

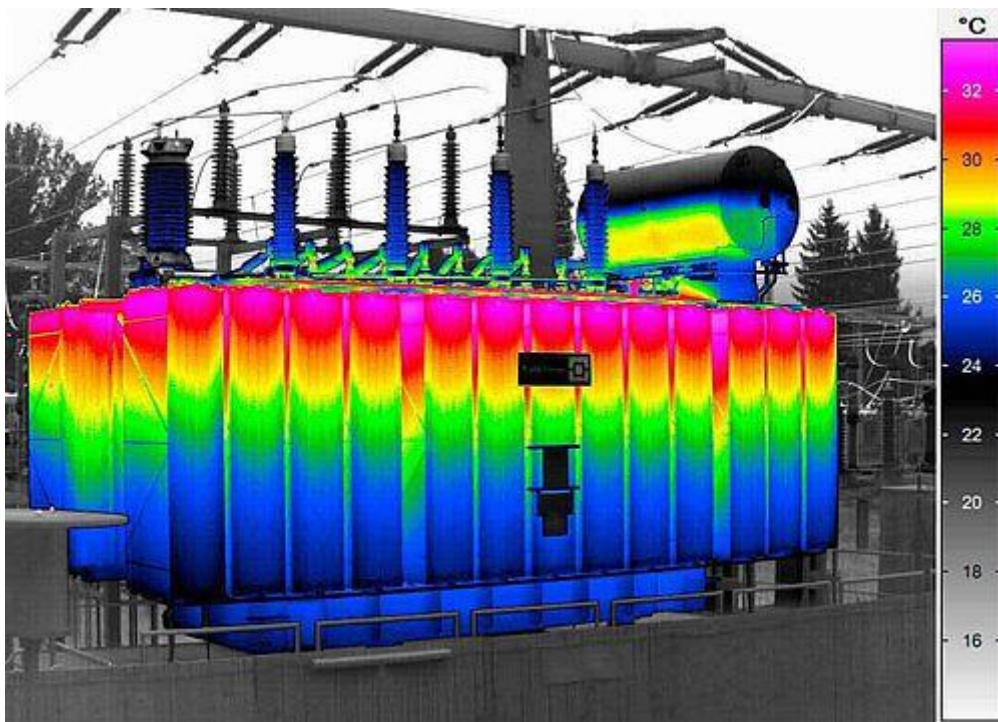
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1695

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΣΤΟΝ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ



ΠΕΤΤΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, ΑΜ:6410

ΧΑΡΙΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΜ:6285

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2018

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θερμογραφία είναι η παρατήρηση, μέτρηση και καταγραφή της θερμότητας και της ροής της. Όλα τα σώματα στη γη, με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) εκπέμπουν θερμική ενέργεια στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η ποσότητα της θερμότητας που εκπέμπει ένα σώμα είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θερμοκρασία του. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να δει με γυμνό μάτι αυτή την ακτινοβολία, αλλά με τη χρήση υπέρυθρων καμερών και της θερμογραφίας μπορεί να δει τη θερμότητα, να παρατηρήσει ανωμαλίες, που με τη σειρά τους θα τον οδηγήσουν να αναγνωρίσει προβλήματα. Σε αυτά τα προβλήματα αναφέρεται και η παρούσα πτυχιακή εργασία

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θερμογραφία είναι η παρατήρηση, μέτρηση και καταγραφή της θερμότητας και της ροής της. Όλα τα σώματα στη γη, με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) εκπέμπουν θερμική ενέργεια στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η ποσότητα της θερμότητας που εκπέμπει ένα σώμα είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θερμοκρασία του. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να δει με γυμνό μάτι αυτή την ακτινοβολία, αλλά με τη χρήση υπέρυθρων καμερών και της θερμογραφίας μπορεί να δει τη θερμότητα, να παρατηρήσει ανωμαλίες, που με τη σειρά τους θα τον οδηγήσουν να αναγνωρίσει προβλήματα. Σε αυτά τα προβλήματα αναφέρεται και η παρούσα πτυχιακή εργασία

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές της θερμογραφίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς διάδοσης της θερμότητας, στη βασική θεωρία που βασίζεται η θερμογραφία και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι τεχνικές ανάλυσης της θερμικής εικόνας. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η λειτουργία της θερμοκάμερας και παρατίθενται παραδείγματα τεχνικών ανάλυσης θερμικών εικόνων.

Ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο όπου γίνεται αναφορά σε εφαρμογές θερμογραφίας σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. Αναλύεται η διαδικασία εντοπισμού και αποκατάστασης βλαβών. Επίσης πραγματοποιείται ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν μια θερμική εικόνα και μπορεί να την αλλοιώσουν σημαντικά.

Τέλος στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται εφαρμογές θερμογραφίας σε μετασχηματιστές με έμφαση στις προβληματικές περιοχές που εντοπίζονται μέσω των θερμογραφημάτων καθώς και φωτογραφίες με σφάλματα που εντοπίστηκαν σε έναν μετασχηματιστή 20kV/400V.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	5
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	5
1.1 Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας .....	5
1.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	5
1.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (θερμική μεταβίβαση) .....	7
1.1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία .....	7
1.2 Βασικές αρχές της θερμογραφίας.....	8
1.2.1 Θερμικά κύματα.....	9
1.2.2 Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία .	10
1.2.3 Συντελεστής εκπομπής .....	11
1.3 Τεχνικές θερμογραφίας.....	12
1.3.1 Παθητική θερμογραφία .....	12
1.3.2 Ενεργητική θερμογραφία .....	13
1.3.3 Θερμογραφία παλμού.....	15
1.3.4 Θερμογραφία lock-in .....	16
1.4 Άλλες τεχνικές θερμογραφίας .....	20
1.4.1 Θερμογραφία φάσης παλμού.....	20
1.4.2 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση .....	21
1.4.3 Θερμογραφία με δονήσεις.....	21
1.4.4 Επαγωγική θερμογραφία .....	23

1.5	Θερμικές κάμερες υπερύθρου .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>		<b>28</b>
<b>ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ</b>		
<b>ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ .....</b>		<b>28</b>
2.1	Αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας .....	28
2.2	Ορατό εναντίον υπέρυθρου .....	28
2.3	Θερμική εικόνα .....	30
2.4	Εμφανής θερμοκρασία - Ορισμός .....	31
2.4.1	‘Μέτρηση’ εμφανούς θερμοκρασίας .....	32
2.4.2	Αντιστάθμιση - προσαρμογή .....	32
2.4.3	Μετάφραση της εικόνας .....	32
2.5	Τεχνικές Ανάλυσης Θερμικής Εικόνας .....	33
2.5.1	Θερμική κλίση .....	33
2.5.2	Εργαλεία κάμερας για ενίσχυση σχεδίου .....	34
2.5.3	Θερμική ανάλυση-παράδειγμα .....	35
2.5.4	Ισοθερμικό .....	36
2.5.5	Παλέτες .....	38
2.5.6	Προφίλ .....	39
2.6	Ανάλυση εικόνας –Παραπλανητικά σχέδια .....	40
2.7	Αντανάκλαση από μια πηγή σημείου .....	42
2.8	Αντανεκλάσεις από διαφορετικές πηγές .....	44
2.9	Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 1 .....	45
2.10	Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 2 .....	45
2.11	Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 3 .....	46
2.12	Διάφορες αντανεκλαστικές πηγές .....	46

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... 48

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

### ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ 48

3.1	Κύκλος επιθεώρησης.....	49
3.2	Γενικά στοιχεία εξοπλισμού.....	50
3.3	Πρόγραμμα επιθεώρησης.....	51
3.4	Επιθεώρηση.....	51
3.5	Ταξινόμηση και αναφορά .....	53
3.6	Προτεραιότητα.....	54
3.7	Επισκευή .....	54
3.8	Έλεγχος .....	55
3.9	Βάση δεδομένων.....	56
3.10	Τεχνική μετρήσεων σε σχέση με τη θερμογραφική επιθεώρηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.....	56
3.10.1	Συστηματική προσέγγιση .....	56
3.10.2	Πως να γίνει η ορθή εγκατάσταση του υλικού .....	57
3.10.3	Μέτρηση θερμοκρασίας .....	59
3.11	Συγκριτική μέτρηση .....	62
3.12	Κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας .....	63
3.13	Ταξινόμηση των λαθών .....	65
3.14	Διάφοροι τύποι θερμών σημείων στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις .....	66
3.14.1	Ανακλάσεις .....	66
3.14.2	Ηλιακή θέρμανση.....	68
3.14.3	Θέρμανση λόγω επαγωγής.....	68
3.14.4	εταβολές φορτίου .....	69

3.14.5	Μεταβαλλόμενες συνθήκες ψύξης .....	71
3.14.6	Μεταβαλλόμενη αντίσταση .....	72
3.14.7	Υπερθέρμανση ενός τμήματος σαν αποτέλεσμα του σφάλματος σε κάποια άλλο τμήμα .....	73
3.15	Παράγοντες όχλησης κατά τη θερμογραφική επιθεώρηση των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων .....	74
3.15.1	Άνεμος .....	74
3.15.2	Βροχή και χιόνι .....	75
3.15.3	Απόσταση από στόχο .....	75
3.15.4	Μέγεθος αντικειμένου .....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>.....</b>	<b>79</b>
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ</b>		
<b>ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ</b>	<b>.....</b>	<b>79</b>
4.1	Θερμογραφήματα σε μετασχηματιστές .....	79
4.2	Διαδικασία πειράματος .....	79
4.3	Πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα σε μετασχηματιστή 20kV/400V .....	84
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>.....</b>	<b>91</b>

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Γενικές έννοιες σχετικά με την ακτινοβολία

Η πρωταρχική πηγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα ή θερμική ακτινοβολία. Την υπέρυθρη ακτινοβολία (θερμική ακτινοβολία) όλων των μηκών κύματος (κοντινή, μέση, μακρινή) δεν μπορούμε να τη δούμε με τα μάτια μας. Μπορούμε όμως να αισθανθούμε με το δέρμα μας (σαν θερμότητα), τη μέση και τη μακρινή υπέρυθρη ακτινοβολία.

Καθημερινά παραδείγματα μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα, που αισθανόμαστε από την ηλιακή ακτινοβολία, από μια φωτιά, από μια θερμάστρα ή ένα θερμοπομπό κ.λπ.



**Εικόνα 1: Πηγές εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας<sup>[1]</sup>**

Η υπέρυθρη ακτινοβολία αποτελεί μέρος της θερμικής ακτινοβολίας. Όλα τα σώματα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ( $0^{\circ}\text{K}$  ή  $-273^{\circ}\text{C}$ ), εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, ακόμα και τα αντικείμενα που νομίζουμε ότι είναι πολύ κρύα (όπως οι κύβοι πάγου). Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα τόσο περισσότερη θερμική ακτινοβολία εκπέμπει. Επιπλέον κάθε σώμα μπορεί να δέχεται ακτινοβολία από όλα τα γύρω σώματα που έχουν θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν.

Η θερμογραφία υπερούθρου ή υπέρυθρη θερμογραφία, InfraRed (IR) thermography, είναι η μέθοδος που ανιχνεύει τη θερμότητα η οποία εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, τη μετατρέπει σε θερμοκρασία και απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας ως «θερμογράφημα». Ο έλεγχος υλικών με θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον



προσδιορισμό εξαρτημάτων που λειτουργούν σε θερμοκρασίες υψηλότερες άλλων εξαρτημάτων, για την ανίχνευση βλάβης σε υλικά ή για τον εντοπισμό ενεργειακών απωλειών σε κτίρια, γραμμές κρυογενικών υγρών ή σωληνώσεων ατμού. Συχνά, η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες μη καταστροφικές μεθόδους για τον πληρέστερο έλεγχο των υλικών και κατασκευών. Στον ηλεκτρολογικό τομέα η χρήση της θερμοκρασίας εδραιώνεται και στη χώρα μας γιατί μπορεί να δώσει μια πάρα πολύ καλή εικόνα όσον αφορά την υπερθέρμανση τμημάτων ή εξαρτημάτων σε μετασχηματιστές, ηλεκτρικούς κινητήρες, γραμμές μεταφοράς και εξοπλισμό σύνδεσης και ασφάλισης σε Υ.Τ, Μ.Τ. και Χ.Τ.

## **Ιστορία της θερμογραφίας**

Πριν από 200 χρόνια, κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί την ύπαρξη του υπέρυθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ανακάλυψη έγινε συμπτωματικά το 1800 κατά τη διάρκεια έρευνας πάνω σε ένα καινούργιο οπτικό υλικό. Ο Sir Frederick William Herschel (1738–1822), Βασιλικός Αστρονόμος του Βασιλιά Γεωργίου του III της Αγγλίας και ήδη διάσημος για την ανακάλυψη του πλανήτη Ουρανού, αναζητούσε ένα υλικό οπτικού φίλτρου που θα μείωνε τη φωτεινότητα της εικόνας του ήλιου στα τηλεσκόπια κατά την παρατήρηση της ηλιακής επιφάνειας. Καθώς δοκίμαζε διάφορα δείγματα έγχρωμου γυαλιού, τα οποία έδιναν παρόμοιες μειώσεις της φωτεινότητας, εντυπωσιάστηκε όταν ανακάλυψε ότι μερικά από τα δείγματα άφηναν να περάσει ελάχιστη από τη θερμότητα του ήλιου, ενώ άλλα άφηναν να περάσει τόσο πολλή θερμότητα που κινδύνευε το μάτι μετά από ελάχιστα λεπτά παρατήρησης . Ο Herschel οδήγησε λοιπόν το ηλιακό φως με ένα γυάλινο πρίσμα για να δημιουργήσει ένα φάσμα των ορατών χρωμάτων και στη συνέχεια μέτρησε τη θερμοκρασία του κάθε χρώματος και διαπίστωσε ότι οι θερμοκρασίες των χρωμάτων αυξάνονταν από το ιώδες προς το ερυθρό. Μετακινώντας το θερμόμετρο στη σκοτεινή περιοχή πέρα από το ερυθρό άκρο του φάσματος, με έκπληξη διαπίστωσε ότι στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία συνέχιζε να αυξάνει. Εντόπισε το σημείο μεγιστοποίησης της θερμοκρασίας, το οποίο βρισκόταν αρκετά πέρα από το ερυθρό άκρο του φάσματος, στην περιοχή που σήμερα είναι γνωστή ως «υπέρυθρα μήκη κύματος». Ο Herschel ονόμασε το νέο αυτό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού

φάσματος «θερμομετρικό φάσμα» και την ακτινοβολία «σκοτεινή θερμότητα» ή «αόρατες ακτίνες» γιατί δεν φαινόταν με γυμνό μάτι. Η επινόηση του όρου «υπέρυθρες» δεν αποδίδεται στον Herschel. Ο όρος αυτός άρχισε να εμφανίζεται σε έντυπες εκδόσεις σχεδόν 75 χρόνια αργότερα και εξακολουθεί ακόμη και σήμερα να αγνοείται το όνομα εκείνου που τον καθιέρωσε

Το 1830, ο Ιταλός ερευνητής Macedonio Melloni (1798–1854) συνέχισε την έρευνα του Sir William Herschel και ανακάλυψε ότι κρύσταλλοι ορυκτού άλατος παρήγαγαν διαθλάσεις του θερμικού φάσματος. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε στην προτυποποίηση της έρευνας του υπερύθρου. Το 1840, ο Sir John Herschel (1792–1871), γιος του Sir William, κατάφερε για πρώτη φορά να λάβει μια πρωτόγονη καταγραφή της θερμικής φωτογραφίας σε χαρτί, που την ονόμασε «θερμογράφημα».

Η επόμενη σημαντική επιστημονική επιτυχία στον τομέα της υπερύθρης ακτινοβολίας έγινε το 1880, όταν ο Samuel Pierpont Langley (1834–1906) ανακάλυψε το βολόμετρο (bolometer), που επέτρεψε στους ερευνητές να μετρήσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τότε, το 1892, ο Sir James Dewar εισήγαγε τη χρήση υγροποιημένων αερίων για την αύξηση της ευαισθησίας των ανιχνευτών υπερύθρου.

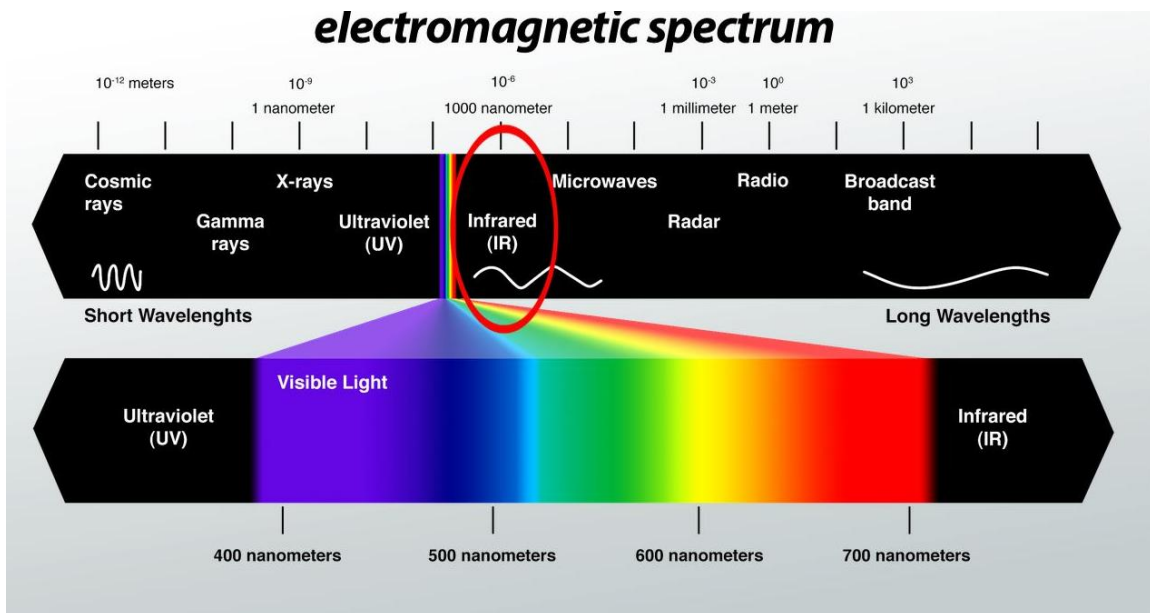
Κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο πόλεμο, επιστήμονες άρχισαν να ανακαλύπτουν τις στρατιωτικές εφαρμογές της ανίχνευσης υπερύθρου και της θερμογραφίας, έτσι η σχετική έρευνα θεωρήθηκε ως διαβαθμισμένη και παρέμεινε με τη μορφή αυτή έως το τέλος του πολέμου. Μετά τον πόλεμο, η έρευνα για ειρηνικές εφαρμογές της τεχνολογίας άρχισε και πάλι και την περίοδο ανάμεσα στους δυο παγκόσμιους πολέμους έγινε η επόμενη σημαντική ανακάλυψη. Το 1935, η Γερμανική εταιρεία AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft – Εταιρεία Γενικού Ηλεκτρισμού) ανακάλυψε την τεχνολογία της νυχτερινής όρασης. Αυτή η εξέλιξη είχε προφανείς εφαρμογές, συνεπώς η τεχνολογία διαβαθμίστηκε και πάλι τόσο από τον Γερμανικό άξονα όσο και από τις συμμαχικές δυνάμεις, και παρέμεινε έτσι μέχρι το 1955

Κατά τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1960, η τεχνολογία της θερμογραφίας άρχισε να βρίσκει μη στρατιωτικές εφαρμογές. Οι πρώτες θερμοκάμερες ήταν ογκώδεις, ανακριβείς και ακριβές, και

χρησιμοποιούταν μόνο από τις μεγαλύτερες εταιρείες. Όμως, μέχρι τη δεκαετία του 1990, η τεχνολογία προχώρησε αρκετά και οι θερμικές κάμερες νέας γενιάς έγιναν μικρότερες, πολύ αξιόπιστες, και πολύ μικρότερου κόστους

## Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε ζώνες διαφορετικών μηκών κύματος, οι οποίες διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με την ακτινοβολία που παράγουν. Όλοι οι τύποι ακτινοβολίας που αντιστοιχούν στις διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ακτίνες Χ, υπεριώδεις – UV, ορατό φως, υπέρυθρες – IR, μικροκύματα, ραδιοκύματα) διέπονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους και οι μόνες τους διαφορές είναι εκείνες που οφείλονται στο διαφορετικό τους μήκος κύματος. Όπως φαίνεται στη σχημα, η θερμογραφία αξιοποιεί τη ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην πλευρά των μικρότερων μηκών κύματος, το σύνορο της ζώνης των υπέρυθρων βρίσκεται στο όριο του ορατού φάσματος, στο βαθύ κόκκινο. Στην πλευρά των μεγαλύτερων μηκών κύματος, η ζώνη των υπέρυθρων συγχωνεύεται με τα μήκη κύματος της ζώνης των μικροκυμάτων, της τάξης του χιλιοστού.



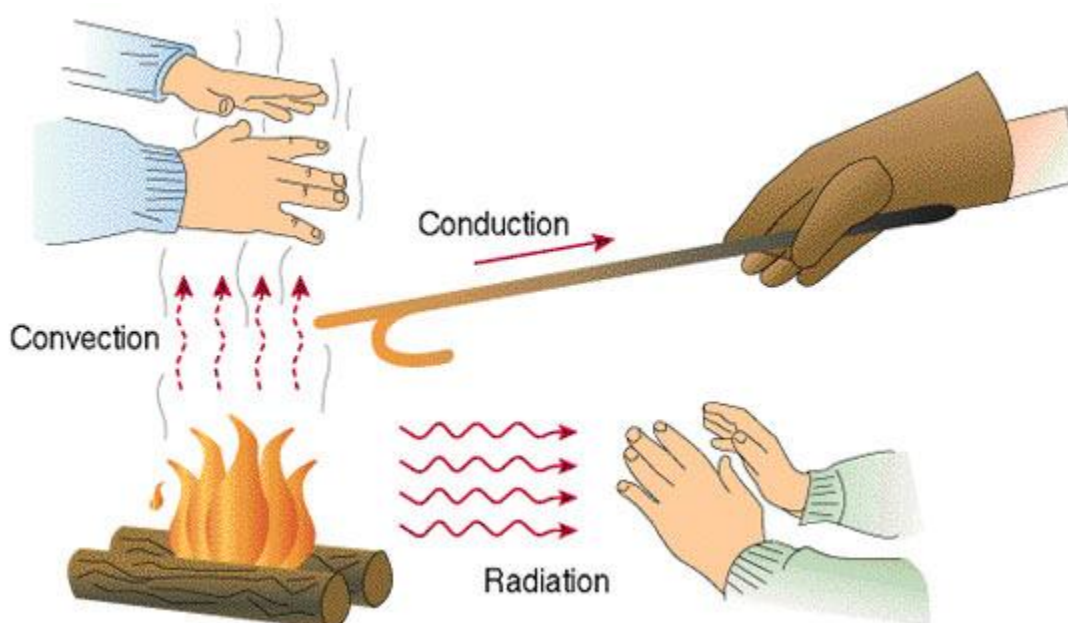
Εικόνα 2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα<sup>[2]</sup>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

### 1.1 Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας

Για την κατανόηση της θερμογραφίας είναι σημαντική η γνώση των μηχανισμών διάδοσης της θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί από ένα θερμό σε ένα ψυχρό σώμα με αγωγή (conduction), με θερμική μεταβίβαση (convection), ή με ακτινοβολία (radiation). Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται οι τρεις τρόποι διάδοσης της θερμότητας για ένα υλικό.



**Εικόνα 3: Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας για ένα υλικό<sup>[3]</sup>**

#### 1.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή μέσω της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία μεταφοράς της θερμότητας μέσω ενός σώματος εξαρτάται από την αγωγιμότητά του. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας ενός υλικού μέσω της μάζας του. Καλοί αγωγοί της θερμότητας είναι για παράδειγμα τα μέταλλα, ενώ τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας είναι, αντίθετα, κακοί αγωγοί της θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή έχει ως συνέπεια την απώλεια θερμότητας

από ένα αντικείμενο. Η ποσότητα της θερμότητας,  $Q$ , που μεταφέρεται με αγωγή ακολουθεί το νόμο του Fourier:

$$Q = \frac{k}{d} \cdot F(t_1 - t_2) \cdot a$$

όπου:

$k$ : θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του υλικού

$F$ :εμβαδόν της επιφάνειας του αντικειμένου

$t_1$ :θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του αντικειμένου

$t_2$ :θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του αντικειμένου

$d$ :πάχος του υλικού

$a$ :χρόνος ροής της θερμότητας

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με το νόμο της διατήρησης της ενέργειας, οδηγεί στην παραβολική εξίσωση διάχυσης της θερμότητας, η οποία με απουσία εσωτερικών πηγών θερμότητας έχει τη μορφή:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

όπου

$\alpha$ : είναι η θερμική διαχυτικότητα (thermal diffusivity), η οποία σχετίζεται με την θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , με τη σχέση

$$k = \rho \cdot c \cdot \alpha,$$

όπου

$\rho$ :είναι η πυκνότητα και

$c$ :είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα (specific heat capacity) ή ειδική θερμότητα (specific heat).

### **1.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (θερμική μεταβίβαση)**

Η θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφέρεται μέσω της μάζας του, με την κίνηση της. Αν η κίνηση γίνεται σε μέσο, όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές (ο κρύος αέρας κινείται προς τα κάτω, ενώ ο ζεστός αέρας κινείται προς τα πάνω) ονομάζουμε την κίνηση αυτή φυσική διάχυση, όταν όμως η κίνηση γίνεται βεβιασμένα (π.χ. με χρήση ανεμιστήρων, κλπ.) την ονομάζουμε βίαιη διάχυση. Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση είναι ένα μακροσκοπικό φαινόμενο και παρατηρείται κατά την διάχυση των ρευστών. Η διαφορά πυκνοτήτων διαφόρων ρευστών προκαλεί φυσική διάχυση. Αντίστοιχα, η μηχανική ανάμειξη προκαλεί βεβιασμένη διάχυση. Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση παρατηρείται και μεταξύ ρευστού και στερεού σώματος

### **1.1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία**

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η ποσότητα της οποίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους, και άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται στη γη αποκλειστικά με αυτόν τον τρόπο. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου υλικού. Όταν θερμική ακτινοβολία προσπέσει σε ένα σώμα, ή θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος. Θερμική ακτινοβολία είναι ο ρυθμός με τον οποίο ενέργεια εκπέμπεται από ένα σώμα ως αποτέλεσμα της θερμοκρασίας στην οποία αυτό βρίσκεται. Η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα σώματα που βρίσκονται πάνω από μηδέν βαθμούς Kelvin ( $K = ^\circ C + 273$ ). Όσο αυξάνει η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο περισσότερη ενέργεια ακτινοβολείται. Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της θερμικής ακτινοβολίας από πραγματικές επιφάνειες, είναι χρήσιμο να συγκρίνουμε την επιφάνεια με το μέλαν σώμα (black body). Το μέλαν σώμα είναι μια ιδανική επιφάνεια που απορροφά τέλεια τη θερμότητα, άρα και εκπέμπει τέλεια τη θερμότητα. Είναι λοιπόν ένα πρότυπο με το οποίο πρέπει να συγκριθούν οι ιδιότητες ακτινοβολίας μιας επιφάνειας. Ο νόμος μετατόπισης του

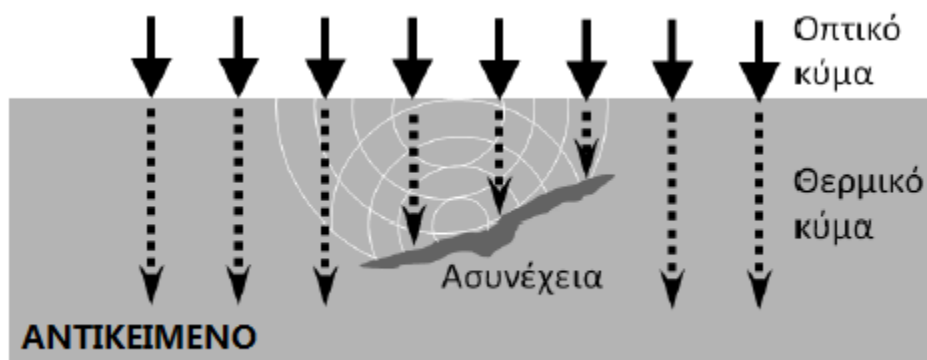
Wien δίνει τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μήκους κύματος της επιφάνειας ενός μέλανος σώματος

$$\lambda_{max} T = C$$

όπου C:2897,6 μm·K (σταθερά).

