλικές επαφές που αποτελούνται από διαφορετικά μέταλλα. Η διάβρωση που μπορεί να υποστεί ένα σύνδεσμος είναι η ιδιοδιάβρωση και η ηλεκτροχημική διάβρωση επαφής. Η ιδιοδιάβρωση συμβαίνει όταν ένα μέταλλο βρίσκεται μόνο του στο έδαφος. Το περιβάλλον μπορεί να αντιδράσει με το υλικό και να προκαλέσει βαθμιαία χημική διάβρωση, η οποία θα εξαρτάται από τον αερισμό του χώματος, την υγρασία του και τον βαθμό pH. Ενώ, η διάβρωση επαφής συμβαίνει όταν δύο μέταλλα είναι ενταφιασμένα ή όχι και ενώνονται μεταξύ τους. Κάθε μέταλλο αναπτύσσει ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό, δηλαδή μία τάση μεταξύ αυτού και της άπειρης γης., το οποίο εξαρτάται από το μέταλλο και το περιβάλλον έδαφος. Αν κατά την ένωση δύο μετάλλων υπάρχει διαφορά στην ηλεκτροχημική τους τάση, τότε ρέει ένα ρεύμα ιόντων από το αρνητικό στο θετικό ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα την αφαίρεση υλικού από το ηλεκτραρνητικότερο μέταλλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροή ιόντων μπορεί να υπάρξει και μεταξύ ίδιων μετάλλων που βρίσκονται σε διαφορετικό περιβάλλον π.χ. χάλυβας σε χώμα και χάλυβας σε σκυρόδεμα (σχήμα 1.3-1).



Σχήμα 1.3-1: Ηλεκτροχημική διάβρωση μετάλλων σε διαφορετικό περιβάλλον

Η τελική επίδραση της διάβρωσης στην επαφή συντελείται είτε με την δραστική μείωση της περιοχής επαφής που προκαλεί ηλεκτρική δυσλειτουργία είτε με την μηχανική αστοχία λόγω της εκτεταμένης διάβρωσης. Οι παράγοντες που καθορίζουν τον βαθμό του φαινομένου είναι αρκετοί και σύνθετοι αλλά ο πλέον σημαντικός είναι η υγρασία, η οποία αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο. Ένας απλός τρόπος για να σταματήσει η αποδόμηση της επαφής είναι η ύπαρξη λιπαντικού ή γράσου στην διεπιφάνεια των υλικών η οποία τελικά οδηγεί σε ανοικτοκύκλωμα. Στην αντίθετη περίπτωση η ύπαρξη ηλεκτρολύτη (π.χ. κοντά σε θαλάσσιο περιβάλλον) οδηγεί σε διάβρωση της επαφής αφού αντιστοιχεί σε κλειστό κύκλωμα.

1.4. Η επίδραση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα στην οξείδωση των επαφών

Το πάχος του στρώματος της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα έχει άμεση εξάρτηση από την τραχύτητα των επιφανειών της επαφής. Στρώματα νερού πάχους μικρότερου από 50 Å, δεν αντέχουν την πίεση των δύο μερών της επαφής και γι' αυτό διατάσσονται περιφερειακά στην επιφάνεια και στα πιθανά κενά που υπάρχουν. Τα λεπτά στρώματα νερού, ανάμεσα σε μεταλλικές επιφάνειες μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία με ηλεκτροχημική δράση οξειδώνουν τις επαφές. Αυτή η διεργασία χρειάζεται μικρότερο χρόνο από την οξείδωση της επαφής στον ατμοσφαιρικό αέρα. Για να συμβεί όμως αυτό, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες υγρασίας (πάνω από 70%) ή υγροσκοπικά τεμάχια σκόνης ή λεπτά ασυνεχή στρώματα νερού, που μπορούν με ιόντα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα στρώματα του νερού και των στερεών λιπαντικών σε μία επαφή επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση διάβασης γιατί ο κύριος όγκος τους απομακρύνεται με το κλείσιμο του λυόμενου συνδέσμου με αποτέλεσμα να μένουν μόνο απλές στοιβάδες ατόμων, οι οποίες είναι αγωγίμες. Στερεά κατάλοιπα μικρού πάχους (έως 10Å), που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της επιφάνειας της επαφής παρουσιάζουν στην πράξη μεγάλη αντίσταση και μπορούν να γίνουν αιτία αύξησης της αντίστασης διάβασης. Οι επικαθίσεις αυτές είναι συνήθως άμορφες οργανικές ουσίες μεγάλου μοριακού βάρους, που προέρχονται από οργανικούς ατμούς, οι οποίοι παράγονται στους οργανικούς μονωτές που χρησιμοποιούνται στη στήριξη των ηλεκτρικών επαφών. Πάρα πολλά μονωτικά υλικά παράγουν ατμούς κατά τον πολυμερισμό τους. Ορισμένα υλικά επαφών όπως το παλλάδιο (Pd), ο λευκόχρυσος (Pt), το ρουθίνιο (Ru) και το χρώμιο (Cr) δρουν καταλυτικά για την εναπόθεση οργανικών ουσιών σε αυτά και άλλα όχι, όπως π.χ. ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), το βολφράμιο (W), ο άργυρος (Ag) και το νικέλιο (Ni). Τέλος, τα οργανικά στρώματα, που προαναφέρθηκαν, απανθρακώνονται, όταν σε μία επαφή δημιουργούνται τοπικά μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα από τα λεπτά στρώματα άνθρακα, να διευκολύνεται η εκδήλωση ηλεκτρικών εκκενώσεων μεγαλύτερης ενέργειας.

1.5. Οι διατάξεις μέτρησης και αξιολόγησης των στατικών ηλεκτρικών επαφών

Η αξιοπιστία των στατικών ηλεκτρικών επαφών βασίζεται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, ανάλογα με το ονομαστικό τους ρεύμα, το οποίο είναι τυποποιημένο και αντικατοπτρίζει τη δοκιμή ανύψωσης της θερμοκρασίας ή δοκιμή υπερθέρμανσης.

1.5.1. Δοκιμή υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας) αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής μέχρι τα προγραμματισμένα όρια συντήρησης. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος (π.χ.: 10A, 200A, 400A κ.λπ.). Η δοκιμή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες. Η εξακρίβωση της ικανότητας σε ονομαστικό ρεύμα ενός αγωγού βασίζεται κυρίως, κατά τη δοκιμή υπερθέρμανσης, στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ ως προς το περιβάλλον, που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η τιμή $\Delta\theta$ θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από 1°C. Η τιμή του ρεύματος, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ανωτέρω σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, ονομάζεται ονομαστικό ρεύμα I_N της επαφής.

1.5.2. Δοκιμή μηχανικής αντοχής

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά βασικά την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των στατικών επαφών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής (ενδεχομένως παραμορφώσεις των επαφών ή τυχόν αποσυναρμολογήσεις ή ακατάλληλα ελατήρια κ.λπ.). Μετά το πέρας δηλαδή της δοκιμής αυτής, θα πρέπει να γίνει η δοκιμή υπερθέρμανσης.

1.5.3. Δοκιμή υπό τριπολικό βραχυκύκλωμα

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μίας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα. Η δοκιμή διαρκεί ένα δευτερόλεπτο, αρκετό δηλαδή χρόνο, ως προς εκείνον ενεργοποίησης των μέσων προστασίας του δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ βραχυκύκλωσης, που καθορίζεται από τη θέση της κατασκευής στο δίκτυο. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν, μετά το πέρας της, δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα (δηλαδή, στη συνέχεια πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης).

1.6. Υπέρυθρη Ακτινοβολία

Η υπέρυθη ακτινοβολία ανακαλύφθηκε το 1800 από τον αστρονόμο William Herschel (1738-1822), ο οποίος γνώριζε ότι το ηλιακό φως εκπέμπει θερμότητα και ότι αποτελείται από τα χρώματα του ορατού φάσματος. Ο Herschel ήθελε να μάθει το ποσό της θερμότητας, που εκπέμπει κάθε διαφορετικό χρώμα του ορατού φάσματος και γι' αυτό επιτόνησε και πραγματοποίησε ένα πείραμα, όπου μέτρησε την θερμοκρασία του κάθε χρώματος που προερχόταν από την ανάλυση του ηλιακού φωτός από ένα πρίσμα. Παρατήρησε ότι η θερμοκρασία αυξανόταν καθώς μετατόπιζε το θερμομέτρο από το ιώδες στο κόκκινο χρώμα. Επίσης, η θερμοκρασία είχε την υψηλότερη τιμή πέρα από το κόκκινο χρώμα, σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει ορατό φως. Με αυτό τον τρόπο ανακάλυψε την ύπαρξη ακτινοβολίας έξω από την περιοχή του ορατού φάσματος (πέρα από το ερυθρό χρώμα), η οποία ανιχνεύτηκε από το θερμικό αποτέλεσμα. Ο Herschel ονόμασε αυτή τη μη ορατή ακτινοβολία «θερμαντικές ακτίνες» ('calorific rays'). Πρόκειται για την ακτινοβολία η οποία ονομάζεται σήμερα **υπέρυθρη ακτινοβολία (infra-red radiation)**.

Η υπέρυθη ακτινοβολία, λοιπόν, βρίσκεται αμέσως μετά το ερυθρό χρώμα της ορατής ακτινοβολίας, στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, στην περιοχή μηκών κύματος από $0,75 \times 10^{-6} \text{m}$ έως 10^{-3}m . Χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές ανάλογα με την απόστασή της από την περιοχή του ερυθρού χρώματος της ορατής ακτινοβολίας ως εξής:

- **Κοντινή (SW)** με μικρό μήκος κύματος, από $0,75 \times 10^{-6}$ έως $2 \times 10^{-6} \text{m}$
- **Μέση (MW)** με μεσαίο μήκος κύματος, από 2×10^{-6} έως $7 \times 10^{-6} \text{m}$
- **Μακρινή (LW)** με μεγαλύτερο μήκος κύματος, από 7×10^{-6} έως 10^{-3}m

Η πρωταρχική πηγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα ή θερμική ακτινοβολία. Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπει. Η υπέρυθη ακτινοβολία (θερμική ακτινοβολία) όλων των μηκών κύματος (κοντινή, μέση, μακρινή) δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι. Η μέση και η μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία γίνεται γενικά αντιληπτή στο ανθρώπινο δέρμα ως θερμότητα. Παραδείγματα μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας στην καθημερινότητα είναι η θερμότητα, που αισθάνεται κανείς από την ηλιακή ακτινοβολία, από μια φωτιά, από μια θερμάστρα ή ένα θερμοπομπό κλπ. Μια εφαρμογή είναι οι ειδικές λάμπες εκπομπής υπέρυθρου φωτός, που χρησιμοποιούνται για να ζεσταίνουν τα φαγητά σε εστιατόρια και καταστήματα γρήγορου φαγητού (fast food). Αυτό το υπέρυθρο φως είναι μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία, που γίνεται αισθητή σαν ζέστη σε κοντινή απόσταση από τις λάμπες αυτές.

Μερικές εφαρμογές κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι διάφορες συσκευές, που έχουν σαν αρχή λειτουργίας τους, την εκπομπή κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν μπορεί να γίνει αισθητή από το δέρμα ούτε ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Τέτοιες συσκευές είναι τα τηλεκοντρόλ των τηλεοράσεων, οι Η/Υ, που μέσω ειδικών θυρών υπέρυθρων στέλνουν σήματα σε διάφορες περιφερειακές συσκευές, οι ανιχνευτές των συστημάτων συναγερμού κτιρίων κ.λπ.

1.7. Υπέρυθρη Θερμογραφία

Η υπέρυθρη θερμογραφία, είναι η μέθοδος που ανιχνεύει τη θερμότητα (υπέρυθρη ακτινοβολία) που εκπέμπει ένα σώμα (αντικείμενο) και απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος. Οι μετρήσεις γίνονται με ειδικές κάμερες, που λέγονται κάμερες υπερύθρων (infra-red cameras), οι οποίες ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο (non-contact type technique). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εστίαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, από τον οπτικό φακό. Μέσω αυτού, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνάει στον ανιχνευτή υπερύθρων, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα στους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, όπου γίνεται η μετατροπή των δεδομένων αυτών σε έγχρωμη εικόνα. Με αυτή τη διαδικασία, η ένταση της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό σε έγχρωμη θερμική εικόνα, που εμφανίζεται σε ειδική οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).

Η εικόνα αυτή λέγεται **θερμογράφημα (thermogram)**, στην οποία τα θερμότερα σημεία παρουσιάζονται με εντονότερα χρώματα. Από ένα θερμογράφημα μπορεί κανείς όχι μόνο να δει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός σώματος, αλλά και να προσδιορίσει ή να εκτιμήσει τη σοβαρότητα πιθανών προβλημάτων υπερθέρμανσης. Επίσης, από το θερμογράφημα, επεξεργαζόμενο με το κατάλληλο λογισμικό Η/Υ, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα, καθώς και γραφικές απεικονίσεις (τα οποία θα εξεταστούν στη συνέχεια).

Για να είναι ένα θερμογράφημα αξιόπιστο, πρέπει κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων να λαμβάνονται υπόψη και οι συνθήκες του περιβάλλοντος (σκόνη, υγρασία, εκπομπή αερίων, ατμοί, ταχύτητα ανέμων για εξωτερικούς χώρους κ.λ.π.), με κατάλληλες ρυθμίσεις ή και με την τοποθέτηση κατάλληλων φίλτρων στην κάμερα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν τις μετρήσεις, είναι οι ιδιότητες της επιφάνειας του μετρούμενου σώματος και ο συντελεστής εκπομπής. Για τη μέτρηση θερμοκρασιών από μεγάλη απόσταση με τη χρήση κάμερας υπερύθρων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απορρόφηση της ατμόσφαιρας, η οποία όμως συμβαίνει σε συγκεκριμένες περιοχές μήκους κύματος. Τα τρία «παράθυρα» που μας αφήνει η ατμόσφαιρα να «δούμε» χωρίς σημαντική απορρόφηση (atmospheric windows) είναι τα εξής:

- Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος
- Ακτινοβολία σχετικά μικρού μήκους κύματος
- Ακτινοβολία μεγάλου κύματος

Σήμερα, η υπέρυθρη θερμογραφία αναδεικνύεται σε μια αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων, εναλλακτική των υφισταμένων παραδοσιακών μεθόδων, καθώς επίσης και σε βασικό εργαλείο εκτέλεσης προληπτικής συντήρησης στη βιομηχανία με μη καταστροφικό τρόπο. Σε έναν έλεγχο προληπτικής συντήρησης, όταν μια πιθανή “αστοχία” συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας ή από τοπική συγκέντρωση θερμότητας, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί μια εξαιρετική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου (Non Destructive Testing -NDT). Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών ενώ μπορεί να είναι αποτελεσματική στον εντοπισμό τόσο μηχανολογικών όσο και ηλεκτρολογικών αστοχιών, επιτρέποντας την ανίχνευση τους με ταχύτητα που κυμαίνεται από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου έως και μερικά λεπτά, ανάλογα με το προς έλεγχο αντικείμενο.

1.7.1 Δυνατότητες και Περιορισμοί

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας:

Πλεονεκτήματα

- Ταχύς ρυθμός ελέγχου
- Δεν απαιτείται καμία επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο και έτσι υπάρχει έλεγχος από απόσταση
- Δεν εμπλέκονται επιβλαβείς για το ανθρώπινο σώμα ακτινοβολίες που συνεπάγεται την ασφάλεια της μεθόδου
- Έγκαιρος εντοπισμός προβλήματος που σημαίνει πρόγνωση προβλημάτων
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών
- Ευκολία στη 'μετάφραση' των αποτελεσμάτων
- Λογισμικό για την επεξεργασία και ανάλυση εικόνας

Μειονεκτήματα

- Κόστος εξοπλισμού
- Επίδραση θερμικών απωλειών
- Δυσκολία στην εφαρμογή κατάλληλης θερμικής διέγερσης πάνω σε μεγάλες επιφάνειες
- Δυνατότητα ανίχνευσης μόνο των ελαττωμάτων εκείνων που επιφέρουν μια μετρήσιμη αλλαγή στις θερμικές ιδιότητες
- Έλεγχος μέχρι μόνο ένα μικρό βάθος από την επιφάνεια του αντικειμένου
- Προβλήματα ικανότητας εκπομπής

1.7.2 Παθητική και Ενεργητική Θερμογραφία

Η υπέρυθρη θερμογραφία, μπορεί να εφαρμοστεί με δύο προσεγγίσεις, την παθητική προσέγγιση (passive thermography), και την ενεργητική προσέγγιση (active thermography). Κατά την **παθητική θερμογραφία**, το εξεταζόμενο αντικείμενο θερμογραφείται ως έχει, δηλαδή στη φυσική του θέση και λειτουργία, χωρίς την επιβολή εξωτερικής πηγής διέγερσης (θερμότητας). Με άλλα λόγια, η παθητική θερμογραφία εξετάζει υλικά και δομές, τα οποία βρίσκονται είτε κατά τη λειτουργία τους, είτε εν γένει, σε διαφορετική (συχνά υψηλότερη) θερμοκρασία από την περιβάλλουσα. Μερικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας είναι στην προληπτική συντήρηση, στην ανάλυση ροής θερμότητας σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό και ποιότητας ψύξεως σε υποσυστήματα και εγκαταστάσεις. Η μετρούμενη θερμοκρασία του σώματος που εξετάζεται μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση πέντε παραμέτρων:

$$T = f(\varepsilon, T_{atm}, T_0, \omega, d) \quad (1.7.2-1)$$

όπου ε είναι η εκπεμπτικότητα της εξεταζόμενης επιφάνειας, T_{atm} (°K) η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, T_0 (°K) η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ω η σχετική υγρασία, και d (m) η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου.

Παρά τα πλεονεκτήματα της παθητικής θερμογραφίας, τα καλύτερα αποτελέσματα στη μη καταστροφική αξιολόγηση (Non Destructive Evaluation – NDE) επιτυγχάνονται μέσω της **ενεργητικής θερμογραφίας**. Η προσέγγιση αυτή έχει ευρεία εφαρμογή στο μη καταστροφικό έλεγχο για αξιολόγηση ελαττωμάτων στο εσωτερικό των αντικειμένων. Στην ενεργητική θερμογραφία είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας για να διαπιστωθούν ή όχι

ασυνέχειες στη κατανομή της θερμοκρασίας και, συνεπώς, στη δομή του υπό εξέταση αντικειμένου. Η παρουσία ελαττώματος στο εσωτερικό κάποιου υλικού μπορεί να ανιχνευτεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία θερμικών κυμάτων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, όταν ένα ημιάπειρο δείγμα υπόκειται σε περιοδική θερμική διέγερση, η θερμοκρασία σε βάθος z (m) και σε χρόνο t (s), μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$T(z, t) = T_0 e^{z/\mu} \cos(\Omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \quad (1.7.2-2)$$

όπου T_0 (°K) είναι η θερμοκρασία για $z=0$ (δηλαδή στην επιφάνεια του δείγματος), $\Omega=2\pi f$ (rad/s) είναι η γωνιακή ταχύτητα της περιοδικής θερμικής διέγερσης, και $\lambda=2\pi\mu$ (m) το μήκος του θερμικού κύματος. Το μ συμβολίζει το μήκος της θερμικής διάχυσης και ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\Omega}} \text{ (m)} \quad (1.7.2-3)$$

όπου $\alpha=k/(\rho C_p)$ (m^2/s) είναι ο συντελεστής διάχυσης του υλικού, k (W/m) η θερμική αγωγιμότητα, ρ (kg/m^3) η πυκνότητα, και C_p ($Jkg^{-1} C^{-1}$) η ειδική θερμότητα.

Ανάλογα με το είδος της εξωτερικής πηγής θερμότητας, η ενεργητική θερμογραφία διαιρείται στις εξής κατηγορίες:

- *Παλμική θερμογραφία (pulse thermography)*, κατά την οποία το ερέθισμα είναι ένας παλμός, συνήθως προερχόμενος από παλμική ακτινοβολία φωτός (π.χ. λάμπες φλας). Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση περιοχών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια στερεών σωμάτων. Η ροή θερμότητας μέσω του δείγματος επηρεάζεται από την ανομοιογένεια του υλικού που μπορεί να οφείλεται σε ρωγμές, τρύπες ή και στην ύπαρξη ξένου σώματος διαφορετικών θερμικών παραμέτρων κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Πλεονέκτημα αυτού του είδους θερμογραφίας είναι ότι οι πληροφορίες για διαφορετικά βάθη του υλικού αντλούνται από ένα αριθμό θερμογραφημάτων, τα οποία λαμβάνονται μέσα σε δευτερόλεπτα από την εφαρμογή του παλμού. Το μειονέκτημα είναι ότι οι προκαλούμενες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας πρέπει να ξεπερνούν το επίπεδο θορύβου της θερμοκάμερας. Συνεπώς, η παλμική θερμογραφία δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση αδύνατων θερμικών σημάτων.
- *Lock-in θερμογραφία (lock-in thermography)*, η οποία είναι γνωστή και ως θερμογραφία θερμικών κυμάτων, καθώς μπορεί να περιγραφεί από τη θεωρία ταλαντευόμενων θερμικών κυμάτων. Εδώ η διάχυση της θερμότητας συμβαίνει περιοδικά με μια συγκεκριμένη συχνότητα «lock-in», και η θερμοκρασιακή διαμόρφωση της επιφάνειας εκτιμάται και υπολογίζεται μετά από έναν αριθμό περιόδων «lock-in». Έτσι, η τεχνική αυτή έχει παρόμοια φυσική σημασία με την παλμική θερμογραφία. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος για το οποίο αντλούμε πληροφορίες. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους θερμογραφίας είναι ότι, χάρις στο ότι βασίζεται στον υπολογισμό μέσω τιμών, η ευαισθησία της μπορεί να είναι βελτιωμένη σε σύγκριση με την ονομαστική ευαισθησία της κάμερας που χρησιμοποιείται. Το μειονέκτημα της σε σχέση με την θερμογραφία παλμών, είναι ότι χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο μετρήσεων, καθώς συνυπολογίζει έναν αριθμό περιόδων «lock-in». Επιπλέον, για την απόκτηση πληροφορίας σε διαφορετικά βάθη, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ενός αριθμού θερμογραφήσεων με διαφορετική συχνότητα κάθε φορά. Έτσι, η θερμογραφία θερμικών κυμάτων χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο από τη θερμογραφία θερμικών παλμών.

- *Θερμογραφία με δονήσεις (vibrothermography)*, κατά την οποία χρησιμοποιούνται υπερηχητικά κύματα (διαμορφωμένου πλάτους ή παλμοί) για να διεγείρουν τα εσωτερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στερεών σωμάτων. Η τεχνική αυτή είναι για την ανίχνευση ρωγμών και ελαττωμάτων σε υλικά, κυρίως μεταλλικά. Οι ρωγμές γίνονται ορατές μέσω της θερμότητας λόγω τριβής που προκαλείται από υπερήχους υψηλής συχνότητας. Σε αυτό το είδος θερμογραφίας η θερμότητα παράγεται από την έκλυση μηχανικής ενέργειας στην επιφάνεια της ρωγμής λόγω δονήσεων.