## 1.2 Βασικές αρχές της θερμογραφίας

Η θερμογραφία υπέρυθρου βασίζεται στην αρχή ότι οι υποεπιφανειακές ασυνέχειες σε ένα υλικό οδηγούν στη δημιουργία τοπικών διαφορών στην επιφανειακή θερμοκρασία του αντικειμένου. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις περιοχές, όπου υπάρχουν ασυνέχειες. Η θερμογραφία ανιχνεύει την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του υλικού και παράγει μια οπτική εικόνα από το θερμικό σήμα, η οποία μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος της εσωτερικής ατέλειας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Με την αύξηση της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και για τις πολύ μεγάλες θερμοκρασίες βρίσκεται στο ορατό φάσμα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός πυρακτωμένου μετάλλου. Στη θερμοκρασία δωματίου, το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας είναι της τάξης των 10μm, βρίσκεται δηλαδή στην υπέρυθρη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



**Εικόνα 4: Αρχή της θερμογραφίας υπέρυθρου<sup>[4]</sup>**

### 1.2.1 Θερμικά κύματα

Όταν μια επιφάνεια θερμαίνεται, αναπτύσσονται πολύ κοντά σε αυτή εξασθενημένα κύματα διασποράς, τα οποία ονομάζονται θερμικά κύματα και ανακαλύφθηκαν από τους J. Fourier και A. J. Angstrom 10. Το ενδιαφέρον σε αυτά τα κύματα για το μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν και να παρατηρηθούν από απόσταση, χωρίς φυσική επαφή. Η κατανόηση της συμπεριφοράς και των χαρακτηριστικών των θερμικών κυμάτων είναι σημαντική για τη θερμογραφία. Στην περίπτωση που θερμότητα εναποτίθεται σε ένα αντικείμενο από μια ομοιόμορφη περιοδική πηγή με γωνιακή συχνότητα,  $\omega$ , η μαθηματική προσέγγιση γίνεται μονοδιάστατη και η θερμοκρασία,  $T$ , εκφράζεται ως συνάρτηση του βάθους,  $z$ , και του χρόνου,  $t$ , κατά τον οποίο διαρκεί η διέγερση:

$$T(x, t) = T_o \cdot e^{\frac{-z}{\mu}} \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda})$$

όπου

$\mu$ : είναι το μήκος θερμικής διάχυσης (thermal diffusion length):

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c}} = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}$$

όπου:

$k$  = θερμική αγωγιμότητα [W/m-K]

$\rho$  = πυκνότητα [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = ειδική θερμότητα [J/kg-K]

$\omega$  = γωνιακή συχνότητα (=2πf) [rad·s<sup>-1</sup>]

$a$  = θερμική διαχυτικότητα [m<sup>2</sup>/s]

$\lambda$  = μήκος θερμικού κύματος ( $\lambda=2\pi\mu$ ) [m]



Τα θερμικά κύματα εξασθενούν πολύ σε βάθος μερικών μηκών θερμικής διάχυσης και, κατά συνέπεια, είναι χρήσιμα για την ανίχνευση εντοπισμένης βλάβης στο εσωτερικό των υλικών. Η ταχύτητα διάδοσης των θερμικών κυμάτων είναι:

$$u = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{2\omega\alpha}$$

### 1.2.2 Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία

Οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας εξαρτώνται από κάποια χαρακτηριστικά του υλικού, όπως :

- Ειδική θερμότητα,  $c$  (ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από την μάζα του υλικού για δεδομένο εύρος θερμοκρασίας).
- Πυκνότητα,  $\rho$  (μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου).
- Θερμική αγωγιμότητα,  $k$  (ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται σε δεδομένη κατεύθυνση όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στο υλικό σε εκείνη την κατεύθυνση).
- Θερμική διάχυση,  $\alpha$  (ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας στο περιβάλλον υλικό).
- Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $h$  (μέτρο της αποτελεσματικότητας ανταλλαγής της θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και μιας ροής υγρού ή αερίου).
- Θερμοκρασία,  $T$  (μέτρο της θερμικής ενέργειας που εμπεριέχεται σε ένα αντικείμενο).
- Συντελεστής εκπομπής,  $\epsilon$  (δείχνει την αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Η θερμογραφία εξαρτάται από τις διαφορές των υλικών στα χαρακτηριστικά αυτά, για να ορίσει ένα μετρήσιμο, και συνήθως εντοπισμένο, διαφορικό θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, όταν θερμαίνεται ή ψύχεται ένα αντικείμενο που η πυκνότητα του δεν είναι ίδια παντού, τότε η αλλαγή στη θερμοκρασία θα παρατηρηθεί πιο αργά στις περιοχές εκείνες με υψηλότερη πυκνότητα. Αυτή η διαφορά στον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας μπορεί να μετρηθεί και να αξιολογηθεί με τη θερμογραφία.

### 1.2.3 Συντελεστής εκπομπής

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη διάδοση της θερμότητας, και είναι ένα χαρακτηριστικό των υλικών, είναι ο συντελεστής εκπομπής,  $\epsilon$  του κάθε αντικειμένου. Ο συντελεστής εκπομπής δείχνει την αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα όταν σε αυτό προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το μέλαν σώμα ως το πιο αποδοτικό θερμαντικό σώμα έχει συντελεστή εκπομπής ίσο με τη μονάδα, ενώ όλα τα υπόλοιπα έχουν μικρότερο από 1.0. Η Εικόνα 5 δείχνει το λόγο για τον οποίο τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν τέλεια την υπέρυθη ακτινοβολία. Καθώς η ενέργεια μετακινείται από το εσωτερικό του υλικού προς την επιφάνεια, μια ποσότητα ενέργειας ανακλάται και πάλι στο εσωτερικό και έτσι δεν διαφεύγει ποτέ, κατά τρόπο σχετικό. Στο παράδειγμα της εικόνα 5, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μόνο το 60% της ενέργειας εκπέμπεται πραγματικά



**Εικόνα 5: Εσωτερική ανάκλαση ενέργειας<sup>[4]</sup>**

Ο συντελεστής εκπομπής ενός αντικειμένου είναι ο λόγος της ενέργειας που ακτινοβολείται ως προς την ενέργεια που το αντικείμενο θα ακτινοβολούσε εάν ήταν μέλαν σώμα. Έτσι, ο συντελεστής εκπομπής (ή εκπεμπτικότητα) εκφράζεται ως ακολούθως:

$$\text{Εκπεμπτικότητα} = \frac{\text{Ακτινοβολία που εκπέμπεται από αντικείμενο σε θερμοκρασία } T}{\text{Ακτινοβολία που εκπέμπεται από μέλαν σώμα σε θερμοκρασία } T}$$

Ο συντελεστής εκπομπής είναι συνεπώς μια έκφραση της ικανότητας του αντικειμένου να ακτινοβολεί υπέρυθη ενέργεια. Η

τιμή του  $\epsilon$  για τα διάφορα υλικά ποικίλει. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συντελεστής εκπομπής δεν είναι γενικά μια σταθερά, αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως, το χρώμα και η τραχύτητα των αντικειμένων. Τα μέταλλα με τραχεία ή οξειδωμένη επιφάνεια έχουν συνήθως υψηλότερο συντελεστή εκπομπής συγκριτικά με μια λεία, στιλβωμένη επιφάνεια.

### **1.3 Τεχνικές θερμογραφίας**

Η θερμογραφία υπερύθρου χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών και κατασκευών. Το κύριο πλεονέκτημα της θερμογραφίας έναντι των κλασικών μεθόδων μη καταστροφικών δοκιμών έγκειται στη δυνατότητα επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών με γρήγορο και ασφαλή τρόπο, χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει πρόσβαση και στις δύο πλευρές του υπό έλεγχο αντικειμένου. Ωστόσο, η θερμογραφία υπερύθρου περιορίζεται στον εντοπισμό σχετικά ρηχών ατελειών (σε βάθος μερικών χιλιοστών κάτω από την επιφάνεια) επειδή επηρεάζεται από τη διάχυση της θερμότητας στον όγκο του υλικού.

Η θερμογραφία υπερύθρου μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική. Αυτοί οι δυο τύποι θερμογραφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται ανάλογα με το εάν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται ή όχι σε θερμική ισορροπία.

#### **1.3.1 Παθητική θερμογραφία**

Η παθητική θερμογραφία (passive thermography) αναφέρεται στην τεχνική θερμογραφίας για τον έλεγχο των υλικών και δομών χωρίς τη χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας. Η τεχνική απαιτεί αρκετή θερμική αντίθεση ανάμεσα στο υπό έλεγχο αντικείμενο και στο περιβάλλον, ώστε να είναι ανιχνεύσιμη από ένα αισθητήρα υπερύθρων. Με την παθητική θερμογραφία απεικονίζεται λοιπόν η θερμοκρασία της υπό έλεγχο κατασκευής όταν αυτή βρίσκεται, με φυσικό τρόπο, σε μια διαφορετική θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντος. Η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται κυρίως σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, όπου η θερμοκρασία αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της σωστής λειτουργίας.

Μερικές σημαντικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: κάμερες επιτήρησης, προληπτική συντήρηση αεροσκαφών, ανίχνευση πυρκαγιών, ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων, έλεγχο θερμομόνωσης κατασκευών, έλεγχο ηλεκτρικών εξαρτημάτων, κλπ. Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές οι ασυνήθιστες, μη-φυσιολογικές θερμοκρασιακές διαφορές αποτελούν ένδειξη ύπαρξης κάποιου προβλήματος. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της παθητικής θερμογραφίας είναι η ανίχνευση παρουσίας υγρασίας σε μέρη του αεροσκάφους αμέσως μετά την προσγείωση, καθόσον η σημαντική θερμική διαφορά ανάμεσα στο υλικό και το νερό επιτρέπει την ανίχνευση της βλάβης. Παρόμοια, ανιχνεύεται και η παρουσία υγρασίας σε κτίρια και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς.

### **1.3.2 Ενεργητική θερμογραφία**

Η ενεργητική θερμογραφία (active thermography) βασίζεται στην ύπαρξη εξωτερικής πηγής θέρμανσης ώστε να προκύψουν, και στη συνέχεια να μετρηθούν, οι σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογραφίας απαιτείται η δημιουργία θερμικής αντίθεσης με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής ενέργειας, όταν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Σχεδόν κάθε πηγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με την εφαρμογή, για να ενεργοποιήσει το υπό έλεγχο αντικείμενο, με χρήση ψυχρού ή ζεστού αέρα, πίδακα νερού, ή ελαστικών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους. Σε γενικές γραμμές, τα εξωτερικά ερεθίσματα μπορεί να είναι οπτικά, μηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά, κλπ. Η οπτική διέγερση παράγεται από εξωτερικές πηγές, όπως για παράδειγμα λαμπτήρες, δημιουργεί θερμότητα στην επιφάνεια του υλικού, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται ως θερμικό κύμα μέσω του αντικειμένου στις υποεπιφανειακές ανωμαλίες, και τέλος επιστρέφει πάλι στην επιφάνεια, όπου ανιχνεύεται από τη θερμική κάμερα. Η μηχανική ενέργεια, αντίθετα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας εσωτερικός τρόπος διέγερσης, καθώς η θερμότητα παράγεται στη διεπιφάνεια μεταξύ ατέλειας και υλικού και στη συνέχεια διαδίδεται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Κατά την ηλεκτρομαγνητική διέγερση, δημιουργούνται δινορεύματα σε αγώγιμο αντικείμενο με τη βοήθεια εξωτερικού πηνίου, τα οποία στη συνέχεια παράγουν εσωτερική θερμότητα στο υλικό.

Με βάση την πηγή διέγερσης, η ενεργητική θερμογραφία μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικά είδη: (α) τις τεχνικές θερμογραφίας παλμού (Pulsed Thermography - PT) και (β) τις τεχνικές διαμόρφωσης (modulated). Στην κατηγορία των τεχνικών θερμογραφίας παλμού ανήκει και η θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (Step Heating - SH), η οποία αναφέρεται στην εφαρμογή μακρύ παλμού διέγερσης. Η θερμογραφία lock-in (Lock-in Thermography - LT) είναι τεχνική διαμόρφωσης πλάτους.

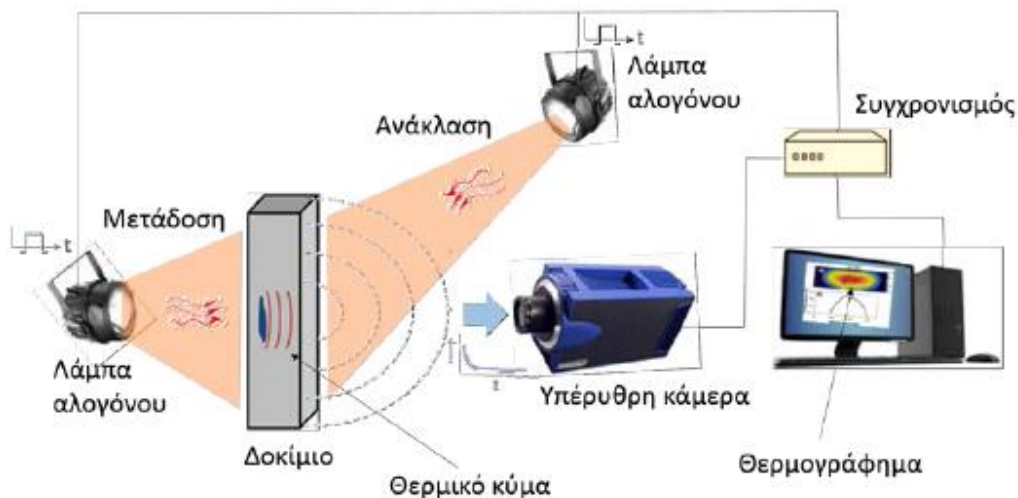
Οι διάφορες πειραματικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας κατηγοριοποιούνται επίσης ανάλογα με το εξωτερικό ερέθισμα, δηλαδή την πηγή ενέργειας, που προκαλεί τις θερμικές αντιθέσεις. Η θερμογραφία παλμού και η θερμογραφία lock-in αναφέρονται σε τεχνικές που χρησιμοποιούν οπτική, μηχανική, ή ηλεκτρομαγνητική διέγερση. Τα δεδομένα που λαμβάνονται όταν χρησιμοποιείται οπτική διέγερση παρουσιάζονται συνήθως σε μορφή θερμογραφημάτων, δηλαδή απεικονίσεων της θερμικής κατάστασης στην επιφάνεια του αντικειμένου. Στην περίπτωση μηχανικής διέγερσης με χρήση παλμών υπερήχων, ή με διαμορφωμένη συχνότητα, ή με διαμορφωμένα τη συχνότητα και το πλάτος, χρησιμοποιούνται οι όροι θερμογραφία υπερήχων (Ultrasonic Thermography - UT) ή θερμογραφία δονήσεων (Vibrothermography - VT). Τέλος, για τεχνικές που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική διέγερση με δινορεύματα, χρησιμοποιούνται οι όροι επαγωγική θερμογραφία (induction thermography) ή θερμογραφία με δινορεύματα (Eddy Current Thermography - ECT).

Τα δεδομένα θερμογραφίας παλμού ή θερμογραφίας lock-in, που λαμβάνονται με τη χρήση οπτικής διέγερσης, μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT). Εάν πρόκειται για δεδομένα παλμού τότε έχουμε τη θερμογραφία φάσης παλμού (Pulsed Phase Thermography - PPT), ενώ εάν πρόκειται για δεδομένα διαμόρφωσης έχουμε τη θερμογραφία γωνίας φάσης (phase angle thermography). Τα αποτελέσματα των τεχνικών αυτών παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων φάσης (phasegrams), δηλαδή απεικονίσεις της επιφάνειας του αντικειμένου που δείχνουν την καθυστέρηση φάσης του σήματος εξόδου ως προς το σήμα εισόδου.

Παρακάτω παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι κυριότερες τεχνικές θερμογραφίας υπερύθρου.

### 1.3.3 Θερμογραφία παλμού

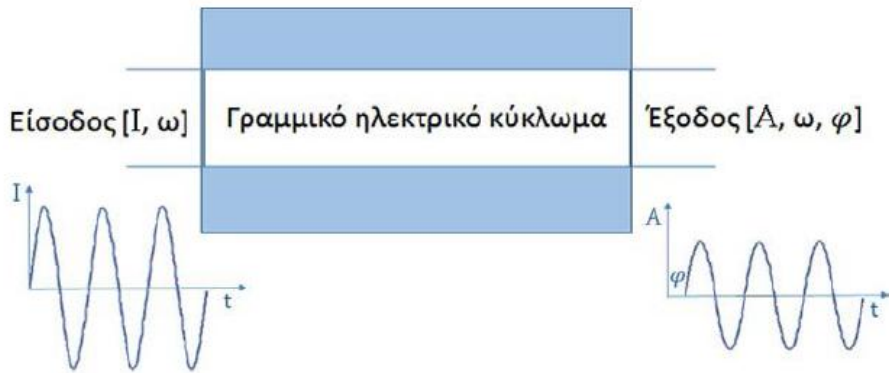
Στη θερμογραφία παλμού, ένας παλμός ενέργειας εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου δημιουργώντας ένα θερμικό μέτωπο το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού με διάχυση, σύμφωνα με την εξίσωση του Fourier. Ο παλμός αυτός μπορεί να δημιουργηθεί από λαμπτήρες αλογόνου, δέσμη λέιζερ, αέρα ή δέσμη νερού. Η θερμική διέγερση μπορεί να είναι θερμή ή ψυχρή, διότι αυτό που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στη θερμογραφία παλμού είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει και όχι η απόλυτη θερμοκρασία. Η διάρκεια του παλμού ποικίλει από μερικά  $\mu\text{s}$  για υλικά μικρού πάχους και θερμικά αγωγίμα υλικά (π.χ. μέταλλα) έως λίγα δευτερόλεπτα για υλικά μεγάλου πάχους και υλικά με μικρή θερμική αγωγιμότητα (π.χ. πλαστικά). Η συμπεριφορά του αντικειμένου αναλύεται είτε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (δηλ. κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του) <sup>27</sup> είτε κατά τη διάρκεια της αποθέρμανσης (δηλ. κατά τη μείωση της θερμοκρασίας του). Η θερμογραφία παλμού μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους: Πρώτον, η πηγή θερμικής διέγερσης και η υπέρυθρη κάμερα είναι τοποθετημένα μπροστά από το αντικείμενο και η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη θερμότητα που ανακλάται (reflection). Δεύτερον, η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη μετάδοση (transmission) της θερμότητας μέσω του αντικειμένου, καθώς η πηγή διέγερσης και η κάμερα είναι τοποθετημένες εκατέρωθεν του



Εικόνα 6: Τεχνική θερμογραφίας παλμού<sup>[4]</sup>

### 1.3.4 Θερμογραφία lock-in

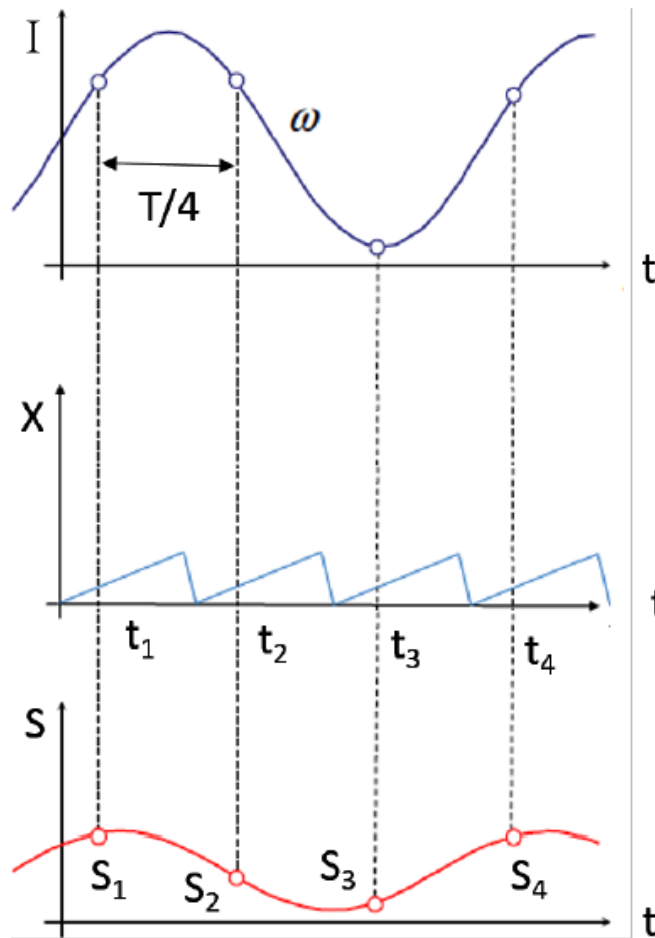
Η θερμογραφία lock-in, η οποία είναι επίσης γνωστή ως διαμορφωμένη ή συγχρονισμένη θερμογραφία (modulated thermography), βασίζεται στην δημιουργία θερμικών κυμάτων που παράγονται από μια περιοδική θερμική διέγερση. Η περιοδική διέγερση είναι συνήθως ημιτονοειδής, παρόλο που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες περιοδικές μορφές. Κατά την περιοδικά διαμορφωμένη θερμική διέγερση, θερμικά κύματα διαδίδονται στο υλικό. Τα θερμικά κύματα μπορούν να παραχθούν (π.χ. με περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια του αντικειμένου με οπτικό τρόπο – λυχνία εκκένωσης, δινορεύματα, υπέρηχοι, μικροκύματα, κλπ.) και να ανιχνευθούν από απόσταση με τη βοήθεια θερμικής κάμερας. Ο όρος lock-in αναφέρεται στην ανάγκη να ελεγχθεί η ακριβής χρονική εξάρτηση μεταξύ του σήματος εξόδου και του σήματος εισόδου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν ενισχυτή lock-in. Οι εσωτερικές ατέλειες ενεργούν ως εμπόδια στη διάδοση της θερμότητας, και προκαλούν μεταβολές στο πλάτος και καθυστέρηση φάσης του σήματος απόκρισης στην επιφάνεια. Διαφορετικές τεχνικές εφαρμόζονται για την εξαγωγή της πληροφορίας πλάτους και φάσης. Συνήθως χρησιμοποιείται ανάλυση Fourier ώστε να προκύψουν εικόνες φάσης (phasegrams) και πλάτους (ampligrams). Οι εικόνες φάσης συσχετίζονται με το χρόνο διάδοσης των θερμικών κυμάτων και, δεδομένου ότι δεν επηρεάζονται από τοπικά εξωτερικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του αντικειμένου, μπορούν να αξιοποιηθούν για τον μη καταστροφικό έλεγχο. Το εύρος του βάθους σε μια εικόνα φάσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας της θερμικής διέγερσης, οπότε οι υψηλότερες συχνότητες περιορίζουν την ανάλυση σε μια περιοχή κοντά στην επιφάνεια του αντικειμένου. Για να κατανοηθεί η έννοια της θερμογραφίας lock-in, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα για το οποίο, για μια ημιτονοειδή είσοδο,  $I$ , με γωνιακή συχνότητα  $\omega$ , παρατηρείται έξοδος με την ίδια ημιτονοειδή συχνότητα  $\omega$  αλλά με πλάτος  $A$  και φάση  $\varphi$



**Εικόνα 7: Ερμηνεία της θερμογραφίας lock-in χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα<sup>[4]</sup>**

Στην περίπτωση του μη καταστροφικού ελέγχου, το αντικείμενο να αντικαθιστά την έννοια του γραμμικού κυκλώματος. Όταν θερμότητα με πλάτος,  $I$ , εναποτίθεται στην επιφάνεια αντικειμένου με γωνιακή συχνότητα,  $\omega$ , δημιουργεί θερμικό κύμα που διαπερνά την επιφάνεια του αντικειμένου, απορροφάται και υπόκειται σε μετατόπιση φάσης,  $\varphi$ . Όταν το κύμα εισόδου συναντά ασυνέχειες (ατέλειες), δηλαδή περιοχές με μη ομογενείς θερμοφυσικές ιδιότητες σε σχέση με το περιβάλλον υλικό, το κύμα εισόδου ανακλάται μερικώς. Το ανακλώμενο τμήμα του κύματος αλληλεπιδρά με το εισερχόμενο κύμα εισόδου στην επιφάνεια του αντικειμένου, προκαλώντας ένα μοτίβο κατανομής της τοπικής επιφανειακής θερμοκρασίας, η οποία πάλλεται με την ίδια συχνότητα όπως το θερμικό κύμα. Η εσωτερική δομή του υπό έλεγχο αντικειμένου μπορεί να εκτιμηθεί από την αξιολόγηση της μετατόπισης φάσης της τοπικής επιφανειακής θερμοκρασίας (έξοδος) σε σχέση με το κύμα εισόδου, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας ανιχνεύεται και καταγράφεται από μια θερμική κάμερα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του αντικειμένου επιτρέπει να ανακατασκευαστεί το θερμικό κύμα και να καθιερωθούν οι τιμές  $A$  και  $\varphi$  για τέσσερα ισαπέχοντα σημεία θερμοκρασίας:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  και  $S_4$  που καταγράφηκαν στην επιφάνεια του αντικειμένου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (δηλαδή μιας περιόδου της ημιτονοειδούς καμπύλης).





**Εικόνα 8: Μεθοδολογία τεσσάρων σημείων για την εκτίμηση της καθυστέρησης πλάτους με θερμογραφία lock-in.** <sup>[4]</sup>

Το ημιτονοειδές κύμα εισόδου,  $I$ , φαίνεται στο πάνω μέρος της εικόνα 8, η δε απόκριση του σήματος,  $S$ , απεικονίζεται στο κάτω μέρος. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, η είσοδος και η έξοδος έχουν την ίδια μορφή όταν χρησιμοποιούνται ημιτονοειδή σήματα, υπάρχει μόνο μεταβολή στο πλάτος και τη φάση η οποία υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right)$$

Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων είναι ταχεία, αλλά ισχύει μόνο για ημιτονοειδή διέγερση και επηρεάζεται από θόρυβο. Τέσσερα

σημεία, συνήθως επιτρέπουν τον υπολογισμό των  $A$  και  $\varphi$ , ενώ περισσότερα σημεία βοηθούν και για την αποφυγή του θορύβου που προκύπτει από τη διαδικασία. Η χρήση του ενισχυτή lock-in συμβάλει καθοριστικά στην εξάλειψη του θορύβου. Η τεχνική lock-in παρέχει τρεις εικόνες: φάσης,  $\varphi$ , πλάτους,  $A$  και θερμοκρασίας,  $T$  (συμβατική θερμογραφία). Μια εικόνα θερμογραφίας είναι η χαρτογράφηση της εκπεμπόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η εικόνα φάσης έχει σχέση με το χρόνο διάδοσης και η εικόνα πλάτους με τον συντελεστή θερμικής διάχυσης. Ένα από τα ισχυρά σημεία της θερμογραφίας lock-in είναι η εικόνα φάσης, η οποία δεν εξαρτάται από τα τοπικά οπτικά και υπέρυθρα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Τέλος, σημαντική παράμετρος για τη θερμογραφία lock-in είναι η διάρκεια της θερμικής διέγερσης, η οποία πρέπει να είναι το λιγότερο ένας κύκλος (π.χ. για συχνότητα 1Hz απαιτείται χρόνος το λιγότερο 1sec, ενώ για 0,1Hz απαιτείται χρόνος τουλάχιστον 10sec).

Υπάρχουν πλεονεκτήματα, αλλά και μερικοί περιορισμοί, στην εφαρμογή της θερμογραφίας lock-in. Ο έλεγχος των υλικών με θερμοκρασία lock-in είναι γενικά αργότερος από την θερμογραφία παλμού, καθώς η τεχνική απαιτεί κάποιον χρόνο σταθεροποίησης πριν την επίτευξη κατάστασης ισορροπίας. Όμως, υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ βάθους και συχνότητας ελέγχου που επιτρέπει εκτίμηση του βάθους από δεδομένα πλάτους ή φάσης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτείται για την εκτέλεση πειράματος θερμογραφίας lock-in είναι γενικά μικρότερη από ό,τι σε άλλες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, πράγμα το οποίο είναι ενδιαφέρον για μερικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, όπως για παράδειγμα στον έλεγχο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς, έργων τέχνης, τοιχογραφιών, κ.λπ.

Τυπικές εφαρμογές της θερμογραφίας lock-in περιλαμβάνουν: προσδιορισμό πάχους των επικαλύψεων, ανίχνευση αποκολλήσεων μεταξύ στρώσεων σε σύνθετα υλικά, προσδιορισμό τοπικού προσανατολισμού των ινών σε σύνθετα υλικά, ανίχνευση διάβρωσης, ανίχνευση ρωγμών, έλεγχο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και έργων τέχνης, κ.α., ενώ σημαντικές είναι οι σύγχρονες εφαρμογές της τεχνικής στην έρευνα, όπως για παράδειγμα ο ταχύς προσδιορισμός του ορίου μηχανικής κόπωσης προηγμένων τεχνολογικών υλικών.

## 1.4 Άλλες τεχνικές θερμογραφίας

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται άλλες τεχνικές θερμογραφίας, οι οποίες όμως εμπίπτουν στις γενικές κατηγορίες της θερμογραφίας παλμού και θερμογραφίας lock-in.

### 1.4.1 Θερμογραφία φάσης παλμού

Η θερμογραφία φάσης παλμού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της θερμογραφίας φάσης αλλά και της lock-in. Κατά την τεχνική αυτή το υπό έλεγχο αντικείμενο διεγείρεται θερμικά με έναν τετραγωνικό παλμό. Όταν ένα αντικείμενο θερμαίνεται με παλμούς τότε θερμικά κύματα διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους διαδίδονται στο εσωτερικό του. Ο διαχωρισμός αυτών των συχνοτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με το μονοδιάστατο μετασχηματισμό Fourier, εξίσωση (4.17), για κάθε εικονοστοιχείο (pixel x,y) του θερμογραφήματος κατά την αποθέρμανση του υλικού:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{\frac{2\pi i k n}{N}} = Re_n + i Im_n$$

όπου

i: είναι ο φανταστικός αριθμός,

Re και Im: το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μετασχηματισμού, αντίστοιχα, και

ο δείκτης n:συμβολίζει την αύξηση της συχνότητας.

Η ανάλυση μέσω μετασχηματισμού Fourier παρέχει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με αυτά της κλασσικής θερμογραφίας παλμού, με αποτέλεσμα την ανίχνευση διαφόρων τύπων υποεπιφανειακών ατελειών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της θερμογραφίας φάσης παλμού είναι ότι προκύπτουν θερμογραφήματα φάσης. Τα θερμογραφήματα φάσης επηρεάζονται ελάχιστα από τη μη ομοιόμορφη θέρμανση διότι όλες οι πληροφορίες σχετικά με το πλάτος του θερμικού παλμού εμπεριέχονται στο πλάτος που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Fourier. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα καθώς η

ανομοιόμορφη θέρμανση είναι το βασικό πρόβλημα της θερμογραφίας φάσης.

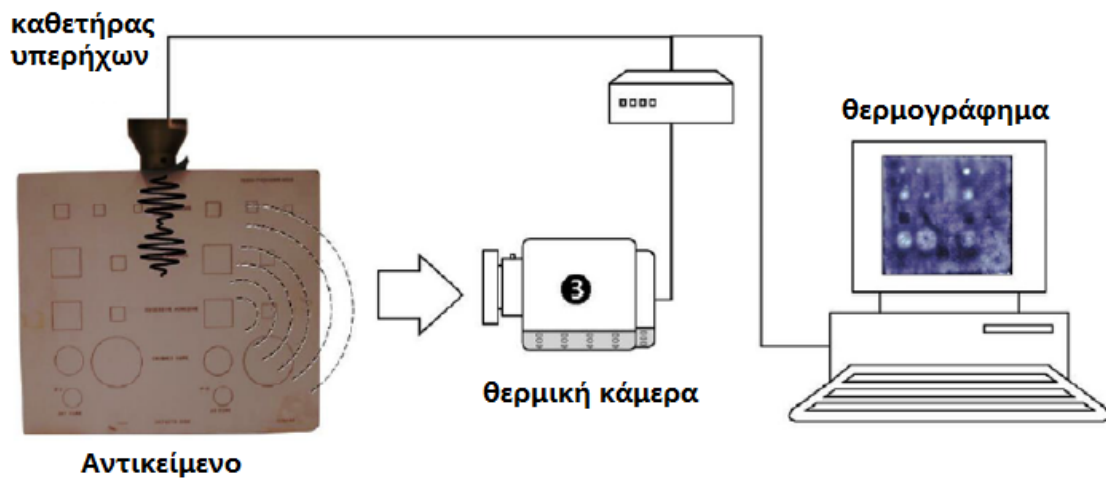
#### **1.4.2 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση**

Η θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση χρησιμοποιεί μεγαλύτερους παλμούς, διάρκειας από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά. Σ' αυτή την περίπτωση καταγράφεται η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του αντικειμένου καθώς πραγματοποιείται κλιμακωτή θέρμανση με παλμούς. Οι μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας με το χρόνο συσχετίζονται με χαρακτηριστικά του υλικού, όπως και στη θερμογραφία παλμού. Παρόλο που χρησιμοποιείται συνήθως οπτική διέγερση για την κλιμακωτή θέρμανση του αντικειμένου, δεν υπάρχει περιορισμός στη χρήση άλλων μορφών διέγερσης.

Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του πάχους επικαλύψεων, την αποτίμηση της ακεραιότητας της διεπιφάνειας επικάλυψης/υποστρώματος, το χαρακτηρισμό της διάβρωσης σε αεροναυπηγικές δομές, κλπ.

#### **1.4.3 Θερμογραφία με δονήσεις**

Η θερμογραφία με δονήσεις (vibrothermography) είναι τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας κατά την οποία προκαλούνται εξωτερικές μηχανικές δονήσεις ή διέγερση με υπερήχους (γι' αυτό και ονομάζεται επίσης θερμογραφία υπερήχων), η οποία ανιχνεύει τη θερμότητα που παράγεται από βλάβη στο εσωτερικό του υλικού. Η μη καταστροφική αυτή τεχνική αξιολογεί τη δομική ακεραιότητα του υπό έλεγχο αντικειμένου. Η μέθοδος είχε προταθεί αρχικά από τον Hennecke et al. στα τέλη της δεκαετίας του '80, αλλά έγινε ευρέως γνωστή από τον Favro et al. σχεδόν είκοσι χρόνια αργότερα.



**Εικόνα 9: Πειραματική διάταξη θερμογραφίας με δονήσεις<sup>[4]</sup>**

Η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων μετατρέπεται σε θερμική με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται θερμότητα λόγω τριβής ακριβώς στις θέσεις, όπου εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων σε σύνθετα υλικά. Η θερμογραφία με δονήσεις μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση ατελειών δύσκολα ανιχνεύσιμες από τις άλλες μεθόδους θερμογραφίας, όπως κλειστές ρωγμές σε γρανάζια, βλάβη λόγω μηχανικής κόπωσης, φθορά επικαλύψεων, καθώς και για τον έλεγχο μεγάλων επιφανειών στο πεδίο.

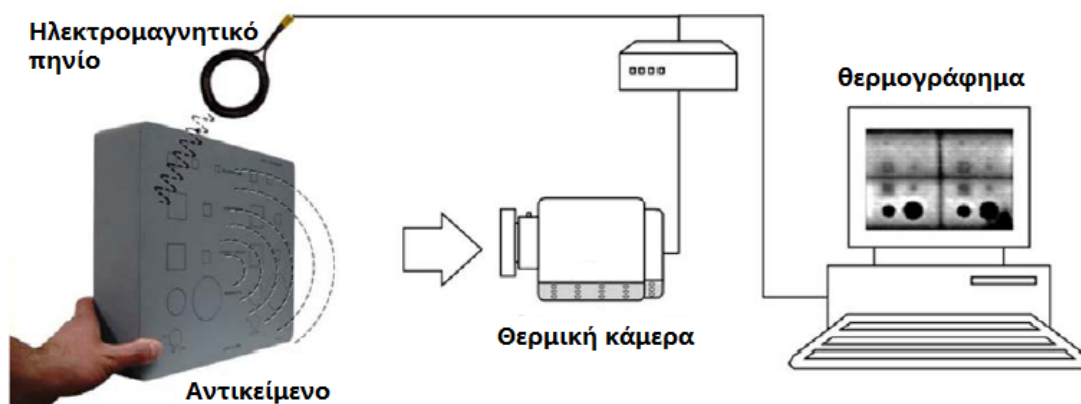
Οι μηχανισμοί διάχυσης της ενέργειας δόνησης στη βλάβη δεν έχουν γίνει ακόμη πλήρως κατανοητοί, αλλά σίγουρα εξαρτώνται από τις παραμέτρους του υλικού και τα χαρακτηριστικά της βλάβης. Συνεπώς, η ακριβής ποσότητα της θερμότητας που αναμένεται να διαχυθεί από ορισμένες ατέλειες δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Όμως, είναι γνωστό ότι η παραγόμενη θερμότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και τη θέση της πηγής θερμότητας (ατέλεια).

Όπως και στην περίπτωση της οπτικής διέγερσης, η μηχανική διέγερση μπορεί να επιτευχθεί με μορφή παλμών (θερμογραφία παλμού) ή με διαμορφώσεις πλάτους (θερμογραφία lock-in).

#### 1.4.4 Επαγωγική θερμογραφία

Η επαγωγική θερμογραφία (induction thermography) ή θερμογραφία με δινορεύματα (eddy current thermography) είναι μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο της ενεργητικής θερμογραφίας<sup>48-51</sup>. Επαγωγική διέγερση μπορεί να εφαρμοστεί εσωτερικά σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά, παράγοντας δινορεύματα σε συγκεκριμένο βάθος (το οποίο καθορίζεται από τη συχνότητα διέγερσης), με αποτέλεσμα τη θέρμανση του αντικειμένου και επομένως των εσωτερικών ατελειών. Οι επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες προκαλούν μεταβολές στην κίνηση των δινορευμάτων, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασιακή κατανομή. Όπως και στις άλλες τεχνικές θερμογραφίας, οι μεταβολές αυτές στη θερμοκρασία μπορούν να ανιχνευτούν στην επιφάνεια του αντικειμένου με υπέρυθη κάμερα.

Η επαγωγική θερμογραφία εφαρμόζεται για την ανίχνευση ρωγμών σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά, ανίχνευση βλάβης λόγω πρόσκρουσης σε σύνθετα υλικά, έλεγχο συγκόλλησης αρθρώσεων, κλπ. Όπως και στην περίπτωση της οπτικής και της μηχανικής διέγερσης, η επαγωγική διέγερση μπορεί να επιτευχθεί με μορφή παλμών (θερμογραφία παλμού) ή με διαμορφώσεις πλάτους (θερμογραφία lock-in).



**Εικόνα 10: Πειραματική διάταξη επαγωγικής θερμογραφίας<sup>[4]</sup>**

## 1.5 Θερμικές κάμερες υπέρυθρου

Οι περισσότερες εφαρμογές της θερμογραφίας υπέρυθρου χρησιμοποιούν μια υπέρυθρη κάμερα η οποία διαθέτει έναν ανιχνευτή υπέρυθρων για την απεικόνιση των διαφορών της θερμικής ακτινοβολίας. Οι κάμερες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν αισθητήρες που δεν αντιλαμβάνονται το πλάνο επιτήρησης όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του φωτός, στο οπτικό φάσμα, δηλαδή όπως το βλέπουμε με το ανθρώπινο μάτι. Αντίθετα, λαμβάνουν την εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του υπέρυθρου. Δηλαδή, αντί για το εύρος των 450–750 nm του ορατού φάσματος, στο οποίο λειτουργούν οι συνήθεις φωτογραφικές μηχανές, οι υπέρυθρες κάμερες λειτουργούν σε μήκη κύματος έως και 14,000 nm (14  $\mu\text{m}$ ).

Το 1970 ένα νέο είδος συσκευών απεικόνισης εμφανίστηκε και έφερε επανάσταση τον τομέα των υπέρυθρων. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία, τα απαραίτητα συστατικά για την κατασκευή μιας θερμικής κάμερας είναι τα οπτικά εξαρτήματα, μια συστοιχία εστιακού επιπέδου (Focal Plane Array – FPA), τα απαραίτητα ηλεκτρονικά και μια μονάδα ψύξης. Κάποιες συστοιχίες εστιακού επιπέδου αποτελούνται από:

- ανιχνευτές φράγματος Schottky,
- ανιχνευτές υπερπλέγματος ,
- ενδογενείς ανιχνευτές,
- ανιχνευτές Z-επιπέδου και
- ανιχνευτές συστοιχίας μικροβολομέτρων.



**Εικόνα 11: Μέτρηση υποσταθμού με θερμοκάμερα<sup>[4]</sup>**

Οι ανιχνευτές φράγματος Schottky έχουν διαστάσεις 512 x 512 pixels και είναι κατασκευασμένοι από PtSi (το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 3-5  $\mu\text{m}$ ), ή από GaSi (το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 8-14  $\mu\text{m}$  και 8-16  $\mu\text{m}$ ). Για την κατασκευή θερμικής κάμερας με αυτούς τους ανιχνευτές απαιτείται σύστημα ψύξης ώστε η θερμοκρασία να είναι σταθερή στους 77 K. Οι ανιχνευτές υπερπλέγματος είναι κατασκευασμένοι από ημιαγωγούς, όπως GaAs/GaAlAs, και το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 0,8-2,6  $\mu\text{m}$ . Για τη σωστή λειτουργία τους απαιτείται σύστημα ψύξης ώστε να επιτευχθούν θερμοκρασίες 50-70 K. Οι ενδογενείς ανιχνευτές έχουν διαστάσεις 128 x 128 pixels, ανιχνεύουν φάσμα από 8-12  $\mu\text{m}$  και είναι κατασκευασμένοι από HgSdTe. Επίσης κάποιοι ανιχνευτές είναι κατασκευασμένοι από InGaAs και λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου. Οι ανιχνευτές Z-επιπέδου βασίζονται σε κυκλώματα πυριτίου που είναι κατεργασμένα πάνω σε μια μικροσκοπική επιφάνεια μαζί με έναν ανιχνευτή εγκατεστημένο στη μια της άκρη. Αυτές οι επιφάνειες ενωμένες συνθέτουν τον τελικό ανιχνευτή, που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σταγόνων μέσα σε δοκίμια. Οι ανιχνευτές συστοιχίας μικροβολομέτρων έχουν διαστάσεις 320 x 240 pixels, λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά η απόδοσή τους δεν



είναι τόσο καλή όσο των ανιχνευτών που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα που χρησιμοποιούν, οι θερμικές κάμερες δρουν στις αντίστοιχες ζώνες (μήκη κύματος) του υπέρυθρου φάσματος ακτινοβολίας. Αυτές κατανέμονται ως εξής:

- SWIR (Short-Wave Infrared), από 1.0  $\mu\text{m}$  έως 3.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InGaAs.
- MWIR (Mid-Wave Infrared), από 3.0  $\mu\text{m}$  έως 5.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InSb, HgCdTe και σπανιότερα PbSe.
- LWIR (Long-Wave Infrared), από 7.0  $\mu\text{m}$  έως 14.0  $\mu\text{m}$ , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό HgCdTe. Οι εικόνες από τις κάμερες υπέρυθρων συνήθως διαθέτουν ένα μοναδικό χρωματικό κανάλι, διότι γενικά χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα εικόνας που δεν διακρίνει διαφορετικά μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι αισθητήρες έγχρωμων εικόνων απαιτούν πολύπλοκη κατασκευή για να μπορούν να διακρίνουν τα διαφορετικά μήκη κύματος. Επίσης, η έννοια του χρώματος έχει μικρότερη σημασία έξω από το ορατό φάσμα, επειδή τα διάφορα μήκη κύματος δεν χαρτογραφούνται ομοιόμορφα μέσα στο σύστημα της έγχρωμης όρασης που χρησιμοποιείται από το ανθρώπινο οφθαλμό. Μερικές φορές αυτές οι μονοχρωματικές εικόνες εμφανίζονται σε ψευδο-χρώματα, όταν για την παρουσίαση των μεταβολών στο σήμα, οι αλλαγές στο χρώμα χρησιμοποιούνται περισσότερο από τις αλλαγές στην ένταση. Αυτό είναι χρήσιμο διότι, μολονότι ο ανθρώπινος οφθαλμός διαθέτει γενικά πολύ μεγαλύτερο δυναμικό εύρος για την ανίχνευση της έντασης από το χρώμα, η ικανότητα να διακρίνουμε μικρές διαφορές έντασης στις φωτεινές περιοχές είναι αρκετά περιορισμένη. Για την απεικόνιση της θερμοκρασίας τα φωτεινότερα (θερμότερα) τμήματα της εικόνας έχουν συνήθως χρώμα λευκό, οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες κόκκινο και κίτρινο, και τα σκουρότερα (ψυχρότερα) τμήματα μαύρο. Μια κλίμακα εμφανίζεται δίπλα σε μια εικόνα ψευδο-χρώματος για να αντιστοιχίσει χρώματα σε θερμοκρασίες. Η ανάλυση των υπέρυθρων καμερών είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη των οπτικών καμερών, τις περισσότερες φορές μόνο 160 x 120 pixels ή 320 x 240 pixels. Πρόσφατες βελτιώσεις στις μη ψυχόμενες συστοιχίες εστιακού επιπέδου (uncooled focal plane arrays –

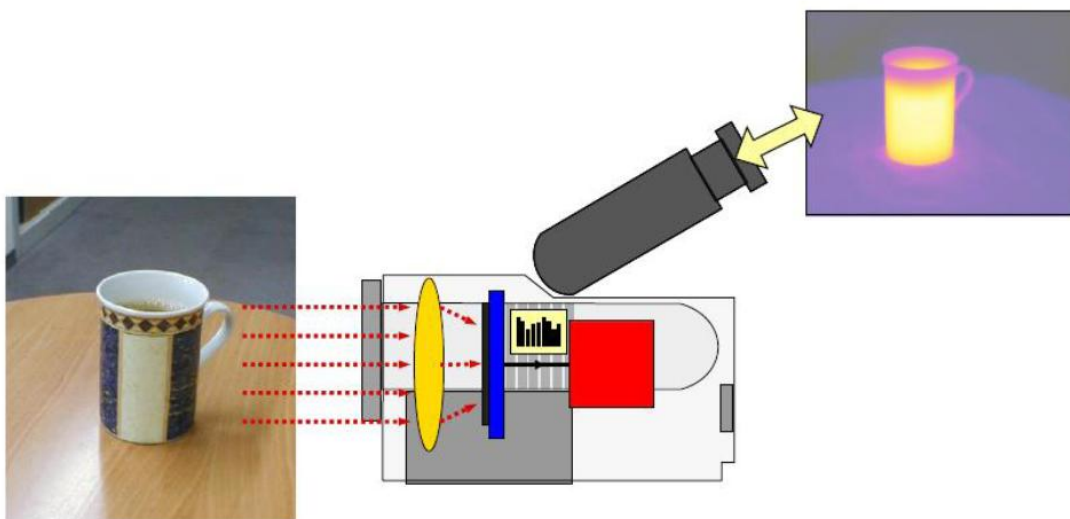
UFPA) εστιάζονται κυρίως σε υψηλότερη ανάλυση και πυκνότητα των εικονοστοιχείων (pixels). Το 2013, η DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ανακοίνωσε 53 μια LWIR κάμερα ανάλυσης 5  $\mu\text{m}$ , που χρησιμοποιεί συστοιχία εστιακού επιπέδου (FPA) 1280 x 720 pixels.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

#### 2.1 Αρχή λειτουργίας της θερμικής κάμερας

Η κάμερα μετατρέπει την αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία σε ορατή εικόνα. Βλέπει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από το στόχο που κοιτάζει. Η υπέρυθρη ακτινοβολία περνάει μέσα από τους φακούς και εστιάζεται στον ανιχνευτή, σχεδόν όπως η οπτική ακτινοβολία επάνω στο φιλμ μιας κανονικής κάμερας.



**Εικόνα 12: Αρχή της υπέρυθρης κάμερας<sup>[5]</sup>**

Ο ανιχνευτής θα δημιουργήσει ένα είδος ηλεκτρικού σήματος, το οποίο θα αλλάζει ανάλογα με την ένταση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό. Σημείωση: η ένταση, τίποτα άλλο! Το ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται και ψηφιοποιείται και ταΐζεται στα ηλεκτρονικά της κάμερας. Έπειτα μετατρέπεται σε μια εικόνα που εμφανίζεται στο σκόπευτρο και μπορούμε να δούμε μια υπέρυθρη εικόνα.

#### 2.2 Ορατό εναντίον υπέρυθρου

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις διαφορές όταν κοιτάζουμε το υπέρυθρο και το οπτικό.

1. Στο ευρύ φάσμα του ορατού φωτός, τα μάτια μας βλέπουν αντανάκλαση. Η υπέρυθη κάμερα ανιχνεύει και την ανακλώμενη και την εκπεμπόμενη ΥΕ ακτινοβολία.
2. Βλέπουμε διαφορετικά μήκη κύματος σαν διαφορετικά χρώματα και την ίδια στιγμή διακρίνουμε την ένταση σαν φωτεινότητα. Με μια 8 – 12  $\mu\text{m}$  ΥΕ κάμερα, ανιχνεύεται και εμφανίζεται μόνο η ένταση της ακτινοβολίας στο εύρος του φάσματος.

Όταν κοιτάζουμε κάτι με τα μάτια μας, βλέπουμε κυρίως αντανακλάσεις. Εκτός αν κάτι είναι πολύ ζεστό – τουλάχιστον 500C – θα βλέπουμε το ορατό φως από μια άλλη πηγή που ανακλάται πάνω στο αντικείμενο. Η πηγή του ορατού φωτός μπορεί να είναι μια λάμπα ή ο ήλιος. Τα χρώματα που βλέπουμε είναι επίσης αντανακλάσεις. Μια μπλε κούπα για παράδειγμα θα έχει την ικανότητα να αντανακλά περισσότερο το μπλε μέρος του ορατού φωτός και να απορροφά τα υπόλοιπα χρώματα.



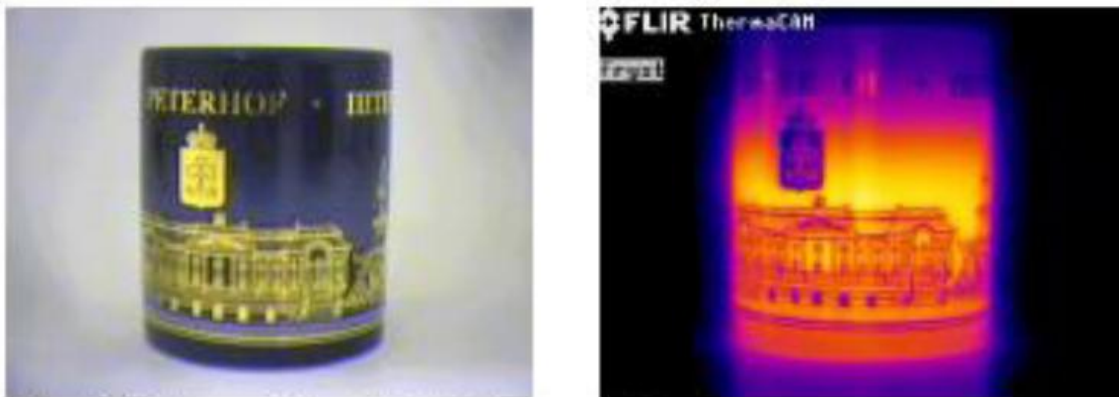
**Εικόνα 13: Το οπτικό είναι αντανακλάσεις, το υπέρυθρο είναι ακτινοβολία στόχου<sup>[5]</sup>**

Παρόλο που παίρνουμε αντανακλάσεις και στο υπέρυθρο, το ανακλώμενο κομμάτι είναι κάτι που προσπαθούμε να αντισταθμίσουμε. Προτιμούμε υψηλής εκπομπής στόχους που δεν αντανακλούν τόσο πολύ. Είναι κυρίως η ικανότητα εκπομπής από το στόχο που μας ενδιαφέρει περισσότερο, το ανακλώμενο κομμάτι συνήθως είναι μια ενόχληση. Η υπέρυθη κάμερα δε βλέπει καμία διαφορά μέσα στη ζώνη μήκους κύματος που ευαίσθητοποιείται. Μια μεγάλου μήκους κύματος κάμερα για παράδειγμα, που χρησιμοποιεί 8 – 12  $\mu\text{m}$  ζώνη κύματος δεν γνωρίζει εάν η ακτινοβολία που χτυπάει τον ανιχνευτή προέρχεται από 8, 9, 10, 11 ή 12  $\mu\text{m}$ . Απλά αθροίζει το γενικό άθροισμα – την ένταση της

ακτινοβολίας. Η εικόνα θα χρησιμοποιεί μια φανταστική κλίμακα του γκρι ή έγχρωμη, όπου το ένα άκρο της κλίμακας συνεπάγεται υψηλότερη ένταση ακτινοβολίας και το άλλο χαμηλότερη ένταση ακτινοβολίας.

### 2.3 Θερμική εικόνα

Μια θερμική εικόνα, είναι μια εικόνα έντασης θερμικής ακτινοβολίας. Ένα πολύ κοινό λάθος είναι να υποθέσουμε επίσης ότι είναι μια εικόνα κατανομής θερμοκρασίας. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για να αποσαφηνιστεί ακολουθούν δύο παραδείγματα. Τα οποία θα μας δείξουν ότι αυτά που βλέπουμε στην εικόνα, δεν είναι επ' ουδενί κατανομή θερμοκρασίας, αλλά είναι πάντα ένταση ακτινοβολίας.

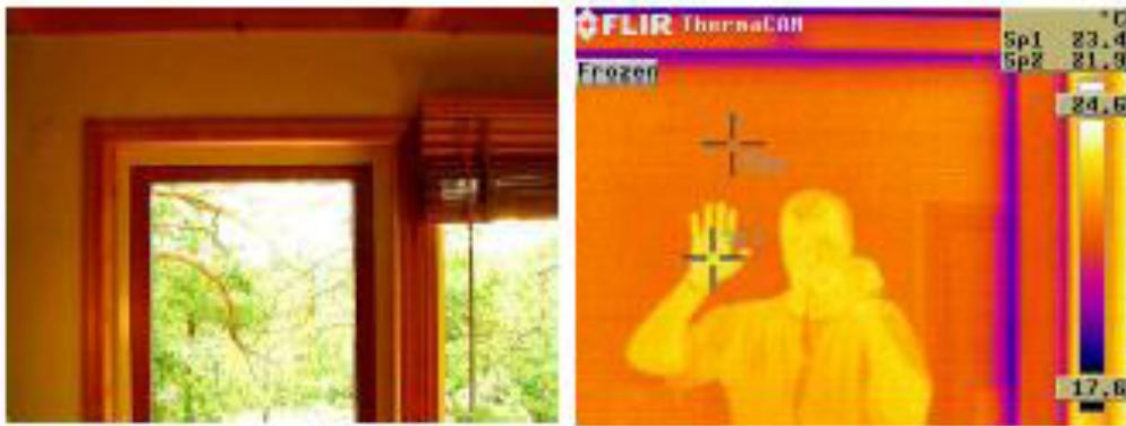


**Εικόνα 14: Μπλε κούπα με χρυσό αποτύπωμα σε οπτικό και υπέρυθρο<sup>[5]</sup>**

Στο εικόνα φαίνεται μια μπλε κούπα σε οπτικό και υπέρυθρο. Στην οπτική φωτογραφία, η ίδια η κούπα αντανακλά περισσότερο από το μπλε μέρος του ορατού φάσματος. Στην ασπρόμαυρη εικόνα φαίνεται σκοτεινότερο. Το χρυσό αποτύπωμα φαίνεται ελαφρώς κιτρινωπό και έχει μια μεταλλική λάμψη. Οτιδήποτε βλέπουμε είναι αντανακλώμενο.

Στη θερμική εικόνα, η μπλε κούπα έχει υψηλότερη ικανότητα εκπομπής και ως εκ τούτου θα ακτινοβολεί περισσότερο από το χρυσό αποτύπωμα που έχει χαμηλή ικανότητα εκπομπής. Η θερμοκρασία της επιφάνειας παρ' όλα αυτά, είναι σχεδόν παρόμοια μεταξύ του μπλε και του χρυσού. Η θερμική εικόνα, πραγματικά δείχνει τις διαφορές έντασης ακτινοβολίας αλλά όχι τις πραγματικές διαφορές θερμοκρασίας.

Σε αυτή την περίπτωση είναι η διαφορά της ικανότητας εκπομπής που προκαλεί την αντίθεση στη θερμική εικόνα, όχι η διαφορά θερμοκρασίας. Και η μπλε κούπα και το χρυσό αποτύπωμα λαμβάνουν ίση ποσότητα ακτινοβολίας από τα περιβάλλοντα αντικείμενα του δωματίου. Στην υπέρυθρη η θερμική ακτινοβολία από το δωμάτιο θα ανακλάται επίσης, περισσότερο από το χρυσό αποτύπωμα και λιγότερο από τη μπλε κούπα.



**Εικόνα 15: Οπτική και υπέρυθρη εικόνα του ίδιου σκηνικού<sup>[5]</sup>**

Εδώ είναι μια εικόνα ενός παραθύρου σε ορατό και σε υπέρυθρο. Υπάρχει ένας άντρας με μια υπέρυθρη κάμερα που στέκεται μπροστά από το παράθυρο, αλλά στην οπτική εικόνα το μόνο που βλέπουμε στο παράθυρο είναι αυτό που βρίσκεται έξω από το κτίριο. Στη θερμική εικόνα μπορούμε να δούμε μια αντανάκλαση του άντρα. Ο άντρας αποτελεί μια ποσότητα υψηλότερης ανακλώμενης ακτινοβολίας από το υπόλοιπο δωμάτιο και για αυτό το παράθυρο είναι 1,5 βαθμούς Κελσίου θερμότερο στην αντανάκλαση. Το ίδιο το παράθυρο βεβαίως έχει παντού την ίδια θερμοκρασία, εκτός από τα όρια του που είναι πιο ψυχρό. Αλλά η εξαγόμενη ακτινοβολία από την περιοχή της αντανάκλασης είναι πράγματι μεγαλύτερη. Έτσι πάλι βλέπουμε ότι η θερμική εικόνα εκπροσωπεί την ένταση της ακτινοβολίας, όχι τη θερμοκρασία.

## 2.4 Εμφανής θερμοκρασία - Ορισμός

Η εμφανής θερμοκρασία είναι η μη αντισταθμισμένη ένδειξη από μια υπέρυθρη κάμερα, η οποία περικλείει όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει στο εργαλείο, ανεξάρτητα από τις πηγές της.

Η θερμική εικόνα θα είναι πάντα μια εικόνα εμφανούς θερμοκρασίας. Η εμφανής θερμοκρασία, είναι διαφορετική από την πραγματική θερμοκρασία – που συνδέεται με τη μοριακή κίνηση

των ατόμων και των μορίων. Η εμφανής θερμοκρασία είναι μια μη αντισταθμισμένη ένδειξη θερμοκρασίας, ακριβώς όπως τη βλέπει το υπέρυθρο όργανο. Για να πάρουμε μια πραγματική ένδειξη θερμοκρασίας από ένα υπέρυθρο όργανο, πρέπει να αντισταθμίσουμε αρκετούς παράγοντες. Ο όρος 'εμφανής θερμοκρασία' είναι δόκιμος και για άλλους τύπους οργάνων, όχι μόνο για απεικονιστές.

#### **2.4.1 'Μέτρηση' εμφανούς θερμοκρασίας**

Κάποιες φορές μας ενδιαφέρει να ποσοτικοποιήσουμε την εμφανή θερμοκρασία. Για να 'μετρήσουμε' την εμφανή θερμοκρασία, θέτουμε την ικανότητα εκπομπής στο 1 και την απόσταση στο 0, που σημαίνει ότι καμία προσαρμογή δεν έγινε.