1.7.3. Εφαρμογές Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Από την εμφάνισή της μέχρι σήμερα η υπέρυθη θερμογραφία απαντάται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως:

- *Στην επιθεώρηση κτιρίων* για ανίχνευση σημείων των δομικών στοιχείων, όπου υπάρχουν απώλειες θερμότητας και καταστροφή της μόνωσης, διαρροών σε σωληνώσεις, που βρίσκονται εντός δαπέδων και τοίχων, σημείων υγρασίας και διαρροών στις στέγες.
- *Στη διαστημική τεχνολογία*, όπου δορυφόροι καταγράφουν και επεξεργάζονται την εκπεμπόμενη και την ανακλώμενη ακτινοβολία από πλανήτες, γαλαξίες, κομήτες και δίνουν ακριβείς εικόνες από την επιφάνειά τους.
- *Στις δυνάμεις καταστολής (αστυνομία-στρατός)*, για ανίχνευση και εντοπισμό τρομοκρατών και εχθρικών στόχων, ιδίως την νύκτα.
- *Στην ανεύρεση εγκλωβισμένων ανθρώπων* (σε δάση, σε πυρκαγιές κτιρίων κ.λ.π.).
- *Στην Ιατρική*, για εκτίμηση τραυμάτων, για διάγνωση και εκτίμηση διαφόρων ασθενειών (αρθρίτιδα, καρκίνων μαστού κ.λ.π.), για τον έλεγχο διακύμανσης της θερμοκρασίας στα διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος κ.λ.π.
- *Στην αεροναυπηγική*, για ανίχνευση βλαβών στα διάφορα συστήματα των αεροσκαφών, ανίχνευση υγρασίας και πάγου στα πτερύγια ελέγχου των αεροσκαφών σε εσωτερικά σημεία που δεν είναι ορατά.
- *Σε περιβαλλοντολογικές εφαρμογές*, όπως εντοπισμό και έλεγχο διαρροών λιπαντικών, χημικών ουσιών, πετρελαίου, εντοπισμό και έλεγχο πυρκαγιών από αέρα, παρακολούθηση μετεωρολογικών φαινομένων κ.λπ.
- *Στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις* όπου οι μετρήσεις θερμοκρασίας είναι απαραίτητες, για την αξιοπιστία τους, την ασφάλεια και την αποφυγή αιφνιδίων βλαβών (brakedowns). Στις περιπτώσεις, όπου δεν είναι εφικτό το αισθητήριο του μετρητικού οργάνου να έλθει σε επαφή με το επιθυμητό σημείο, στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις, τότε υπάρχει η λύση της υπέρυθρης θερμογραφίας. Συνήθως η υπέρυθη θερμογραφία εφαρμόζεται για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε τμήματα του εξοπλισμού που βρίσκονται υπό τάση, κινούνται, περιστρέφονται ή δονούνται (άξονες, έδρανα, κινητήρες κ.λ.π.) ή βρίσκονται σε σημεία, που δεν είναι δυνατή η προσέγγιση (κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή σε μεγάλο ύψος, όπως υπόγεια δίκτυα, μεγάλες δεξαμενές, μονώσεις σωληνώσεων και δεξαμενών κ.λ.π.). Ακόμα εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία παρουσιάζει ανομοιόμορφη κατανομή και απότομες αλλαγές (καυστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, τύμπανα ξήρανσης κ.λ.π.) ή όταν υπάρχουν στερεά, υγρά και αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες (λέβητες, φλογοθάλαμοι, καπνοδόχοι, δίκτυο ατμού, δεξαμενές, αεραγωγοί κ.λ.π.).

Η θερμογραφία υπέρυθρων εξελίσσεται στο πλέον αξιόπιστο διαγνωστικό εργαλείο, που χρησιμοποιείται στην προβλεπτική συντήρηση (predictive maintenance) του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα και αποτελεσματικά, εξοπλισμός εσωτερικού χώρου (όπως μετασχηματιστές, χειριστήρια μηχανών, πίνακες, διακόπτες, ασφαλειοδιακόπτες, ρελέ, ακροδέκτες, πηνία, κινητήρες κ.λ.π.), αλλά και εξωτερικού χώρου (όπως υποσταθμίοι, μετασχηματιστές, εναέρια δίκτυα κ.λ.π.). Κάθε τμήμα του εξοπλισμού, που

μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, πριν υποστεί βλάβη, παρουσιάζει συνήθως αυξημένη θερμοκρασία, που δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Μέσω της θερμογραφίας υπερύθρων γίνεται ανίχνευση των σημείων του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί βλάβη, και μέσω κατάλληλου προγραμματισμού των εργασιών ελέγχου είναι δυνατό να γίνουν έγκαιρα διορθωτικές ενέργειες πριν το τελικό στάδιο της βλάβης και την ολοκληρωτική καταστροφή του εξοπλισμού. Μια βλάβη σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό μπορεί να έχει τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα όπως η αιφνίδια διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας, η αντικατάσταση τμήματος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, ο κίνδυνος πιθανής πρόκλησης ατυχήματος σε εργαζόμενους, αλλά και ο κίνδυνος πιθανής πρόκλησης βραχυκυκλώματος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σημαντικό πλεονέκτημα της θερμογραφίας υπερύθρων, είναι ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ενώ ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι υπό τάση (πλήρη λειτουργία), χωρίς το διαγνωστικό όργανο (κάμερα υπερύθρων) να έλθει σε επαφή με τον εξοπλισμό. Μπορεί κανείς λοιπόν, εύκολα και άμεσα, να ελέγξει τμηματικά όλο τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υπό τάση, από ασφαλή απόσταση και με ασφαλή τρόπο να κάνει την διάγνωση μέσω του θερμογραφήματος. Από τον έλεγχο αυτό θα προκύψει ότι πρέπει να επισκευαστούν μόνο αυτά τα σημεία του εξοπλισμού στα οποία υπάρχει πιθανότητα μελλοντικής βλάβης.

Η χρήση της θερμογραφίας υπερύθρων σαν διαγνωστικό εργαλείο της προβλεπτικής συντήρησης του ηλεκτρικού εξοπλισμού, αντικαθιστά τους παραδοσιακούς τρόπους συντήρησής του, με σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης, αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας του και το κυριότερο αποφυγή κινδύνου πρόκλησης ατυχήματος σε ανθρώπινο δυναμικό καθώς και σε εξοπλισμό. Για παράδειγμα, η συστηματική σύσφιξη όλων των ακροδεκτών μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, αφ' ενός απαιτεί μεγάλο αριθμό εργατοωρών, αφ' ετέρου μπορεί να καταλήξει σε καταστροφή των ακροδεκτών (λόγω της υπερβολικής ροπής σύσφιξης). Αποτέλεσμα αυτού είναι το πολύ μεγάλο κόστος συντήρησης για τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί αύξηση της αξιοπιστίας του. Επειδή η αύξηση του βαθμού επικινδυνότητας σχετίζεται με τις ανιχνευθείσες ανόδους της θερμοκρασίας, με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρων είναι δυνατή η διαβάθμιση του κινδύνου βλάβης σε συγκεκριμένα σημεία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού καθώς και ο προγραμματισμός του χρονικού περιθωρίου επέμβασης για επίλυση των προβλημάτων, πριν από τη δημιουργία απωλειών του εξοπλισμού και διακοπή της λειτουργίας του.

Τα προβλήματα, που παρατηρούνται συνήθως στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό τα οποία μπορούν να εξελιχθούν σε βλάβη είναι τα παρακάτω :

- **Χαλαρές συνδέσεις** (σε ακροδέκτες, ασφάλειες κ.λπ.), που οφείλονται σε μικρότερη ροπή σύσφιξης από αυτή που απαιτείται. Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται το εμβαδόν επιφανείας στο οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαρρεύσει και παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής. Αυτό προκύπτει και από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad (1.7.3-1)$$

όπου R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω), ρ η ειδική αντίσταση ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), l το μήκος του αγωγού (m) και S η διατομή του αγωγού (mm^2).

Όταν αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση, αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα από ένα σώμα και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία. Αυτό προκύπτει και από τη σχέση:

$$Q = 0,24RI^2t \quad (1.7.3-2)$$

όπου Q η παραγόμενη θερμότητα (cal), R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω), I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (A), t ο χρόνος (sec).

Αν μια χαλαρή σύνδεση παραμείνει, τότε θα παρατηρηθεί σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, με καταστροφή της σύνδεσης και του εξοπλισμού, που βρίσκεται κοντά στη σύνδεση.

- **Οξείδωση που δημιουργείται στο σημείο σύνδεσης.** Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης, ανάλογα με το μέγεθος της οξείδωσης. Αν η οξείδωση συνεχιστεί, θα παρατηρηθεί υπερβολική αύξηση και της θερμοκρασίας, με τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- **Υπερφορτωμένο κύκλωμα,** που δημιουργείται όταν έχει τοποθετηθεί αγωγός μικρότερης διαμέτρου από αυτόν που έχει σχεδιαστεί, ή όταν κάποια συσκευή του κυκλώματος (π.χ. ηλεκτροκινητήρας) παρουσιάζει υπερφόρτωση. Στην περίπτωση ενός υπερφορτωμένου κυκλώματος, λόγω της αυξημένης ροής ηλεκτρικού ρεύματος προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Κακή ποιότητα-γήρανση υλικών κατασκευής και μόνωσης των στοιχείων του εξοπλισμού** (διακοπών, ρελέ, θερμικών, πηνίων κ.λ.π.) που προκαλούν σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με τα γνωστά αποτελέσματα.
- **Μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς του μονωτικού υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές και τους κινητήρες.** Συνέπεια αυτού του φαινομένου, η υπερθέρμανση των στοιχείων αυτών. Με τη θερμογραφία υπερύθρων είναι δυνατή η εύκολη και έγκαιρη ανίχνευση του προβλήματος.

1.8. Εκπεμπτικότητα υλικών

Για τη σωστή μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός υλικού με χρήση κάμερας υπερύθρων, απαιτείται ο ακριβής καθορισμός της τιμής εκπεμπτικότητας του. Η εκπεμπτικότητα είναι ο λόγος της ακτινοβολίας ενός σώματος σε μια δεδομένη θερμοκρασία προς την ακτινοβολία ενός σώματος που απορροφά όλη την ακτινοβολία, στην ίδια θερμοκρασία.

1.8.1. Ορισμός

Η **εκπεμπτικότητα ε** ή συντελεστής εκπομπής (emissivity) μιας πραγματικής επιφάνειας, ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας (μέσω ακτινοβολίας) σε μια δεδομένη θερμοκρασία ως προς αυτήν που θα εξέπεμπε το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} / \frac{dR_{bb}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (1.8.1-1)$$

Οι συντελεστές εκπομπής μπορούν να ορίζονται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος λ (μονοχρωματικοί συντελεστές εκπομπής), ενώ για επιφάνειες που δεν υπακούουν στο νόμο του Lambert θα πρέπει να ορίζονται για συγκεκριμένες γωνίες εκπομπής φ . Στην περίπτωση θερμικής ισορροπίας, ισχύει ο Νόμος του Kirchhoff: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$, δηλαδή η εκπεμπτικότητα ενός σώματος σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ακτινοβολίας, είναι ίση με το συντελεστή απορρόφησης στο ίδιο μήκος κύματος.

Ονομάζουμε *φαινό σώμα* εκείνο για το οποίο ο συντελεστής εκπομπής είναι σταθερός για όλα τα μήκη κύματος:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E}{E_{b\lambda}} = \varepsilon \quad (1.8.1-2)$$

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι έκφρασης της εκπεμπτικότητας μιας επιφάνειας ανάλογα με τον τρόπο παρατήρησης του αντικειμένου και μέτρησης της εκπεμπτικότητας:

- Η φασματική εκπεμπτικότητα κατεύθυνσης (directional-spectral emissivity), που συμβολίζεται με $\varepsilon_{\beta,\lambda}$ είναι η εκπεμπτικότητα που μετράται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Είναι ο συντελεστής εκπομπής που ισχύει κατά την παρατήρηση ενός σώματος σε άλλη κατεύθυνση εκτός από την κάθετη προς την επιφάνεια.
- Η κανονική-φασματική εκπεμπτικότητα (normal-spectral emissivity) $\varepsilon_{n,\lambda}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής που μετράται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και όταν παρατηρείται κάθετα μια επιφάνεια. Είναι μακράν ο πιο συνηθισμένος τύπος εκπεμπτικότητας στη θερμομετρία.
- Η κανονική ολική εκπεμπτικότητα (normal-total emissivity) $\varepsilon_{n,tot}$ είναι το ολοκλήρωμα της εκπεμπτικότητας σε όλα τα μήκη κύματος κατά την παρατήρηση του σώματος στην κάθετη κατεύθυνση.
- Η ημισφαιρική ολική εκπεμπτικότητα (hemispherical-total emissivity) είναι το ολοκλήρωμα της εκπεμπτικότητας σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις γωνίες εκπομπής. Χρησιμοποιείται στην εξίσωση Stefan-Boltzmann για τον υπολογισμό του συνολικού ποσού της ακτινοβολίας που εξέρχεται από μια επιφάνεια.

Παρά το γεγονός ότι όλοι αυτοί οι παραπάνω τρόποι έκφρασης της εκπεμπτικότητας για μια συγκεκριμένη επιφάνεια θα έχουν πάντα τιμή μικρότερη από τη μονάδα, και για τις περισσότερες εφαρμογές, θα είναι αρκετά παρόμοιοι, δεν είναι ίσοι και όλοι είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Είναι σημαντικό να επιλέγεται ο σωστός τύπος ανάλογα με την εφαρμογή. Στην παρούσα εργασία με τον όρο εκπεμπτικότητα θα εννοείται η ολική κανονική εκπεμπτικότητα.

1.8.2. Φάσμα εκπεμπτικότητας υλικών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκπεμπτικότητα μια επιφάνειας είναι της μορφής $\varepsilon(\lambda, \phi, T)$, δηλαδή η εκπεμπτικότητα είναι μια συνάρτηση του μήκους κύματος, της κατεύθυνσης της παρατήρησης σε σχέση με την επιφάνεια και της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Γενικά, η εκπεμπτικότητα μεταβάλλεται αργά με το μήκος κύματος στην περίπτωση των στερεών αντικειμένων, αλλά μεταβάλλεται γρήγορα στην περίπτωση των αερίων και των υγρών. Επιπλέον, η εκπεμπτικότητα μιας επιφάνειας στο ορατό φάσμα συχνά δεν έχει καμία σχέση με την εκπεμπτικότητα στο φάσμα των υπεριώθων. Για παράδειγμα, το χιόνι έχει πολύ χαμηλή εκπεμπτικότητα στο ορατό φάσμα, αλλά είναι άριστο μέλαν σώμα στις υπέρυθρες ακτίνες. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει μια αρκετά αργή επιστροφή στην υγρή κατάσταση, ακόμη και κάτω από την έκθεση στο φως του ήλιου. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας διασκορπίζεται και αντανάκλαται, η υψηλότερη εκπεμπτικότητα στην περιοχή των υπεριώθων επιτρέπει την επανεκπομπή της απορροφημένης υπέρυθρης ενέργειας.

Γενικά, τα μέταλλα έχουν μια σχετικά χαμηλή εκπεμπτικότητα που αυξάνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία έως ότου διαμορφωθεί ένα οξείδιο στην επιφάνεια του θερμού μετάλλου. Άλλα υλικά έχουν υψηλές τιμές εκπεμπτικότητας που τείνουν να μειωθούν με τη θερμοκρασία. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από την επιφάνεια του υλικού. Για ένα δεδομένο υλικό, η εκπεμπτικότητα ανάγεται συχνά υπό κανονικές συνθήκες και ενσωματώνεται σε όλα τα μήκη κύματος:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda \quad (1.8.2-1)$$

Αυτό αναφέρεται ως *ολική εκπεμπτικότητα* που είναι η αναλογία της ενέργειας που ακτινοβολείται από το υλικό σε μια θερμοκρασία T και της ενέργειας που ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία.

1.8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της εκπεμπτικότητας

Η εκπεμπτικότητα των υλικών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

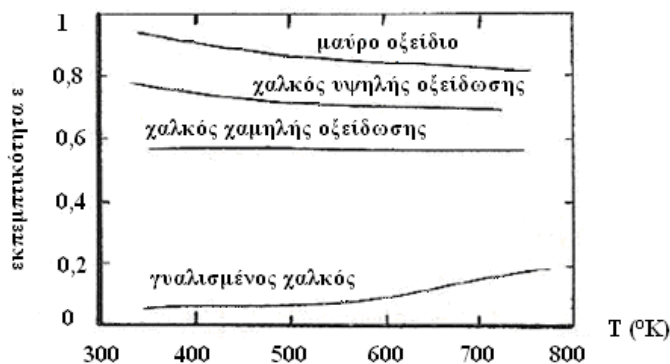
- *Εγγενείς ιδιότητες αντικείμενου* : το υλικό (μέταλλο, μονωτής, κλπ.), η επιφάνεια (τραχιά/γυαλισμένη) και η γεωμετρία (κοιλότητες, αυλακώσεις, κλπ.)
- *Διακυμάνσεις οφειλόμενες σε άλλες παραμέτρους*: η θερμοκρασία, η κατεύθυνση παρατήρησης (οπτική γωνία) και το μήκος κύματος (LW/MW/SW)

1.8.3.1 Το υλικό

Η σημαντικότερη παράμετρος είναι το είδος του υλικού. Ανάλογα με τις τεχνικές μετρήσεων, λαμβάνονται οι μέσοι όροι σε ορισμένες γωνιακές και φασματικές περιοχές, όπως είναι χρήσιμο στη θερμογραφία. Σε μια απλουστευμένη ταξινόμηση, μπορεί κανείς να χωρίσει τα υλικά σε μέταλλα και μη μέταλλα, καθώς τα περισσότερα μη μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές της θερμογραφίας όπως το δέρμα, το χαρτί, η μπογιά, οι πέτρες, το γυαλί και άλλα, έχουν αρκετά υψηλές τιμές εκπεμπτικότητας μεγαλύτερες του 0,8. Αντιθέτως, τα μέταλλα και κυρίως τα γυαλισμένα μέταλλα, δημιουργούν προβλήματα εξαιτίας των συχνά χαμηλών συντελεστών εκπομπής τους με τιμές μικρότερες του 0,2.

1.8.3.2 Η δομή επιφάνειας

Για κάθε υλικό, η εκπεμπτικότητα μπορεί να ποικίλλει σημαντικά λόγω της δομής της επιφάνειάς του. Αυτό οδηγεί στη δυσμενή κατάσταση κατά την οποία για το ίδιο υλικό μπορούν να βρεθούν διαφορετικές τιμές εκπεμπτικότητας. Αυτή η επίδραση είναι πιο έντονη στα μέταλλα. Ενώ τα γυαλισμένα μέταλλα μπορούν να φτάσουν σε πολύ χαμηλές τιμές εκπεμπτικότητας γύρω στο 0,02, για τραχείες επιφάνειες η εκπεμπτικότητα μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη φτάνοντας ακόμα και στο 0,8.



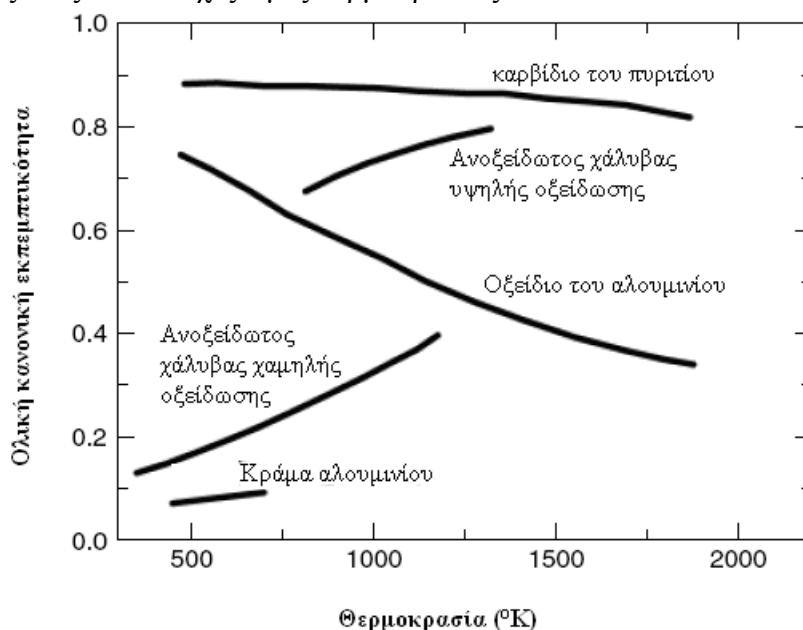
Σχήμα 1.8.3.2-1: Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας από την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού.

Οι υψηλότερες τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε μεταλλικά εξαρτήματα, είναι σε αυτά που έχουν τροποποιηθεί μέσω οξείδωσης/διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου (σχήμα 1.8.3.2-1). Για παράδειγμα, για μια μεταλλική βίδα μιας ηλεκτρικής σύνδεσης που λειτουργεί εδώ και χρόνια, η εκπεμπτικότητα έχει βρεθεί 0,78 για έντονα οξειδωμένο Cu και 0,90 για κάποιες ενώσεις χάλυβα, λόγω αυτών των τροποποιήσεων της επιφάνειας. Αυτός ο παράγοντας είναι ο πιο σημαντικός για

κάθε επιθεώρηση σε κοχλίες, περικόχλια, σφικτήρες και άλλα εξαρτήματα, καθώς ένα θερμογραφικό σύστημα πρέπει να έχει κριτήρια για την επιτυχία ή όχι της μέτρησης. Επομένως, η ποσοτική ανάλυση είναι αναγκαία, δηλαδή, πρέπει κανείς να ξέρει την ακριβή διαφορά θερμοκρασίας των στοιχείων αυτών σε σχέση με το γνωστής εκπεμπτικότητας περιβάλλον τους. Και η μετρούμενη θερμοκρασία εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την πραγματική τιμή της εκπεμπτικότητας.

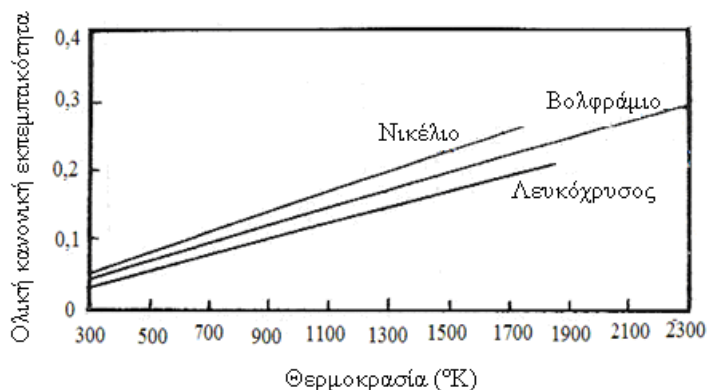
1.8.3.3 Η θερμοκρασία

Οι ιδιότητες των υλικών συνήθως μεταβάλλονται με την αλλαγή της θερμοκρασίας και το ίδιο ισχύει και για την εκπεμπτικότητα. Στο σχήμα 1.8.3.3-1 φαίνονται μερικά τέτοια παραδείγματα. Κάποια υλικά παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, για αυτό μπορεί να είναι απαραίτητο για πρακτικούς λόγους να γνωρίζουμε εάν η θερμοκρασία παραμένει σε ένα ορισμένο διάστημα κατά τη διαδικασία της μέτρησης ώστε η εκπεμπτικότητα για τη μελέτη να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επιπλέον, αν χρησιμοποιηθούν τιμές εκπεμπτικότητας από τη βιβλιογραφία, πρέπει κανείς να γνωρίζει τις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.8.3.3-1: Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας από τη θερμοκρασία για διάφορα υλικά.

Η εκπεμπτικότητα των μετάλλων στην περιοχή των υπερύθρων γενικά τείνει να αυξηθεί με τη θερμοκρασία του μετάλλου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.8.3.3-2 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.8.3.3-2: Ολική κανονική εκπεμπτικότητα μετάλλων.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο συντελεστής ανάκλασης ενός μετάλλου δίνεται από το τύπο:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma\mu c^2}} \quad (1.8.3.3-1)$$

όπου $\omega=2\pi c/\lambda$ είναι η γωνιακή συχνότητα του οπτικού κύματος, το γ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου, το μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και το c είναι η ταχύτητα του φωτός. Η εκπεμπτικότητα ενός μετάλλου δίνεται από τη σχέση:

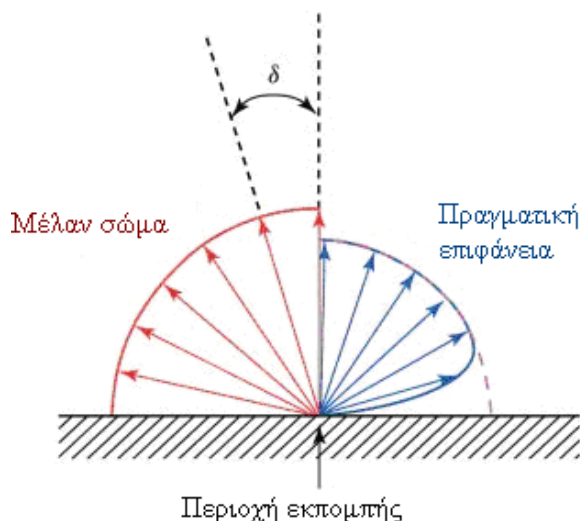
$$\varepsilon(\lambda) = 1 - R = \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma\mu c^2}} \quad (1.8.3.3-2)$$

και αυξάνεται όσο η ηλεκτρική του αγωγιμότητα γ μειώνεται. Μια αύξηση στη θερμοκρασία αντιστοιχεί σε μια μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας λόγω της θερμικής κίνησης του μοριακού πλέγματος, η οποία παράγει μια αύξηση στην εκπεμπτικότητα. Η κατάσταση της επιφάνειας και η οξείδωση του μετάλλου μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την εκπεμπτικότητα.

1.8.3.4 Η γωνία παρατήρησης

Η εκπεμπτικότητα, όπως έχει ήδη ορισθεί, ισούται με το λόγο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς εκείνη που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Σε όρους ραδιομετρίας, ορίζει κανείς την εκπεμπτικότητα ως το λόγο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε δεδομένο μήκος κύματος λ και σε διεύθυνση που ορίζεται από δύο γωνίες δ και φ , προς την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος.