#### **2.4.2 Αντιστάθμιση - προσαρμογή**

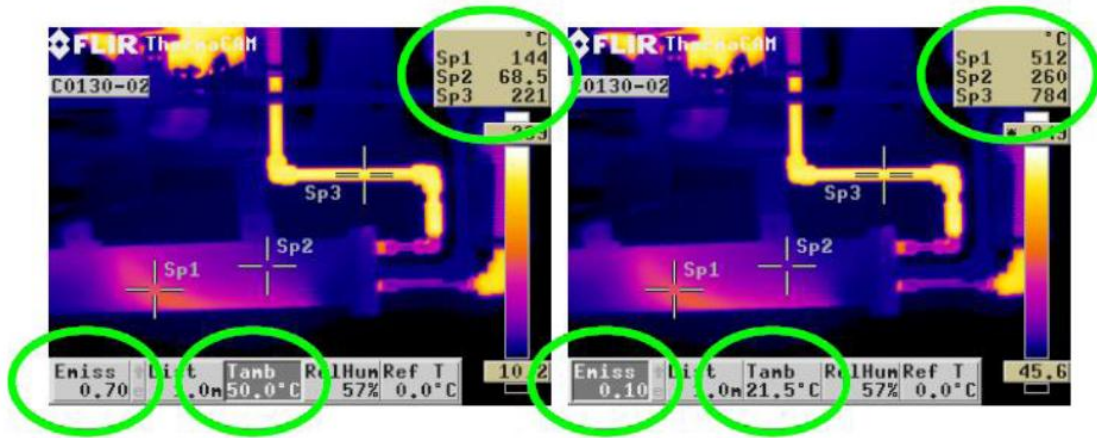
Για να μπορέσουμε να κάνουμε μέτρηση θερμοκρασίας, πρέπει να προσαρμόσουμε την εικόνα εμφανούς θερμοκρασίας με διάφορους τρόπους.

Κάνουμε την προσαρμογή θέτοντας αυτό που συνήθως ονομάζουμε παράμετρος αντικειμένου. Κάθε υπέρυθρο εργαλείο με πραγματική ικανότητα μέτρησης θα έχει μενού ή ρυθμίσεις για αυτές τις παραμέτρους παρόλο που μπορούν να διαφέρουν μεταξύ εργαλείων.

#### **2.4.3 Μετάφραση της εικόνας**

Όταν η προσαρμογή έχει ολοκληρωθεί, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι δεν αλλάζει αυτό που βλέπει η κάμερα. Η εικόνα που βλέπει κανείς στο σκόπευτρο, θα παραμένει μια εικόνα εμφανούς θερμοκρασίας. Πρέπει να μάθουμε να μεταφράζουμε την εικόνα στο μυαλό μας, γιατί η κάμερα δεν το κάνει αυτό για εμάς.

Στην εικόνα 16 είναι δυο εκδοχές της ίδια θερμικής εικόνας με δυο διαφορετικές ρυθμίσεις των παραμέτρων του αντικειμένου. Η διαφορά στις ρυθμίσεις θα αλλάξει δραματικά την ένδειξη της θερμοκρασίας στα τρία μετρούμενα σημεία που είναι μαρκαρισμένα στην εικόνα. Αλλά η εικόνα φαίνεται ακόμα η ίδια. Κάποιες από τις εμφανής θερμοκρασίες που βλέπουμε, θα είναι πολύ κοντά με την πραγματική θερμοκρασία και κάποιες θα απέχουν πολύ. Ένας θερμογράφος πρέπει να μάθει να ξεχωρίσει την πραγματική από τη λανθασμένη. Και αυτό είναι μια μεγάλη διαδικασία εκμάθησης.



**Εικόνα 16:** Δύο διαφορετικά παραδείγματα προσαρμογής παραμέτρων της ίδια εικόνας<sup>[5]</sup>

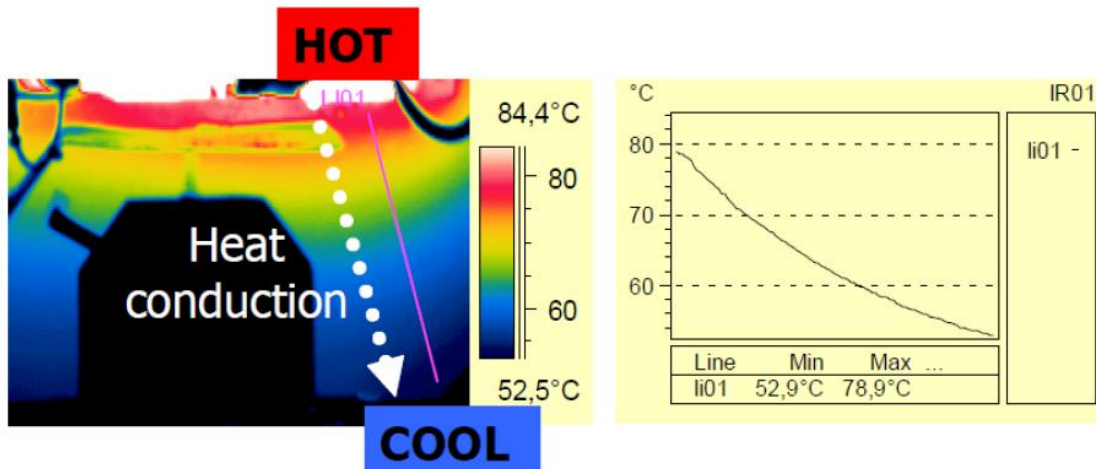
## 2.5 Τεχνικές Ανάλυσης Θερμικής Εικόνας

Όταν χρησιμοποιούμε μία οπτική κάμερα για να αποθανάτισουμε κάτι, συνήθως είναι αρκετό να δημιουργήσουμε μία ωραία φωτογραφία. Η θερμική εικόνα είναι κάτι εντελώς διαφορετικό από την οπτική εικόνα, για αυτό είναι απαραίτητο να μάθουμε νέες μεθόδους για να τις αναλύουμε. Η ανάλυση εικόνας απαιτεί θεωρητική γνώση και πρακτική εμπειρία. Η πρακτική εμπειρία έρχεται με την εξάσκηση στο πεδίο δράσης, αλλά έχοντας και το θεωρητικό υπόβαθρο πριν την πρακτική η βελτίωση των δεξιοτήτων έρχεται πολύ πιο γρήγορα.

### 2.5.1 Θερμική κλίση

Η θερμική κλίση είναι μία βαθμιαία αλλαγή της θερμοκρασίας με τοποθεσία πάνω σε μία επιφάνεια. Η θερμική κλίση συχνά υποδεικνύει την παρουσία αγωγίμης μεταφοράς θερμότητας. Οι περισσότεροι στόχοι στην θερμογραφία είναι αδιαφανή στερεά, και στα αδιαφανή στερεά η μόνη μεταφορά θερμότητας που μπορεί να συμβεί είναι η αγωγιμότητα. Για αυτό είναι πολύ σημαντικό η κατανόηση της ανάλυσης των θερμικών κλίσεων. Μία θερμική κλίση θα δείξει την κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας, και θα καθοδηγήσει στην πηγή θερμότητας. Η παρουσία ή η απουσία θερμικής κλίσης θα δώσει πολύ σημαντικά στοιχεία για να αναλυθούν θερμικές εικόνες.





**Εικόνα 17: Παράδειγμα θερμικής κλίσης σε μηχανήμα χύτευσης<sup>[5]</sup>**

Το μηχανήμα χύτευσης της παραπάνω εικόνας θερμαίνεται με ακτινοβολία από την κορυφή από ένα ζεστό καλούπι. Μπορούμε να δούμε πώς άγεται η θερμότητα από το μέρος που απορροφάται η ακτινοβολημένη θερμότητα μέσα στο μηχανήμα. Σε αυτή την συγκεκριμένη περίπτωση η θέρμανση του πλαισίου του μηχανήματος προκάλεσε μία άνιση θερμική διαστολή που προκάλεσε την διαρροή του καλουπιού. Η θερμική κλίση έπρεπε να μειωθεί, για να μειωθεί και η διαφορά της διαστολής.

### 2.5.2 Εργαλεία κάμερας για ενίσχυση σχεδίου

Η ανάλυση θερμικών εικόνων πολλές φορές είναι θέμα ανάλυσης θερμικών σχεδίων στην εικόνα. Τα θερμικά σχέδια μερικές φορές είναι δύσκολα να διακριθούν, και για αυτό το εργαλείο περιέχει πολλά χαρακτηριστικά που βοηθάνε στην ενίσχυση αυτών των σχεδίων.

Τα τρία πιο σημαντικά εργαλεία για ενίσχυση θερμικών σχεδίων στην κάμερα είναι

- Θερμική ρύθμιση
- Ισοθερμικό
- Παλέτες

Ένα ακόμη εργαλείο που είναι μερικές φορές σχετικό είναι η λειτουργία προφίλ

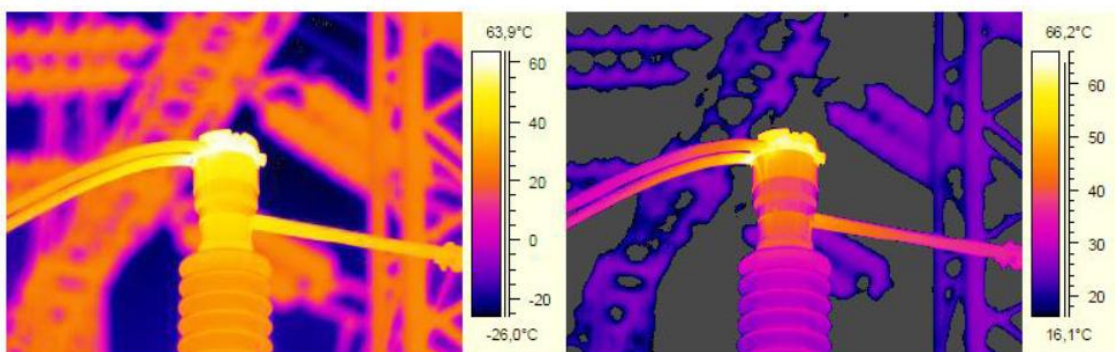
### 2.5.2.1 Θερμική ρύθμιση

Η θερμική ρύθμιση σημαίνει την προσαρμογή της κλίμακας της εικόνας στο αντικείμενο ανάλυσης, με σκοπό την εξιδανίκευση της αντίθεσης. Για να κάνουμε θερμική ρύθμιση χρησιμοποιούμε τις ρυθμίσεις Επιπέδου και Ανοίγματος της κάμερας. Όταν έχουμε επιλέξει το μέρος της εικόνας που μας ενδιαφέρει, θέτουμε το Επίπεδο/Ανοίγμα έτσι ώστε τα χρώματα της μπάρας χρωμάτων να καλύψουν μόνο αυτό το μέρος της εικόνας. Τα λιγότερο ενδιαφέροντα μέρη της εικόνας επιτρέπεται να βρίσκονται εκτός κλίμακας, και συνήθως γίνονται λευκά ή μαύρα.

Χρησιμοποιώντας την αυτόματη ρύθμιση που έχουν πολλές κάμερες, λαμβάνεται μία εικόνα όπου σχεδόν όλα τα μέρη της καλύπτονται από τα χρώματα της κλίμακας. Κάποιες φορές οι άκρες της εικόνας είναι εκτός κλίμακας. Αν κοιτάξουμε την παραπάνω εικόνα, η ζεστή σύνδεση στην άνω δεξιά γωνία έχει τα φωτεινά χρώματα της κλίμακας, ενώ το παρασκήνιο είναι μαύρο ή σχεδόν στο μαύρο. Αυτό επιτρέπει μια όψη ολόκληρης της εικόνας, ώστε να έχουμε μία ιδέα του τι βλέπουμε. Ολόκληρο το πλαίσιο της εικόνας είναι θερμικά ρυθμισμένο.

### 2.5.3 Θερμική ανάλυση-παράδειγμα

Οι παρακάτω δύο εικόνες δείχνουν έναν διακόπτη αποσύνδεσης υψηλής τάσης με ανωμαλία. Η αριστερή εικόνα είναι αυτόματα ρυθμισμένη από την κάμερα. Η κάμερα έχει κοιτάξει την εικόνα και έχει βρει ότι η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι  $-26,0^{\circ}\text{C}$ , και επομένως και το άνοιγμα έχει ανοίξει για να καλύπτει αυτή τη θερμοκρασία.



**Εικόνα 18: Η ίδια εικόνα, αυτόματα προσαρμοσμένη(αριστερά) και θερμικά ρυθμισμένη στα συστατικά(δεξιά). Μία αυτόματα ρυθμισμένη εικόνα με παρασκήνιο ψυχρού ουρανού δίνει πολύ πλατύ άνοιγμα<sup>[5]</sup>**

Αυτό σημαίνει ότι η αντίθεση στο μέρος της εικόνας που πραγματικά μας ενδιαφέρει να αναλύσουμε γίνεται πολύ φτωχή. Στην δεξιά εικόνα, το άνοιγμα είναι μικρότερο, και το επίπεδο είναι ελαφρώς υψηλότερο, που δίνει καλύτερη αντίθεση. Αυτή η εικόνα είναι πιο εύκολη στην ανάλυση, επειδή το θερμικό σχέδιο είναι περισσότερο έντονο.

Η εκμάθηση της θερμικής ανάλυσης είναι σημαντική, γιατί μία αυτόματα ρυθμισμένη εικόνα δεν δείχνει πάντα αυτό που επιδιώκουμε να δούμε και μπορεί να χάσουμε προβλήματα που βρίσκονται εκεί αλλά είναι κρυμμένα.

Η θερμική ρύθμιση είναι μέρος της ανάλυσης που κάνει ένας θερμογράφος στην πράξη, προτού αποθηκεύσει την εικόνα για μελέτη. Η ανάγκη για αντίθεση μπορεί να είναι διαφορετική στην αναφορά. Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση πρέπει να οριστεί μια κατάλληλη θερμική ρύθμιση πριν την αποθήκευση.

#### **2.5.4 Ισοθερμικό**

Το ισοθερμικό αντικαθιστά συγκεκριμένα χρώματα στην κλίμακα με ένα χρώμα που κάνει αντίθεση. Σημαδεύει μια περιοχή εμφανούς θερμοκρασίας. Τα χρώματα σε μια εικόνα δεν αντιπροσωπεύουν θερμοκρασία. Το ισοθερμικό απλά αντικαθιστά αυτά τα χρώματα με ένα άλλο χρώμα, που έχει υψηλή αντίθεση σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στην ίδια την εικόνα και ως εκ τούτου ούτε το ισοθερμικό αντιπροσωπεύει θερμοκρασία. Το ισοθερμικό μπορεί να μετακινείται πάνω και κάτω στην κλίμακα και να φαρδαίνει ή να στενεύει όπως απαιτείται.

Η αντίθεση είναι το στοιχείο κλειδί. Όταν κοιτάζουμε για αδύναμα θερμικά σχέδια πρέπει να βοηθήσουμε τα μάτια μας να τα δουν. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ισοθερμικό για να ανιχνεύσουμε τη μεταφορά θερμότητας, ή για να βρούμε αν υπάρχει. Αν το ισοθερμικό είναι επίπεδο σε μια επιφάνεια ή ένα στόχο, σημαίνει ότι δεν υπάρχει καθόλου ροή θερμότητας κατά μήκος αυτής της επιφάνειας ή στόχου(το οποίο δε σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρξει ροή θερμότητας από αυτή, εάν είναι πιο θερμή από τα περιβάλλοντα, αλλά αυτό είναι κάτι διαφορετικό). Ένας ηλεκτρικός αγωγός που έχει ένα ισοθερμικό στοιχείο και είναι ζεστό, μεταφέρει φορτίο. Εάν είναι πολύ ζεστός σημαίνει ότι το φορτίο είναι πολύ υψηλό και όχι ότι υπάρχει μια κακή σύνδεση.

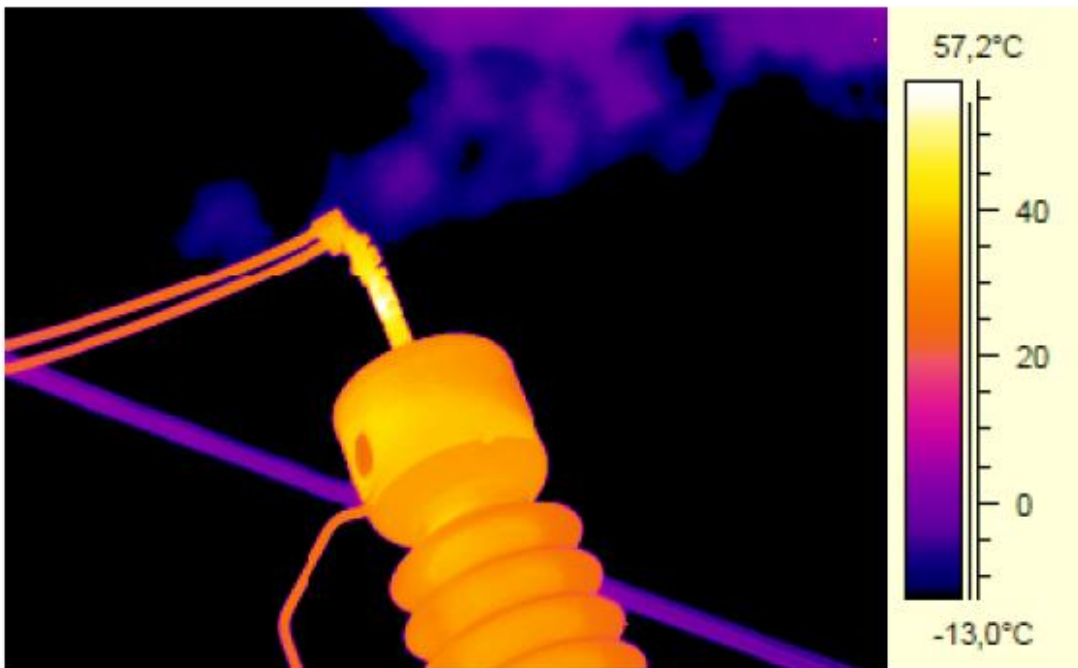
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ισοθερμικό για να βρούμε την ακριβή τοποθεσία του πιο ζεστού σημείου. Θα μας δείξει που μπορεί να υπάρχει πηγή θερμότητας πίσω από την επιφάνεια που

κοιτάζουμε ή πού βρίσκεται το πιο λεπτό σημείο ενός μονωτικού αγγείου. Το ισοθερμικό είναι μια λειτουργία με διπλό σκοπό. Από τη μία χρησιμοποιείται για να αναλύσουμε σχέδια. Από την άλλη, στις περισσότερες κάμερες είναι ακόμα μια λειτουργία μέτρησης θερμοκρασίας. Μια θερμοκάμερα μπορεί να έχει διαθέσιμους αρκετούς διαφορετικούς τύπους ισοθερμικού.

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα χρήσης του ισοθερμικού:

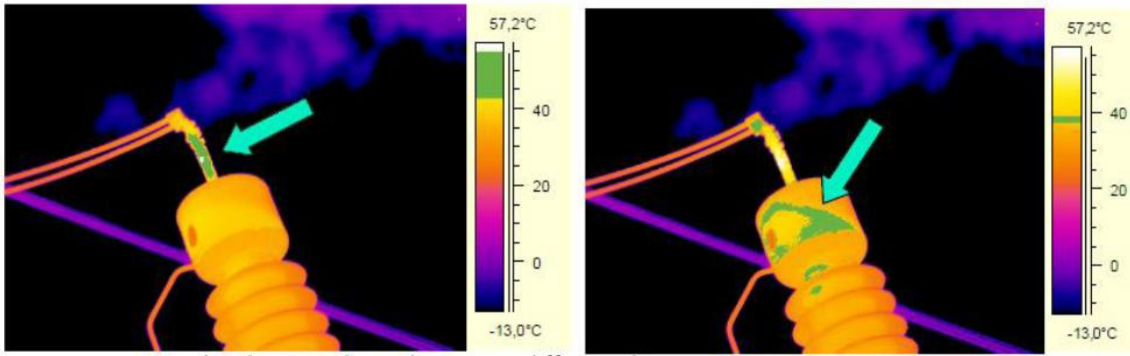
#### 2.5.4.1 Ανάλυση με ισοθερμικό – Παράδειγμα 1

Εδώ είναι μια θερμική εικόνα ενός κουζινέτου υψηλής τάσης μετασχηματιστή. Με μία πρώτη ματιά και με αυτή τη θερμική ρύθμιση, η εικόνα δε μας δείχνει και πολλά.



**Εικόνα 19: Υψηλής τάσης κουζινέτο μετασχηματιστή<sup>[5]</sup>**

Με τη χρήση όμως του ισοθερμικού τα πράγματα αλλάζουν, όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν



**Εικόνα20: Το ίδιο κουζινέτο με ισοθερμικά σε διαφορετικές τοποθεσίες<sup>[5]</sup>**

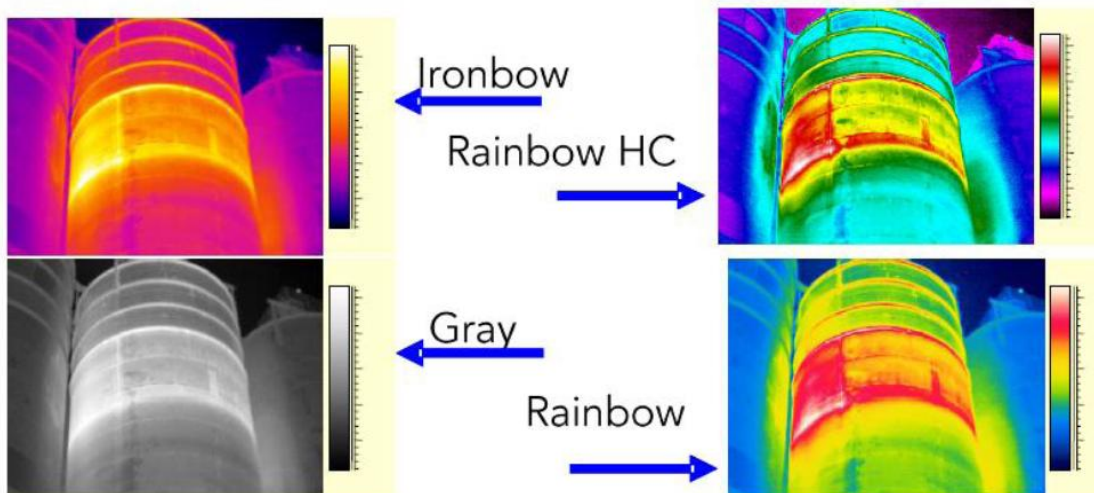
Στην αριστερή εικόνα το ισοθερμικό επικεντρώνεται σε ένα μέρος στην σύνδεση του κουζινέτου. Αυτό το μέρος παράγει θερμότητα, και μπορεί για αυτό να αποτελέσει πρόβλημα. Στην δεύτερη εικόνα, το ισοθερμικό σκιαγραφεί το επίπεδο λαδιού στο κουζινέτο.

### 2.5.5 Παλέτες

Η χρωματική παλέτα της εικόνας παραχωρεί διαφορετικά χρώματα για να σηματοδότησουν συγκεκριμένα επίπεδα φανεράς θερμοκρασίας. Οι παλέτες μπορούν να δίνουν περισσότερη ή λιγότερη αντίθεση, αναλόγως των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτές.

Η θερμική εικόνα μπορεί να παρουσιαστεί με μέγιστο 256 διαφορετικές αποχρώσεις χρωμάτων ή γκρι ταυτόχρονα. Σε μια συνεχόμενη κλίμακα του γκρι για παράδειγμα ξεκινάμε με μαύρο στη μια άκρη και το αφήνουμε να γίνει πιο φωτεινό για κάθε ένα από τα 256 βήματα μέχρι να καταλήξει άσπρο. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει πολύ μικρή αντίθεση ανάμεσα στη -για παράδειγμα- 93η και 94η απόχρωση του γκρι. Με μία έγχρωμη εικόνα, έχουμε περισσότερη ελευθερία στη χρήση χρωμάτων με μεγαλύτερη αντίθεση. Για να δώσουμε στην εικόνα μία απαλή εμφάνιση που δεν θα ενοχλεί στη θέαση της, τα χρώματα θα πρέπει να ταιριάζουν μεταξύ τους.

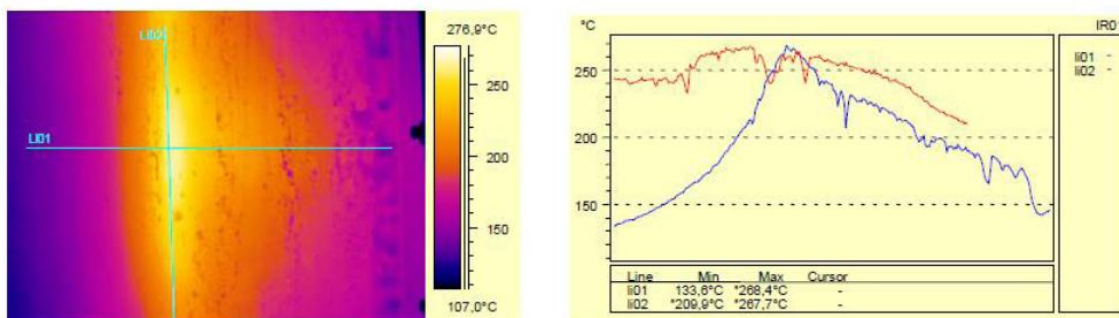
Μεταξύ χωρών και μεταξύ βιομηχανιών, οι παλέτες που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι στις αναφορές τους διαφέρουν, λόγω κουλτούρας ή συνθηκών. Κάποιος ξεκινά να χρησιμοποιεί μία συγκεκριμένη και οι άλλοι ακολουθούν και αμέσως γίνεται 'παράδοση'.



**Εικόνα 21: Παραδείγματα διαφορετικών παλετών<sup>[5]</sup>**

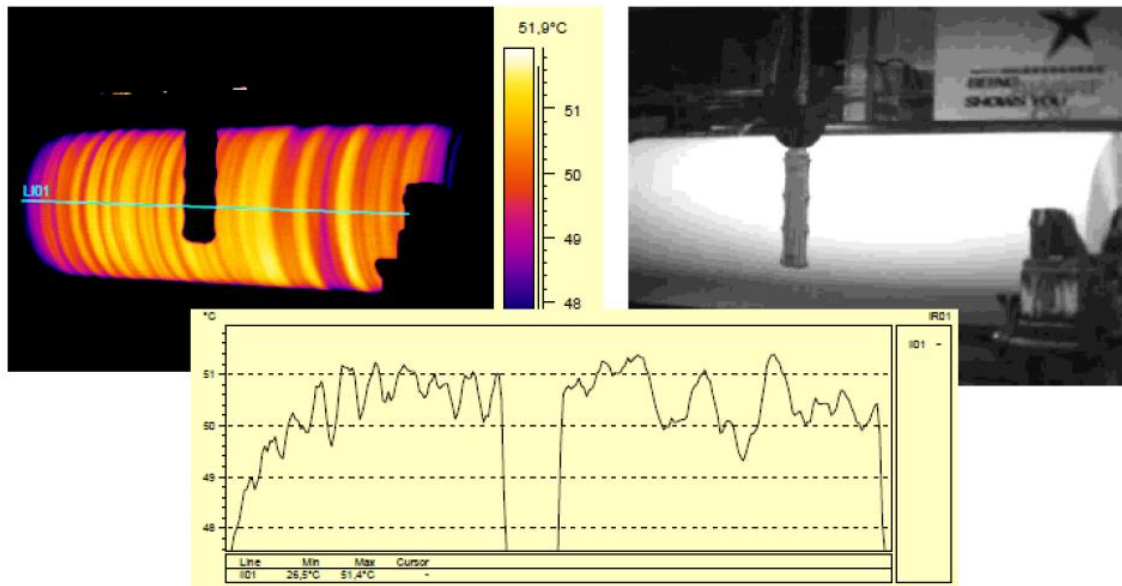
### 2.5.6 Προφίλ

Το προφίλ περιγράφει τη θερμοκρασία κατά μήκος μιας γραμμής στην εικόνα. Η λειτουργία του προφίλ δεν είναι πολύπλοκη στην κατανόησή της. Είναι απλά ένα διάγραμμα με θερμοκρασία στον κατακόρυφο άξονα και τοποθεσία στον οριζόντιο άξονα. Είναι μια πολύ χρήσιμη λειτουργία όπου ενδείκνυται.



**Εικόνα 22: Το προφίλ δείχνει την κατακόρυφη και οριζόντια θερμική κλίση αυτού το ζεστού σημείου<sup>[5]</sup>**

Η λειτουργία προφίλ είναι εξαιρετική σε περιπτώσεις που έχουμε θερμικό σχέδιο κατά μήκος του στόχου, όπως στα ρολά ενός μηχανήματος χαρτιού.



**Εικόνα 23:Χρήση της λειτουργίας προφίλ στην παραγωγή χαρτιού<sup>[5]</sup>**

Σε αυτή την εικόνα, μπορούμε να δούμε τις ανωμαλίες στα ρολά του χαρτιού, όπως εξέρχεται από το μηχάνημα χαρτιού. Αυτές οι ανωμαλίες είναι μη επιθυμητές και το θερμικό σχέδιο μπορεί να βοηθήσει τους χειριστές να προσαρμόσουν την διαδικασία για να δημιουργήσουν ένα πιο ομαλό σχέδιο.

## 2.6 Ανάλυση εικόνας –Παραπλανητικά σχέδια

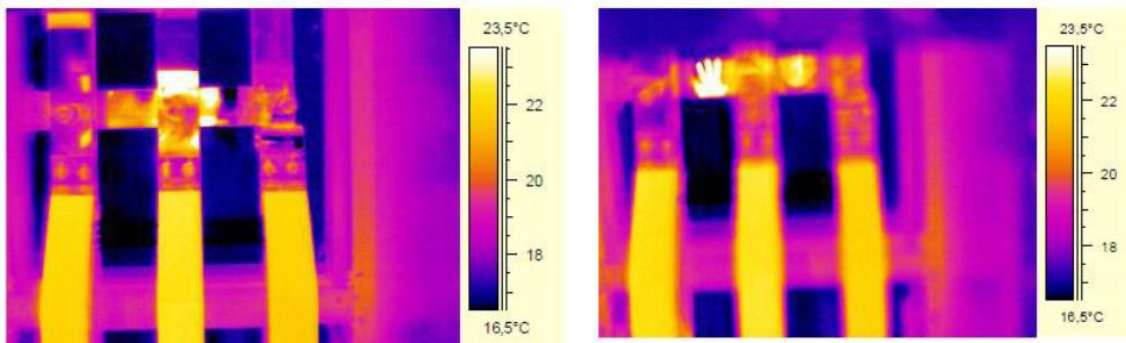
Στη θερμογραφία, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που θα προκαλέσουν σφάλματα στην ανάλυση. Δύο από αυτούς τους παράγοντες είναι:

- Αντανακλάσεις από πηγές στιγμάτων
- Διαφορές ικανότητας εκπομπής

Αν σταθεί κανείς μπροστά από έναν καθρέπτη, θα δει μία αντανάκλαση του εαυτού του. Εάν δεν σταθεί μπροστά από τον καθρέπτη, ο καθρέπτης θα αντανακλά τον τοίχο ή οτιδήποτε άλλο. Ισχύει το ίδιο με τις θερμικές εικόνες και τις αντανακλάσεις. Εάν κρατήσουμε κάτι ζεστό μπροστά από μια ανακλούσα επιφάνεια, θα δούμε την αντανάκλαση του αντικειμένου στην θερμική εικόνα. Εάν μετακινήσουμε τη ζεστή πηγή, η επιφάνεια θα αντανακλάσει κάτι άλλο.

Για να πάρουμε μία ομαλή και εύκολη στην ανάλυση εικόνα, προτιμάμε να έχουμε μία επιφάνεια με ομοιόμορφη εξαγόμενη ακτινοβολία που αντανακλά στον στόχο μας. Εάν δεν μας ενδιαφέρει αυτό, μπορούμε να έχουμε αντανάκλαση από μία πηγή σημείου. Αυτό που κοινώς ονομάζουμε ‘αντανάκλαση’ είναι για την ακρίβεια ένα σημείο με εξαγόμενη ακτινοβολία διαφορετική από αυτήν που υπάρχει στην περιοχή γύρω του.

Οι αντανακλάσεις σημείου είναι ενοχλητικές για εμάς, γιατί μοιάζουν με ανωμαλία. Ένα παράδειγμα είναι όταν ψάχνουμε να βρούμε ζεστές συνδέσεις σε ηλεκτρικά συστήματα.



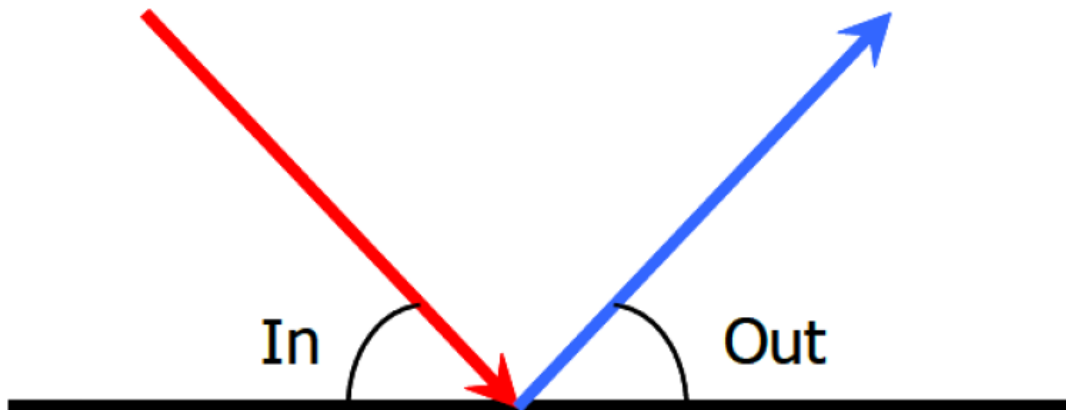
**Εικόνα 24: Αντανακλάσεις του χειριστή (προσέξτε τα χέρια και το πρόσωπο), η δεξιά εικόνα είναι εστιασμένη σε διπλή απόσταση από το στόχο<sup>[5]</sup>**

Η αριστερή εικόνα έχει ‘ζεστό σημείο’ στη μεσαία μπάρα που ομοιάζει με ζεστή σύνδεση στο ανεκπαιδευτο μάτι. Στην δεξιά εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε ότι είναι μία αντανάκλαση του χειριστή. Πάρθηκε υπό διαφορετική γωνία και σε διπλή εστιακή απόσταση.

Πηγές αντανακλώμενων εστιών μπορεί να είναι διάφορα πράγματα. Ο χειριστής για παράδειγμα είναι πολύ κοινή πηγή αντανακλάσεων. Άρα ο χειριστής πρέπει να στέκεται έτσι ώστε να μην βρίσκετε ακριβώς μπροστά από τον στόχο.

Οι εισερχόμενες και εξερχόμενες γωνίες αντανάκλασης είναι πάντα οι ίδιες, όπως σε έναν καθρέπτη. Γνωρίζοντας αυτό μας βοηθά να εντοπίζουμε την πηγή αντανάκλασης σημείου και να την αποφύγουμε.



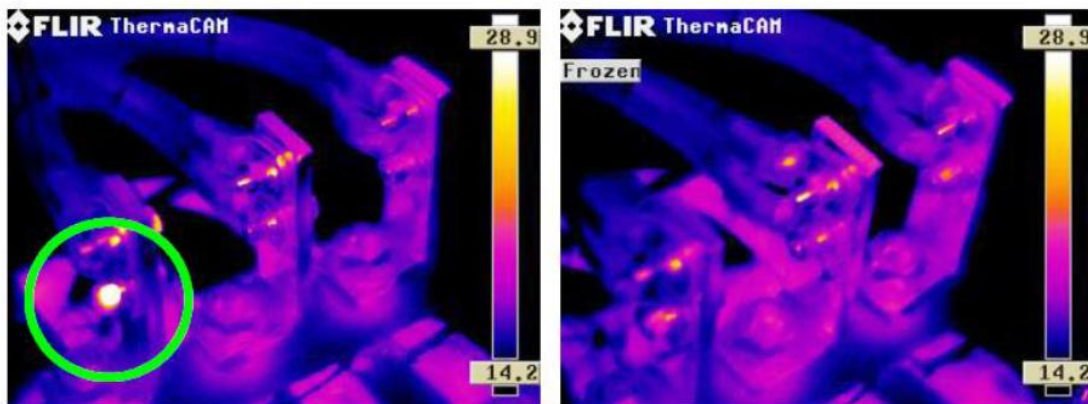


**Εικόνα 25: Οι εισερχόμενες και εξερχόμενες γωνίες αντανάκλασης είναι πάντα οι ίδιες<sup>[5]</sup>**

Εάν η επιφάνεια είναι διάχυτη, η εξερχόμενη αντανάκλαση θα είναι διασκορπισμένη, και θα αφήσει την επιφάνεια όχι σαν συγκεντρωμένη ακτίνα αλλά προς όλες τις κατευθύνσεις. Τότε το σημείο αντανάκλασης θα είναι πιο αχνό.

Οι περισσότερες ανακλάουσες επιφάνειες μοιάζουν περισσότερο με καθρέφτη στο υπέρυθρο φάσμα απ' ότι στο ορατό. Αυτό σημαίνει ότι μια επιφάνεια που φαίνεται διάχυτη στο ορατό μπορεί κάλλιστα να μοιάζει με καθρέφτη στο υπέρυθρο.

## 2.7 Αντανάκλαση από μια πηγή σημείου.



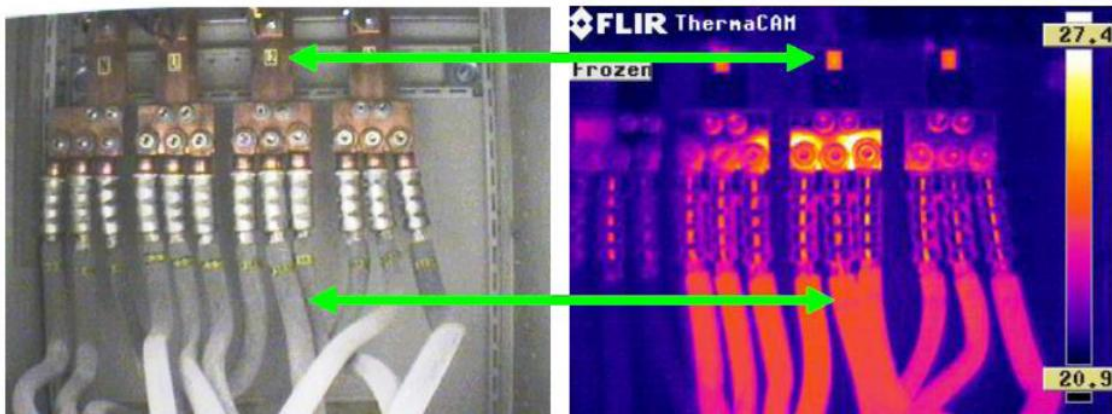
**Εικόνα 26: Αντανάκλαση από μια πηγή σημείου, εξαφανίζεται όταν αλλάζει η γωνία<sup>[5]</sup>**

Αν αλλάξουμε τη γωνία που βλέπουμε το στόχο και το 'ζεστό σημείο' εξαφανιστεί, ήταν μια αντανάκλαση από μια πηγή σημείου.



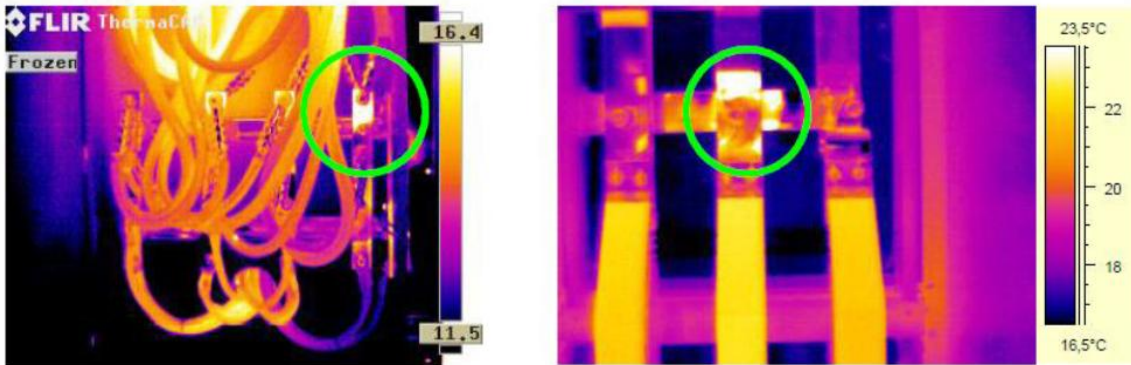
**Εικόνα 27: Όταν η γωνία αλλάζει, η αντανάκλαση κινείται<sup>[5]</sup>**

Σε αυτές τις δυο εικόνες, η αντανάκλαση έχει μετακινηθεί από τα αριστερά στα δεξιά, όταν η κάμερα άλλαξε γωνία λήψης.



**Εικόνα 28: Η υψηλότερη εκπομπή δίνει μια πιο 'πραγματική' ένδειξη<sup>[5]</sup>**

Μια χαμηλής εκπομπής επιφάνεια θα προσπαθήσει να καμουφλάρει την πραγματική της θερμοκρασία, αντανακλώνοντας αυτών που την περιβάλλουν. Κοιτάζοντας στο ορατό φάσμα τον στόχο και προσπαθώντας να καθορίσουμε πού έχουμε υψηλή και χαμηλή εκπομπή, μπορούμε να διαπιστώσουμε ποιες εμφανείς θερμοκρασίες είναι πιο κοντά στην πραγματική θερμοκρασία. Σε αυτή την περίπτωση το καλώδιο και το μικρό ταμπελάκι ταινίας στη μπάρα, έχουν και τα δυο υψηλή εκπομπή και μοιράζονται παρόμοια εμφανή θερμοκρασία. Οι επιφάνειες με υψηλή εκπομπή μπορούν να διαπιστευτούν, οι υπόλοιπες μπορούν να αγνοηθούν.



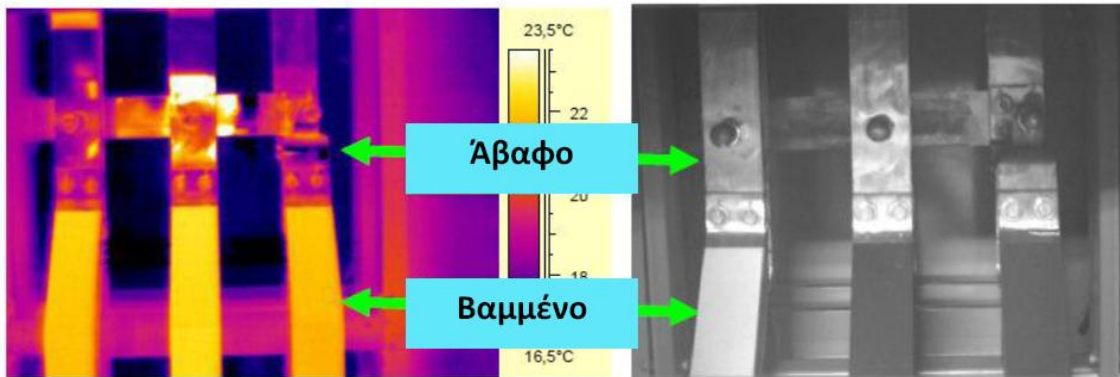
**Εικόνα 29: Η πραγματική θέρμανση συνήθως έχει ομαλό σχέδιο αλλά οι αντανάκλασεις όχι<sup>[5]</sup>**

## **2.8 Αντανάκλασεις από διαφορετικές πηγές**

Μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα για τις εμφανείς θερμοκρασίες που διαβάζουμε. Το υψηλής εκπομπής καλώδιο, θα δείξει κοντά στην πραγματική θερμοκρασία. Το χαμηλής εκπομπής παπούτσι καλωδίου αντανακλά το μετασχηματιστή υπό γωνία και φαίνεται ζεστό. Η μπάρα αντανακλά τον τοίχο πίσω από το χειριστή και φαίνεται κρύα. Στην πραγματικότητα όλα είναι περίπου στην ίδια θερμοκρασία και κοντά στην εμφανή θερμοκρασία που διαβάζουμε από το καλώδιο. Όλα αντανακλούν πάντα κάτι.

## 2.9 Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 1

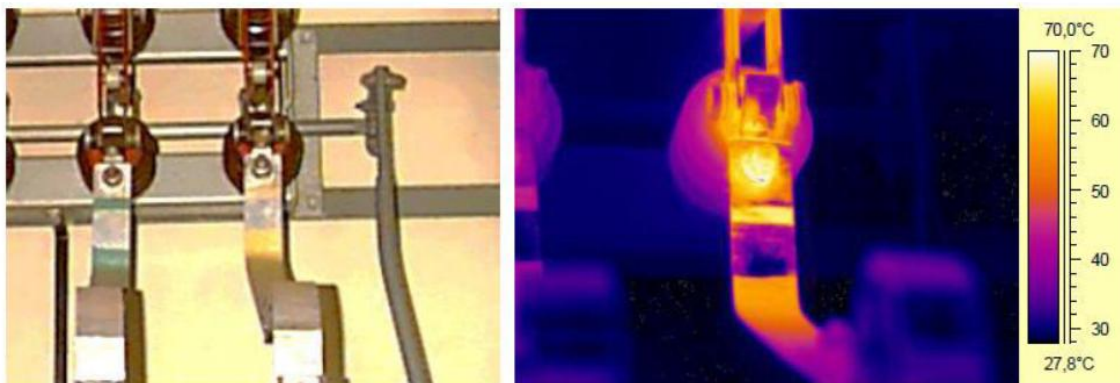
Μια απότομη αλλαγή στην εκπομπή δημιουργεί απότομη αλλαγή και στο θερμικό σχέδιο, ακόμα και αν η πραγματική θερμοκρασία παραμείνει ίδια.



**Εικόνα 30: Διαφορετική εμφάνιση βαμμένου και άβαφου τμήματος της μπάρας<sup>[5]</sup>**

Στην παραπάνω εικόνα το βαμμένο και άβαφο τμήμα φαίνονται διαφορετικά. Η βαφή φυσικά θα δείξει μια πιο πραγματική θερμοκρασία. Δεν υπάρχει θερμική κλίση σε αυτή την εικόνα, έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπάρχει ανωμαλία.

## 2.10 Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 2

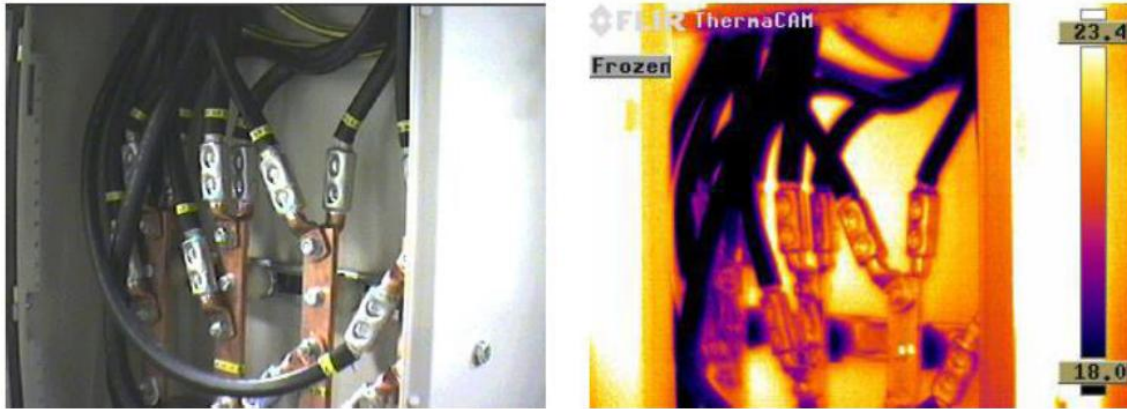


**Εικόνα 31: Απότομη αλλαγή στο θερμικό σχέδιο εξαιτίας αλλαγής στην εκπομπή<sup>[5]</sup>**

Σε αυτή τη θερμική εικόνα υπάρχει μια ζεστή σύνδεση. Αυτό φαίνεται από τη θερμική διαβάθμιση που εκτείνεται από τη

σύνδεση προς τη μπάρα. Η θερμική διαβάθμιση διακόπτεται από διαφορές στην εκπομπή εκεί που η μπάρα είναι άβαφη.

### 2.11 Διαφορά εκπομπής – Παράδειγμα 3

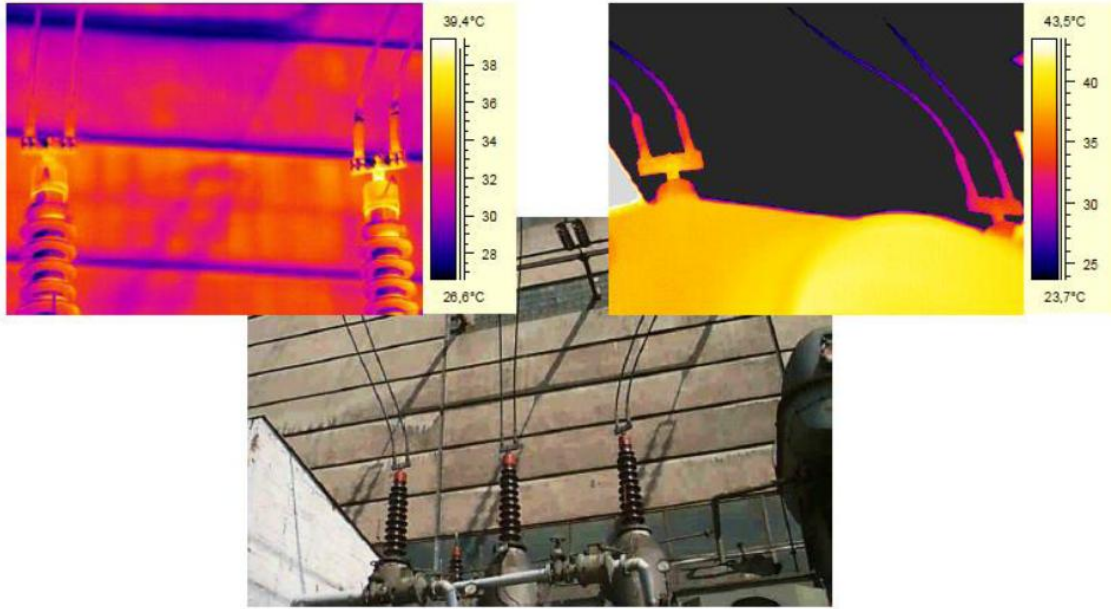


**Εικόνα 32: Ψυχρότερος στόχος που αντανακλά θερμότερα περιβάλλοντα<sup>[5]</sup>**

Αυτή η θερμική εικόνα φαίνεται πολύ παράξενη, αν κανείς δεν γνωρίζει τις συνθήκες στις οποίες τραβήχτηκε. Τα καλώδια δεν είναι καθόλου φορτισμένα. Είναι σε ένα δωμάτιο με κάποιες γεννήτριες πετρελαίου που δοκιμάζονται. Η διαδικασία της δοκιμής έχει θερμάνει το δωμάτιο και το κουτί σύνδεσης που βλέπουμε στις εικόνες. Άρα τα καλώδια έχουν υψηλότερη θερμική χωρητικότητα και έχουν παραμείνει δροσερά. Τα χαμηλής εκπομπής μέρη θα αντανακλούν τα θερμότερα πλέον περιβάλλοντα.

### 2.12 Διάφορες αντανακλαστικές πηγές

Οι αντανακλάσεις σημείων δημιουργούν παραπλανητικά θερμικά σχέδια. Αλλά μερικές φορές ακόμα και μεγάλες επιφάνειες με διαφορετικά επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας, μπορούν να προκαλέσουν παραπλανητικά σχέδια. Μια τέτοια 'επιφάνεια' είναι ο ουρανός. Ένας καθαρός ουρανός έχει πολύ χαμηλή εμφανή θερμοκρασία. Ένας συννεφιασμένος ουρανός έχει εμφανή θερμοκρασία πλησιέστερη στη θερμοκρασία του εδάφους, αλλά και πάλι ψυχρότερη.



**Εικόνα 33:Συνδέσεις μετασχηματιστή παρατηρούμενες από διαφορετικές θέσεις<sup>[5]</sup>**

Από τη φωτογραφία παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι μια πολύ ηλιόλουστη μέρα. Βλέπουμε τις σκιές των ηλεκτρικών συστατικών στο κτίριο της γεννήτριας από πίσω. Το αριστερό θερμοδιάγραμμα πάρθηκε από την ίδια κατεύθυνση όπως και η φωτογραφία. Τα κάθετα εγκάρσια τμήματα που συνδέουν τις δύο διπλές γραμμές τροφοδοσίας στα κουζινέτα φαίνονται αρκετά δροσερά. Αυτό είναι λόγω της αντανάκλασής τους από τον ψυχρό ουρανό. Η εικόνα είναι αρκετά δύσκολη για ανάλυση. Το δεξιό θερμοδιάγραμμα τραβήχτηκε από ένα μέρος ανάμεσα από τον μετασχηματιστή και το κτίριο της γεννήτριας. Μέσα σε αυτό ο τοίχος του κτιρίου αντανακλά αντί για τον ουρανό. Τα σχέδια φαίνονται πολύ πιο απαλά και τώρα είναι πολύ πιο εύκολο να αναλυθεί η εικόνα. Υπάρχει μία αμελητέα θερμική ανωμαλία στην αριστερή σύνδεση, που είναι η δεξιά σύνδεση στις άλλες δύο εικόνες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Η θερμογραφία βρίσκει άριστη εφαρμογή και στον έλεγχο ηλεκτρικών κυκλωμάτων και εγκαταστάσεων. Επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται:

- στην παραγωγή ενέργειας
- στους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας
- καθώς και σε όλο το δίκτυο διανομής (αγωγοί και πίνακες)

Πιο συγκεκριμένα: Η θερμική απεικόνιση αποτελεί έναν εύκολο τρόπο για τον εντοπισμό θερμοκρασιακών διαφορών στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Η αποτύπωση των τριών φάσεων π.χ., σε ένα κύκλωμα μπορεί πολύ εύκολα να δείξει αν έχουμε ανωμαλίες που οφείλονται σε ασυμμετρία ή υπερφόρτιση.

Μια ασυμμετρία στην τάση μπορεί να προκαλέσει φθορά στις συνδέσεις του κυκλώματος, να εξασθενίσει την συνολική παρερχομένη τάση, ενώ οι κινητήρες ή άλλα φορτία, που μπορεί να συνδέονται στο σύστημα που εξετάζεται, απορροφούν μεγάλο ρεύμα, λειτουργώντας ταυτόχρονα σε χαμηλή ροπή με αποτέλεσμα να καταστρέφονται γρήγορα. Μια μεγαλύτερη ασυμμετρία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή κάποιας ασφάλειας με αποτέλεσμα κάποια φάση του κυκλώματος να τεθεί εκτός λειτουργίας.

Επίσης, η εφαρμογή της θερμικής απεικόνισης στους μετασχηματιστές εξασφαλίζει άμεση και ακριβή διάγνωση προβλημάτων στη λειτουργία τους.

Με τον θερμογραφικό έλεγχο δικτύων και μετασχηματιστών, μπορούμε από απόσταση να ελέγξουμε επίπεδο στάθμης ελαίου ψύξης, κατάσταση μονωτήρων, συνδέσεις, συστήματα ψύξης κλπ. Η θερμογραφία όπως έχει αποδειχθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αποτελεί την κυρίαρχη τεχνική διάγνωσης σφαλμάτων των εγκαταστάσεων για την υλοποίηση μέρους της προληπτικής συντήρησης. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου της θερμογραφικής απεικόνισης είναι ότι δεν απαιτεί διακοπή της λειτουργίας των προς επιθεώρηση εγκαταστάσεων χωρίς να διαταράσσεται η παραγωγική διαδικασία.

Ο θερμογραφικός έλεγχος ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων εφαρμόζεται σε όλη την πορεία που ακολουθεί η ηλεκτρική ενέργεια:

- Παραγωγή
- Μεταφορά
- Διανομή

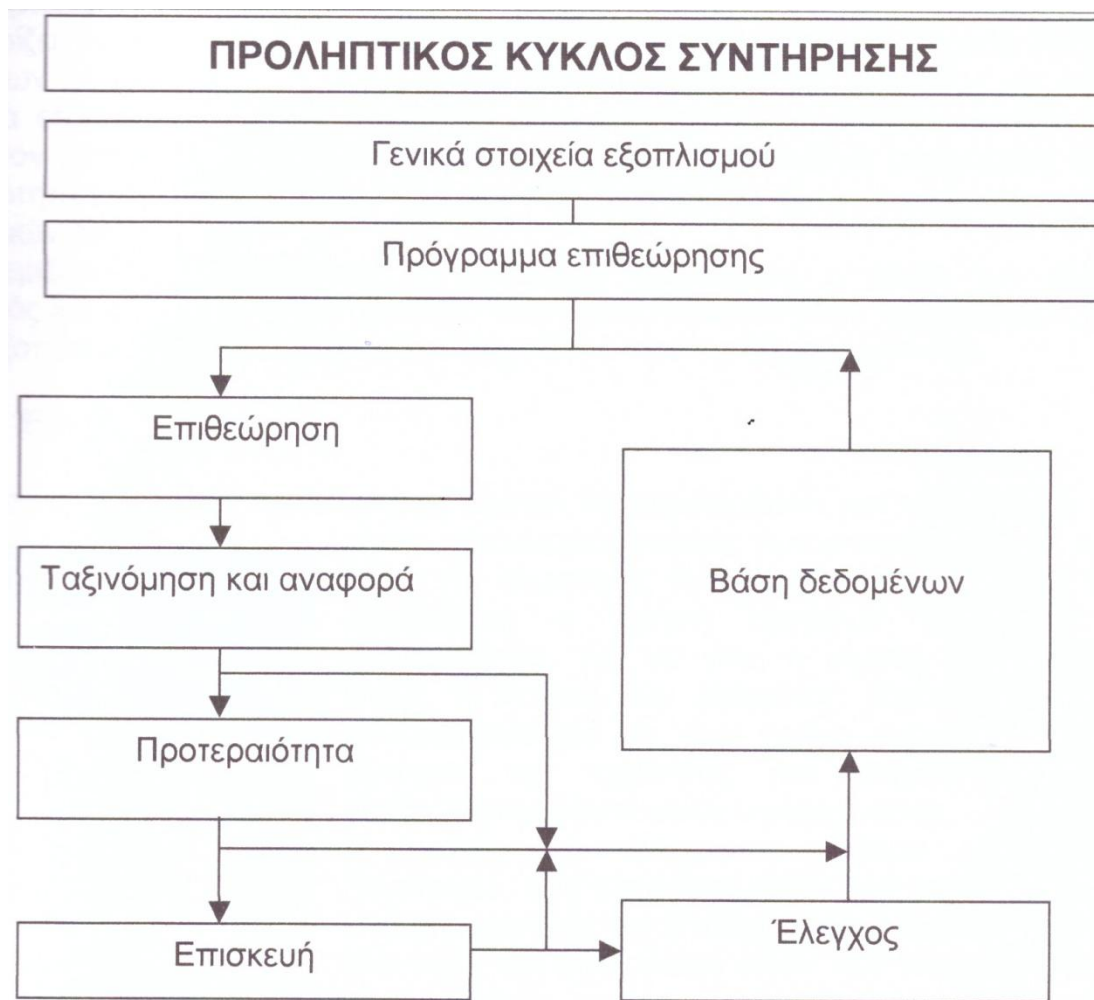
Το γεγονός ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας έχει δημιουργήσει έναν φυσικό διαχωρισμό στις τρεις προαναφερθείσες περιοχές. Οι εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάνουν στις περιόδους υψηλής ηλεκτρικής κατανάλωσης. Αυτές οι περίοδοι διαφέρουν από χώρα σε χώρα και ανά κλιματική περιοχή. Οι περίοδοι μέτρησης επίσης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης που ελέγχεται, π.χ. υδροηλεκτρικοί, πυρηνικοί, πετρελαϊκοί, θερμοηλεκτρικοί σταθμοί με άνθρακα.