Το μέλαν σώμα συμπεριφέρεται σαν ισότροπα διάχυτος εκπομπός, δηλαδή, για κάθε επιφάνεια η ακτινοβολία που εκπέμπει είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης προς την οποία εκπέμπεται. Ωστόσο, οι πραγματικές επιφάνειες παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή η ακτινοβολία τους έχει διακυμάνσεις ανάλογα με την κατεύθυνση εκπομπής. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.11.3.4-1 που ακολουθεί. Εκτός από το γεγονός ότι κάθε πραγματική επιφάνεια εκπέμπει λιγότερη ακτινοβολία από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία, επιπλέον η ακτινοβολία αυτή συνήθως εξαρτάται από τη γωνία εκπομπής.



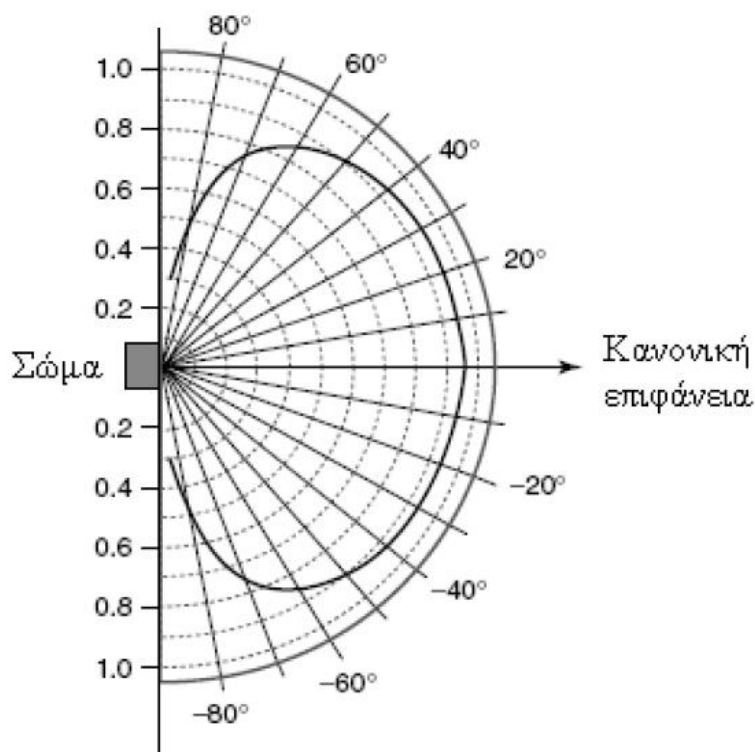
Σχήμα 1.8.3.4-1: Απεικόνιση της ανεξάρτητης-από-τη-γωνία-εκπομπής ακτινοβολίας για το μέλαν σώμα (αριστερά) και της εξαρτώμενης-από-τη-γωνία-εκπομπής ακτινοβολίας για κάθε πραγματική επιφάνεια (δεξιά).

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να επηρεάσει έντονα οποιαδήποτε μέτρηση θερμοκρασίας χωρίς επαφή με χρήση κάμερας υπέρυθρων, καθώς ένα αντικείμενο που παρατηρείται από την κανονική κατεύθυνση προς την επιφάνειά του ($\delta=0^\circ$) θα εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από ότι όταν παρατηρείται υπό κλίση. Αυτό σημαίνει ότι η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης σε σχέση με την κανονική επιφάνεια.



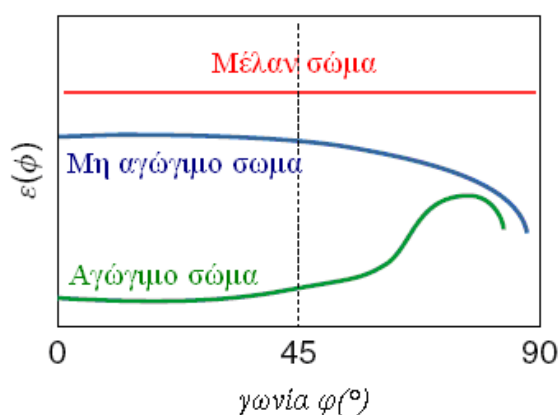
Σχήμα 1.8.3.4-2: Περιστροφή του κύβου Leslie για τη μέτρηση της εκπεμπτικότητας συναρτήσει της οπτικής γωνίας με σημείο αναφοράς την κάμερα

Μια τυπική διάταξη για τη μελέτη αυτής της εξάρτησης φαίνεται στο σχήμα 1.8.3.4-2. Μια γωνιακή κλίμακα από 0° έως 180° τοποθετείται σε ένα τραπέζι με τις 90° να δείχνουν στην κάμερα υπέρυθρων. Το (ζεστό ή καυτό) αντικείμενο που είναι να μελετηθεί τοποθετείται στην κορυφή της κλίμακας, με την επιφάνειά του να βλέπει τις 90° , δηλαδή την κάμερα. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι μετρήσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας, κατά την περιστροφή του αντικειμένου.

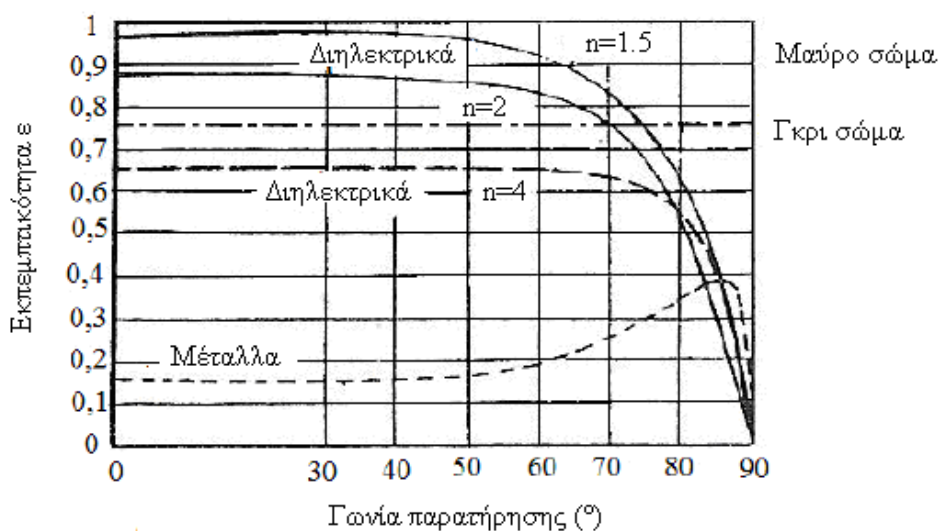


Σχήμα 1.8.3.4-3: Κύβος Leslie για τη μέτρηση της εκπεμπτικότητας συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης (0° - 85°).

Στο σχήμα 1.11.3.4-3, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την πλευρά λευκού χρώματος του κύβου Leslie, η οποία ήταν γεμάτη με ζεστό νερό. Η πραγματική θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί με ένα θερμόμετρο επαφής, το οποίο δίνει τη σωστή τιμή της θερμοκρασίας στην κανονική κατεύθυνση. Οι τιμές που εξαρτώνται από τη γωνία βρίσκονται αλλάζοντας την τιμή της εκπεμπτικότητας στη θερμοκάμερα μέχρι να εμφανιστεί η πραγματική θερμοκρασία. Επίσης, το σχήμα αυτό δείχνει ένα αποτέλεσμα που ισχύει για όλες σχεδόν τις επιφάνειες που είναι σημαντικές σε πρακτικές εφαρμογές: η εκπεμπτικότητα είναι σχεδόν σταθερή από 0° μέχρι 40° ή 45°. Η συμπεριφορά για μεγαλύτερες των 45° γωνίες διαφέρει για μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα 1.8.3.4-4 και 1.8.3.4-5. Για μη αγώγιμα υλικά, παρατηρεί κανείς μια χαρακτηριστική πτώση της εκπεμπτικότητας για μεγαλύτερες γωνίες, ενώ για τις μεταλλικές επιφάνειες η εκπεμπτικότητα συνήθως δείχνει αρχικά μια αύξηση για μεγαλύτερες γωνίες, πριν αρχίσει να μειώνεται και πάλι.



Σχήμα 1.8.3.4-4: Εξάρτηση του ε από την οπτική γωνία για αγώγιμα και μη αγώγιμα σώματα σε σχέση με το μέλαν σώμα.

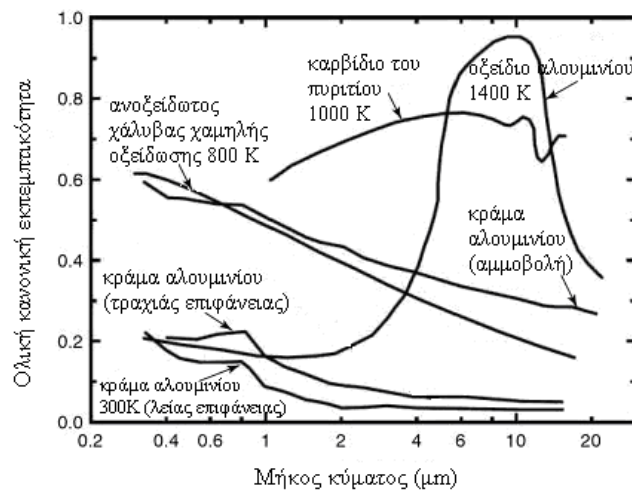


Σχήμα 1.8.3.4-5: Μεταβολή της εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη γωνία παρατήρησης.

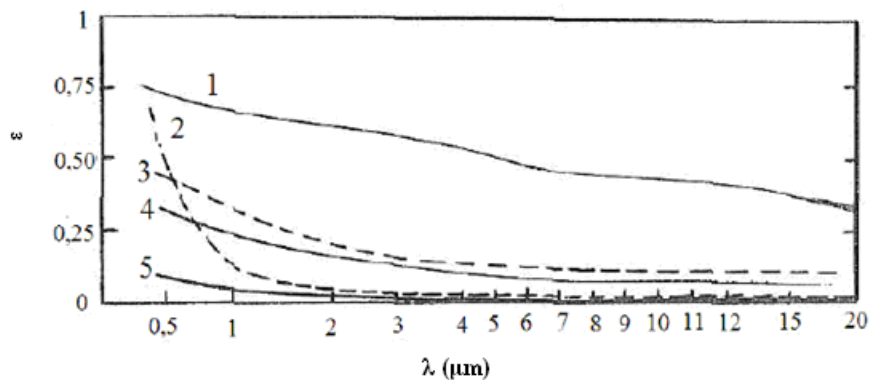
Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή του συντελεστή εκπομπής συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης είναι άγνωστη. Ο συντελεστής εκπομπής είναι γνωστός μόνο όταν η οπτική γωνία ισούται με μηδέν. Μια μεγάλη γωνία παρατήρησης μπορεί να κάνει τις μετρήσεις της θερμοκρασίας ανακριβείς ή και αδύνατες, δεδομένου ότι η θερμοκάμερα πρέπει να είναι στη βέλτιστη θέση σε σχέση με το παρατηρούμενο αντικείμενο.

1.8.3.5 Το μήκος κύματος

Οι ιδιότητες των υλικών συνήθως εξαρτώνται από το μήκος κύματος, όπως είναι γνωστό από την οπτική. Έστω για παράδειγμα ο συντελεστής ανάκλασης των ευγενών μετάλλων: χρυσού, αργύρου και χαλκού. Ο χρυσός και ο χαλκός έχουν εσωτερικές μεταβάσεις (μετάβαση μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας- ηλεκτρόνια και οπές) στο ορατό φάσμα, σύμφωνα με τις οποίες συγκεκριμένο ποσό φωτεινής ενέργειας (χρώμα) απορροφάται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εξαρτώμενο από το μήκος κύματος συντελεστή ανάκλασης, αποδίδοντας το ιδιαίτερο χρώμα αυτών των μετάλλων. Ο συντελεστής ανάκλασης συνδέεται στενά με την εκπεμπτικότητα των μετάλλων, έτσι κάθε εξάρτηση από το μήκος κύματος στο συντελεστή ανάκλασης θα εμφανίζεται και στην εκπεμπτικότητα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.3.5-1, η εκπεμπτικότητα των μετάλλων συνήθως μειώνεται με το μήκος κύματος (το αντίθετο συμβαίνει με το συντελεστή ανάκλασης), ενώ στην περίπτωση των οξειδίων μπορεί να παρουσιάσει και αύξηση. Η περίπτωση των κραμάτων αλουμινίου δείχνει ότι η αυξανόμενη τραχύτητα στην επιφάνεια, από λείες επιφάνειες μέχρι αυτές που έχουν υποστεί αμμοβολή, οδηγεί σε δραστική αύξηση της εκπεμπτικότητας.



Σχήμα 1.8.3.5-1: Έξαρτηση της εκπεμπτικότητας από το μήκος κύματος.

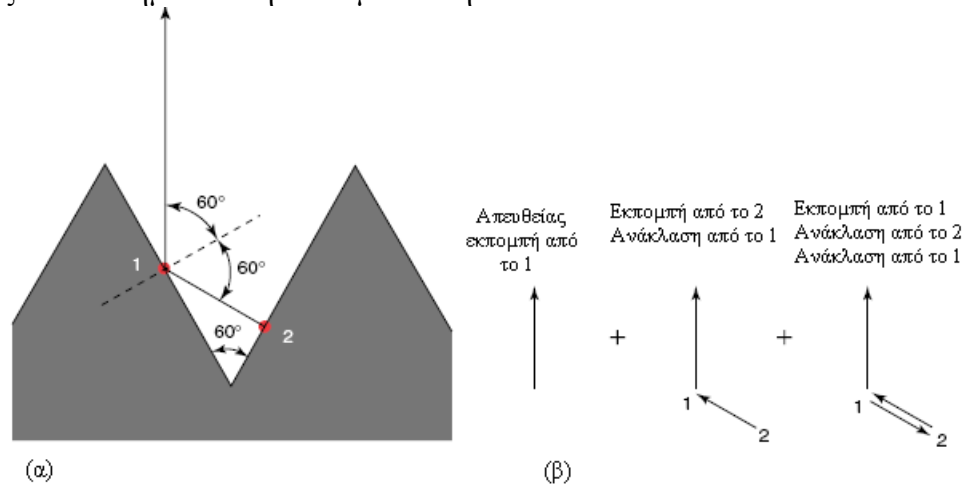


Σχήμα 1.8.3.5-2: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με το φάσμα της ακτινοβολίας των μετάλλων και του γραφίτη: 1-γραφίτης, 2-χαλκός, 3-σίδηρος, 4-αλουμίνιο, 5-ασήμι .

Στο σχήμα 1.8.3.5-2 παρατηρείται η μείωση της τιμής της εκπεμπτικότητας κατά την αύξηση του μήκους κύματος, για το γραφίτη, τον χαλκό, το σίδηρο, το αλουμίνιο και το ασήμι .

1.8.3.6 Η γεωμετρία υλικού

Η γεωμετρία μιας επιφάνειας σχετίζεται με την δομή της επιφάνειας της. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν όμως σαφώς καθορισμένες δομές, όπως αυλακώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν συστηματικά την εκπεμπτικότητα.



Σχήμα 1.8.3.6-1: Μοντέλο αυλάκωσης σχήματος V, μεταλλικής επιφάνειας με χαμηλό συντελεστή εκπομπής (α). Η μακροσκοπική επιφάνεια είναι οριζόντια. (β) Η συμβολή από 3 ακτινοβολίες δημιουργεί τη συνολική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης.

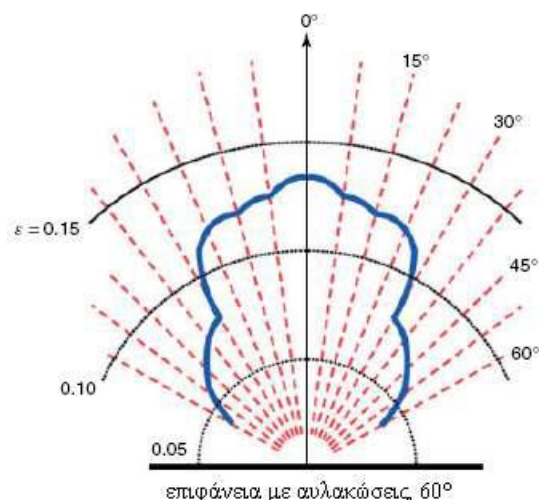
Έστω για παράδειγμα μία μεταλλική επιφάνεια (π.χ. με κανονική εκπεμπτικότητα $\epsilon_{normal}=0,04$) με μια καλά καθορισμένη δομή επιφάνειας σε μορφή αυλακώσεων δεδομένης γωνίας κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.3.6-1α, με γωνία κορυφής 60° . Οι αυλακώσεις ενισχύουν την εκπεμπτικότητα σε διεύθυνση κάθετη προς την μακροσκοπική επιφάνεια όπως μπορεί να γίνει κατανοητό από το σχήμα 1.8.3.6-1β. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 σε μια κατεύθυνση κανονική προς τη μακροσκοπική επιφάνεια της αυλάκωσης, αποτελείται από τη συμβολή τριών ακτινοβολιών:

1. Την άμεση ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 η οποία χαρακτηρίζεται από την $\epsilon(60^\circ)$ σε σχέση με την πραγματική επιφάνεια της αυλάκωσης.
2. Την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 2, η οποία στη συνέχεια αντανακλάται από το σημείο 1 στην κανονική κατεύθυνση. Η συμβολή των ακτινοβολιών αυτών χαρακτηρίζεται από $\epsilon(0^\circ) \cdot R(60^\circ) = \epsilon(0^\circ) \cdot [1 - \epsilon(60^\circ)]$ όσον αφορά την επιφάνεια της αυλάκωσης.
3. Την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 προς την κατεύθυνση του σημείου 2, αντανακλάται πίσω από το σημείο 2 στο σημείο 1, και στη συνέχεια αντανακλάται προς την κανονική κατεύθυνση. Αυτή η συμβολή ακτινοβολιών χαρακτηρίζεται από $\epsilon(0^\circ) \cdot R(0^\circ) \cdot R(60^\circ) = \epsilon(60^\circ) \cdot [1 - \epsilon(0^\circ)] \cdot [1 - \epsilon(60^\circ)]$ όσον αφορά την επιφάνεια της αυλάκωσης.

Προσθέτοντας αυτές τις ακτινοβολίες και διαιρώντας με την ακτινοβολία μέλανος σώματος, μπορεί εύκολα να δει κανείς ότι η κανονική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης έχει αυξηθεί. Για μια αριθμητική εκτίμηση, μπορεί να υποθεθεί ότι η εκπεμπτικότητα λείας επιφάνειας είναι $\epsilon(0^\circ)=0,04$ και $\epsilon(60^\circ)=0,05$. Στην περίπτωση αυτή, η συνολική κανονική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης είναι $\epsilon_{total,normal}=0,04+0,04 \cdot (1-0,05)+0,04 \cdot (1-0,04) \cdot (1-0,05) = 0,1145$, δηλαδή, η εκπεμπτικότητα έχει σχεδόν τριπλασιαστεί λόγω αυτής της δομής επιφάνειας. Η αύξηση αυτή εξηγεί το γεγονός ότι οποιαδήποτε ανώμαλη επιφάνεια έχει μεγαλύτερη εκπομπή από λείες επίπεδες επιφάνειες.

Οι συνήθεις δομές επιφανειών συχνά οδηγούν σε μη ομοιόμορφη κατανομή εκπεμπτικότητας συναρτήσει της γωνίας. Επαναλαμβάνοντας τον παραπάνω υπολογισμό για

διάφορες γωνίες εκπομπής σε σχέση με τη μακροσκοπική επιφάνεια της αυλάκωσης (σχήμα 1.8.3.6-2) παρατηρεί κανείς έντονες διακυμάνσεις της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τις γωνίες παρατήρησης.



Σχήμα 1.8.3.6-2: Πολικό διάγραμμα για την αναμενόμενη εξάρτηση της ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας παρατήρησης για μοντέλο αυλάκωσης-V 60° μεταλλικής επιφάνειας με $\varepsilon=0,04$.

1.8.4. Η επίδραση της εκπεμπτικότητας στη θερμογραφία

Η θερμογραφία χρησιμοποιεί κάμερες υπεράυθρων για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκπομπή ενός αντικειμένου με εκπεμπτικότητα ε , σε θερμοκρασία T δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \frac{dR_{bb}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (1.8.4-1)$$

Ο παράγοντας ε_{λ} μπορεί να μεταβάλλεται στο διάστημα 0 έως 1, ανάλογα με το αντικείμενο, και έχει εξαιρετικά ισχυρή επίδραση στην ακτινοβολία από το αντικείμενο. Η θερμογραφία θεωρείται ακριβής μέθοδος για την ανίχνευση αυτής της ακτινοβολίας. Είναι σαφές ότι τα σχεδόν-μέλανα σώματα θα δώσουν ένα άριστο αποτέλεσμα επειδή η μετρούμενη ακτινοβολία προκύπτει πρακτικά στο σύνολο της από αυτο-εκπομπή. Ο νόμος του Planck επιτρέπει στην περίπτωση αυτή τον υπολογισμό της αντίστοιχης θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα είναι πολύ χειρότερα όταν η εκπεμπτικότητα του υλικού είναι χαμηλή.

Δύο παράγοντες επηρεάζουν τέτοιες μετρήσεις. Ο πρώτος παράγοντας είναι το γεγονός ότι σε ίσες θερμοκρασίες, η ενέργεια που ακτινοβολείται από ένα αντικείμενο χαμηλής εκπεμπτικότητας είναι λιγότερη από αυτή ενός μέλανος σώματος. Αυτό το φαινόμενο δεν επιδρά σημαντικά επειδή η γνώση της ικανότητας ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την καλή ευαισθησία ανίχνευσης, επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αντικειμένου. Ο δεύτερος παράγοντας ο οποίος επιδρά σημαντικά στη μέτρηση, είναι η ανάκλαση του υλικού η οποία είναι υψηλή όταν η εκπεμπτικότητα είναι χαμηλή, προσθέτοντας έτσι την παρασιτική ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Είναι επομένως πολύ δύσκολο να διακρίνουμε μεταξύ ακτινοβολίας λόγω της αυτό-εκπομπής και ακτινοβολίας λόγω της αντανάκλασης. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να επιτευχθούν έγκυρα αποτελέσματα όταν η θερμοκρασία του υπό μέτρηση αντικειμένου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η παρασιτική ενέργεια είναι τότε χαμηλή, ακόμη και για ένα αντικείμενο με μέσο συντελεστή ανάκλασης. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι καμία μέτρηση δεν είναι δυνατή για υλικά υψηλής ανάκλασης των οποίων η αυτο-εκπομπή είναι ουσιαστικά μηδέν.

2. Σκοπός της Εργασίας

Οι στατικοί ηλεκτρικοί σύνδεσμοι μέσης τάσης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα σύνδεσης των αγωγών, διαρρέονται από ισχυρά ρεύματα και είναι εκτεθειμένοι στο περιβάλλον, οπότε λειτουργούν σε αντίξοες και ακραίες συνθήκες. Με την πάροδο του χρόνου προκαλείται διάβρωση από το περιβάλλον και με την θέρμανση στις επαφές από το ρεύμα, σχηματίζονται στρώσεις από ξένες επικαθίσεις, οξειδία μετάλλων σκόνη και άλλα σωματίδια. Αυτό οδηγεί και σε αύξηση της θερμοκρασίας του συνδέσμου και σε αυτήν την περίπτωση η επιπλέον θερμοκρασία είναι πιθανό να οδηγήσει το σύνδεσμο σε χαλάρωση. Αυτό με τη σειρά του θα προκαλέσει μεγαλύτερη πτώση τάσης και περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα ένα κύκλο που πιθανόν να οδηγήσει σε βλάβη.

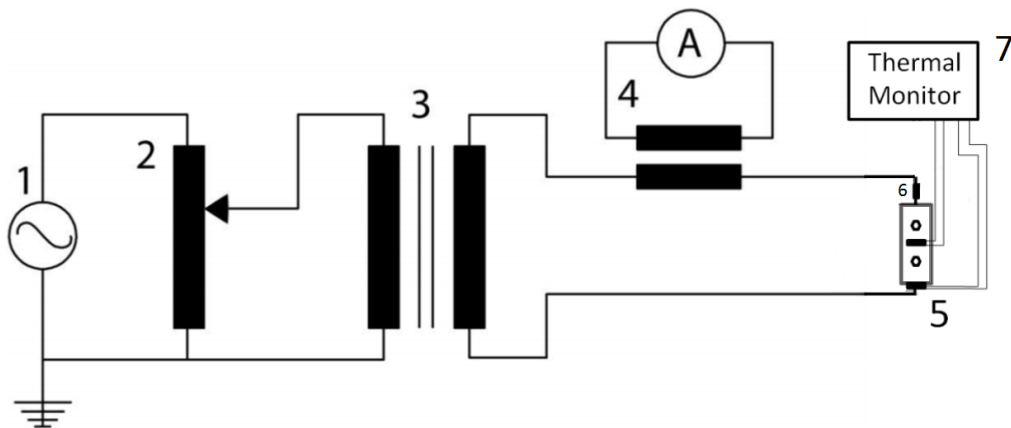
Οι σύνδεσμοι πρέπει να ανταποκρίνονται διαχρονικά και αξιόπιστα στις συνθήκες μόνιμης και πλήρους λειτουργίας. Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία είναι ο κυριότερος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει όλα τα χαρακτηριστικά τους. Για την αξιοπιστία αυτών των συνδέσμων πραγματοποιούνται διάφοροι έλεγχοι με απλές, εξειδικευμένες ή πολύπλοκες μεθόδους. Μια από αυτές τις μεθόδους ελέγχου είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του με χρήση κάμερας υπερύθρων.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας κατά την μέτρηση της θερμοκρασίας συνδέσμων αγωγών ACSR μέσης τάσης, μέσω κάμερας υπερύθρων, υπό διαφορετικά ρεύματα διέλευσης και υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας.

3. Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

3.1. Η πειραματική διάταξη

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των συνδέσμων.



Σχήμα 3-1: 1. Πηγή τάσης, τάση δικτύου 230 V
2. Αυτομετασχηματιστής (Variac)
3. Μετασχηματιστής Έντασης
4. Επαγωγικό Αμπερόμετρο
5. Ηλεκτρικός Σύνδεσμος (δοκίμιο)
6. Αισθητήρες Θερμοκρασίας (Pt-100)
7. Καταγραφικό Αισθητήρων

Το δίκτυο χαμηλής τάσης τροφοδοτεί έναν αυτομετασχηματιστή, ο οποίος έχει τέσσερις ακροδέκτες, οι δύο ακροδέκτες (είσοδος) συνδέονται στην τάση του δικτύου 230 V και οι άλλοι δύο ακροδέκτες (εξόδος) συνδέονται εσωτερικά του μετασχηματιστή με το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος και την ενδιάμεση λήψη αντίστοιχα. Η ενδιάμεση λήψη ρυθμίζεται μέσω ποτενσιόμετρου, ώστε η τάση στην έξοδο του αυτομετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0-230V και να τροφοδοτεί την είσοδο του μετασχηματιστή έντασης. Με αυτό τον τρόπο η ένταση του ρεύματος στην έξοδό του, ελέγχεται από την ενδιάμεση λήψη του αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού. Στην έξοδο του μετασχηματιστή έντασης συνδέθηκαν αγωγοί, οι οποίοι στη συνέχεια συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω του δοκιμίου προς μέτρηση.

Οι αγωγοί της διάταξης είναι πολύκλωνοι αγωγοί ASCR, από τους οποίους έχει αφαιρεθεί η χαλύβδινη ψυχή. Η αφαίρεση αυτή κρίθηκε απαραίτητη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που εμφάνιζε ο χάλυβας στις υψηλές τιμές ρευμάτων που έχουν οριστεί για τη διεξαγωγή του πειράματος. Αυτή η αύξηση θερμοκρασίας θα επηρέαζε τις μετρήσεις των δοκιμίων, λόγω μεταφοράς θερμότητας. Οι αγωγοί συνδέονται στις πλάκες εξόδου του μετασχηματιστή έντασης και είναι διπλοί. Έτσι το ρεύμα που διέρρεε κάθε αγωγό μειώθηκε στο μισό. Ως αποτέλεσμα μειώθηκε περεταίρω η παραγόμενη θερμότητα από τους αγωγούς. Στην μεριά του δοκιμίου τα ζεύγη συνεστράφησαν σε ένα, για να τοποθετηθεί ο σύνδεσμος και αφαιρέθηκε κατάλληλος αριθμός κλώνων ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο, για τον κάθε σύνδεσμο, πάχος αγωγού. Για την μέτρηση και τον έλεγχο του ρεύματος εξόδου του μετασχηματιστή έντασης χρησιμοποιήθηκε ένα επαγωγικό αμπερόμετρο (αμπεροτσιμπίδα).

Η θερμοκρασία του συνδέσμου καταγραφόταν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος με ένα σύστημα δύο αισθητήρων θερμοκρασίας και ενός καταγραφικού. Δύο αισθητήρες PT100 χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της θερμοκρασίας των δοκιμίων. Η μέτρηση γίνεται μέσω παρακολούθησης της αντίστασης του στοιχείου, καθώς η αντίσταση αλλάζει με την θερμοκρασία. Στους 0 βαθμούς Κελσίου ο αισθητήρας παρουσιάζει 100Ω αντίσταση, από όπου πήρε και το όνομά του. Ο πρώτος τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του συνδέσμου μεταξύ των κοχλιών σύσφιξης και ο δεύτερος στην πλαϊνή μεριά του συνδέσμου μεταξύ των αγωγών. Η παρακολούθηση της αντίστασης των δύο αισθητήρων πραγματοποιείται από το καταγραφικό, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπει τις τιμές αντίστασης σε βαθμούς Κελσίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αισθητήρα PT-100.

Ο σύνδεσμος τοποθετήθηκε σε στον εσωτερικό χώρο ενός ειδικού θαλάμου ελεγχόμενων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, δηλαδή ο θάλαμος δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης, των επιθυμητών από τον χρήστη, συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας. Ο σύνδεσμος σφίχτηκε στην επιλεγμένη ροπή, οι αγωγοί και οι αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν στις θέσεις που προαναφέρθηκαν. Για τη σύσφιξη των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε ροπόκλειδο, ώστε να εφαρμοστεί η ονομαστική ροπή σύσφιξης (20Nm) στους κοχλίες των συνδέσμων. Κάθε μέτρηση λήφθηκε με χρήση της θερμοκάμερας για την λήψη υπέρυθρων φωτογραφιών. Η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Fluke, μοντέλο Ti45, η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση της τιμής της εκπεμπτικότητας κατάλληλα ώστε να μετράμε την σωστή θερμοκρασία.

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν είναι τα εξής:

- Σύνδεσμος σύνδεσης αγωγού διατομής 35 mm² με αγωγό 16 mm² (Δοκίμιο No.1).



Σχήμα 3-2: Δοκίμιο No.1

- Σύνδεσμος σύνδεσης αγωγού διατομής 95 mm² με αγωγούς από 16 mm² έως 50 mm² (Δοκίμιο No.2)



Σχήμα 3-3: Δοκίμιο No.2

Οι δύο τύποι συνδέσμων είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο και είναι όμοιας διάταξης ως προς την τοποθέτηση των αγωγών και την σχεδίαση των κοχλιών σύσφιξης.

3.2. Η πειραματική διαδικασία των μετρήσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων συνίσταται από τα ακόλουθα βήματα:

- **Βήμα 1:** Ρύθμιση του θαλάμου στις επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Επιλέχθηκαν τρεις περιβαλλοντικές συνθήκες για να δοκιμαστεί ο προς μελέτη σύνδεσμος. Μία φυσιολογική θερμοκρασία στους 20 βαθμούς Κελσίου σε συνδυασμό με 50% σχετική υγρασία. Μία σε έντονα θερμό και υγρό περιβάλλον στους 80 βαθμούς Κελσίου σε συνδυασμό με 60% σχετική υγρασία, και μία σε ψυχρό κλίμα στους -20 βαθμούς Κελσίου. Στα πολύ ψυχρά κλίματα η σχετική υγρασία δεν έχει πρακτική αξία μιας και απειροελάχιστη μεταβολή της απόλυτης υγρασίας συνεπάγεται τεράστια μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Με αποτέλεσμα να μην είναι ούτε διαχειρίσιμη από τον θάλαμο, ούτε να αλλάζει πρακτικά την ποσότητα της απόλυτης υγρασίας σε αυτόν.
- **Βήμα 2:** Ρύθμιση του ρεύματος καταπόνησης των δοκιμίων στην επιθυμητή τιμή του, χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο του αυτομετασχηματιστή και την αμπεροτσιμπίδα για την μέτρηση του. Το ρεύμα καταπόνησης των συνδέσμων επιλέχτηκε στα 100A, 200A και 300A, άλλα και 0A (λειτουργία μηδενικού φορτίου) . Η επιλογή βασίστηκε στις τιμές των ονομαστικών ρευμάτων των αγωγών που συνδέουν οι σύνδεσμοι και των ονομαστικών ρευμάτων των συνδέσμων, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες. Το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών ASCR διατομής 16mm² είναι 136A. Το ονομαστικό ρεύμα του Δοκιμίου Νο.2 έχει βρεθεί από δοκιμή υπερθέρμανσης σε προηγούμενη διπλωματική εργασία στα 380A.
- **Βήμα 3:** Αναμονή για ισορροπία και σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του συνδέσμου εξαιτίας του ρεύματος καταπόνησης και των περιβαλλοντικών συνθηκών του θαλάμου. Ο χρόνος αναμονής για κάθε μέτρηση ορίστηκε έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η διαφορά θερμοκρασίας του συνδέσμου από το περιβάλλον του. Η σταθεροποίηση ορίζεται, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, για τη δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας), που αφορά βέβαια στην εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος. Η διαφορά θερμοκρασίας του συνδέσμου ως προς το περιβάλλον, θεωρείται ότι έχει σταθεροποιηθεί όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, που απέχουν μεταξύ τους μία ώρα, η αύξηση της τιμής είναι μικρότερη από ένα βαθμό Κελσίου.
- **Βήμα 4:** Μέτρηση θερμοκρασίας συνδέσμου. Αρχικά γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας του δοκιμίου από το καταγραφικό μηχάνημα μέσω των αισθητήρων επαφής, και στη συνέχεια γίνεται άμεση λήψη υπέρυθρων φωτογραφιών με χρήση της θερμοκάμερας, ανοίγοντας στιγμιαία την πόρτα του θαλάμου.
- **Βήμα 5:** Ρύθμιση της τιμής της εκπεμπτικότητας στην κάμερα υπέρυθρων κατά την παρατήρηση διαφοροποίησης στις τιμές θερμοκρασίας των δύο οργάνων, ώστε να επιτευχθεί ταύτιση των δύο θερμοκρασιών. Καταγραφή της τιμής της εκπεμπτικότητας στη θερμοκρασία αυτή. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε 2 φορές για τις ίδιες συνθήκες. Η επανάληψη πραγματοποιήθηκε διαταράσσοντας τις συνθήκες περιβάλλοντος, και αναμένοντας εκ νέου να επέλθει ισορροπία.

4. Αποτελέσματα των Μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Οι μετρήσεις δίνονται σε μορφή πίνακα που περιλαμβάνει την μέτρηση της θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων καθώς και την θερμοκρασία στα αντίστοιχα σημεία του συνδέσμου από την θερμοκάμερα και για τις 2 μετρήσεις καθώς και τον μέσο όρο αυτών των θερμοκρασιών. Ο κάθε πίνακας περιλαμβάνει και τις συνθήκες του θαλάμου περιβάλλοντος (θερμοκρασία-υγρασία) καθώς και την τιμή του ρεύματος που περνάει από το δοκίμιο σε κάθε μέτρηση. Μαζί με τους πίνακες παρουσιάζονται τα υπέρυθρα θερμογραφήματα τα οποία περιλαμβάνουν τις θερμοκρασίες των δύο σημείων του συνδέσμου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στους πίνακες και η σημασία τους.

Tpt1: Τιμή θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου στο πλάι του συνδέσμου

T1: Τιμή θερμοκρασίας από ένδειξη θερμοκάμερας στο πλάι του συνδέσμου

Tpt2: Τιμή θερμοκρασίας του θερμοστοιχείου στο κέντρο του συνδέσμου

T2: Τιμή θερμοκρασίας από ένδειξη θερμοκάμερας στο κέντρο του συνδέσμου (μεταξύ κοχλιών σύσφιξης)

ε: Τιμή της εκπεμπτικότητας

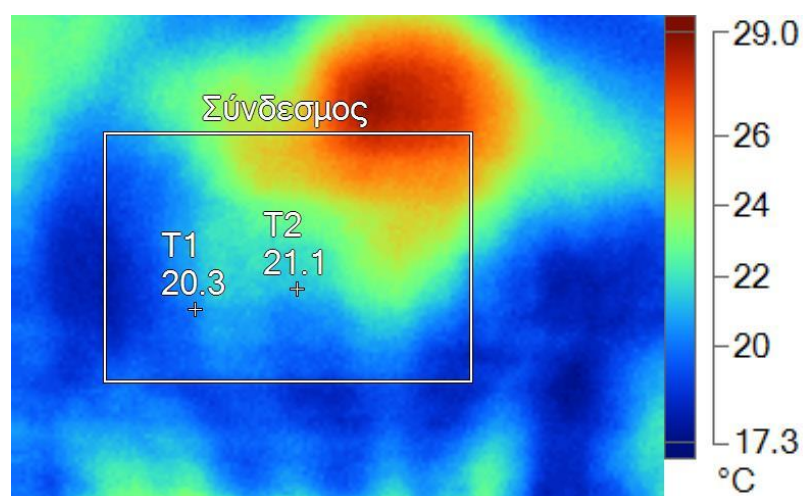
ΔT: Απόκλιση θερμοκρασίας μεταξύ τιμής θερμοστοιχείου και θερμοκάμερας ($\Delta T \leq 0,5^{\circ}\text{C}$)

M.O. : Μέσος όρος

4.1. Μετρήσεις για το δοκίμιο No.1

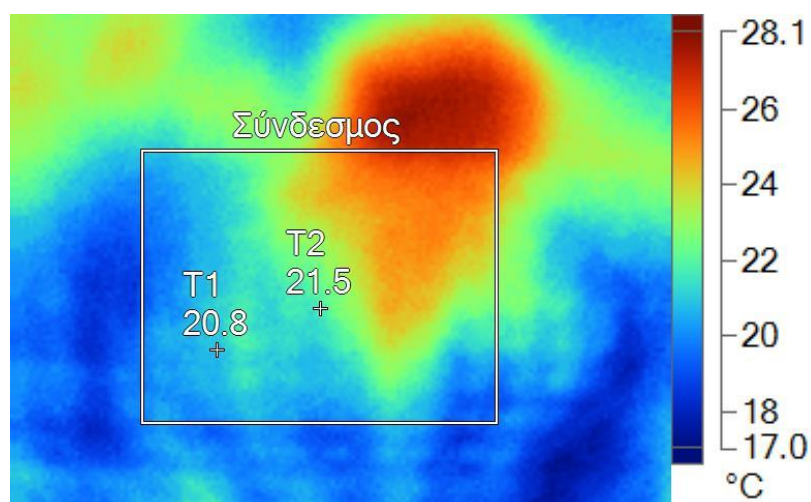
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1 .	20	50	0	20,1	20,3	0,2	0,67	20,8	21,1	0,3	0,67
2 .	20	50	0	20,5	20,8	0,3	0,67	20,9	21,4	0,5	0,67
M.O.	20	50	0	20,3	20,55	0,25	0,67	20,85	21,25	0,4	0,67

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-1

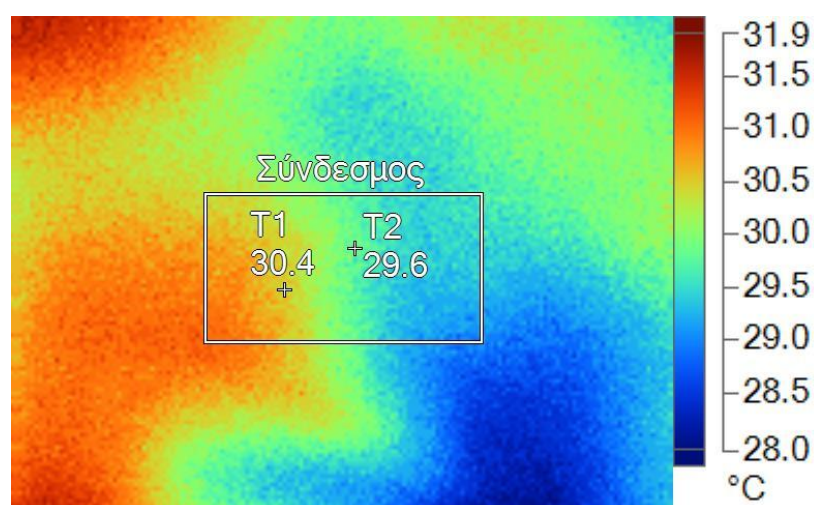
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-2

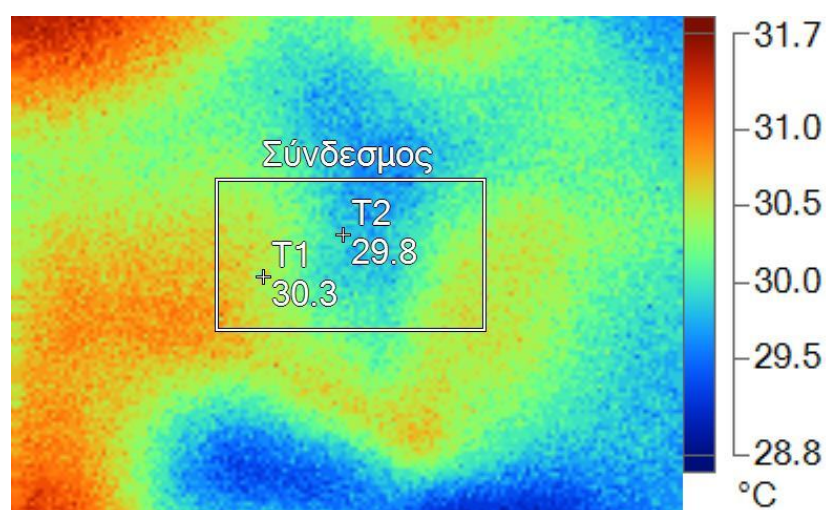
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	100	29,9	30,4	0,5	0,65	29,6	29,6	0,1	0,65
2.	20	50	100	29,8	30,3	0,5	0,65	29,7	29,8	0,1	0,65
M.O.	20	50	100	29,85	30,35	0,5	0,65	29,65	29,7	0,1	0,65

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-3

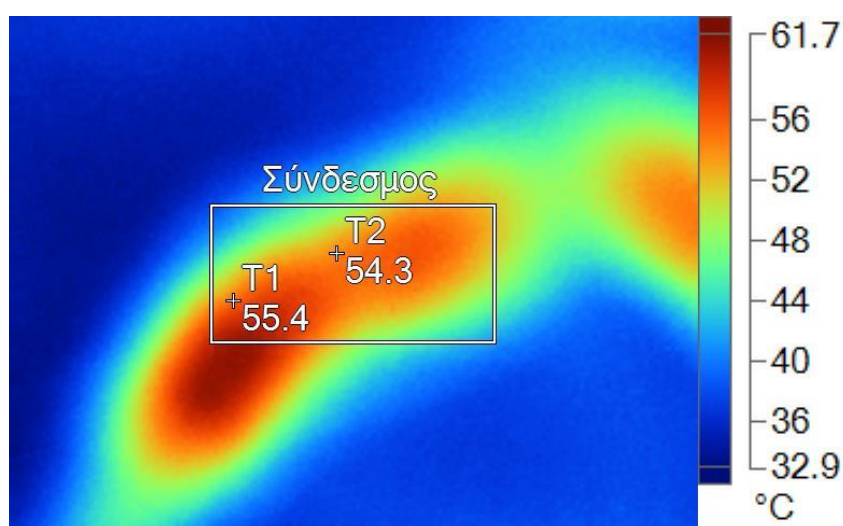
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-4

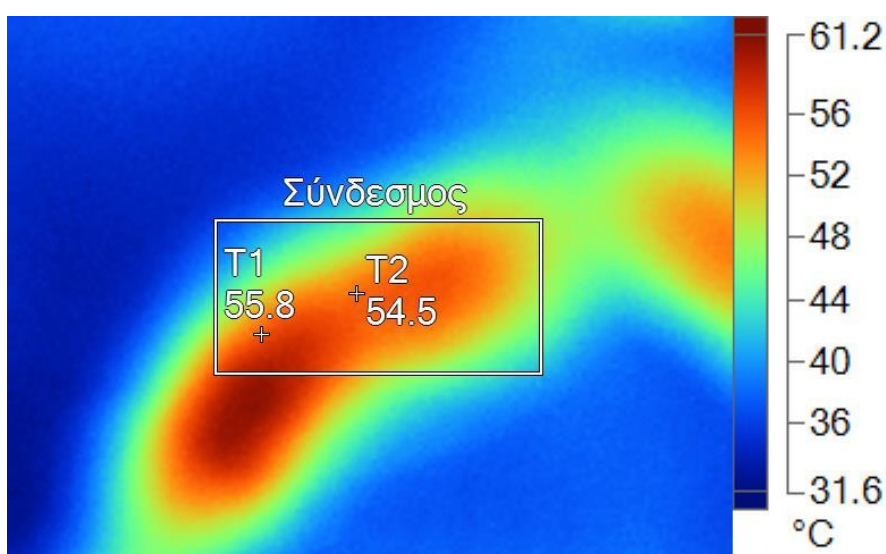
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	200	55,1	55,4	0,3	0,33	54,2	54,3	0,1	0,33
2.	20	50	200	55,5	55,8	0,3	0,33	54,5	54,5	0	0,33
M.O.	20	50	200	55,3	55,6	0,3	0,33	54,35	54,4	0,05	0,33

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-5

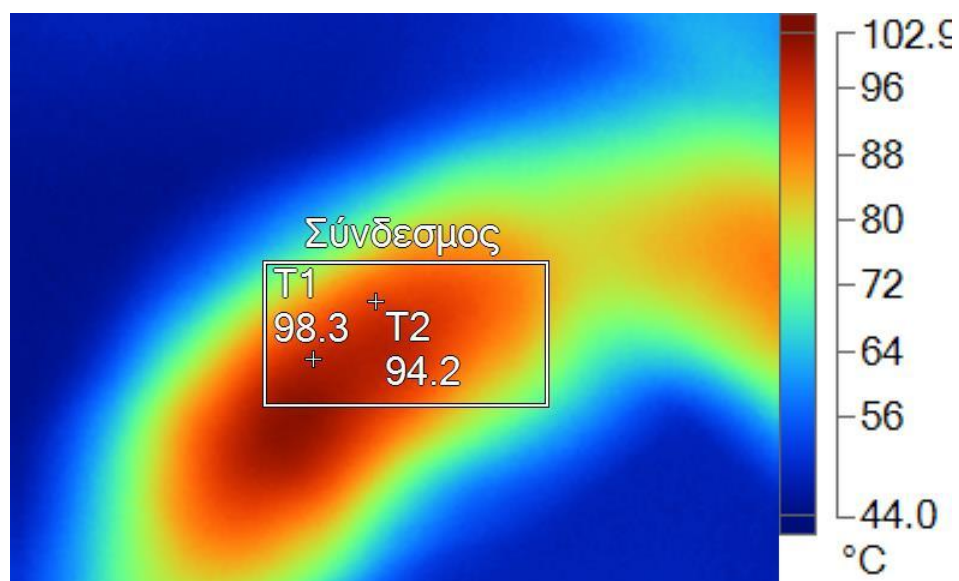
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-6

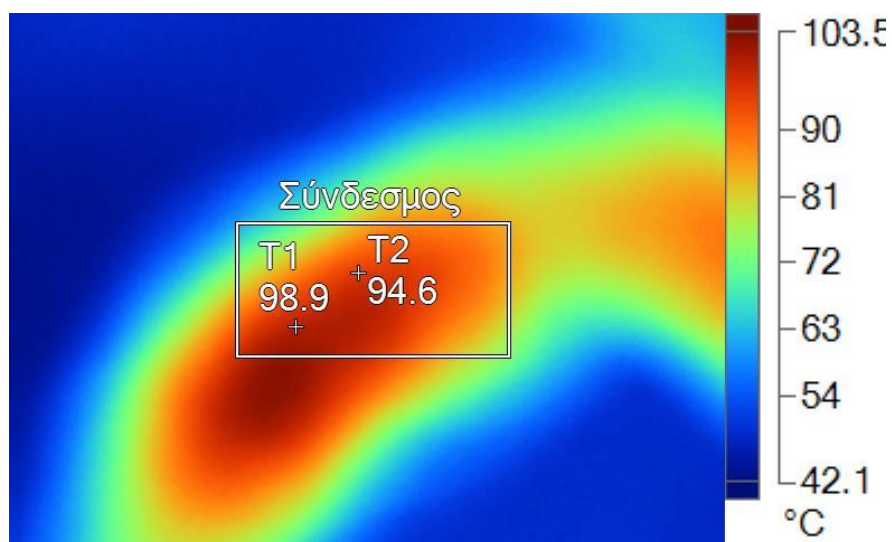
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	300	98,3	98,3	0	0,25	94,4	94,2	0,2	0,25
2.	20	50	300	98,6	98,9	0,3	0,25	94,5	94,6	0,1	0,25
M.O.	20	50	300	98,45	98,6	0,15	0,25	94,45	94,4	0,15	0,25

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-7

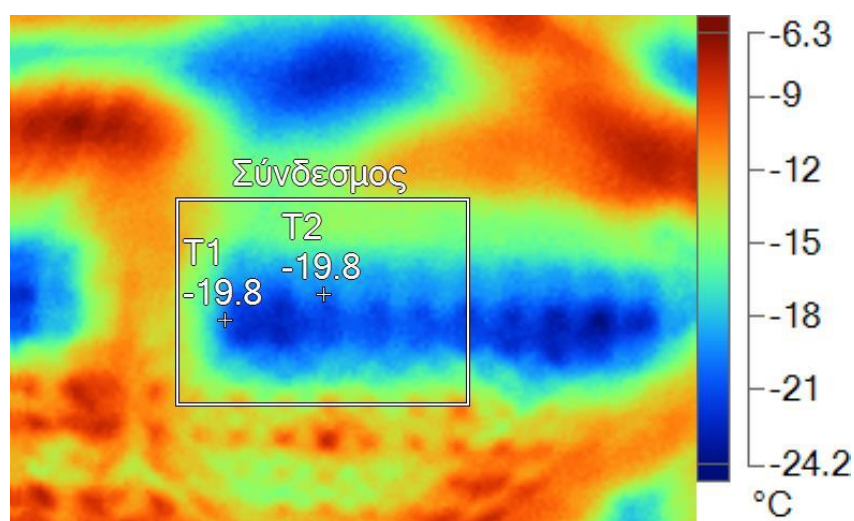
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-8

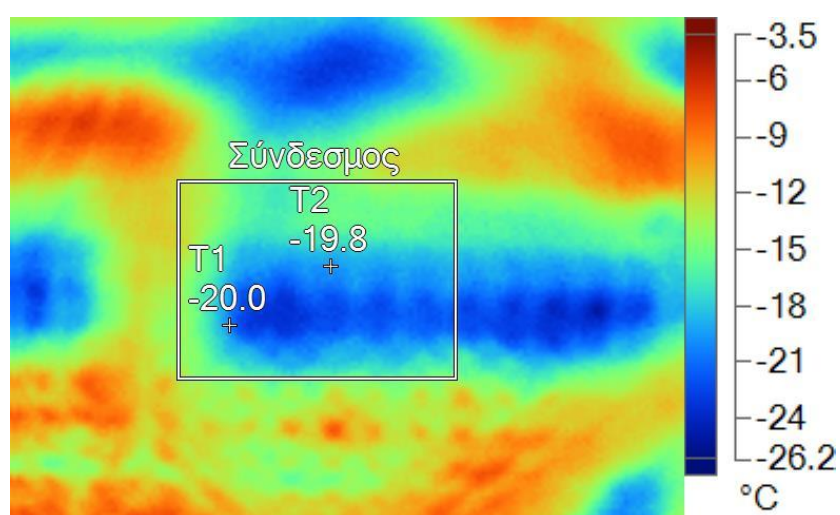
Μέτρηση	Θερμ Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1	-20	0	0	-19,8	-19,8	0	0,86	-19,7	-19,8	0,1	0,86
2	-20	0	0	-20,1	-20	0,1	0,86	-19,9	-19,8	0,1	0,86
M.O.	-20	0	0	-19,95	-20	0,05	0,86	-19,8	-19,8	0,1	0,86

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-9

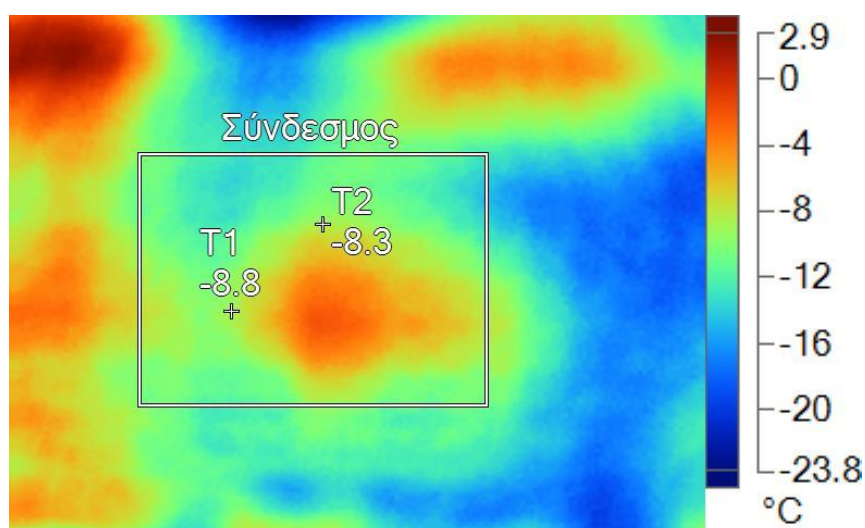
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-10

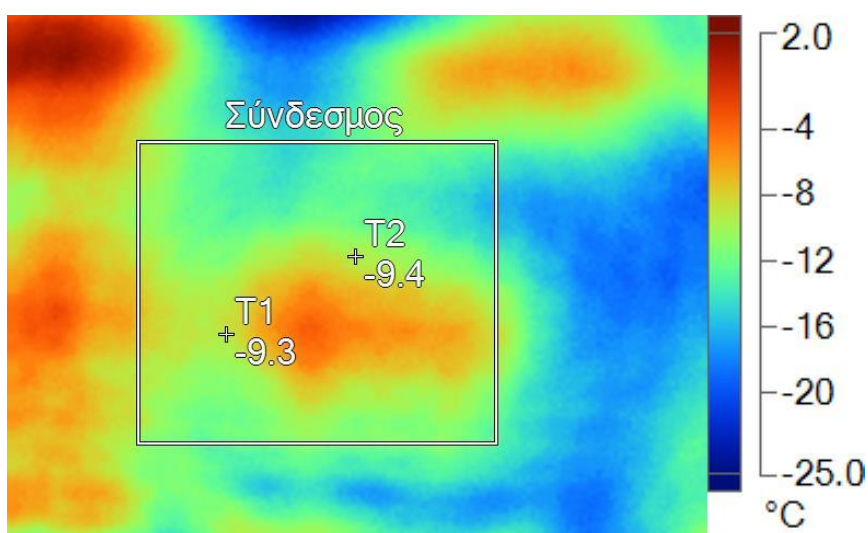
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	100	-8,8	-8,8	0	0,75	-8,7	-8,3	0,4	0,75
2.	-20	0	100	-9,3	-9,3	0	0,75	-9,2	-9,4	0,2	0,75
M.O.	-20	0	100	-9,05	-9,05	0	0,75	-8,95	-8,85	0,2	0,75

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-11

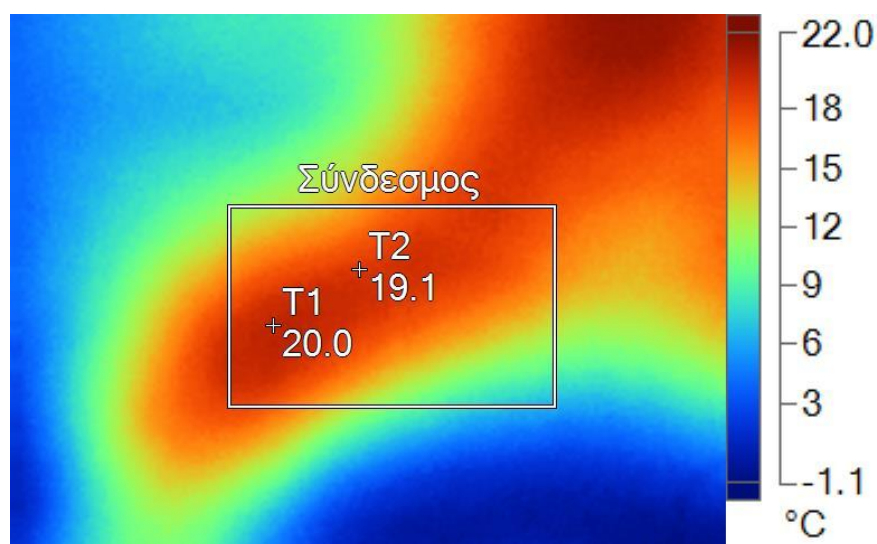
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-12

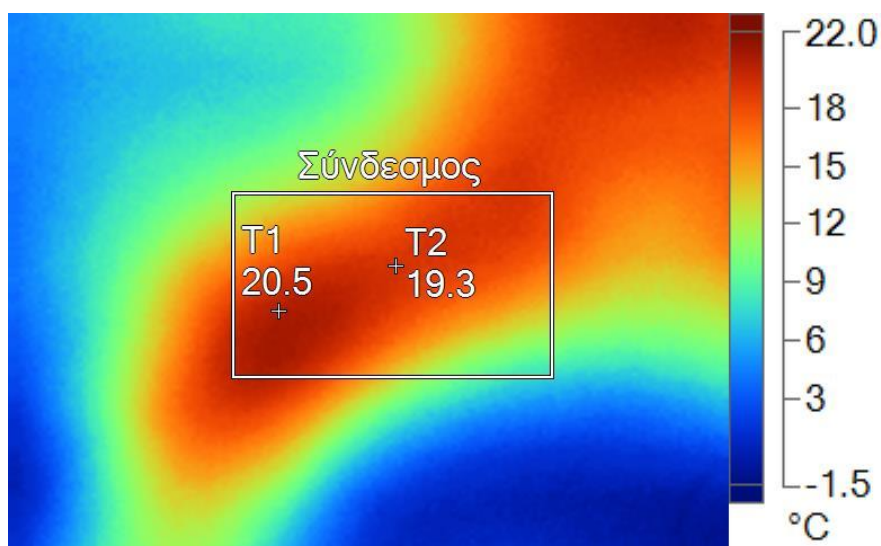
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	200	20	20	0	0,68	19,2	19,1	0,1	0,68
2.	-20	0	200	20,4	20,5	0,1	0,69	19,3	19,3	0	0,69
M.O.	-20	0	200	20,2	20,25	0,05	0,685	19,25	19,2	0,05	0,685

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-13

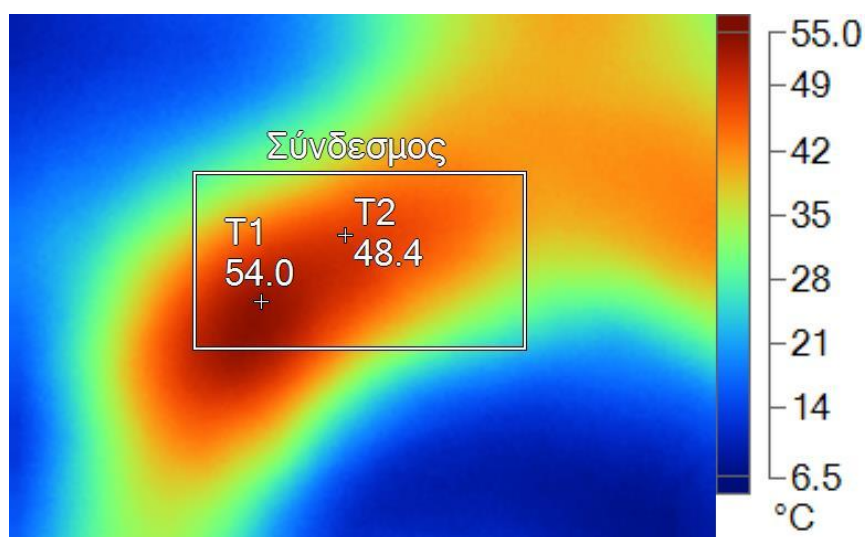
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-14

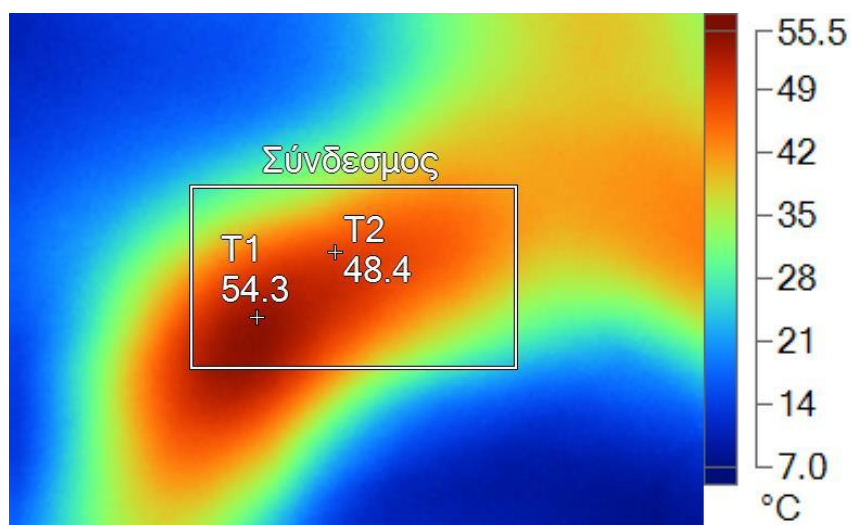
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	300	54	54	0	0,4	48,2	48,4	0,2	0,4
2.	-20	0	300	54,4	54,3	0,1	0,4	48,6	48,4	0,2	0,4
M.O.	-20	0	300	54,2	54,15	0,05	0,4	48,4	48,4	0,2	0,4

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-15

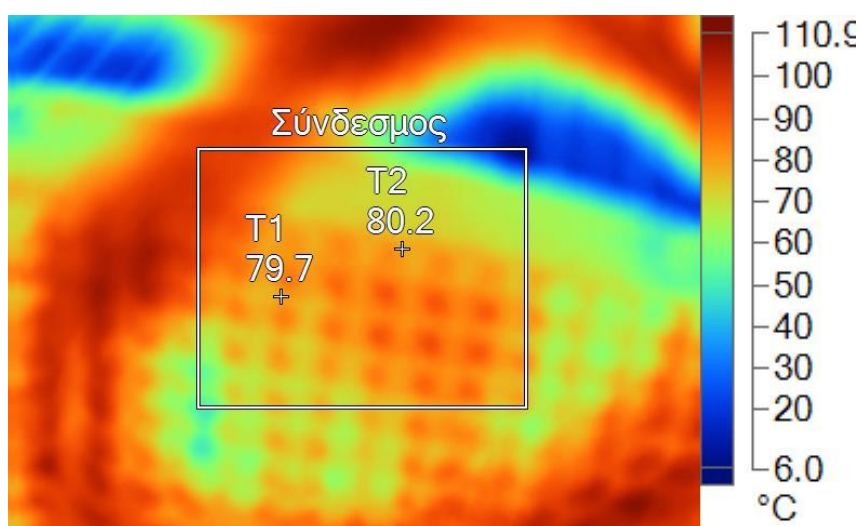
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-16

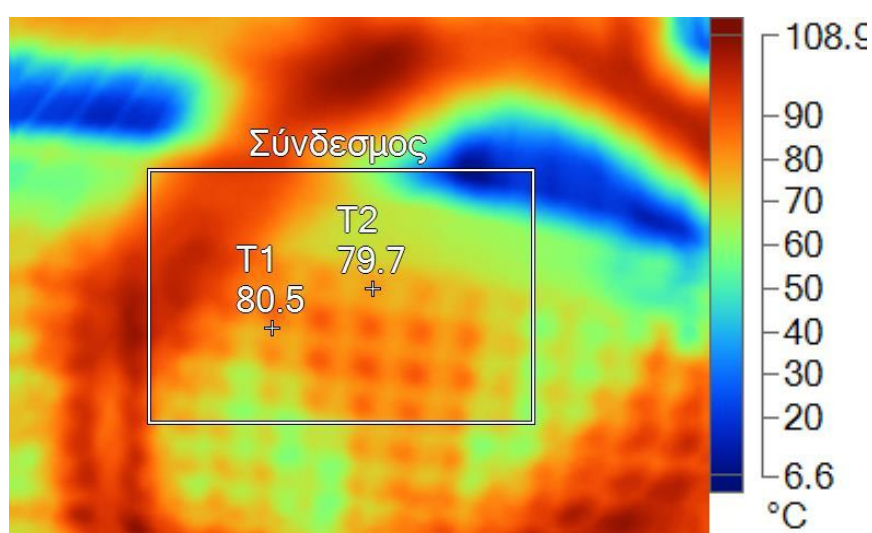
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	0	79,6	79,7	0,1	0,28	80,6	80,2	0,4	0,28
2.	80	60	0	80,1	80,5	0,4	0,28	80,1	79,7	0,4	0,28
M.O.	80	60	0	79,85	80,1	0,25	0,28	48,4	79,95	0,4	0,28

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-17

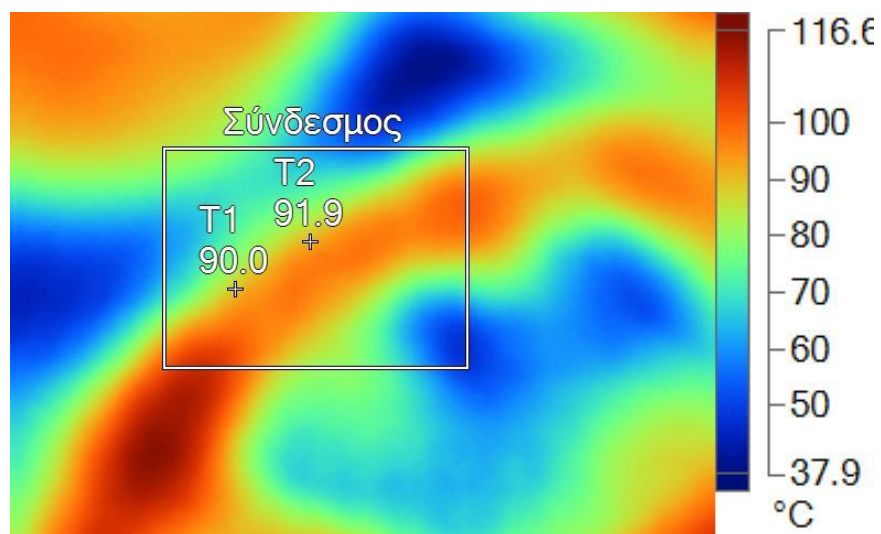
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-18

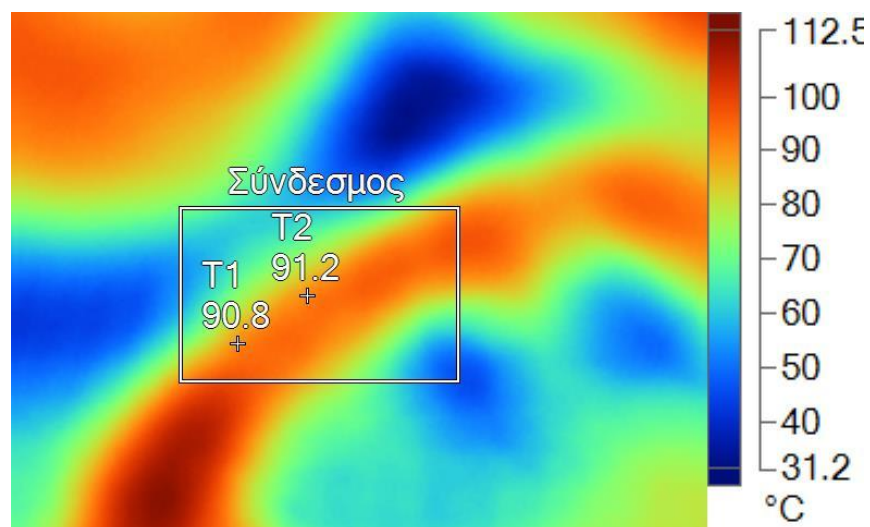
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	100	90,3	90	0,3	0,26	91,6	91,9	0,3	0,26
2.	80	60	100	90,7	90,8	0,1	0,26	91,5	91,2	0,3	0,26
M.O.	80	60	100	90,5	90,4	0,2	0,26	91,55	91,55	0,3	0,26

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-19

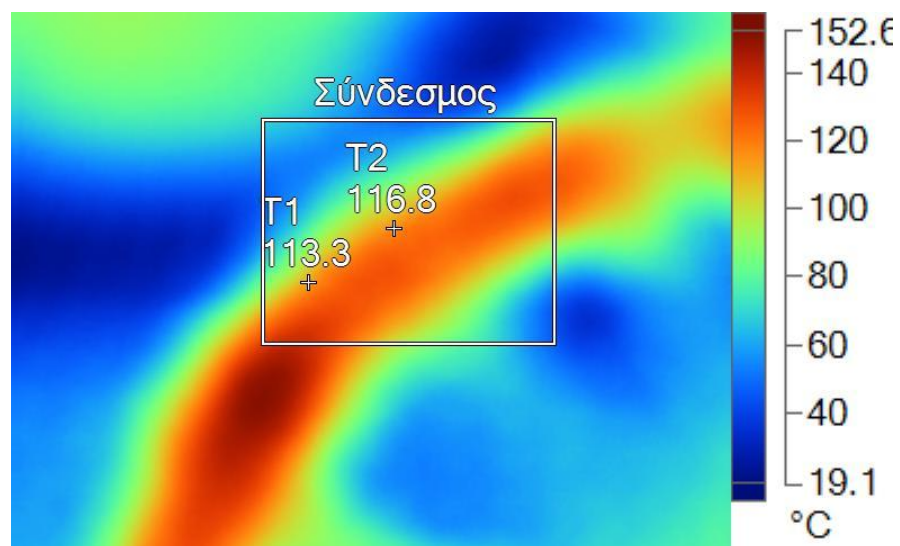
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-20

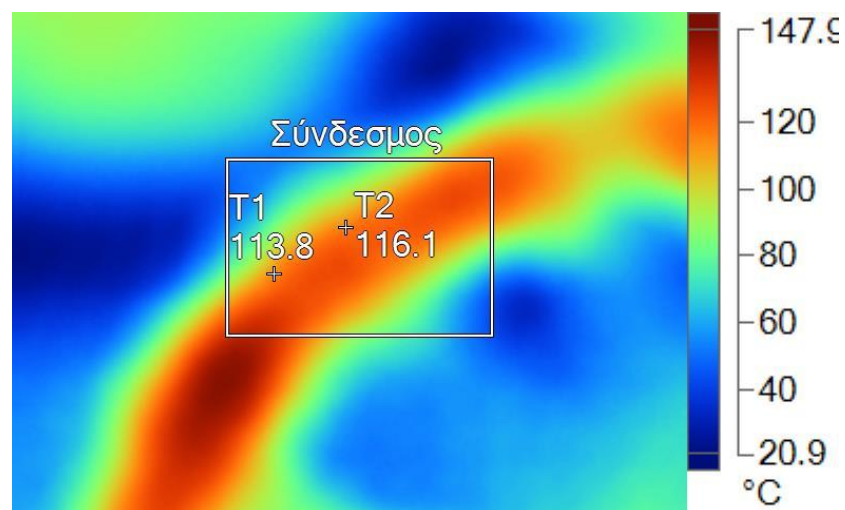
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	200	113,4	113,3	0,1	0,23	116,5	116,8	0,3	0,23
2.	80	60	200	113,3	113,8	0,5	0,23	115,8	116,1	0,3	0,23
M.O.	80	60	200	113,35	113,55	0,3	0,23	116,15	116,45	0,3	0,23

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-21

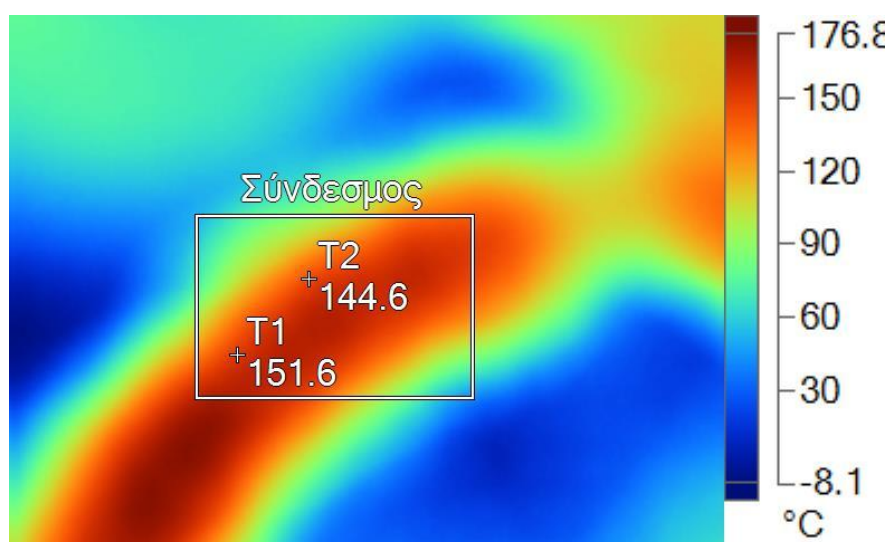
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.1-22