### **3.1 Κύκλος επιθεώρησης**

Ο κύκλος επιθεώρησης αποτελείται από τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Γενικά στοιχεία εξοπλισμού
2. Πρόγραμμα επιθεώρησης
3. Επιθεώρηση
4. Ταξινόμηση και αναφορά
5. Προτεραιότητα
6. Επισκευή
7. Έλεγχος
8. Βάση δεδομένων





**Εικόνα 34: Η θερμογραφία βασισμένη σε προληπτική συντήρηση έχει μια κυκλική πορεία<sup>[6]</sup>**

### 3.2 Γενικά στοιχεία εξοπλισμού

Η ορθή εκτίμηση σε κάθε περίπτωση απαιτεί πληροφορία για τη θερμική συμπεριφορά των διάφορων στοιχείων, π.χ. πρέπει να γνωρίζουμε τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία όλων των υλικών και το ρόλο του κάθε εξαρτήματος στο σύστημα.

Τα καλώδια για παράδειγμα, χάνουν τις μονωτικές τους ιδιότητες πάνω από μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, γεγονός που μεγαλώνει τον κίνδυνο πυρκαγιάς.

Στην περίπτωση των διακοπών ισχύει ότι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κάποια κομμάτια τους μπορεί να λιώσουν

καθιστώντας αδύνατο το άνοιγμα του διακόπτη, οπότε και καταστρέφεται

Όσα περισσότερα γνωρίζει ο χειριστής της θερμικής κάμερας για το ελεγχόμενο εξάρτημα, τόσο αποτελεσματικότερος και αξιόπιστος θα είναι ο έλεγχος. Επειδή όμως είναι σχεδόν αδύνατο ο χειριστής της κάμερας να έχει πλήρη γνώση του εξαρτήματος, καλό είναι να είναι παρόν κατά τον έλεγχο και ο χειριστής του εξαρτήματος

### **3.3 Πρόγραμμα επιθεώρησης**

Η παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού είναι μια κυκλική διαδικασία. Η περίοδος ανάμεσα στις επιθεωρήσεις εξαρτάται από τον τύπο των εξεταζόμενων εξαρτημάτων, την στρατηγική τους σημασία και το φορτίο που φέρουν. Η επαφή με τον θαλάσσιο αέρα ή η οξύτητα του περιβάλλοντος ενός εργοστασίου χαρτιού, είναι πιο διαβρωτική και απαιτεί συχνότερους ελέγχους. Το ίδιο ισχύει και για εξοπλισμό ο οποίος συχνά υπόκειται σε βαρύ και εναλλασσόμενο φορτίο, όπως για παράδειγμα ένας θερμός περιστρεφόμενος μύλος.

Η σημασία ενός εξαρτήματος είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει τη συχνότητα των επιθεωρήσεων. Είναι σημαντική η εύρεση προβληματικών σημείων σε μία γραμμή διανομής, έτσι ώστε να εξοικονομηθεί χρόνος και να οδηγηθεί η ομάδα επισκευής στο σωστό σημείο. Μια ατέλεια σε μία γραμμή υψηλής τάσης, είναι δυνατόν μετά την παρουσίαση σφάλματος να επιφέρει μεγάλες οικονομικές απώλειες. Η συχνότητα των επιθεωρήσεων των γραμμών υψηλής τάσης είναι μεγαλύτερη από αυτή των γραμμών διανομής.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες, οι συνθήκες λειτουργίας, η ηλικία του εξοπλισμού, ο αριθμός και η βαρύτητα των ατελειών που διαπιστώθηκαν στην προηγούμενη επιθεώρηση του εξοπλισμού, προσδιορίζουν τη συχνότητα των επιθεωρήσεων του.

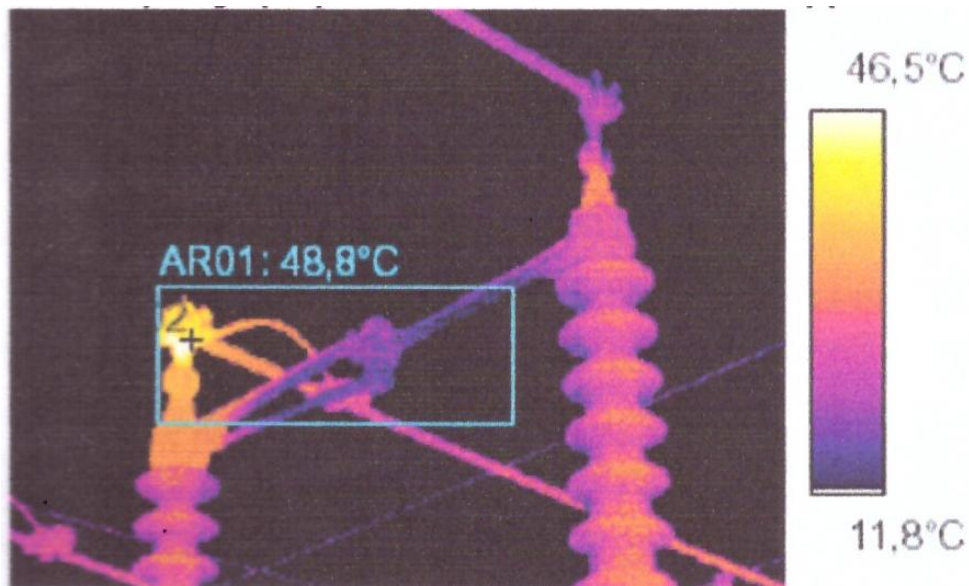
### **3.4 Επιθεώρηση**

Η προετοιμασία μιας επιθεώρησης πρέπει να περιλαμβάνει και τη επιλογή του σωστού πίνακα καταγραφής των αποτελεσμάτων, καθώς και το είδος της αναφοράς που πρέπει να προετοιμαστεί. Είναι συχνά απαραίτητη η χρήση οργάνων μέτρησης, όπως το αμπερόμετρο, για να γίνει η σωστή μέτρηση δεδομένων, εν προκειμένω η μέτρηση του ρεύματος. Επιπλέον θα πρέπει να αποφασιστεί αν θα γίνει χρήση ανεμομέτρων για να γίνει μέτρηση

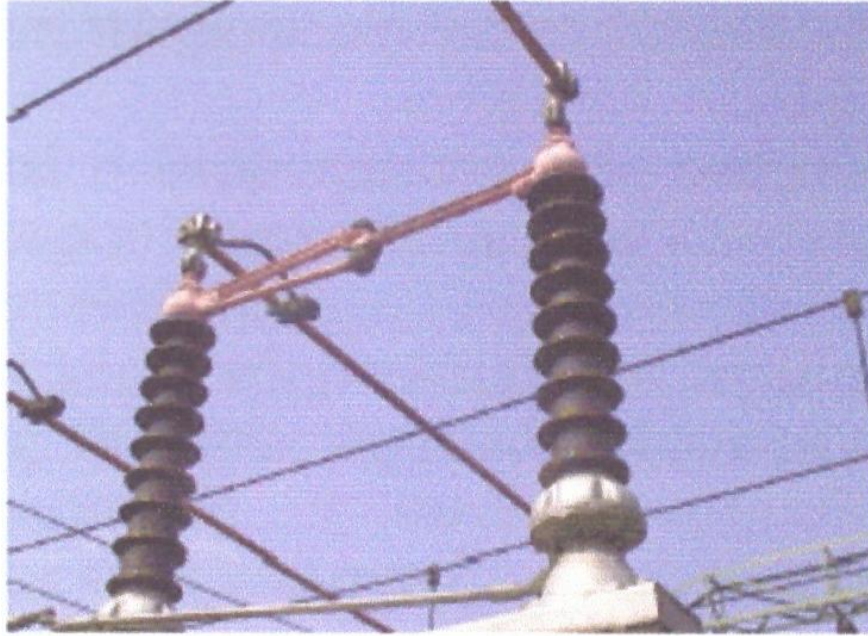
της ταχύτητας του ανέμου στην περίπτωση επιθεώρησης εξοπλισμού υψηλής τάσης.

Η χρήση του σύγχρονου τρόπου καταγραφής, μέσω λογισμικού, των αποτελεσμάτων μιας επιθεώρησης, όπως για παράδειγμα ενός υποσταθμού, κάνει δυνατή σε μικρό χρονικό διάστημα την καταγραφή όλων των πιθανών ατελειών. Αυτό ισχύει βέβαια με την προϋπόθεση ότι η επιθεώρηση ήταν κατάλληλα προετοιμασμένη και η συλλογή της πληροφορίας πραγματοποιούνταν συστηματικά.

Σε κάθε περίπτωση, η επιθεώρηση ξεκινά με την καταγραφή των γενικών παραμέτρων. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να καταχωρηθούν ως σχόλια στο λογισμικό της θερμοκάμερας. Πληροφορία που επίσης χρειάζεται είναι οι συνθήκες περιβάλλοντος και οι συνθήκες φορτίου όλων των στοιχείων που περιλαμβάνονται στην αναφορά.



**Εικόνα 35: Θερμογραφία με θερμό σημείο<sup>[6]</sup>**



**Εικόνα 36: Η προηγούμενη εικόνα δια γυμνού οφθαλμού<sup>[6]</sup>**

Όταν έχει διαπιστωθεί ένα επικείμενο σφάλμα ή επικείμενη βλάβη και ο θερμογράφος υπερύθρων έχει αποσαφηνίσει ότι δεν πρόκειται για αντανάκλαση ή κάποιο θερμό σημείο το οποίο συμβαίνει αναμενόμενα, ξεκινά η συλλογή της πληροφορίας. Η εκπαιδευτικότητα, η αναγνώριση του στοιχείου καθώς και οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, μαζί με τη μετρούμενη θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται στην αναφορά.

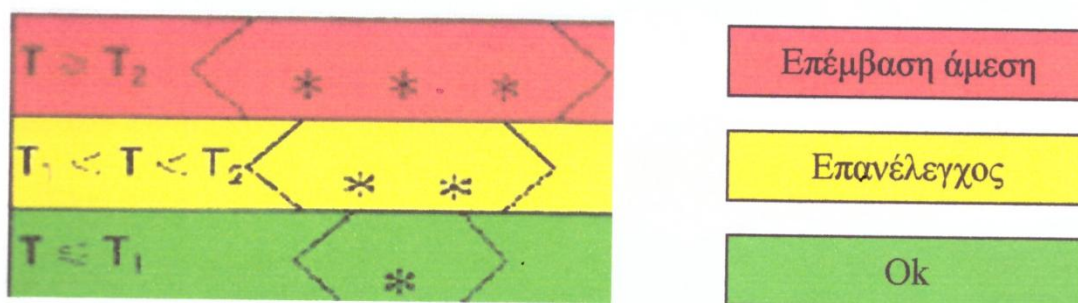
### **3.5 Ταξινόμηση και αναφορά**

Μια υπερθέρμανση των 38°C είναι σαφώς ένα σημαντικό προβληματικό σημείο, αλλά εάν αυτή η υπερθέρμανση ισχύει για ένα στοιχείο που λειτουργεί με το 100% του φορτίου του και για κάποιο άλλο που δουλεύει στο 50% του φορτίου του, τότε είναι φανερό ότι το τελευταίο έχει πολύ υψηλότερη θερμοκρασία, όταν το ονομαστικό φορτίο αυξηθεί από το 50% στο 100% του φορτίου.

Μια τυπική ταξινόμηση χωρίζει τα σφάλματα σε τρεις κατηγορίες (εικόνα 37) πράσινο, κίτρινο και κόκκινο. Είναι εμφανές ότι ένα κόκκινο σφάλμα είναι μεγαλύτερης βαρύτητας από ένα πράσινο.

Για την τελική απόφαση για την προτεραιότητα κατασκευής πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες πέραν της θερμοκρασίας και για αυτό είναι απαραίτητη η γνώμη ενός

ατόμου με ευρύτερη γνώση του όλου θέματος, όπως είναι ο τεχνικός συντήρησης.



Εικόνα 37: Ταξινόμηση σφαλμάτων<sup>[6]</sup>

### 3.6 Προτεραιότητα

Βασισμένο στη σημαντικότητα των σφαλμάτων, ο υπεύθυνος για τη συντήρηση δίνει στα διάφορα σφάλματα μια προτεραιότητα επισκευής. Πολύ συχνά η πληροφορία που συλλέγεται κατά την επιθεώρηση με υπέρυθρες ακτίνες συνδυάζεται με πληροφορία η οποία συλλέγεται με άλλους τρόπους, όπως παρακολούθηση δονήσεων, υπέρηχους ή προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση.

Έτσι η αναγκαιότητα για την πραγματοποίηση μιας επισκευής δεν καθορίζεται από τον χειριστή της κάμερας αλλά από τον υπεύθυνο της συντήρησης που θα συνυπολογίσει όλες τις παραμέτρους.

### 3.7 Επισκευή

Το πιο γνωστό αποτέλεσμα από την αναγνώριση και την ταξινόμηση των ευρεθέντων προβληματικών σημείων είναι μια σύσταση να επιδιορθωθούν αυτά όσο το δυνατόν ταχύτερα. Είναι σημαντικό το προσωπικό που επιδιορθώνει να είναι γνώστης των φυσικών αρχών για την αναγνώριση των προβληματικών σημείων. Εάν ένα προβληματικό σημείο δείξει υψηλή θερμοκρασία και βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση, τότε είναι πολύ συνηθισμένο για το προσωπικό που επιδιορθώνει να περιμένει την ύπαρξη ενός οξειδωμένου στοιχείου. Όπως επίσης δεν είναι παράξενο μια χαλαρή σύνδεση να έχει το ίδιο υψηλές θερμοκρασίες με μια οξειδωμένη.

### 3.8 Έλεγχος

Ένα επισκευασμένο στοιχείο, πρέπει να ελέγχεται το συντομότερο δυνατόν, μετά την επισκευή. Δεν είναι φρόνιμο να περιμένουμε την επόμενη προγραμματισμένη επιθεώρηση με υπέρυθρες, έτσι ώστε να συνδυασθεί η επιθεώρηση με τον έλεγχο των επισκευασθέντων. Οι στατιστικές σχετικά με τη λειτουργία των επισκευασθέντων δείχνουν, ότι το 1/3 αυτών, εξακολουθούν να υπερθερμαίνονται. Αυτό δείχνει ότι τα σφάλματα παρουσιάζουν έναν κίνδυνο λάθους. Η αναμονή για την επόμενη προγραμματισμένη επιθεώρηση με υπέρυθρες παρουσιάζει έναν ανεπιθύμητο κίνδυνο για τις εγκαταστάσεις που μπορεί να αποφθεχθεί με τη χρήση ενός πυρομέτρου υπέρυθρων.



**Εικόνα 38: Έλεγχος της θερμοκρασίας με πυρόμετρο<sup>[6]</sup>**

Όταν η θέση του σφάλματος γίνει γνωστή, η χρήση ενός συστήματος εικονοποίησης ώστε να γίνει ακριβής και σωστή μέτρηση της θερμοκρασίας, δεν είναι απαραίτητη

Πολλές από τις ατέλειες που διαπιστώνονται κατά τον έλεγχο είναι μικρής βαρύτητας. Αντί να επισκευασθούν άμεσα, γεγονός που απαιτεί μεγάλο χρόνο συντήρησης και διακοπής παραγωγής, είναι δυνατόν να αποφασισθεί να παραμείνουν ως έχουν, απλά να βρίσκονται υπό καθεστώς επιτήρησης.

Είναι σύνηθες να γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της επιθεώρησης κατά τη διαδικασία επισκευών, το είδος του σφάλματος που διαπιστώθηκε καθώς και οι ενέργειες που

πραγματοποιήθηκαν. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι μια σημαντική μορφή εμπειρίας που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ώστε να γίνει μείωση του αποθέματος ανταλλακτικών, να γίνει επιλογή των καλύτερων προμηθευτικών υλικών ή να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για την εκπαίδευση του προσωπικού επισκευών.

### **3.9 Βάση δεδομένων**

Η πληροφορία που συλλέγεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου εργασιών, συχνά σώζεται σε μια βάση δεδομένων έτσι ώστε να βοηθήσει σε μελλοντικές επιθεωρήσεις με υπέρυθρες, να αυξήσει τον έλεγχο του εξοπλισμού και να ελαχιστοποιήσει το κόστος συντήρησης.

Στατιστικά στοιχεία σε σχέση με την αποδοτικότητα των επισκευών, το είδος της επισκευής που πραγματοποιήθηκε, το είδος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, τις αλλαγές στη διαδικασία επισκευής και λοιπά στοιχεία πληροφορίας συνήθως κρατούνται σε μια βάση δεδομένων, με στόχο να μεγαλώσει η ασφάλεια της εγκατάστασης και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μιας επιθεώρησης με τη χρήση μιας κάμερας υπέρυθρων, όπως και το κόστος συντήρησης.

### **3.10 Τεχνική μετρήσεων σε σχέση με τη θερμογραφική επιθεώρηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων**

#### **3.10.1 Συστηματική προσέγγιση**

Μια λογική μέθοδος για να γίνει μια θερμογραφική επιθεώρηση σε έναν υποσταθμό, είναι να ακολουθηθεί η ροή του ρεύματος. Κατά αυτό τον τρόπο είναι σίγουρο ότι καμία σύνδεση ή συσκευή δεν θα αγνοηθεί.

Οι εξωτερικοί υποσταθμοί αποτελούνται από πολλά κυκλώματα. Όταν γίνεται μια θερμογραφική επιθεώρηση συνίσταται να γίνει διαδοχικά, για παράδειγμα ξεκινώντας με τη γραμμή εισόδου, συνεχίζοντας με τους διακόπτες απομόνωσης, τους μετασχηματιστές, τους αποζεύκτες, τους μετασχηματιστές ρεύματος και ολοκληρώνοντας με το μονωμένο άκρο του αγωγού.

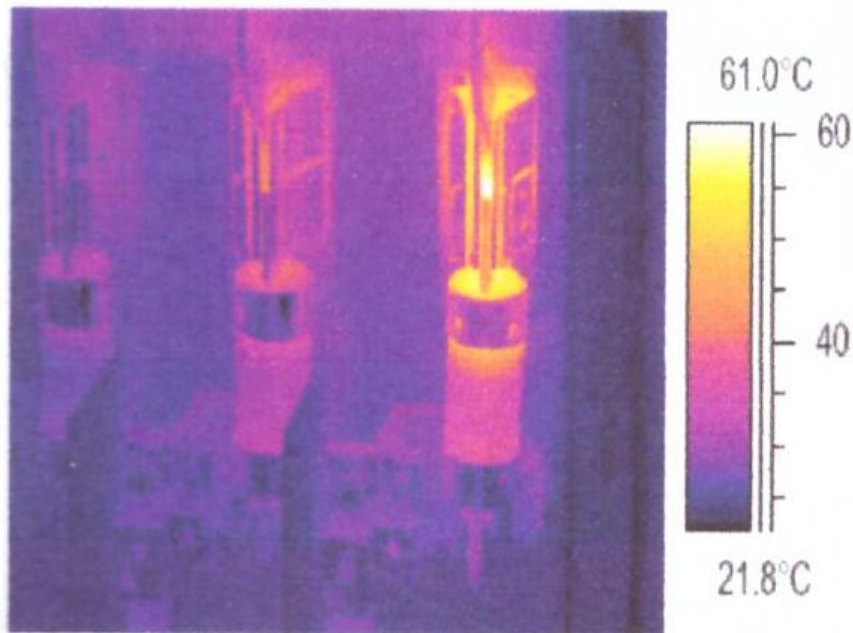
Η συστηματική προσέγγιση έχει δύο κύρια πλεονεκτήματα

- Ο κίνδυνος να αγνοηθούν στοιχεία ελαχιστοποιείται

- Το ονομαστικό φορτίο μπορεί να διαφέρει ανάμεσα στα διάφορα κυκλώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας για τα διάφορα κυκλώματα, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα μελλοντικά ή όταν γίνεται ανάλυση των θερμογραφημάτων

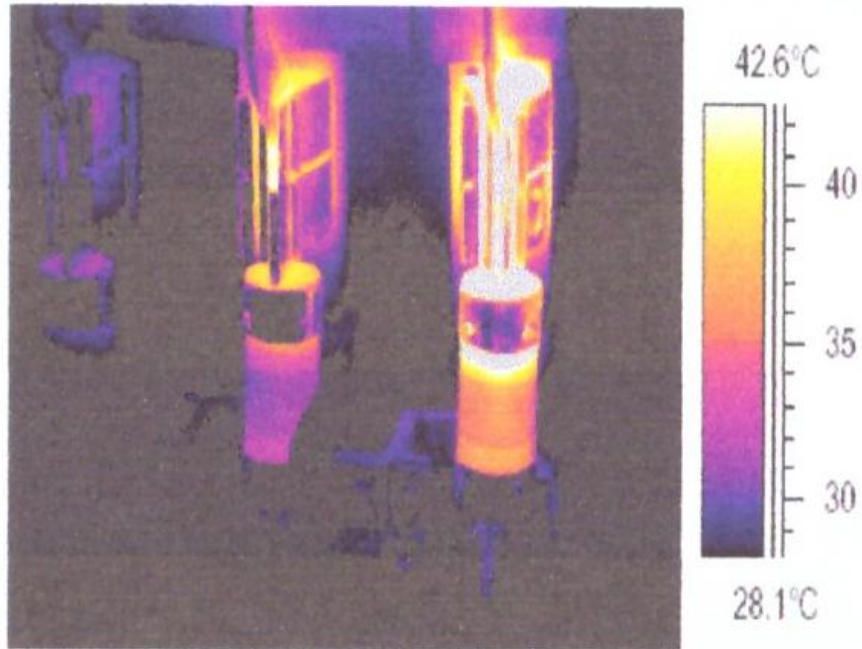
### 3.10.2 Πως να γίνει η ορθή εγκατάσταση του υλικού

Μια θερμική φωτογραφία σε έναν υποσταθμό μπορεί να έχει μεγάλες θερμοκρασιακές αποκλίσεις. Ο σύγχρονος θερμογραφικός εξοπλισμός μπορεί να διαχειριστεί μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στην εικόνα, χωρίς να χάνει την πληροφορία ούτε στην κορυφή ούτε στη βάση της θερμοκρασιακής κλίμακας.

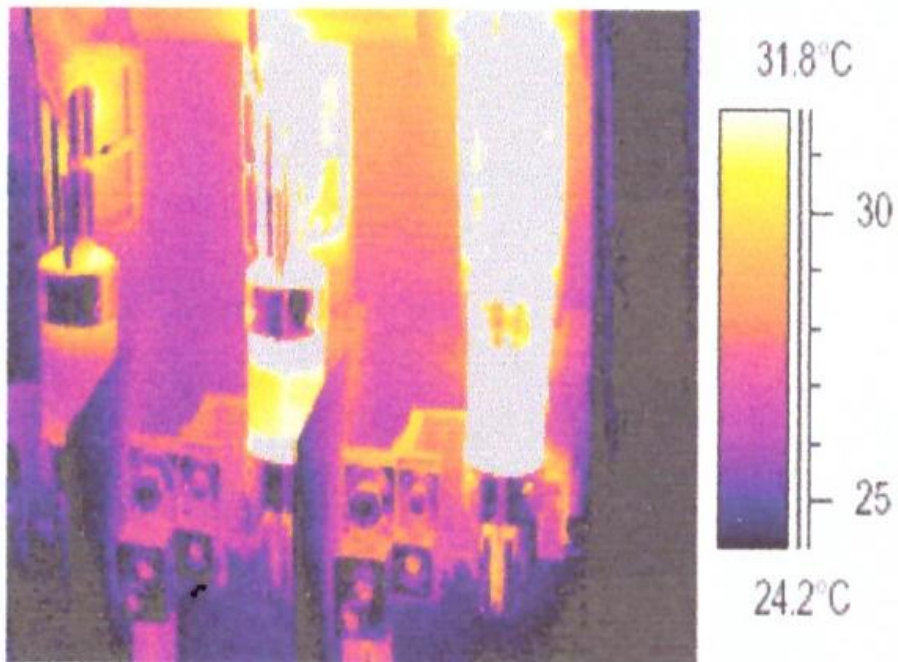


**Εικόνα 39: Η θερμομετρική κλίμακα δίνει τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία μιας εικόνας<sup>[6]</sup>**





**Εικόνα 40: Η θερμομετρική κλίμακα μπορεί να προσαρμοσθεί στη μέση θερμοκρασία μιας θερμογραφίας<sup>[6]</sup>**

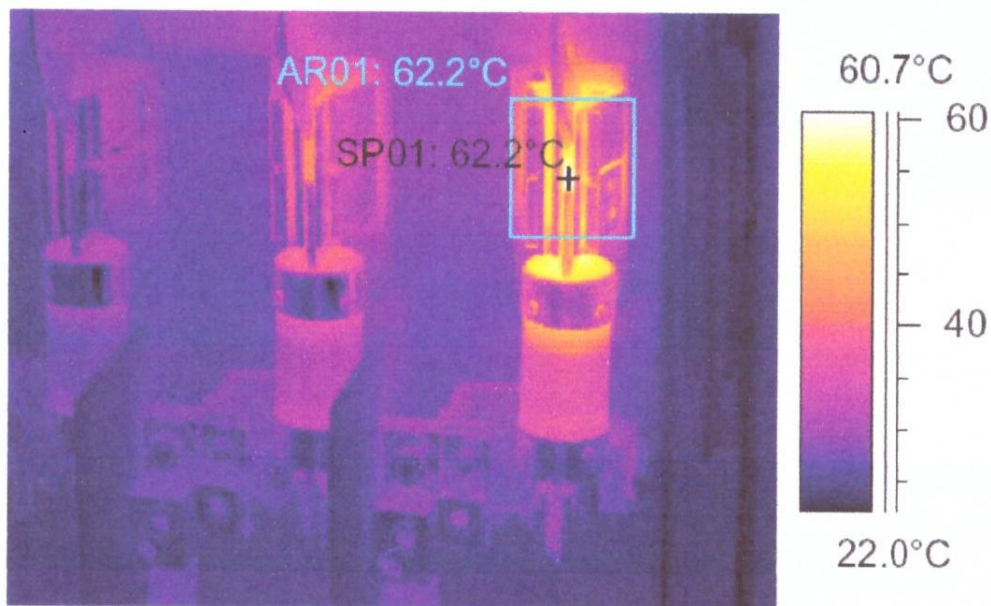


**Εικόνα 41: Η θερμομετρική κλίμακα μπορεί να προσαρμοσθεί στην ελάχιστη θερμοκρασία μιας θερμογραφίας<sup>[6]</sup>**

Στις ανωτέρω φωτογραφίες, η ασφάλεια στα δεξιά έχει μέγιστη θερμοκρασία τους 61°C, αυτή στα αριστερά τους 32°C, ενώ αυτή στη μεσαία φωτογραφία κάπου ανάμεσα. Οι τρεις φωτογραφίες διαφέρουν τόσο, λαμβανομένου υπόψη ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας υπερτιμάται μόνο μια ασφάλεια, σε κάθε φωτογραφία. Παρόλα αυτά πρόκειται για την ίδια εικόνα και όλη η πληροφορία για τις τρεις ασφάλειες περιλαμβάνεται εκεί. Η γκρι περιοχή στις φωτογραφίες, δείχνει περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την επιλεχθείσα μέγιστη θερμοκρασία στην εικόνα. Σήμερα οι σύγχρονες κάμερες, υπό συνθήκες ομαλής λειτουργίας καλύπτουν όλες τις θερμοκρασίες από -40°C έως 500°C, θερμοκρασίες σαφώς ικανές για το μεγαλύτερο αριθμό των επιθεωρήσεων

### 3.10.3 Μέτρηση θερμοκρασίας

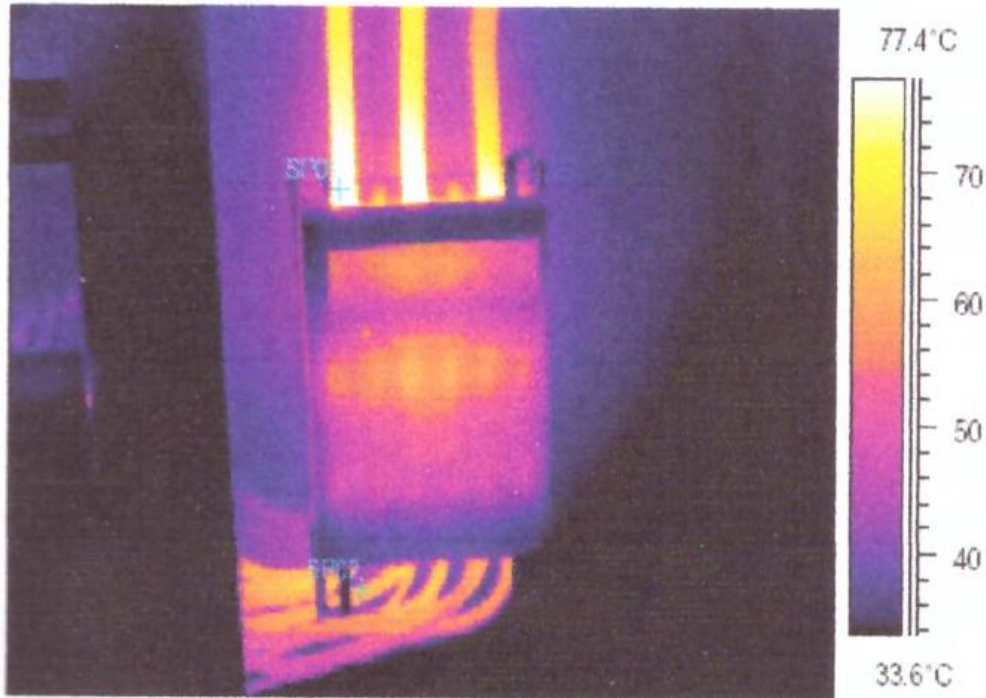
Οι σύγχρονες κάμερες μπορούν να βρουν αυτόματα την υψηλότερη θερμοκρασία σε μια εικόνα. Για το χρήστη μοιάζει σαν την ακόλουθη εικόνα



**Εικόνα 42: Η μετρητική λειτουργία δείχνει την ακριβή θέση του θερμού-προβληματικού σημείου<sup>[6]</sup>**

Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 62.2°C. Το φωτόμετρο δείχνει το ακριβές σημείο του θερμού σημείου. Η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας, εξαρτάται όχι μόνο από τη λειτουργία του προγράμματος αξιολόγησης ή την κάμερα. Είναι δυνατόν, το πραγματικό αίτιο του προβλήματος να μην είναι άμεσα εμφανές,

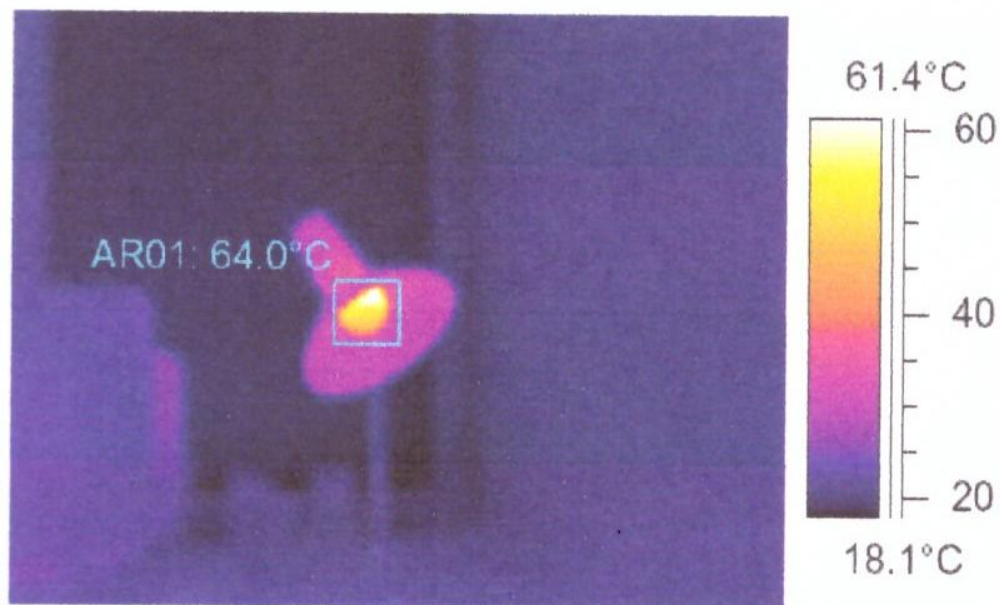
για παράδειγμα μια σύνδεση ή οποία δεν φαίνεται στην κάμερα. Είναι πιθανόν να μετράμε την θερμοκρασία σε μια απόσταση, ενώ το πραγματικό θερμό σημείο να «κρύβεται». Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



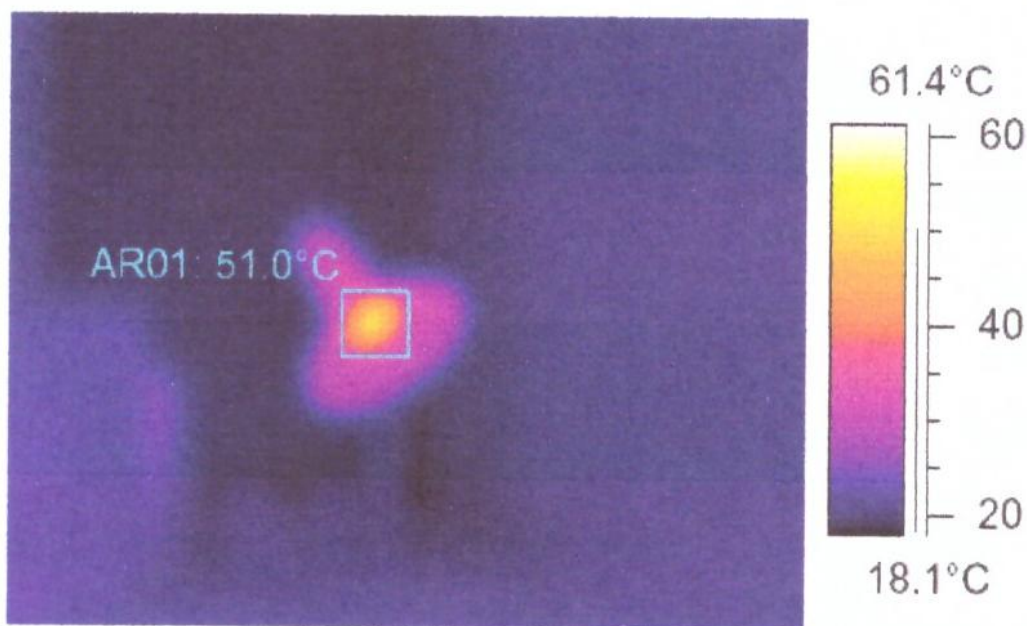
***Εικόνα 43: Η θερμογραφική κάμερα δεν έχει δυνατότητα ένδειξης της θερμοκρασίας προβληματικών σημείων που βρίσκονται καλυμμένα, π.χ. εντός του κιβωτίου<sup>[6]</sup>***

Βλέπουμε ότι τα θερμότερα σημεία που είναι αγωγοί βρίσκονται εντός του κιβωτίου, με αποτέλεσμα η κάμερα να καταγράφει τη θερμοκρασία της επιφάνειας του και όχι τη θερμοκρασία των αγωγών. Δηλαδή η κάμερα ανιχνεύει θερμοκρασίες που επικρατούν πάνω στην επιφάνεια ενός υλικού και όχι στο εσωτερικό του.

Στην εικόνα βλέπουμε πως είναι δυνατόν η κάμερα να καταγράψει λάθος μέτρηση εάν δεν έχει τη σωστή εστίαση. Συγκεκριμένα, στην εικόνα με την καλύτερη δυνατή εστίαση της κάμερας, η θερμοκρασία του λαμπτήρα είναι 64°C, ενώ στην εικόνα με λανθασμένη εστίαση η θερμοκρασία του λαμπτήρα είναι 51°C.



**Εικόνα 44: Καταγραφή θερμοκρασίας με την καλύτερη δυνατή εστίαση<sup>[6]</sup>**



**Εικόνα 45: Καταγραφή θερμοκρασίας με λανθασμένη εστίαση<sup>[6]</sup>**

### 3.11 Συγκριτική μέτρηση

Για τις θερμογραφικές επιθεωρήσεις των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων εφαρμόζεται μια ειδική μέθοδος, η οποία βασίζεται στη σύγκριση διάφορων αντικειμένων ή αλλιώς καλείται συγκριτική μέθοδος. Αυτό σημαίνει ότι ο υπολογιστής συγκρίνει τις τρεις φάσεις μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος χρειάζεται συστηματική επιθεώρηση των τριών φάσεων παράλληλα, έτσι ώστε να γίνει η εκτίμηση εάν κάποιο σημείο διαφέρει από την πρότυπη κανονική θερμοκρασία.

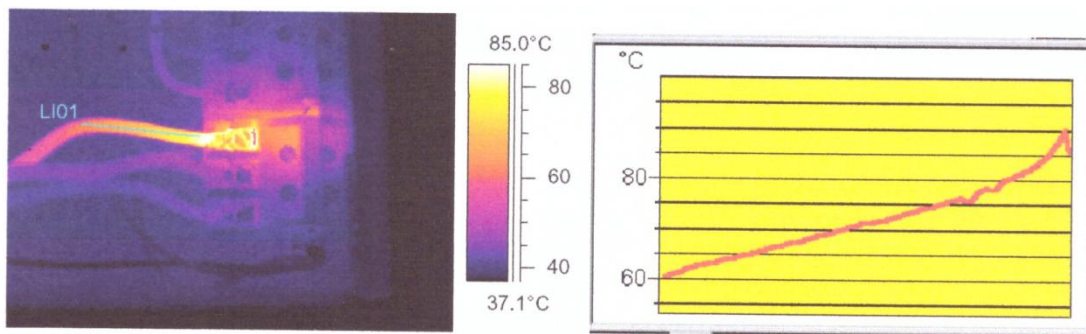
Η πρότυπη κανονική θερμοκρασία έχει την σημασία ότι τα στοιχεία που αποτελούν την αγωγή διαδρομή του ρεύματος έχουν μια δεδομένη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία δίνεται με ένα συγκεκριμένο χρώμα (ή γκρι τόνο) στην οθόνη, η οποία είναι συνήθως κοινή και για τις τρεις φάσεις κάτω από το συμμετρικό φορτίο. Μικρές διαφορές στον χρωματισμό είναι δυνατόν να συμβούν στη συγκεκριμένη αγωγή διαδρομή, για παράδειγμα στο σημείο ένωσης δύο διαφορετικών υλικών, στο σημείο αύξησης ή ελάττωσης της αγωγικής επιφάνειας ή στο σημείο διακοπής του κυκλώματος αγωγής όπου η συγκεκριμένη αγωγή διαδρομή εγκλωβίζεται.

Η εικόνα 46 δείχνει τρεις ασφάλειες, οι θερμοκρασίες των οποίων είναι παραπλήσιες. Η παρεμβαλλόμενη ισοθερμική καμπύλη δείχνει λιγότερο από 2°C διαφορά ανάμεσα στις φάσεις. Διαφορετικά χρώματα είναι συνήθως το αποτέλεσμα στην περίπτωση που οι φάσεις έχουν ασύμμετρο φορτίο. Αυτή η διαφορά στα χρώματα δεν είναι ενδεικτική κάποιας υπερθέρμανσης καθώς αυτό δεν παρατηρείται τοπικά, αλλά είναι κάτι το οποίο συμβαίνει σε όλη τη φάση.



**Εικόνα 46: Η θερμική εικόνα τριών ασφαλειών<sup>[6]</sup>**

Σε ένα πραγματικά «θερμό σημείο» είναι εμφανές το θερμό σημείο όπως και η ελάττωση της θερμοκρασίας καθώς απομακρυνόμαστε από το θερμό σημείο. Στην εικόνα 47 η αγωγιμη γραμμή LI01 δείχνει μια συνεχώς αυξανόμενη θερμοκρασία καθώς πλησιάζει στο θερμό σημείο.



**Εικόνα 47: Γραφική παράσταση ενός θερμού σημείου όπου διακρίνεται η πτώση της θερμοκρασίας όσο απομακρυνόμαστε από τη θέση του υπόψη σημείου<sup>[6]</sup>**

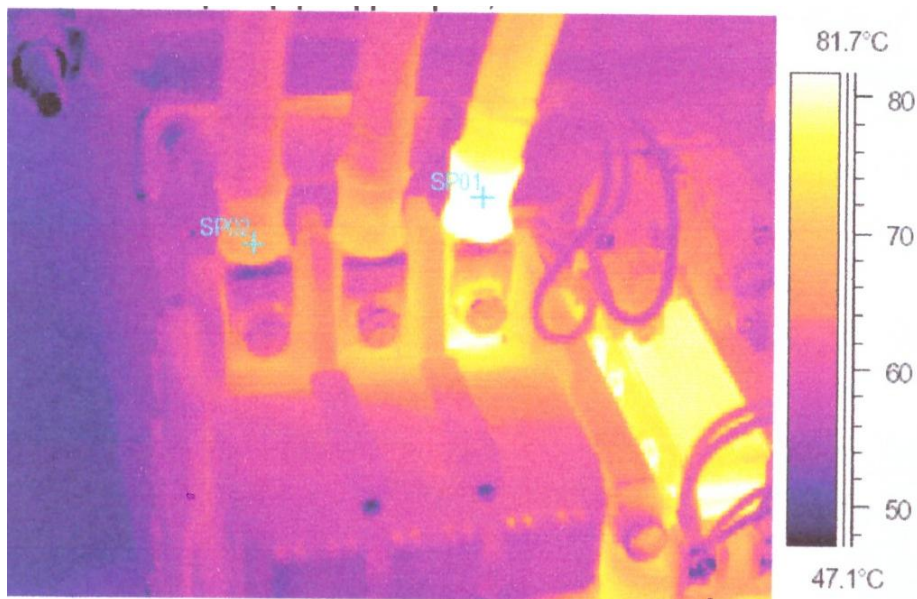
### 3.12 Κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας

Η μέτρηση θερμοκρασίας με θερμογράφο, δείχνει την απόλυτη θερμοκρασία του αντικειμένου. Για να προσδιοριστεί ακριβώς εάν το αντικείμενο έχει υπερθερμανθεί ή όχι, είναι απαραίτητη η γνώση της θερμοκρασίας της κανονικής λειτουργίας του, δηλαδή η θερμοκρασία που θα έχει αν θεωρήσουμε το φορτίο και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Καθώς η απευθείας μέτρηση θα δώσει την απόλυτη θερμοκρασία – η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη καθώς τα περισσότερα στοιχεία έχουν ένα ανώτερο όριο στην απόλυτη θερμοκρασία τους – είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας βάσει του φορτίου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Παρακάτω δίνονται οι εξής ορισμοί:

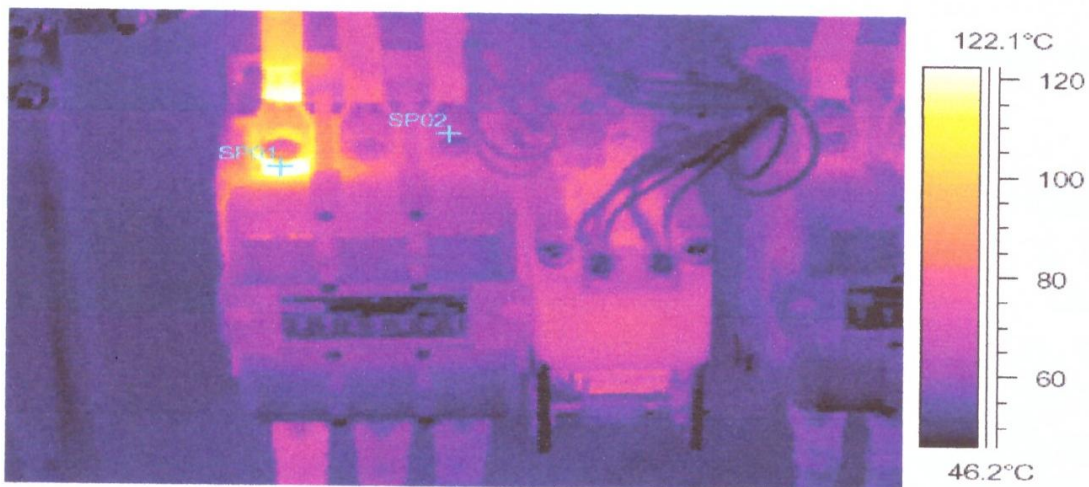
- Θερμοκρασία λειτουργίας: Η απόλυτη θερμοκρασία του αντικειμένου. Εξαρτάται από το φορτίο και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Είναι πάντοτε υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Πλεονάζουσα θερμοκρασία: Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε ένα στοιχείο που δουλεύει υπό κανονικές συνθήκες και ένα ελαττωματικό

Η πλεονάζουσα θερμοκρασία θεωρείται ως η διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία ενός στοιχείου που δουλεύει κανονικά και τη θερμοκρασία ενός γειτονικού προβληματικού σημείου. Είναι σημαντικό να γίνονται συγκρίσεις της θερμοκρασίας ανάμεσα στα ίδια σημεία σε διαφορετικές φάσεις λειτουργίας. Σαν παράδειγμα, στην ακόλουθη θερμογραφία οι δύο φάσεις στα αριστερά θεωρείται ότι δουλεύουν υπό κανονικές συνθήκες ενώ η φάση στα δεξιά έχει μια εμφανή πλεονάζουσα θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία λειτουργίας της αριστερής φάσης είναι 68°C. Αυτό δίνει μια πλεονάζουσα θερμοκρασία 18°C, ένα προβληματικό σημείο το οποίο θα πρέπει να παρακολουθηθεί άμεσα.



**Εικόνα 48 : Πλεονάζουσα θερμοκρασία σε μία φάση<sup>[6]</sup>**

Για πρακτικούς λόγους η αναμενόμενη (κανονική) θερμοκρασία λειτουργίας ενός στοιχείου θεωρείται ως η θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων σε δύο τουλάχιστον από τις τρεις φάσεις λειτουργίας θεωρώντας βέβαια ότι εργάζονται κανονικά. Η πλέον κανονική κατάσταση λειτουργίας είναι όταν και οι τρεις φάσεις έχουν την ίδια ή σχεδόν την ίδια θερμοκρασία λειτουργίας. Η θερμοκρασία των εξωτερικών στοιχείων σε υποσταθμούς ή σε γραμμές μεταφοράς είναι 1 - 2°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εσωτερικά η θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων διαφέρει περισσότερο



**Εικόνα 49: Άλλο ένα θερμό σημείο<sup>[6]</sup>**

Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές στην ακόλουθη φωτογραφία. Εδώ η φάση στα αριστερά είναι εκείνη η οποία παρουσιάζει το φαινόμενο της πλεονάζουσας θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας την οποία παίρνουμε από τις δύο φάσεις είναι 66°C. Η θερμοκρασία της ελαττωματικής φάσης είναι 127°C και θα πρέπει να παρακολουθηθεί άμεσα.

### 3.13 Ταξινόμηση των λαθών

Μετά την εύρεση της ελαττωματικής σύνδεσης, διορθωτικά μέτρα ίσως είναι απαραίτητα, ίσως και όχι. Για να γίνει η σύσταση των απαραίτητων μέτρων τα ακόλουθα κριτήρια πρέπει να αξιολογηθούν:

- Το φορτίο κατά τη διάρκεια της μέτρησης
- Ομαλό ή μεταβαλλόμενο φορτίο
- Θέση του ελαττωματικού στοιχείου στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση



- Αναμενόμενες μελλοντικές συνθήκες φορτίου
- Μετράται η πλεονάζουσα θερμοκρασία άμεσα στο ελαττωματικό σημείο ή έμμεσα δια της εκπεμπόμενης θερμότητας η οποία εκλύεται λόγω κάποιου σφάλματος που εκδηλώθηκε στη συσκευή;

Η υπερβολική θερμοκρασία η οποία μετριέται άμεσα στο ελαττωματικό στοιχείο κατηγοριοποιείται σε τρεις κατηγορίες για την περίπτωση που έχουμε το 100% του μέγιστου φορτίου

- i.  $<5^{\circ}\text{C}$ : Αρχή της υπερθέρμανσης. Θα πρέπει να παρακολουθείται επισταμένως
- ii.  $5-30^{\circ}\text{C}$ : Αναπτυσσόμενη υπερθέρμανση. Θα πρέπει να ελεγχθεί με την πρώτη ευκαιρία λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του φορτίου
- iii.  $>30^{\circ}\text{C}$ : Μεγάλη υπερθέρμανση. Θα πρέπει να διορθωθεί άμεσα λαμβάνοντας όμως υπόψη την κατάσταση του φορτίου

### **3.14 Διάφοροι τύποι θερμών σημείων στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις**

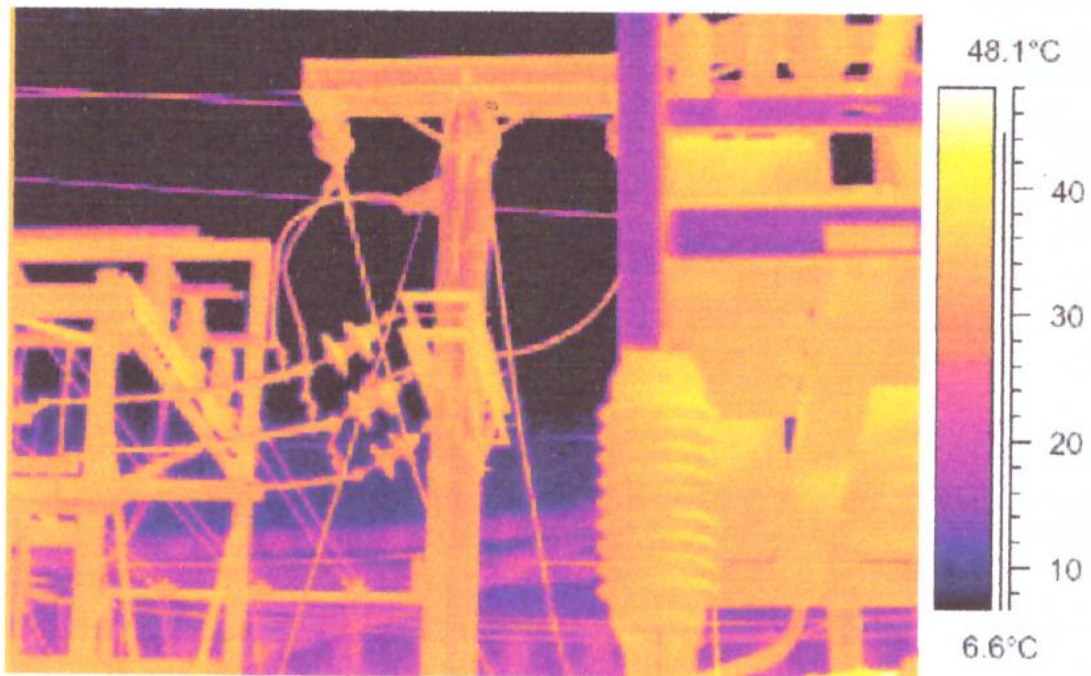
#### **3.14.1 Ανακλάσεις**

Η θερμογραφική κάμερα, ανάλογα με τον τύπο και το εύρος του μήκους κύματος της, είναι ευαίσθητη στην υπέρυθρη ακτινοβολία, στην περιοχή των 3,6-5,0  $\mu\text{m}$  την περιοχή των μικροκυμάτων (Short Wave, SW) ή στην περιοχή των 8-14  $\mu\text{m}$  την περιοχή των βραχέων (Long Wave, LW). Αυτό έχει μια επίδραση στην τεχνική των μετρήσεων, ιδιαίτερα στις εξωτερικές μετρήσεις. Ο λόγος είναι ότι ο ήλιος ακτινοβολεί όχι μόνο στο ορατό φάσμα των 0,4-0,7  $\mu\text{m}$ , αλλά και στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, μέχρι τα 4  $\mu\text{m}$ . Καθώς η κάμερα είναι ευαίσθητη στις ηλιακές ανακλάσεις- την αποκαλούμενη και ηλιακή λάμψη- ο χειριστής της κάμερας πρέπει να λάβει και αυτό το φαινόμενο υπόψη του. Εάν δεν το κάνει αυτό, μπορεί να οδηγηθεί σε ηλιακές ανακλάσεις οι οποίες αναφέρονται ως υπερθερμαινόμενα στοιχεία.

Οι ακόλουθες εικόνες δείχνουν ένα στοιχείο που έχει καταγραφεί με SW και LW κάμερες. Τα θερμογραφήματα έχουν γίνει μια ηλιόλουστη μέρα. Το γράφημα με SW δίνει θερμά σημεία, τα οποία δεν είναι τίποτα περισσότερο από ηλιακές ανακλάσεις. Στο γράφημα με LW δεν φαίνεται τίποτα.



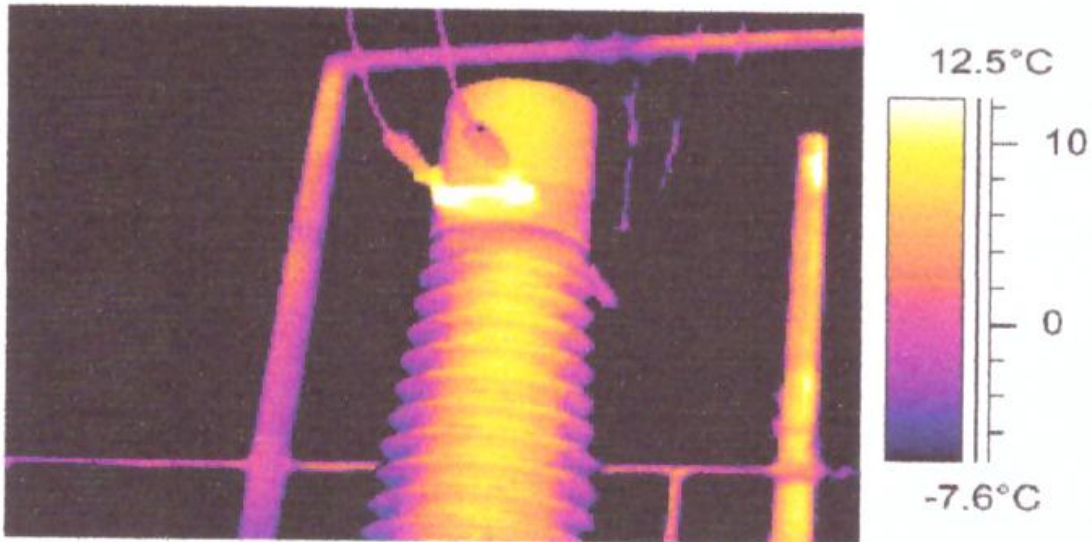
**Εικόνα 50: Θερμογραφία με μικρό κύμα μετάδοσης της εκπεμπόμενης θερμικής ενέργειας<sup>[6]</sup>**



**Εικόνα 51: Θερμογραφία με μεγάλο κύμα μετάδοσης της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας<sup>[6]</sup>**

### 3.14.2 Ηλιακή θέρμανση

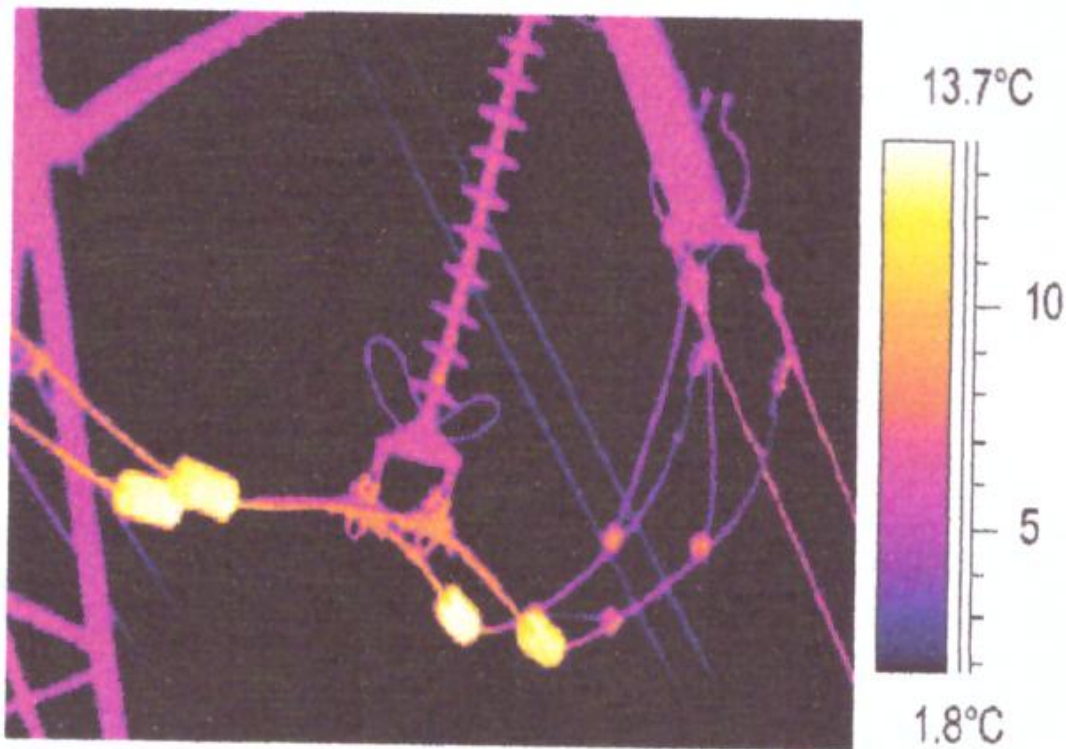
Η επιφάνεια ενός στοιχείου με υψηλή εκπεμπικότητα μπορεί σε μια θερμή μέρα να θερμανθεί σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες από την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμογραφία της εικόνας 52 δείχνει έναν διακόπτη κυκλώματος που έχει θερμανθεί από τον ήλιο. Η φωτογραφία έχει τραβηχτεί με LW κάμερα, κατά συνέπεια δεν περιλαμβάνει ηλιακές ανακλάσεις.



Εικόνα 52: Διακόπτης κυκλώματος<sup>[6]</sup>

### 3.14.3 Θέρμανση λόγω επαγωγής

Τα περιστρεφόμενα επαγόμενα ρεύματα είναι δυνατόν να δημιουργήσουν ένα θερμό σημείο στη διαδρομή αυτή. Στην περίπτωση ρευμάτων μεγάλης ισχύος και γειτνίασης με άλλες μεταλλικές επιφάνειες, είναι δυνατή η πρόκληση φωτιάς. Αυτή η μορφή θέρμανσης συμβαίνει σε μαγνητικά υλικά γύρω από τη συγκεκριμένη περιοχή, όπως είναι οι μεταλλικές επιφάνειες δαπέδου για μονωτήρες διελεύσεως.