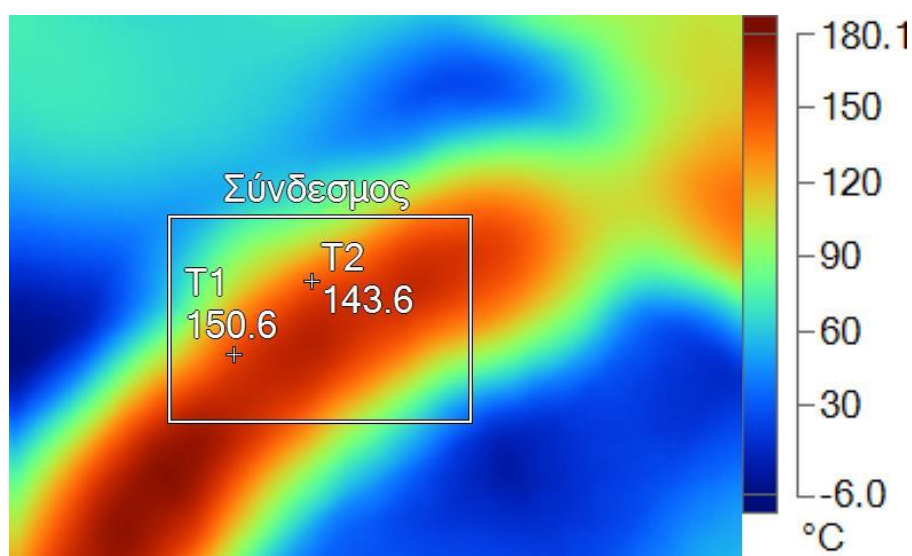
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	300	151,6	151,6	0	0,21	144,5	144,6	0,1	0,21
2.	80	60	300	150,8	150,6	0,2	0,22	143,9	143,6	0,3	0,22
M.O.	80	60	300	151,2	151,1	0,1	0,215	144,2	144,1	0,1	0,215

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.1-23

Μέτρηση 2

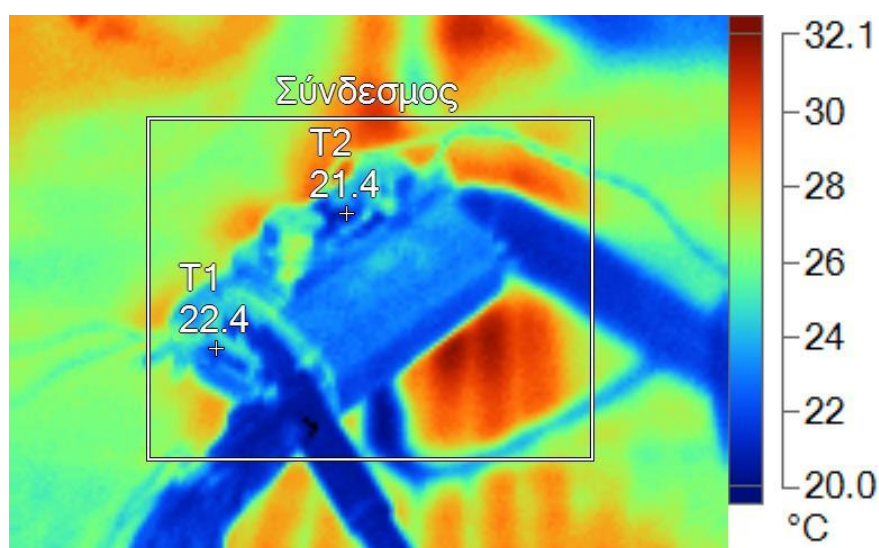


Εικόνα 4.1-24

4.2. Μετρήσεις για το δοκίμιο No.2

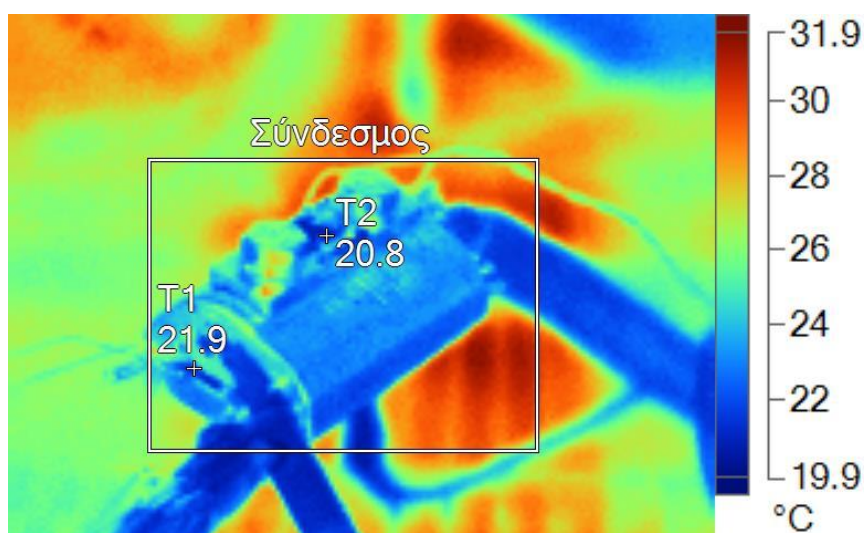
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				T _{pt1}	T ₁	ΔT	ε	T _{pt2}	T ₂	ΔT	ε
1.	20	50	0	22,2	22,4	0,2	0,72	21,3	21,4	0,1	0,72
2.	20	50	0	21,9	21,9	0	0,72	21,2	20,8	0,5	0,72
M.O.	20	50	0	20,3	20,55	0,1	0,72	20,85	21,25	0,3	0,72

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-1

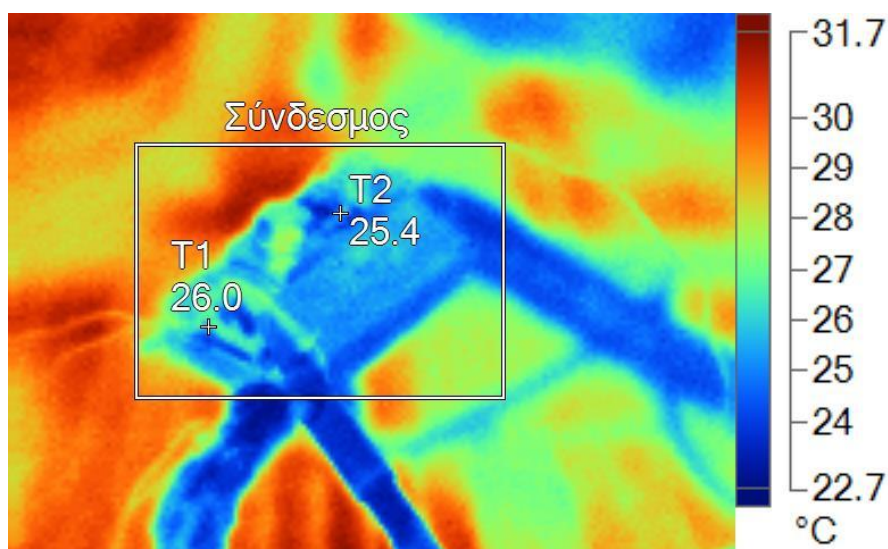
Μέτρηση 2



Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	100	26	26	0	0,65	25,5	25,4	0,1	0,65
2.	20	50	100	26,3	26,2	0,1	0,65	25,8	25,8	0	0,65
M.O.	20	50	100	26,15	26,1	0,05	0,65	25,65	25,6	0,05	0,65

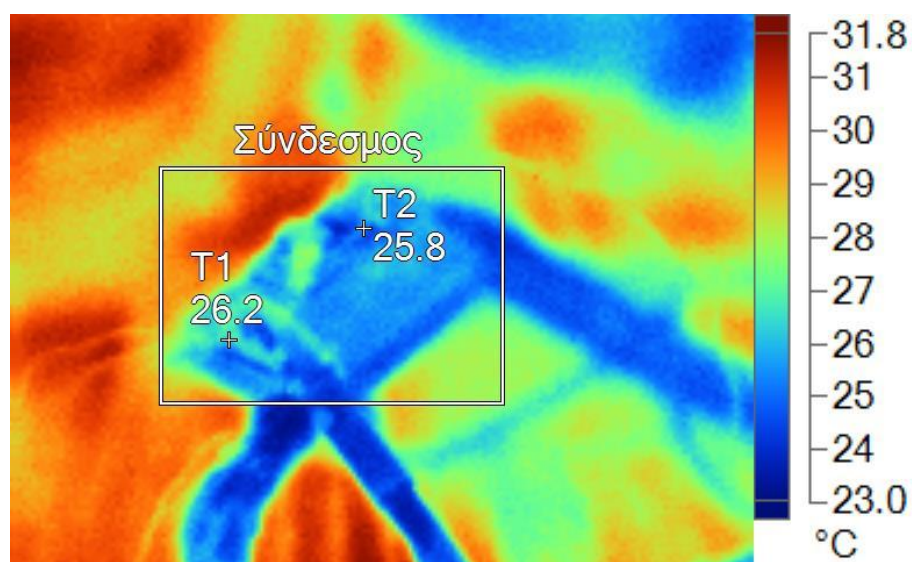
Εικόνα 4.2-1

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-3

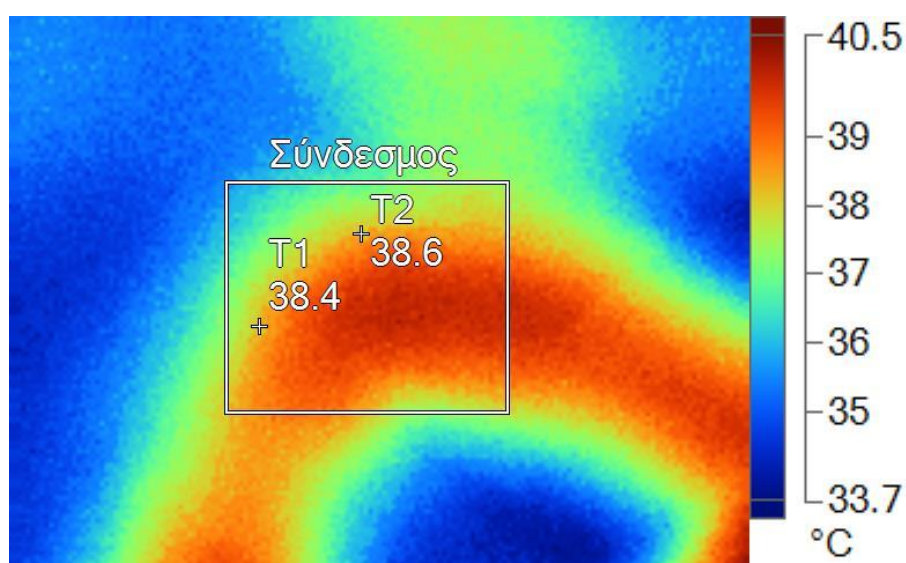
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-4

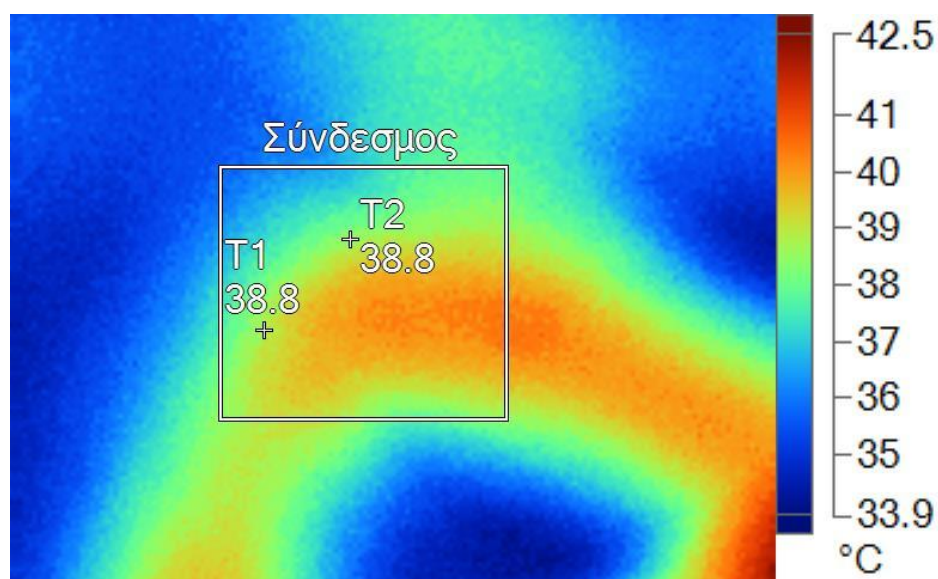
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	200	38,3	38,4	0,1	0,53	38,5	38,6	0,1	0,53
2.	20	50	200	38,8	38,8	0	0,53	38,7	38,8	0,1	0,53
M.O.	20	50	200	38,55	38,6	0,05	0,53	38,6	38,7	0,1	0,53

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-5

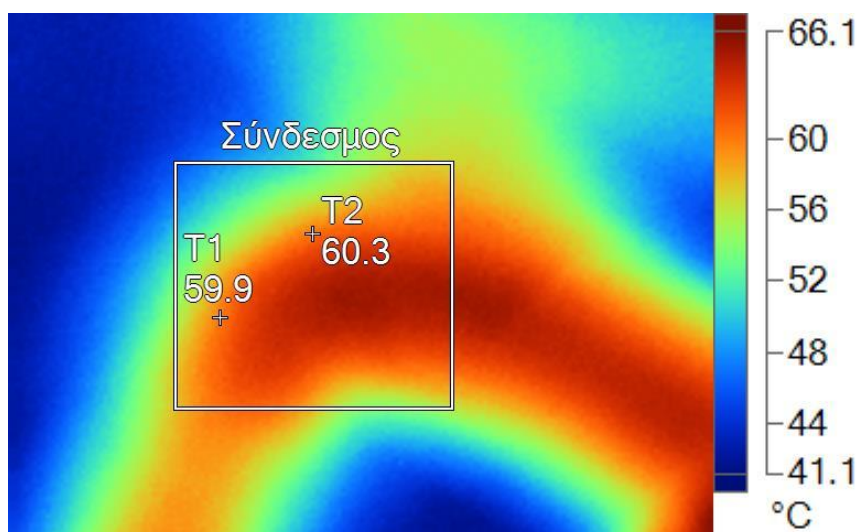
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-6

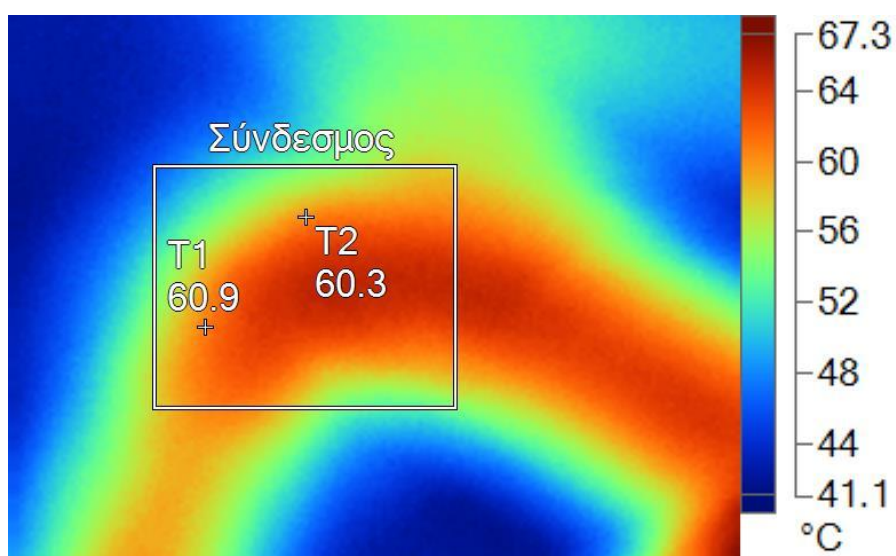
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	20	50	300	59,9	59,9	0	0,35	60,3	60,3	0	0,35
2.	20	50	300	60,7	60,9	0,2	0,35	60,3	60,3	0	0,35
M.O.	20	50	300	60,3	60,4	0,1	0,35	60,3	60,3	0	0,35

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-7

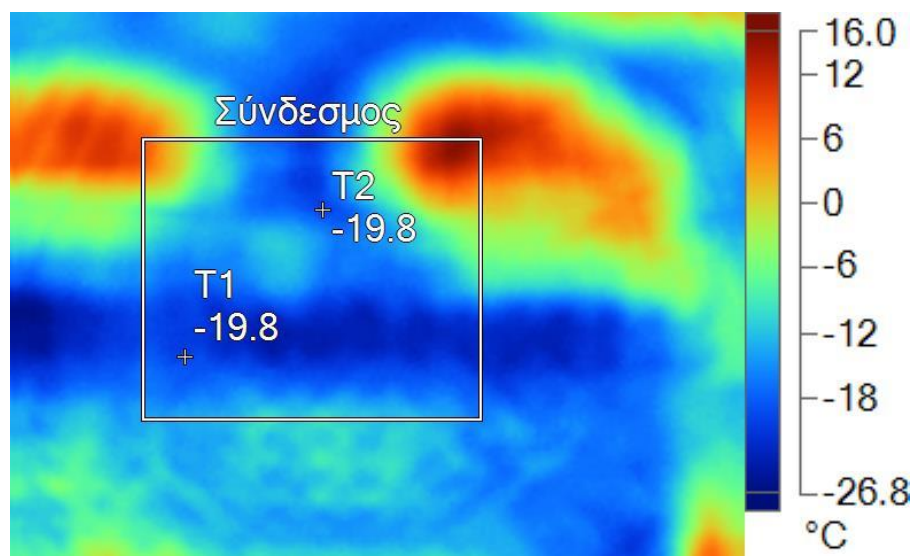
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-8

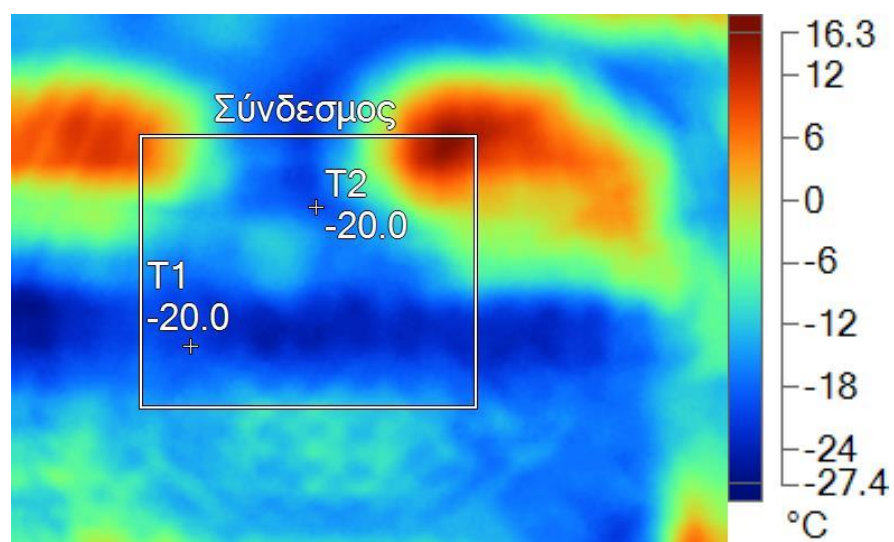
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	0	-19,9	-19,8	0,1	0,86	-19,6	-19,8	0,2	0,86
2.	-20	0	0	-20,1	-20	0,1	0,85	-19,9	-20	0,1	0,85
M.O.	-20	0	0	-20	-19,8	0,1	0,855	-19,75	-19,9	0,15	0,855

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-9

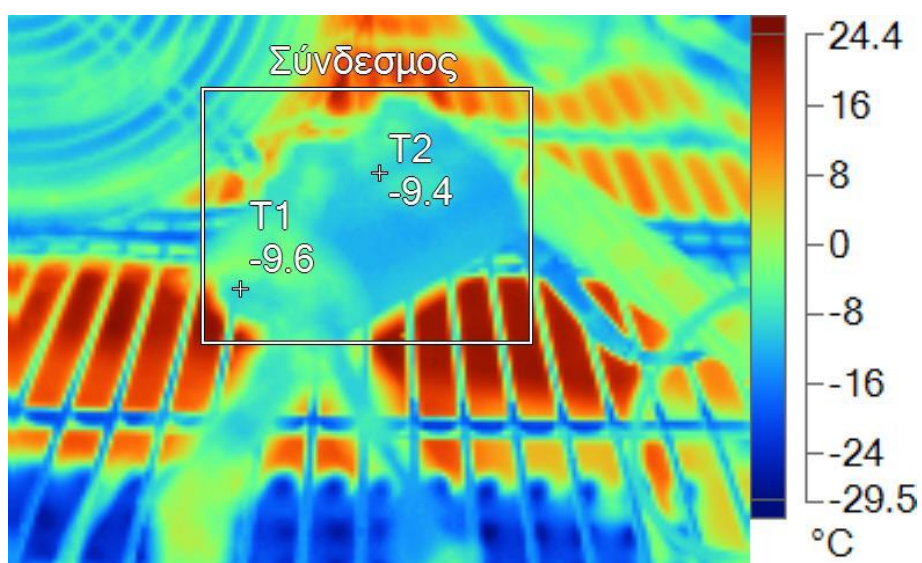
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-10

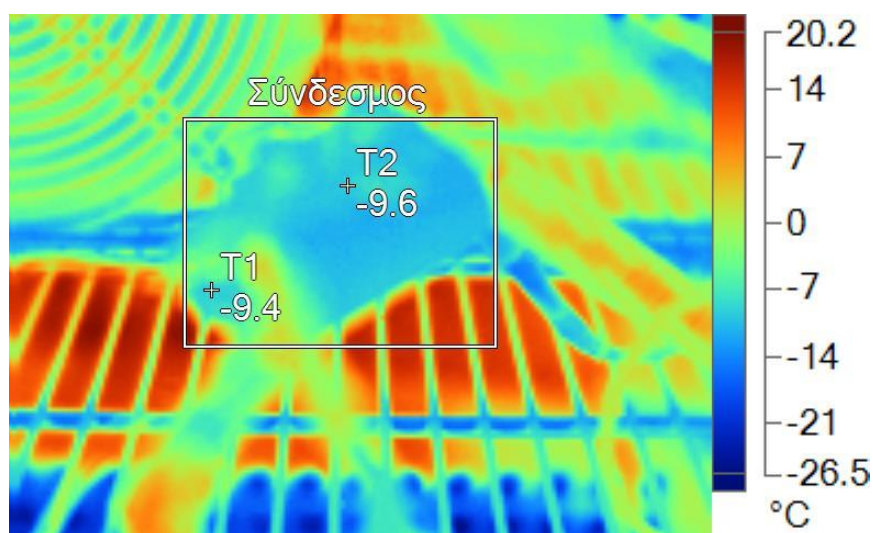
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	100	-9,6	-9,6	0	0,78	-9,6	-9,4	0,2	0,78
2.	-20	0	100	-9,7	-9,4	0,3	0,78	-9,5	-9,6	0,1	0,78
M.O.	-20	0	100	-9,65	-9,5	0,15	0,78	-9,,55	-9,5	0,15	0,78

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-11

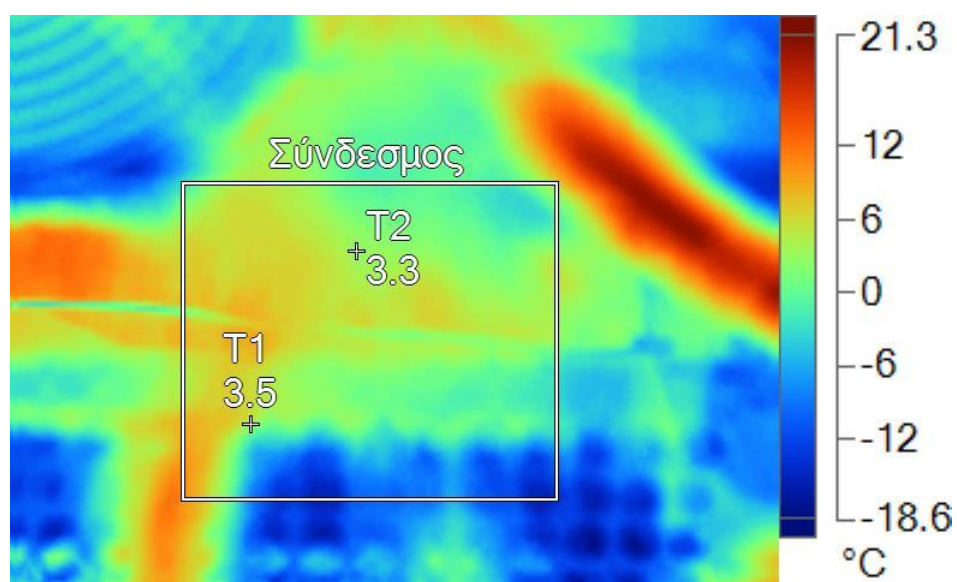
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-12

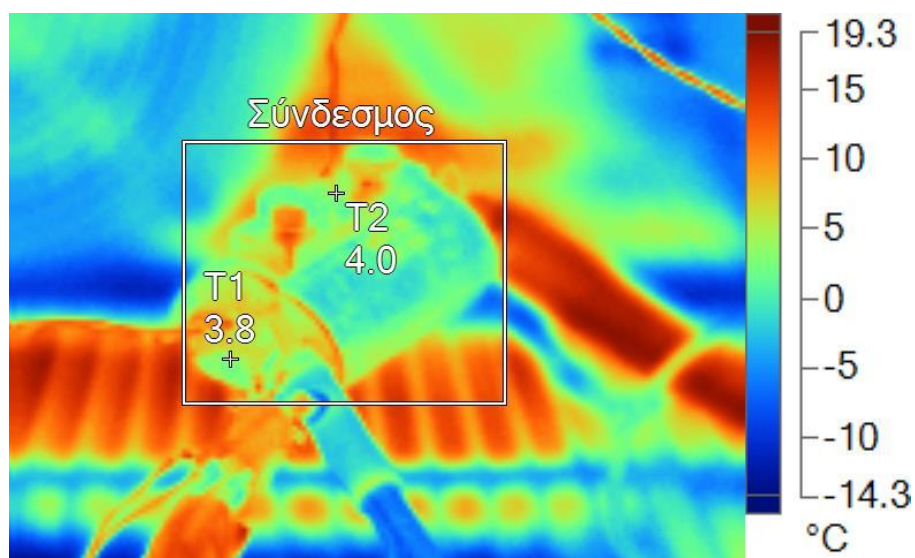
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	200	3,6	3,5	0,1	0,75	3,5	3,3	0,2	0,75
2.	-20	0	200	3,6	3,8	0,2	0,75	3,8	4	0,2	0,75
M.O.	-20	0	200	3,6	3,65	0,15	0,75	3,65	3,65	0,2	0,75

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-13

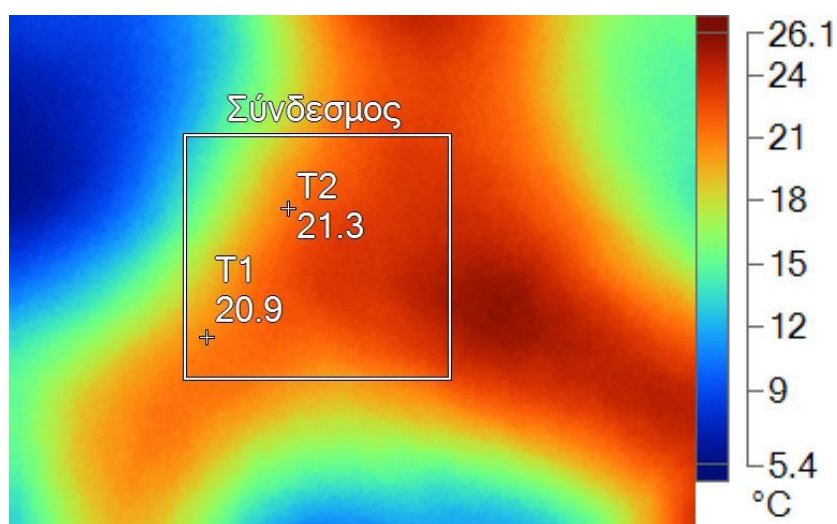
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-14

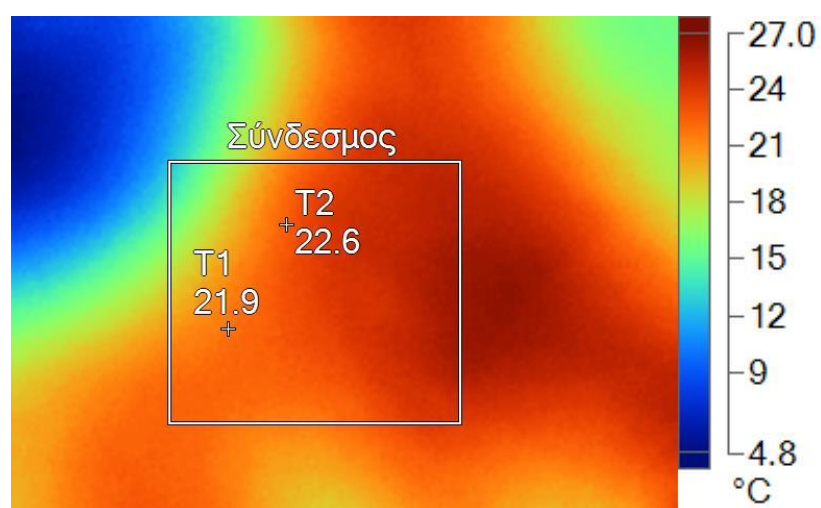
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	-20	0	300	21,3	20,9	0,4	0,71	20,9	21,3	0,4	0,71
2.	-20	0	300	21,9	21,9	0	0,72	22,6	22,6	0	0,72
M.O.	-20	0	300	21,6	21,4	0,2	0,715	21,75	21,95	0,2	0,715

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-15

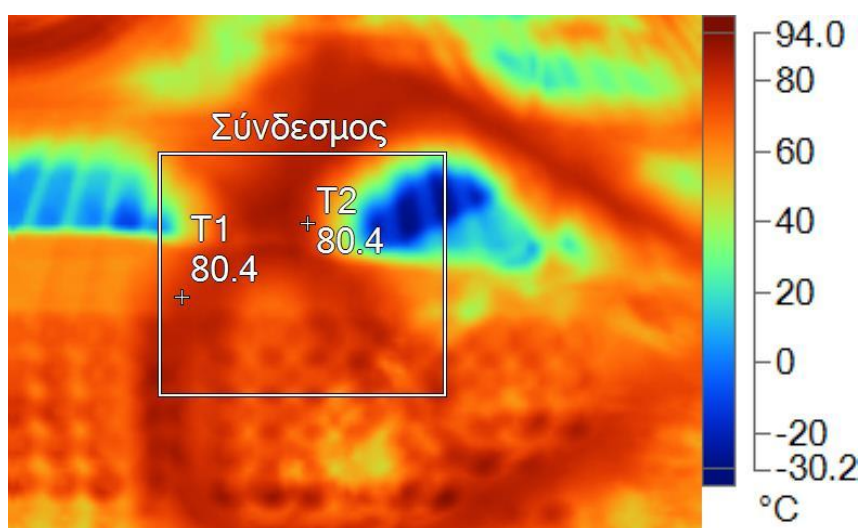
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-16

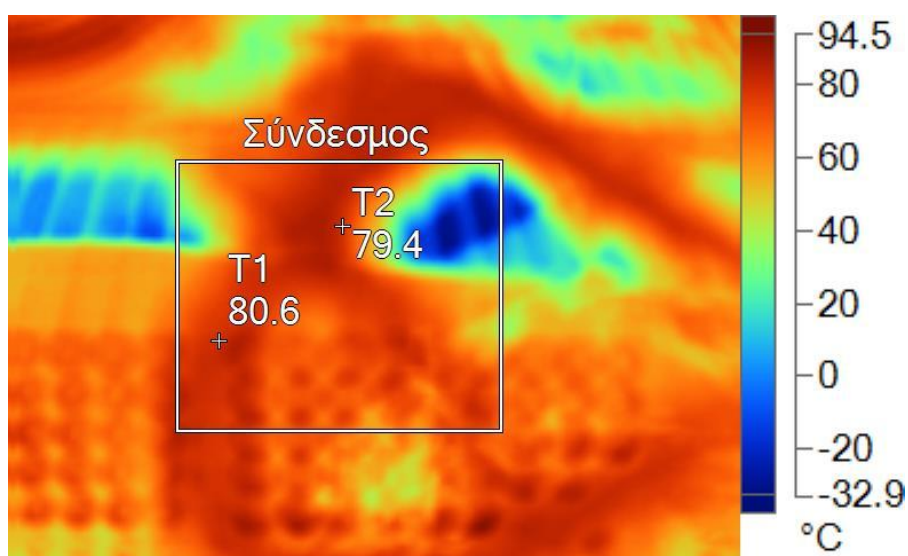
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				T _{pt1}	T ₁	ΔT	ε	T _{pt2}	T ₂	ΔT	ε
1.	80	60	0	80,5	80,4	0,1	0,34	79,9	80,4	0,5	0,34
2.	80	60	0	80,6	80,6	0	0,34	79,7	79,4	0,3	0,34
M.O.	80	60	0	80,55	80,5	0,5	0,34	79,8	79,9	0,4	0,34

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-17

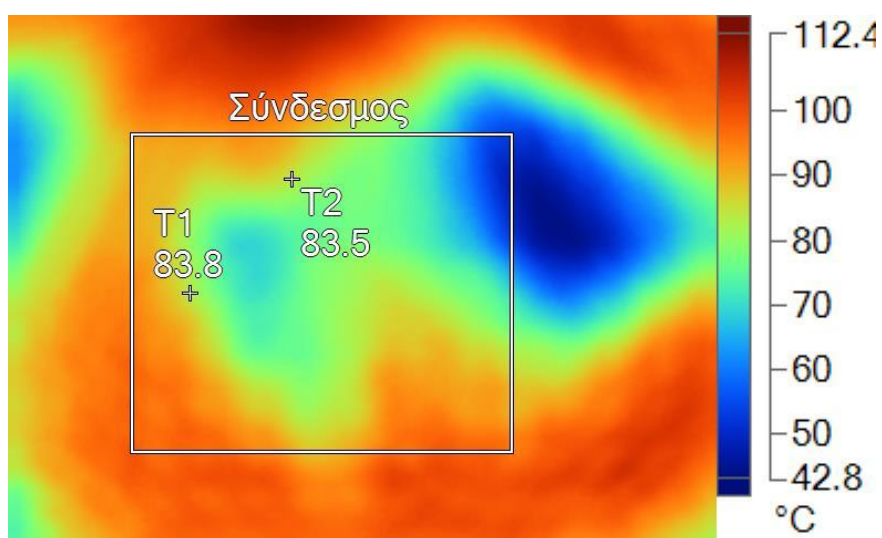
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-18

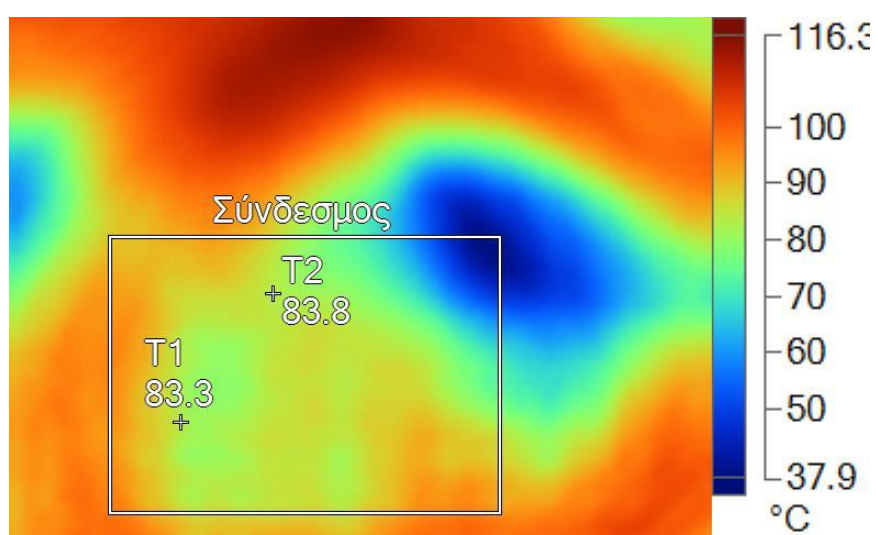
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	100	83,7	83,8	0,1	0,34	83	83,5	0,5	0,34
2.	80	60	100	83,6	83,3	0,3	0,34	83,5	83,8	0,3	0,34
M.O.	80	60	100	83,65	83,55	0,2	0,34	83,25	83,65	0,4	0,34

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-19

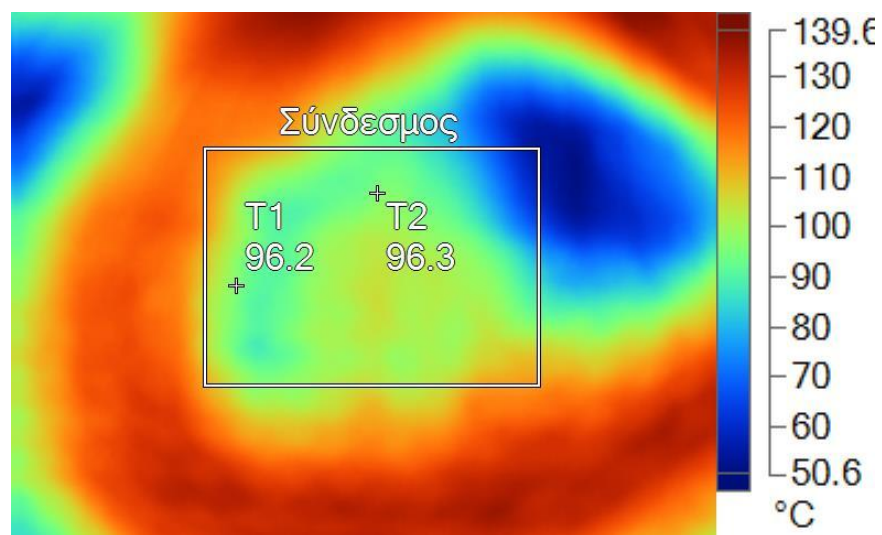
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-20

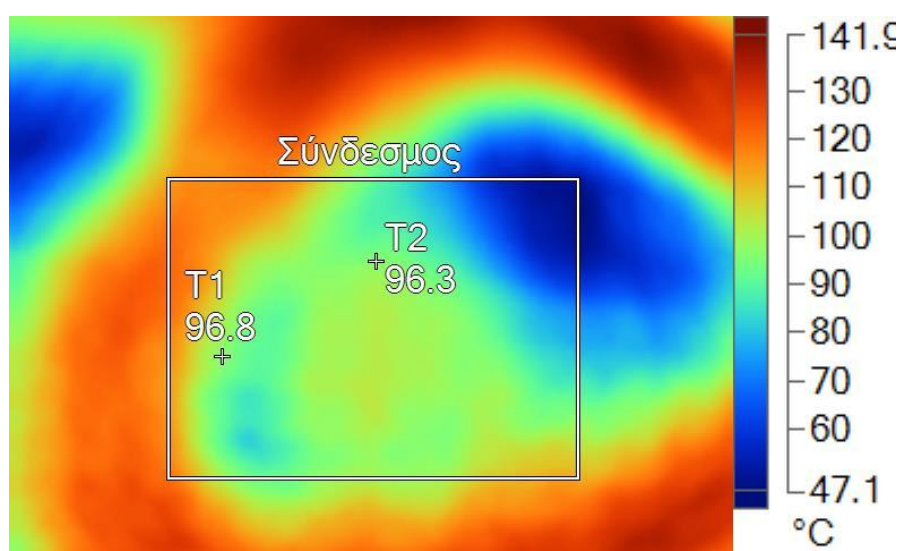
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				Tpt1	T1	ΔT	ε	Tpt2	T2	ΔT	ε
1.	80	60	200	96,3	96,2	0,1	0,32	96,6	96,3	0,3	0,32
2.	80	60	200	96,8	96,8	0	0,32	96,2	96,3	0,1	0,32
M.O.	80	60	200	96,55	96,5	0,05	0,32	96,4	96,3	0,2	0,32

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-21

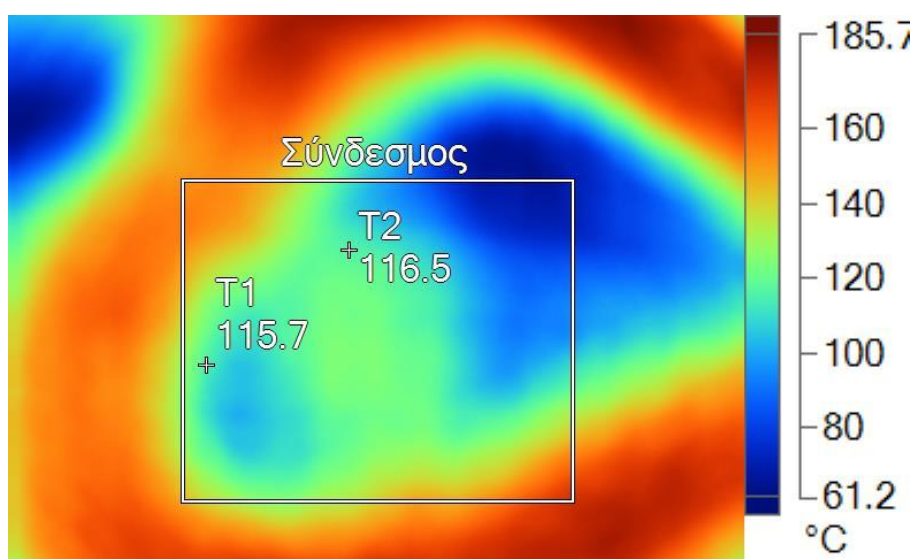
Μέτρηση 2



Εικόνα 4.2-22

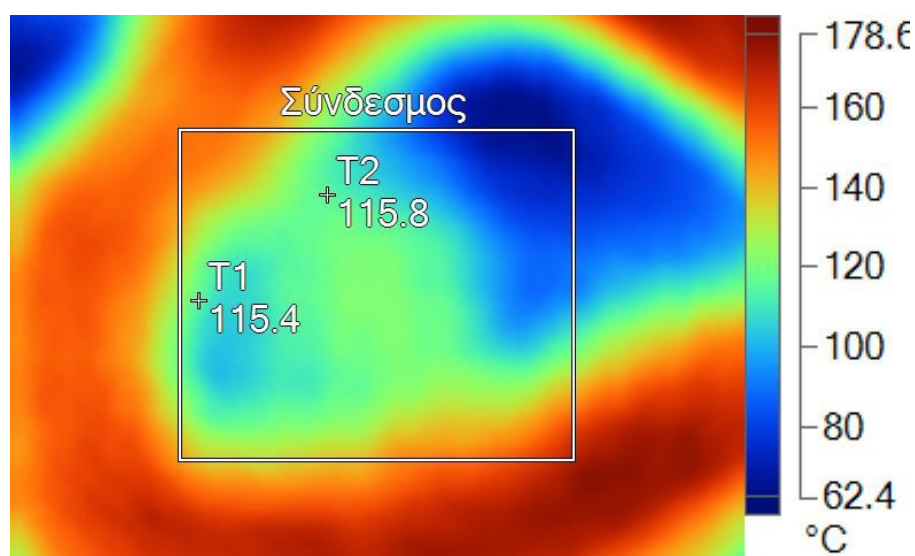
Μέτρηση	Θερμ. Θαλ. (°C)	Υγρ. (%)	Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία (°C)							
				Σημείο 1				Σημείο 2			
				T _{pt1(B)}	T ₁	ΔT	ε	T _{pt2(R)}	T ₂	ΔT	ε
1 (19391)	80	60	300	115,6	115,7	0,1	0,28	116,3	116,5	0,2	0,28
2 (19392)	80	60	300	115,4	115,4	0	0,28	115,8	115,8	0	0,28
M.O.	80	60	300	115,5	115,55	0,05	0,28	116,05	116,15	0,1	0,28

Μέτρηση 1



Εικόνα 4.2-23

Μέτρηση 2



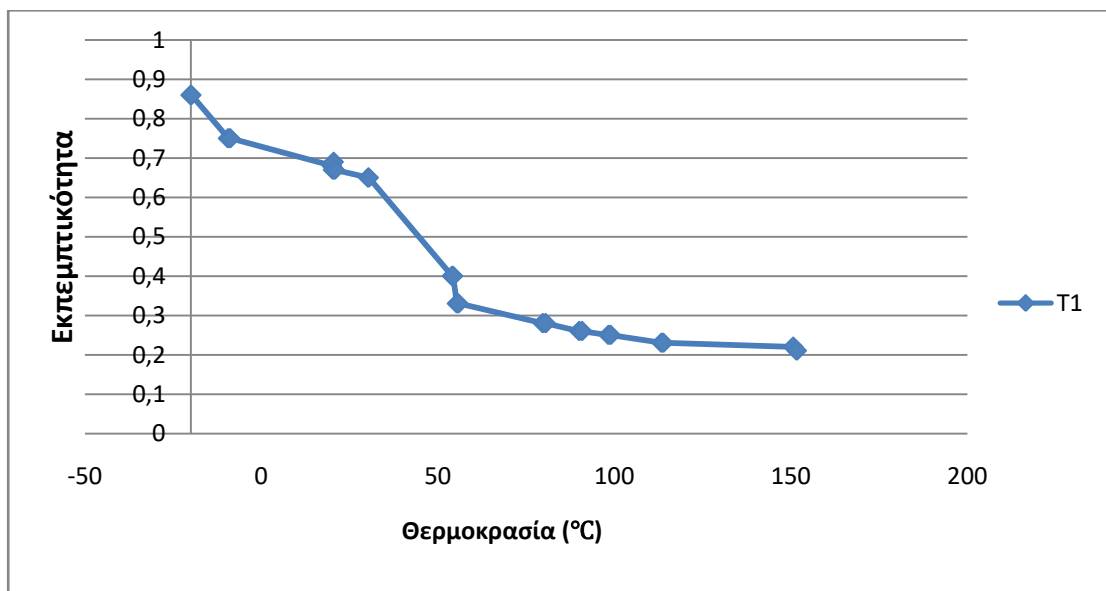
Εικόνα 4.2-24

5. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων – Σχόλια – Συμπεράσματα

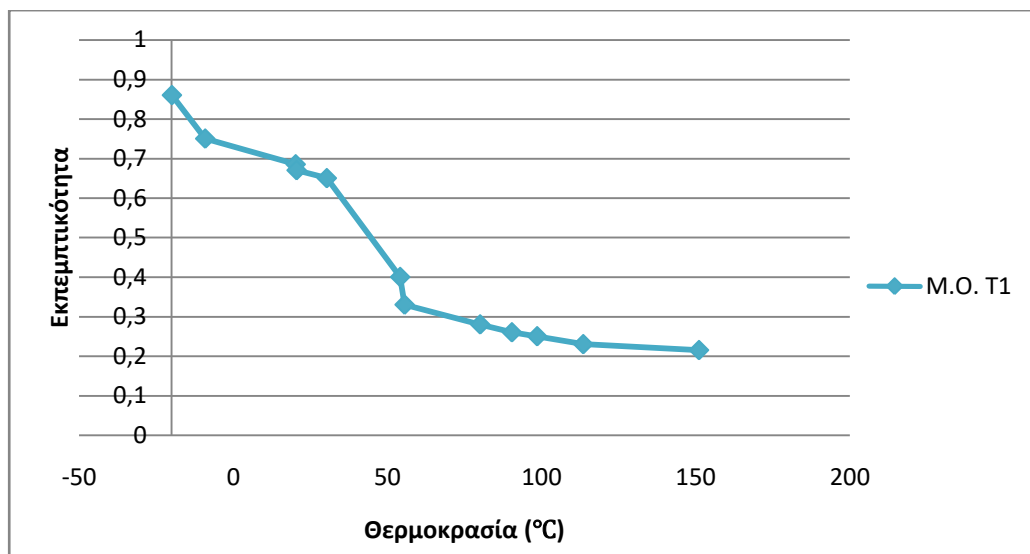
5.1. Επεξεργασία μετρήσεων

Για τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας του υλικού, η οποία εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις απαιτήσεις μεταφοράς ισχύος, στην τιμή της εκπεμπτικότητας, με βάση τις μετρήσεις των θερμοκρασιών στα δύο σημεία των δοκιμών, προκύπτουν τα διαγράμματα εκπεμπτικότητας- θερμοκρασίας του κάθε σημείου καθώς και ο μέσος όρος αυτών.

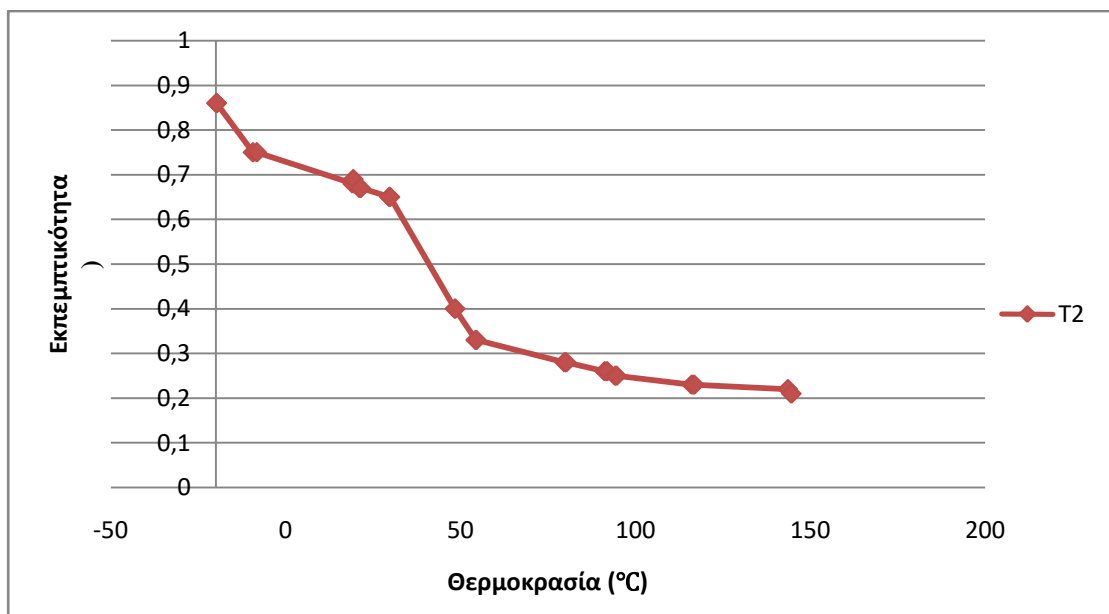
5.1.1. Διαγράμματα για το δοκίμιο Νο.1



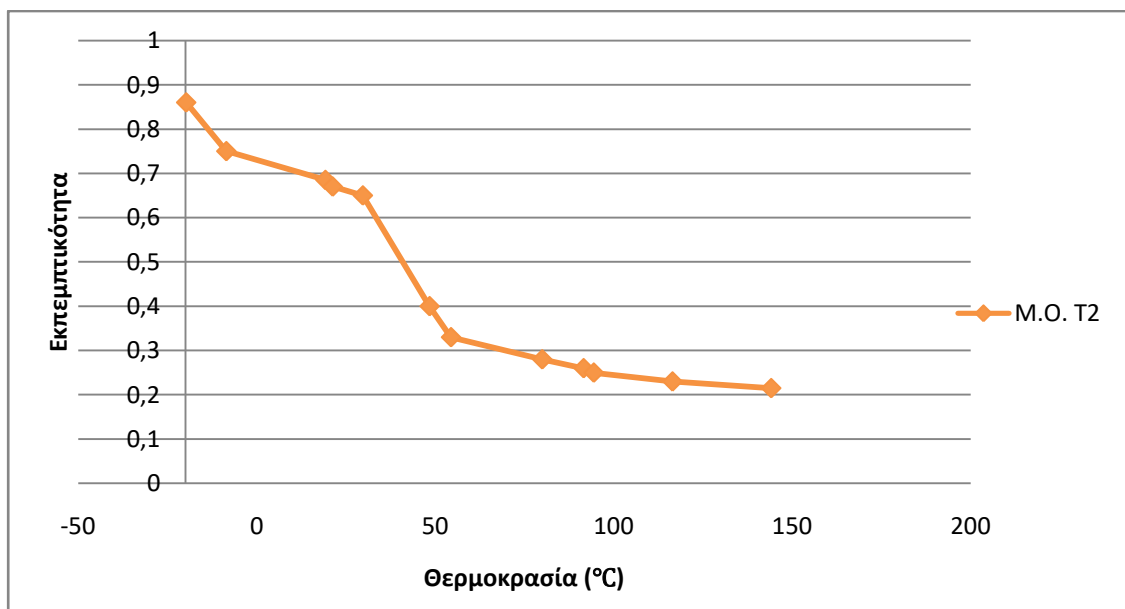
Γράφημα 5.1.1-1: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στο σημείο που βρίσκεται πλάι στο σύνδεσμο (T1)



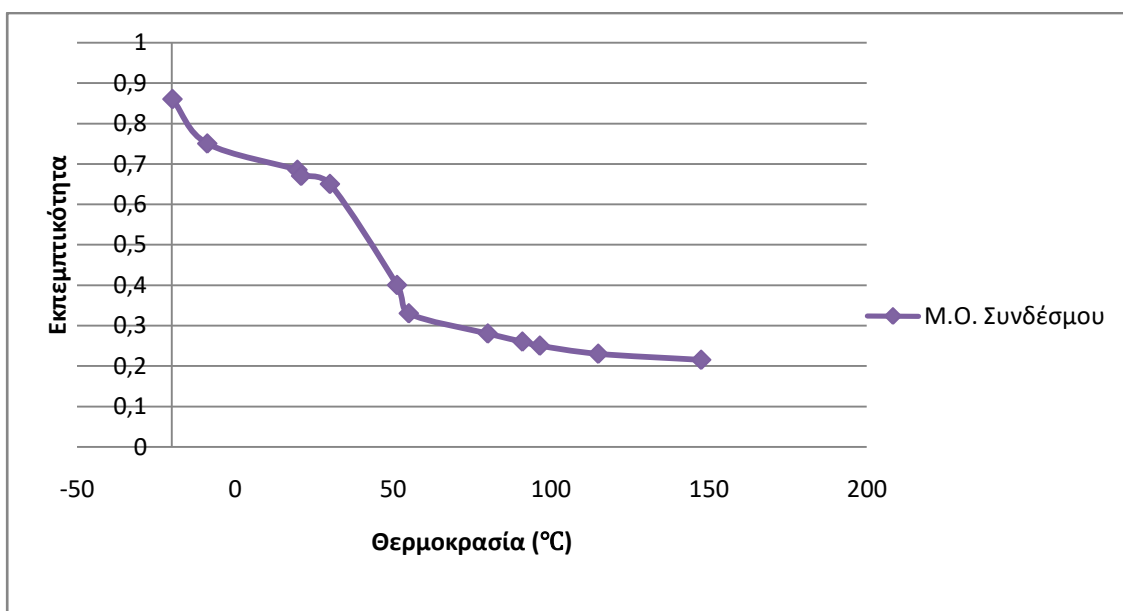
Γράφημα 5.1.1-2: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών στο σημείο που βρίσκεται πλάι στο σύνδεσμο (T1)



Γράφημα 5.1.1-3: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στο σημείο που βρίσκεται στο κέντρο του συνδέσμου (T2)

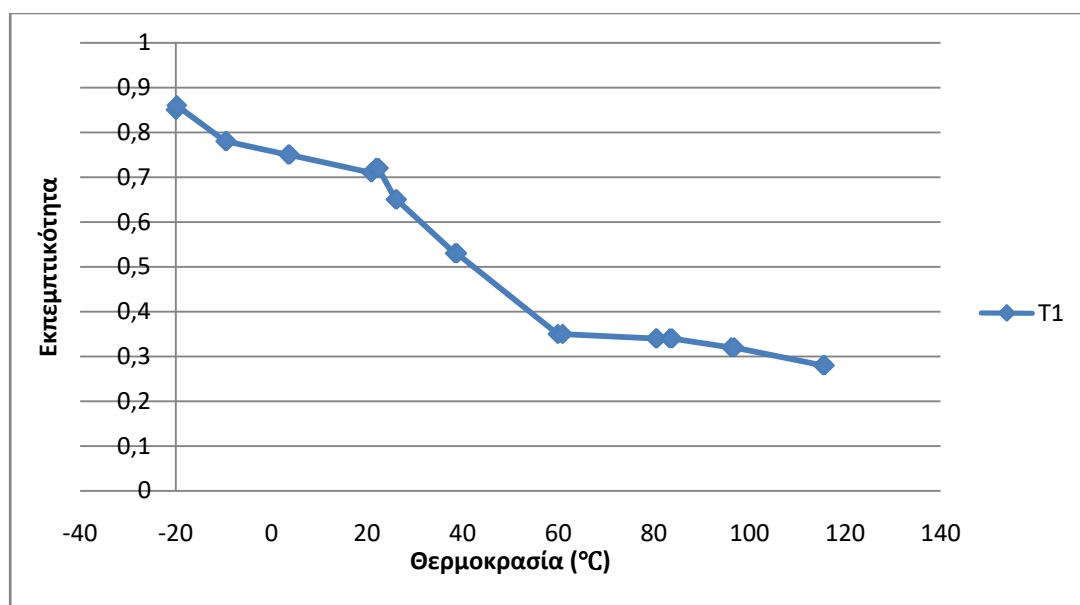


Γράφημα 5.1.1-4: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών στο σημείο που βρίσκεται στο κέντρο του συνδέσμου (T2)

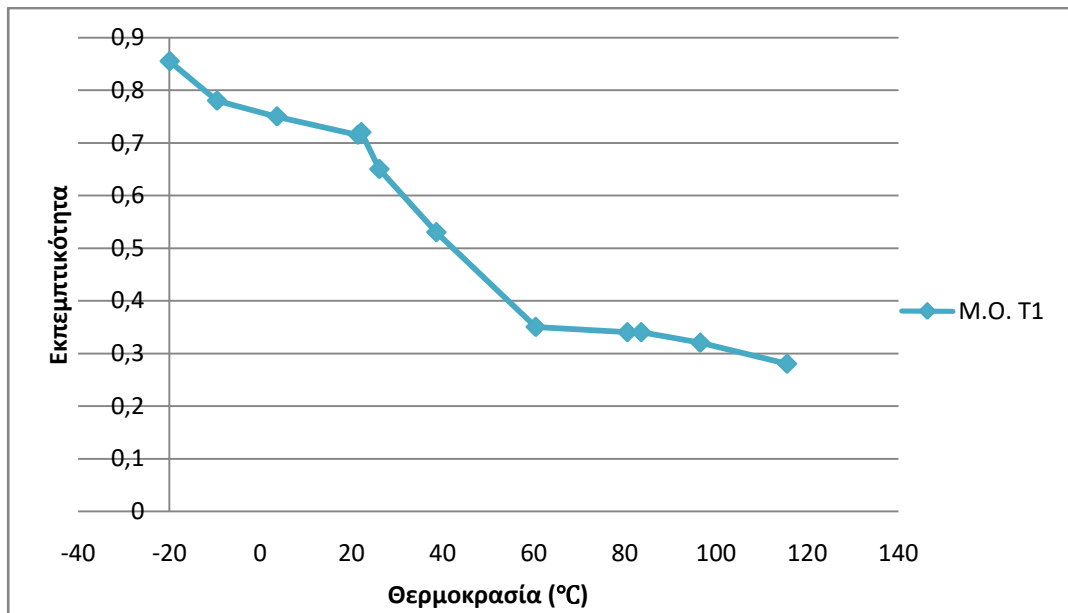


Γράφημα 5.1.1-5: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών των δύο σημείων

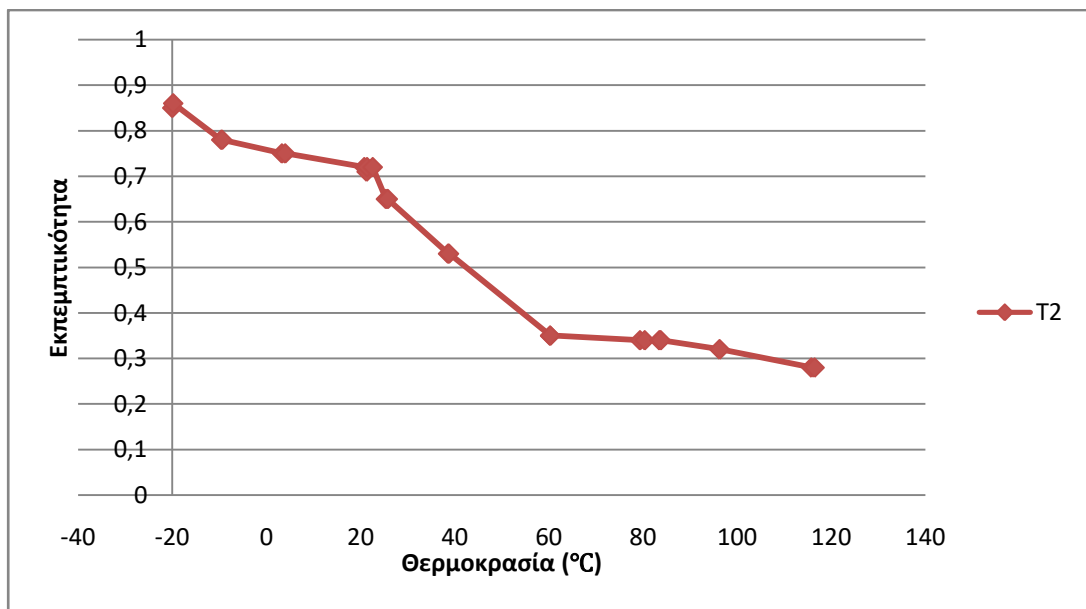
5.1.2. Διαγράμματα για το δοκίμιο Νο.2



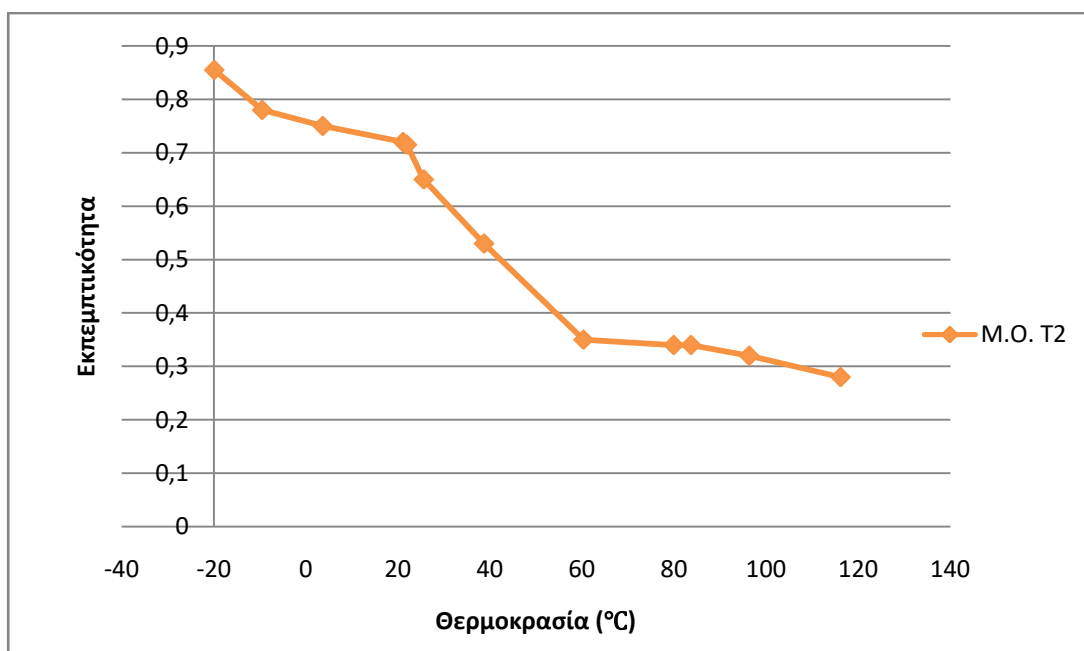
Γράφημα 5.1.2-1: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στο σημείο που βρίσκεται πλάι στο σύνδεσμο (T1)



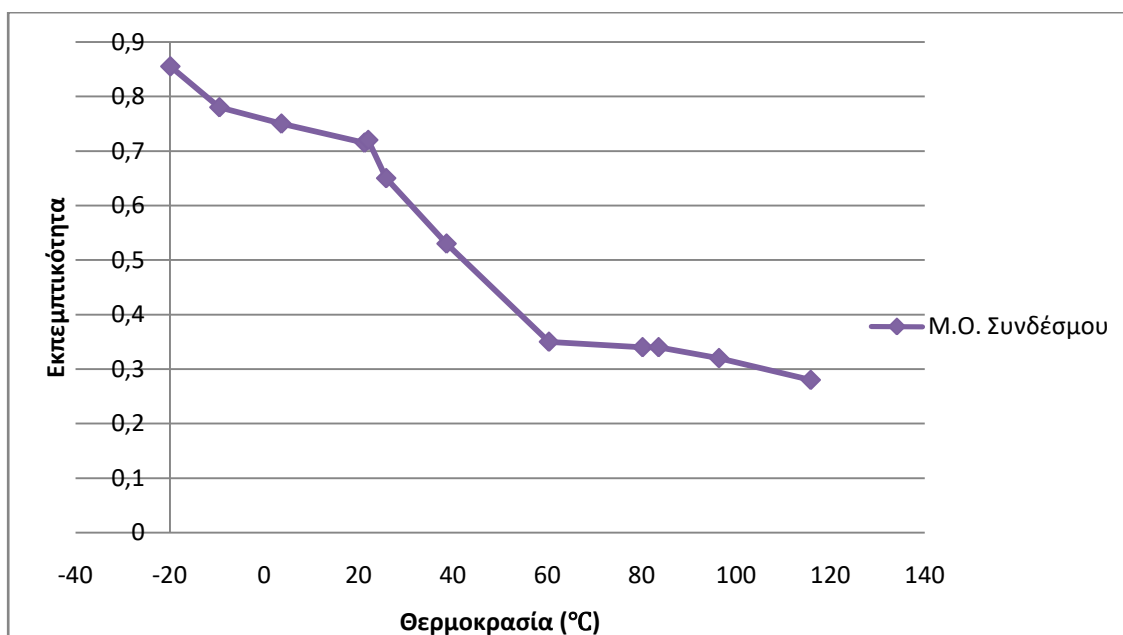
Γράφημα 5.1.2-2: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών στο σημείο που βρίσκεται πλάι στο σύνδεσμο (T1)



Γράφημα 5.1.2-3: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στο σημείο που βρίσκεται στο κέντρο του συνδέσμου (T2)



Γράφημα 5.1.2-4: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών στο σημείο που βρίσκεται στο κέντρο του συνδέσμου (T2)



Γράφημα 5.1.2-5: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας σε συνάρτηση με τον Μέσο Όρο των θερμοκρασιών των δύο σημείων

5.2. Σχολιασμός των μετρήσεων – Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι και για τα δύο δοκίμια η καμπύλη έχει την ίδια μορφή ποιοτικά, δηλαδή καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία τους μειώνεται η τιμή της εκπεμπτικότητας, όπως φαίνεται στα γραφήματα. Αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον η εκπεμπτικότητα μιας επιφάνειας είναι το πηλίκο της ακτινοβολίας της σε μια δεδομένη θερμοκρασία προς την ακτινοβολία μιας επιφάνειας που απορροφά όλη την ακτινοβολία, στην ίδια θερμοκρασία. Επομένως, όσο πιο χαμηλή είναι η θερμοκρασία μιας επιφάνειας τόσο λιγότερη θερμική ακτινοβολία εκπέμπει με αποτέλεσμα η εκπεμπτικότητα να παίρνει τιμές που τείνουν στο 1, ενώ αντίθετα οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν αύξηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια έχοντας ως συνέπεια την μείωση των τιμών της εκπεμπτικότητας, οι οποίες πλησιάζουν σε τιμές κοντά στο μηδέν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω μεγάλης διάρκειας κάθε μέτρησης για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία στις εκάστοτε συνθήκες, λόγω επαγωγής θερμότητας ο σύνδεσμος έτεινε να αποκτήσει ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και αυτό επιβεβαιώνεται επίσης και από όλα τα θερμογραφήματα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να μελετήσουμε ολόκληρο τον σύνδεσμο και να προσεγγίσουμε την συνολική τιμή της εκπεμπτικότητας της επιφάνειας του για τις συνθήκες περιβάλλοντος και ρεύματος διέλευσης που μελετήσαμε. Οι τιμές της θερμοκρασίας στα σημεία του συνδέσμου που μετρήθηκαν με την θερμοκάμερα παρουσίασαν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, οι οποίες οφείλονται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων που όρισαν και την απόσταση τοποθέτησης των αισθητήρων από την πραγματική διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα από τους αγωγούς και μέσα στον σύνδεσμο. Επομένως προέκυψαν τα Γραφήματα 5.1.1-5 και 5.1.2-5, τα οποία αναπαριστούν τους μέσους όρους θερμοκρασιών και των δύο σημείων, που αντιστοιχούν ουσιαστικά στην θερμοκρασία του συνδέσμου, συναρτήσει της εκπεμπτικότητας.

Εν κατακλείδι, με δεδομένο την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ρεύμα διέλευσης του συνδέσμου, μπορούμε να προσεγγίσουμε την τιμή της εκπεμπτικότητας, ώστε να έχουμε την δυνατότητα να την χρησιμοποιήσουμε για τον έλεγχο μέσω θερμοκάμερας, ηλεκτρικών επαφών ίδιου τύπου με αυτών που μελετήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία. Για τις συνθήκες των μετρήσεων των δύο δοκιμίων, που μελετήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες τιμών της εκπεμπτικότητας (5.2-1 και 5.2.-2).

- Δοκίμιο No.1

Θερμ. Περιβ. (°C)	Ρεύμα I (A)	Εκπεμπτικότητα ε
-20	0	0,86
-20	100	0,75
-20	200	0,69
-20	300	0,4
20	0	0,67
20	100	0,65
20	200	0,33
20	300	0,25
80	0	0,28
80	100	0,26
80	200	0,23
80	300	0,22

Πίνακας 5.2-1: Πίνακας εύρεσης τιμής εκπεμπτικότητας με δεδομένα την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ρεύμα διέλευσης του συνδέσμου No.1

- Δοκίμιο No.2

Θερμ. Περιβ. (°C)	Ρεύμα I (A)	Εκπεμπτικότητα ε
-20	0	0,86
-20	100	0,78
-20	200	0,75
-20	300	0,72
20	0	0,72
20	100	0,65
20	200	0,53
20	300	0,35
80	0	0,34
80	100	0,34
80	200	0,32
80	300	0,28

Πίνακας 5.2-2: Πίνακας εύρεσης τιμής εκπεμπτικότητας με δεδομένα την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ρεύμα διέλευσης του συνδέσμου No.2

Βιβλιογραφία

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος ‘Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά.’ Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2004.
2. Π.Δ. Μπούρκας Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1998.
3. Paul G. Slade ‘Electrical contacts: Principles and Applications’ Marcel Dekker Editions, Unit. States of America, 1999.
4. R. Holm ‘Electric contacts: Theory and applications’ 4th Edition Springer-Verlag, Germany, 2000.
5. Πολυκράτη Αικατερίνη ‘Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις’ Διδακτορική διατριβή. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
6. Karagiannopoulos C.G., Bourkas P.D., Dervos C.T.: “Measurements on contacts of no-load switches, using different currents and clamping spring force values” Pro.Int.Applied Modeling and Simulations, Lugano, p.94-97, 1990.
7. A.Polykrati, M. Paisios, K. Karagiannopoulos, P. Bourkas: ‘Model for temperature estimation of electric couplings suffering heavy lightning currents’, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, Jan 2004.
8. A.D. Polykrati, N.E. Koungelis, M.P. Paisios, P.T. Tsarabaris, P. D. Bourkas ‘Evaluation of the reliability of electrical screw couplings of lightning Protection systems’ Int. Conference on Power and Energy Systems (EuroPES) Rhodes, Greece , 28-30 June, 2004.
9. Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, and Nikolai K. Myshkin ‘Electrical Contacts, Fundamentals, Applications and Technology ’
10. Λυράκης Εμμανουήλ, «Μέτρηση του ονομαστικού ρεύματος σε στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους για γυμνούς αγωγούς ACSR» Διπλωματική εργασία, Ιούνιος 2013
11. Καρατζάς – Πλιάκας Αντώνιος, «Θερμική καταπόνηση για διάφορες ροπές σύσφιξης σε σφικτήρα διατομής 35mm² εναέριου δικτύου μέσης τάσης.» Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2012
12. Φώτης Τσουκαλής, ‘Η θερμογραφία υπέρυθρων ως διαγνωστικό μέσο για την προβλεπτική συντήρηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού’, Τεχνικά Χρονικά, Μάρτιος-Απρίλιος 2005
13. Π. Ν. Μπότσαρης, ‘Προληπτική συντήρηση και υπέρυθρη θερμογραφία’, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας
14. Βασίλειος Κ. Τσόλκας, Στυλιανός Α. Τυρέκογλου, ‘Μετρήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας των μετασχηματιστών του δικτύου διανομής’, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2008.
15. Νικόλαος Β. Κοντογιάννης, ‘Διατάξεις μέτρησης του δείκτη εκπομπής των υλικών’, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, Μάιος 2011.
16. Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik, ‘Infrared Thermography: Errors and Uncertainties’, John Wiley & Sons Ltd, 2009, ISBN 978-0-470-74718-6.
17. Otwin Breitenstein, Wilhelm Warta, Martin Langenkamp, ‘Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials’, Springer Series in Advanced Microelectronics, Vol. 10, 2010, ISBN 978-3-642-02416-0.
18. S. Dudzik, ‘A simple method for defect area detection using active thermography’, OPTO-ELECTRONICS REVIEW **17**(4), 338–344 (2009).
19. M.Vollmer, K.P.Mollmann, ‘Infrared Thermal Imaging: Fundamental Research and Applications’, Wiley VCH, 2010, ISBN 978-3-527-40717-0.