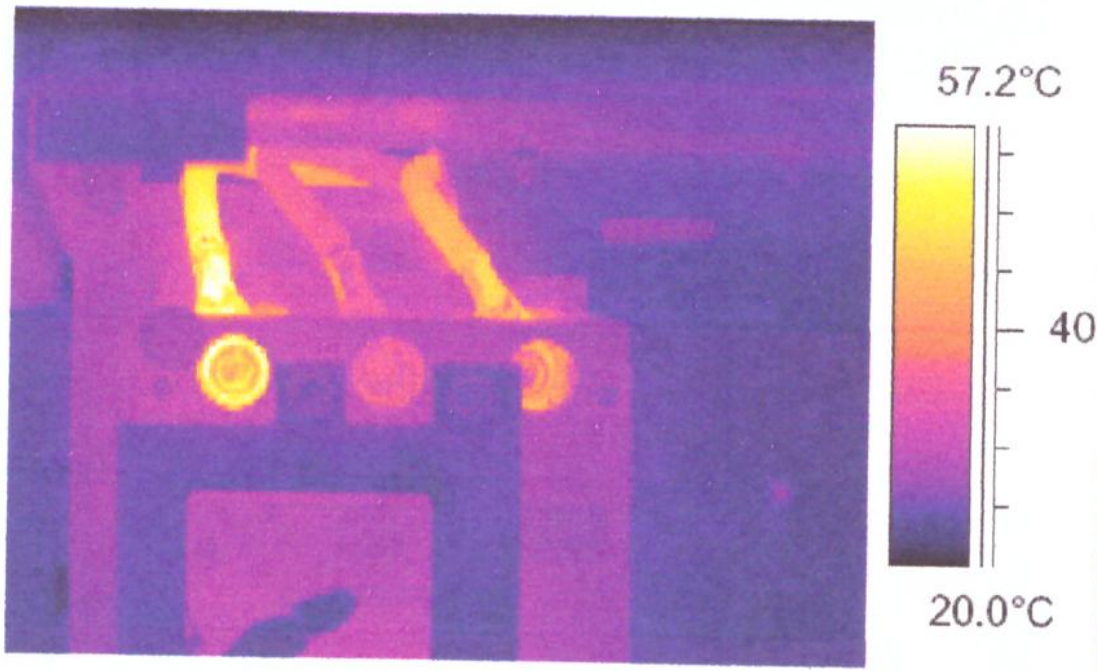


**Εικόνα 53: επαγωγικό θερμικό ισοζύγιο βάρους<sup>[6]</sup>**

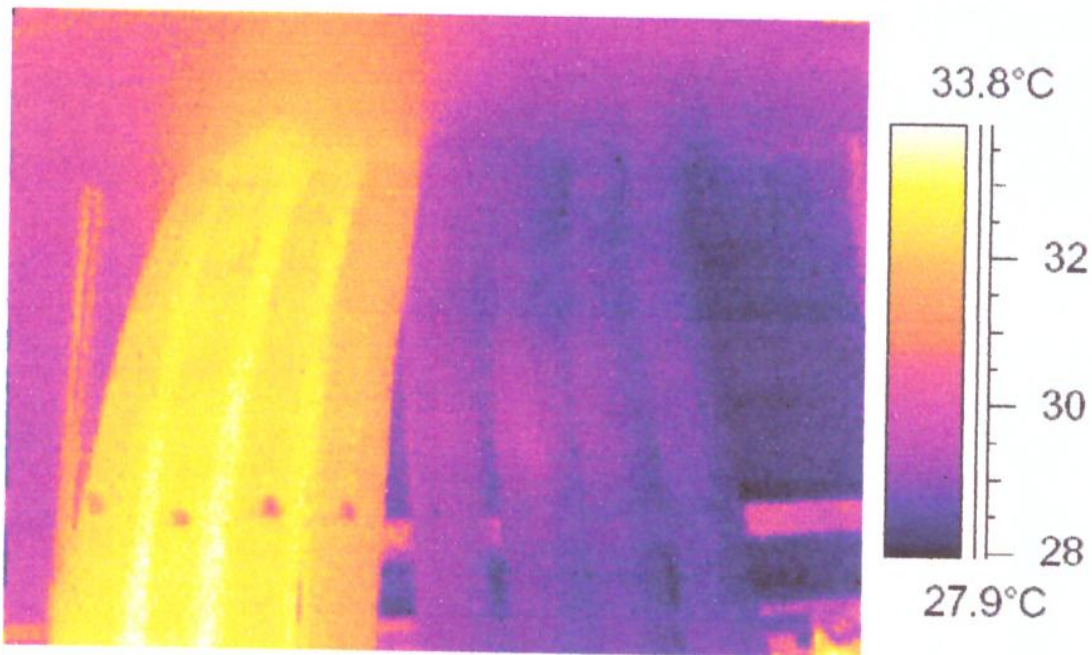
Στην ανωτέρω θερμογραφία της εικόνας βλέπουμε βάρη για τη σταθεροποίηση, όπου διαμέσου αυτών διέρχεται ρεύμα υψηλής έντασης. Αυτά τα βάρη, φτιαγμένα από ένα ελαφρά μαγνητικό υλικό, δεν είναι αγωγοί του ρεύματος αλλά εκτίθενται σε εναλλακτικά μαγνητικά πεδία, τα οποία τελικά θα θερμάνουν το βάρος. Η υπερθέρμανση σε αυτή την περίπτωση θα είναι λιγότερη των 5°C.

#### **3.14.4 Μεταβολές φορτίου**

Το σύνηθες στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις είναι τα τριφασικά συστήματα. Όταν ψάχνουμε για περιοχές οι οποίες έχουν υποστεί υπερθέρμανση, είναι εύκολο να συγκρίνουμε τις τρεις φάσεις μεταξύ τους, για παράδειγμα καλώδια, διακόπτες, μονωτές. Ένα ομοιόμορφο φορτίο ανά φάση, θα είχε ως αποτέλεσμα ομοιόμορφη θερμοκρασία για όλες τις φάσεις. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία διαφέρει σημαντικά σε μία φάση, τότε η πιθανότητα για κάποιο σφάλμα είναι αυξημένη. Παρόλα αυτά πρέπει πάντοτε να σιγουρευτούμε ότι το φορτίο είναι ομοιόμορφα μοιρασμένο ανά φάση. Ο έλεγχος των συνδεδεμένων αμπερομέτρων ή η χρήση ενός φορητού θα μπορούσε να βοηθήσει.



**Εικόνα 54: Ασύμμετρη φόρτιση μεταξύ φάσεων<sup>[6]</sup>**



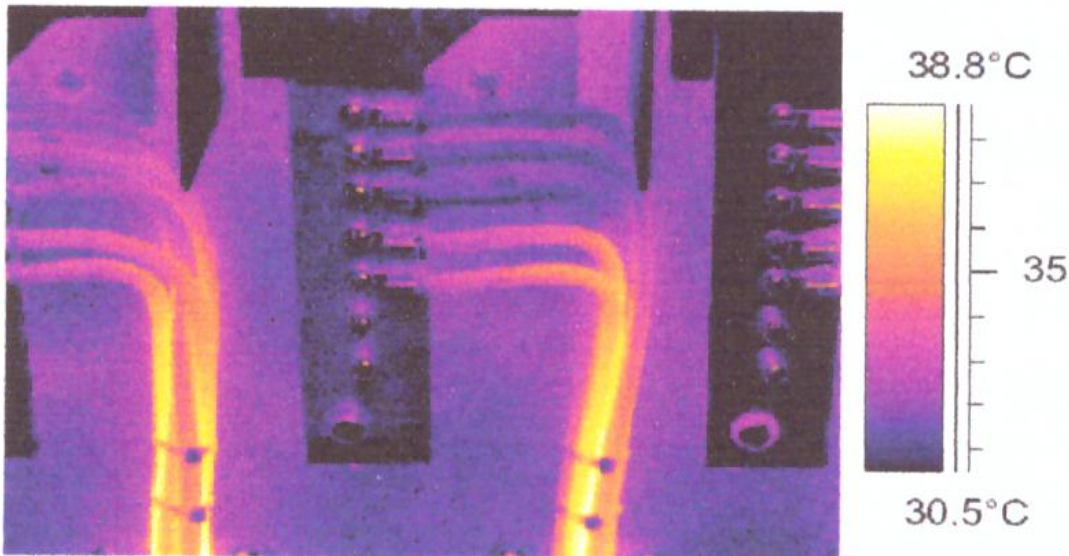
**Εικόνα 55: Καλώδια που αρχίζουν να θερμαίνονται από γειτονικά τους που έχουν ήδη υπερθερμανθεί<sup>[6]</sup>**

Η εικόνα 55 δείχνει τρεις αγωγούς. Είναι τόσο μακριά ο ένας από τον άλλο ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι θερμικά μονωμένοι ο ένας από τον άλλο. Εάν θεωρήσουμε ότι οι ακραίοι αγωγοί δεν παρουσιάζουν ελαττωματική επαφή, τότε η υπερθέρμανση του ενός έναντι του άλλου, οφείλεται στο ασύμμετρο φορτίο που τους διαρρέει. Η θερμότητα διαχέεται ομοιόμορφα κατά μήκος του αγωγού, γεγονός που δείχνει μια αύξηση θερμοκρασίας εξαρτώμενη από το φορτίο, παρά από μια ελαττωματική σύνδεση.

Η εικόνα 55, στα δεξιά δείχνει δυο δέσμες καλωδίων με διαφορετικό φορτίο. Οι δεσμίδες οι οποίες έχουν ένα σημαντικό φορτίο είναι 5°C πιο θερμές από εκείνες που δεν έχουν φορτίο.

### 3.14.5 Μεταβαλλόμενες συνθήκες ψύξης

Όταν ένας αριθμός καλωδίων είναι σε δέσμη, τότε οι κακές συνθήκες ψύξης στο μέσο έχουν συνέπεια την υπέρμετρη αύξηση της θερμοκρασίας της θερμοκρασίας των καλωδίων στο κέντρο, όπως βλέπουμε στη θερμογραφία της εικόνας 56.



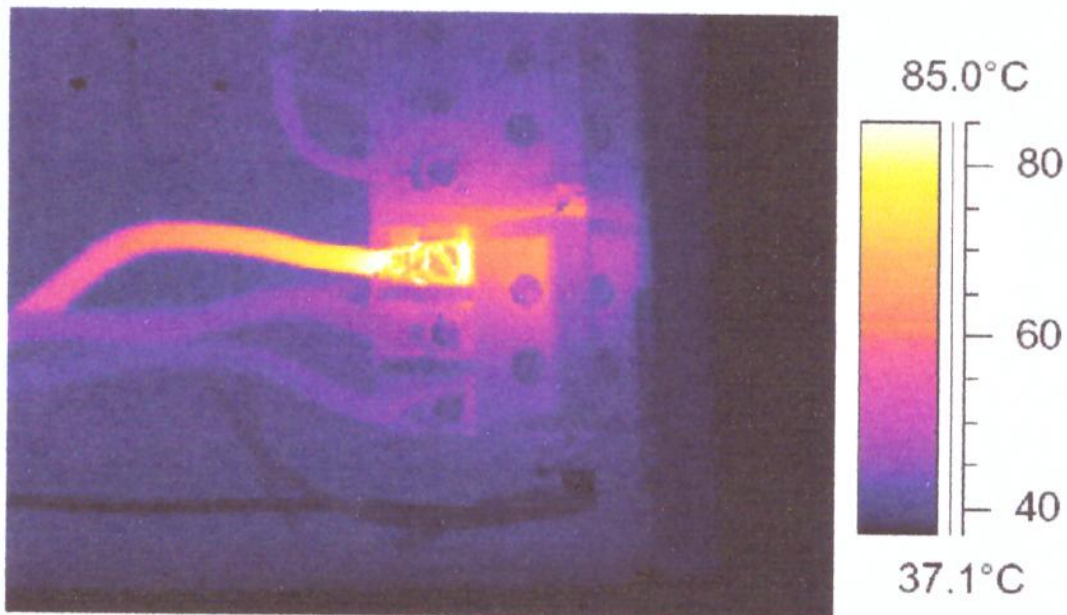
**Εικόνα 56 : τα καλώδια στο μέσον τους είναι θερμότερα από ότι στα άκρα τους<sup>[6]</sup>**

Τα καλώδια στο δεξί μέρος της φωτογραφίας δεν παρουσιάζουν φαινόμενα υπερθέρμανσης. Στο κάθετο τμήμα της δέσμης παρόλα αυτά, τα καλώδια είναι πολύ σφιχτά δεμένα με αποτέλεσμα η ψύξη τους να είναι κακή και η θερμότητα δεν μπορεί να διαφύγει με αποτέλεσμα τα καλώδια να είναι σημαντικά θερμότερα, στην

πραγματικότητα 5°C, από τα καλώδια που έχουν καλύτερη ψύξη στη δέσμη.

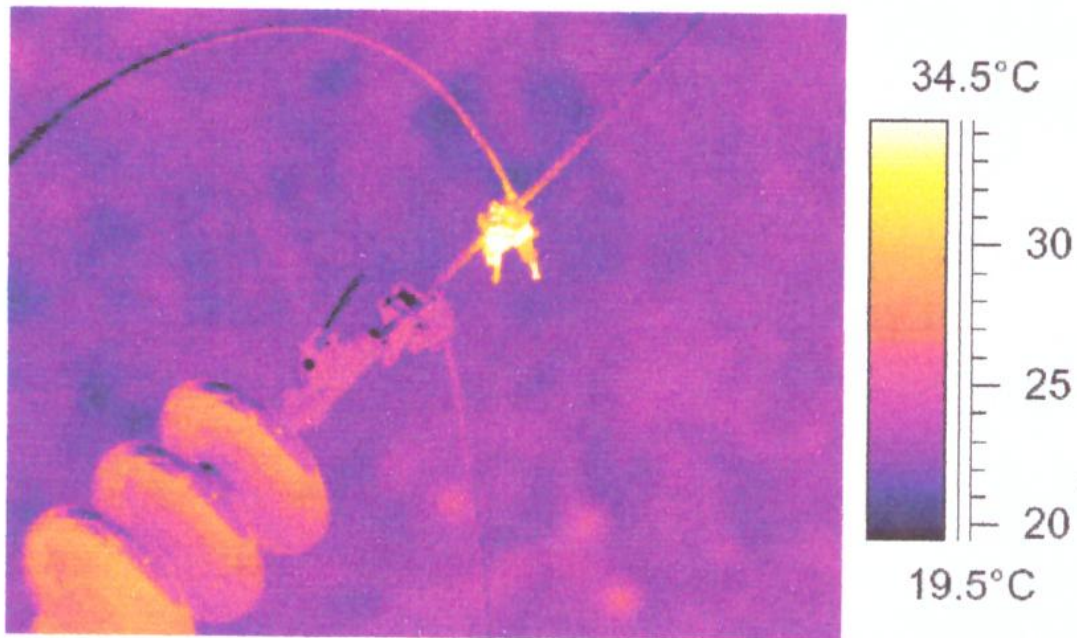
### 3.14.6 Μεταβαλλόμενη αντίσταση

Χαλαρή συναρμογή κατά τη συναρμολόγηση μιας επαφής η οποία μπορεί να συμβεί είτε λόγω της φθοράς του υλικού, όπως για παράδειγμα μειωμένη ένταση ελατηρίου, φθαρμένα σπειρώματα σε περικόχλια και κοχλίες ή ακόμα και πολύ υψηλή εφαρμοζόμενη δύναμη κατά τη συναρμολόγηση. Με την αύξηση του φορτίου έχουμε υπέρβαση της θερμοκρασίας στην ελαττωματική επαφή με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης και την εξασθένιση της έντασης του ρεύματος που διέρχεται από αυτή.



**Εικόνα 57: Κακή επαφή οφειλόμενη σε χαλαρό παξιμάδι. Διάχυση θερμότητας μέσω του καλωδίου<sup>[6]</sup>**

Η εικόνα δείχνει μια κακή επαφή οφειλόμενη σε ένα χαλαρό παξιμάδι. Καθώς η κακή σύνδεση είναι περιορισμένων διαστάσεων, δημιουργεί υπερθέρμανση σε ένα πολύ μικρό σημείο από όπου η θερμότητα διαχέεται δια του καλωδίου σύνδεσης.



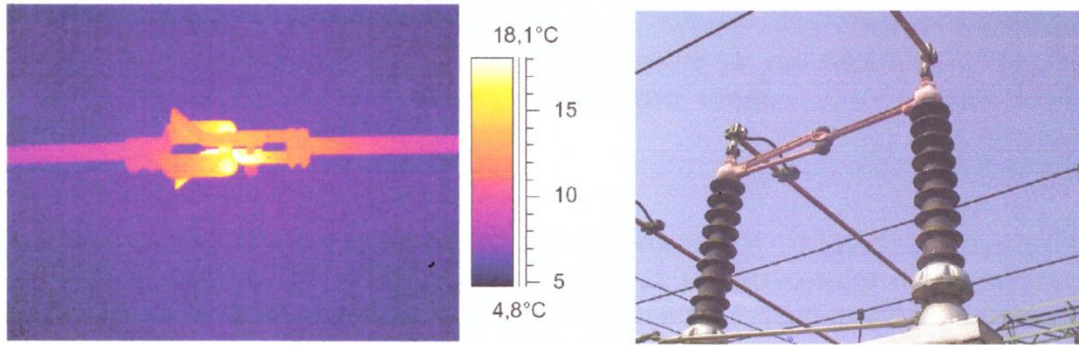
**Εικόνα 58: Κακή επαφή σε εξωτερικό εναέριο δίκτυο, που εάν ήταν σε εσωτερικό χώρο θα είχε υψηλότερη τιμή θερμοκρασίας<sup>[6]</sup>**

Στην παραπάνω εικόνα είναι μια ακόμα υπερθέρμανση οφειλόμενη πάλι σε χαλαρή σύνδεση. Είναι μια εξωτερική σύνδεση, κατά συνέπεια ψύχεται εκτιθέμενη στον εξωτερικό αέρα και είναι πιθανόν η υπερθέρμανση να έχει μικρότερη θερμοκρασία από ότι εάν ήταν εσωτερική σύνδεση.

### **3.14.7 Υπερθέρμανση ενός τμήματος σαν αποτέλεσμα του σφάλματος σε κάποια άλλο τμήμα**

Καμιά φορά η υπερθέρμανση μπορεί να φανεί σε ένα εξάρτημα ενώ δεν έχει σφάλμα. Στο παράδειγμα της εικόνας, είναι δύο επαφές που εφάπτονται και από το εσωτερικό τους διέρχεται φορτίο. Ο ένας από τους δύο αγωγούς έχει αυξημένη αντίσταση, ενώ ο άλλος δεν έχει κάποιο πρόβλημα





**Εικόνα 59:Κακή επαφή σε αποζεύκτη<sup>[6]</sup>**

Κατ'αυτόν τον τρόπο, ο ελαττωματικός φέρει μικρότερο φορτίο ενώ αυτός που δεν παρουσιάζει πρόβλημα φέρει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, ίσως μάλιστα πολύ μεγαλύτερο με αποτέλεσμα να έχει υψηλή θερμοκρασία.

Η υπερθέρμανση του αποζεύκτη κυκλώματος πιθανότατα οφείλεται στην κακή επαφή του αριστερού τμήματος της επαφής. Κατά συνέπεια το δεξί τμήμα μεταφέρει περισσότερο ρεύμα και θερμαίνεται περισσότερο.

### **3.15 Παράγοντες όχλησης κατά τη θερμογραφική επιθεώρηση των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων**

Κατά τη διάρκεια θερμογραφικών επιθεωρήσεων διάφορων τύπων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, διάφοροι παράγοντες όχλησης όπως ο άνεμος, η βροχή ή το χιόνι συχνά επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης

#### **3.15.1 Άνεμος**

Κατά τη διάρκεια της εξωτερικής μέτρησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ψύξης που προκαλεί ο άνεμος. Μια υπερθέρμανση μετρούμενη με ταχύτητα ανέμου 5m/s θα είναι περίπου η διπλάσια από μια υπερθέρμανση μετρούμενη με ταχύτητα ανέμου 1m/s. Μια υπερβολική θερμοκρασία μετρούμενη στα 8 m/s θα είναι 2.5 φορές υψηλότερη με 1 m/s. Ο παράγοντας διόρθωσης, βασισμένος σε εμπειρικές μετρήσεις, είναι εφαρμόσιμος μέχρι τα 8 m/s

Υπάρχουν παρόλα αυτά περιπτώσεις που θα πρέπει να γίνει επιθεώρηση ακόμα και αν ο άνεμος είναι ισχυρότερος από 8 m/s.

Υπάρχουν πολλά μέρη με ισχυρούς ανέμους όπως νησιά, βουνά, κτλ. Αλλά είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι τα ευρεθέντα υπερθερμανθέντα στοιχεία θα είχαν σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία με μικρότερες ταχύτητες ανέμου

### **Πίνακας 1:Ο εμπειρικός πίνακας των παραγόντων**

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Παράγοντας διόρθωσης
1	1
2	1.36
3	1.64
4	1.86
5	2.06
6	2.23
7	2.4
8	2.54

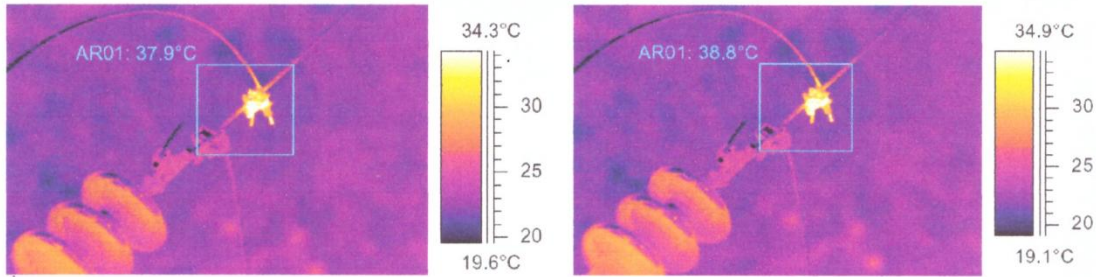
Η μετρούμενη υπερθέρμανση πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα διόρθωσης δίνει την υπερθέρμανση δίχως άνεμο για παράδειγμα στα 1m/s

#### **3.15.2 Βροχή και χιόνι**

Η βροχή και το χιόνι παρουσιάζουν φαινόμενα ψύξης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Η θερμογραφική μέτρηση μπορεί να συνεχιστεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια ελαφριάς χιονόπτωσης με ξηρό χιόνι και ελαφριά ψιχάλα. Η ποιότητα της εικόνας θα αλλοιωθεί από την πυκνή χιονόπτωση ή βροχόπτωση και η αξιόπιστη μέτρηση δεν είναι πλέον δυνατή. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί η πυκνή χιονόπτωση όπως επίσης και η έντονη βροχόπτωση είναι αδιαπέραστη από την υπέρυθρη ακτινοβολία και είναι μάλλον η θερμοκρασία των νιφάδων ή των μεγάλων σταγόνων βροχής που θα μετρηθεί.

#### **3.15.3 Απόσταση από στόχο**

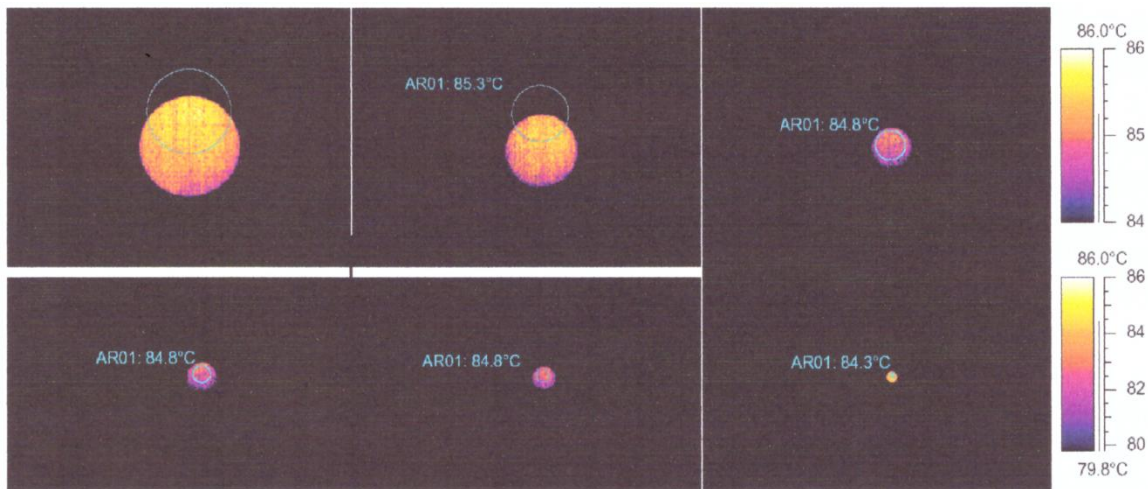
Αυτή η θερμοκρασία έχει τραβηχτεί από ελικόπτερο που βρίσκεται 20 μέτρα από την ελαττωματική σύνδεση. Η απόσταση τέθηκε κατά λάθος στο 1μέτρο και η θερμοκρασία μετρήθηκε στους 37.9°C. Η τιμή μέτρησης, αφού άλλαξε η απόσταση στα 20 μέτρα, φαίνεται στην δεξιά εικόνα



**Εικόνα 60:Θερμογράφηση από ελικόπτερο με ρύθμιση απόστασης 1m (αριστερά) και 20m (δεξιά) <sup>[6]</sup>**

Η διορθωμένη θερμοκρασία είναι 38.8°C. Η διαφορά εδώ δεν είναι τόσο σημαντική, όμως μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη παρακάτω. Για αυτό το λόγο η τοποθέτηση της σωστής απόστασης δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Οι ακόλουθες εικόνες δείχνουν το πως φαίνεται η θερμοκρασία για ένα σημείο θερμοκρασίας 85°C με συνεχώς αυξανόμενη απόσταση του σημείου μέτρησης από το πραγματικό σημείο

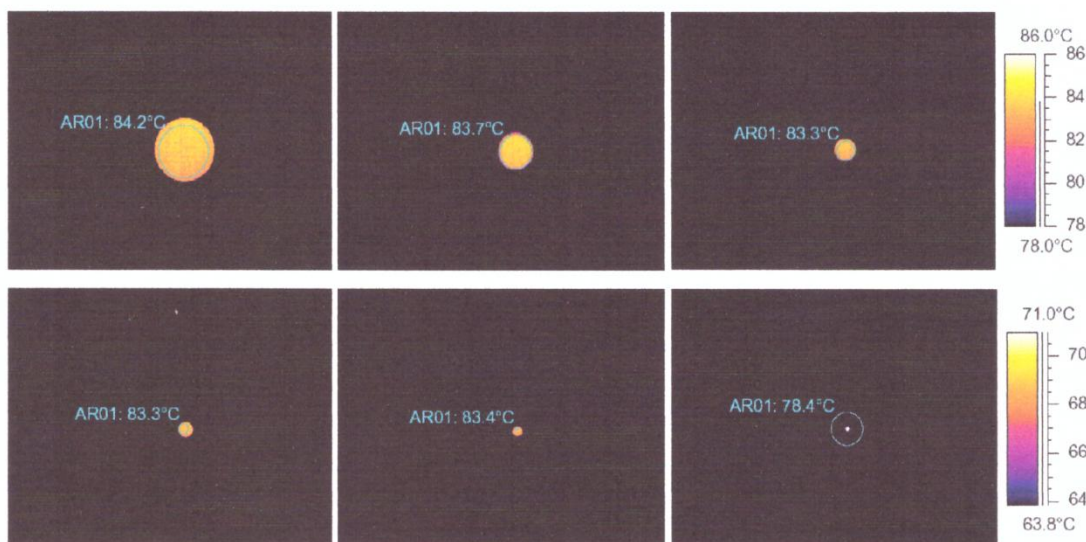


**Εικόνα 61: Διάφορες θερμοκρασίες <sup>[6]</sup>**

Οι μετρούμενες μέσες θερμοκρασίες από τα αριστερά στα δεξιά είναι 85.3, 84.8, 84.3 από ένα μελανό σώμα στους 85°C. Τα θερμογραφήματα γίνονται με ένα φακό 12 lens.Οι αποστάσεις είναι αντίστοιχα 1,2,3,4,5 και 10 μέτρα. Η διόρθωση για την απόσταση έχει τεθεί επιμελώς και δουλεύει επειδή το αντικείμενο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να γίνει σωστή μέτρηση.

### 3.15.4 Μέγεθος αντικειμένου

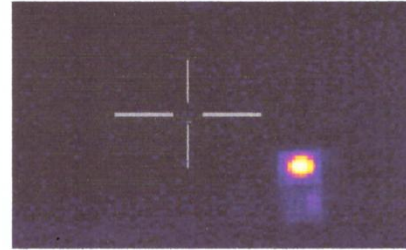
Η ακόλουθη σειρά θερμογραφιών δείχνει τις ίδιες μετρήσεις αλλά με έναν φακό 24°. Εδώ οι μέσες μετρούμενες φωτογραφίες του μελανού σώματος στους 85°C είναι 84.2, 83.7, 83.3, 83.3, 83.4 και 78.4°C



**Εικόνα 62: οι ίδιες μετρήσεις με φακό 24°<sup>[6]</sup>**

Η τελευταία τιμή 78.4°C είναι η μέγιστη θερμοκρασία, καθώς δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση ενός κύκλου στην πολύ μικρή εικόνα ενός μελανού σώματος. Προφανώς δεν είναι δυνατή η μέτρηση εάν το αντικείμενο είναι μικρό. Η φωτογραφία μέτρησης τέθηκε στα 10 μέτρα.

Ο λόγος για τη δημιουργία αυτού του φαινομένου είναι η ύπαρξη ενός μικρότερου αντικειμένου το οποίο δίνει ακριβείς μετρήσεις. Το μικρότερο μέγεθος είναι εύκολο να βρεθεί σε μία σύγχρονη κάμερα. Η ακόλουθη θερμογραφία δείχνει τι βλέπεις στο σκόπευτρο. Το σκόπευτρο έχει ένα άνοιγμα στο μέσο, το οποίο φαίνεται με λεπτομέρεια στα δεξιά. Το αντικείμενο πρέπει να είναι μεγαλύτερο του ανοίγματος αλλιώς κάποια ακτινοβολία από τα γειτονικά αντικείμενα, τα οποία είναι ψυχρότερα, θα παρέμβει στη μέτρηση, δυσχεραίνοντας την ανάγνωση. Στην ανωτέρω περίπτωση, όπου έχουμε ένα αντικείμενο μεγέθους κηλίδας που είναι θερμότερο από τον περιβάλλοντα χώρο, η ανάγνωση της θερμοκρασίας είναι χαμηλή. Το φαινόμενο οφείλεται στις ατέλειες της οπτικής και στο μέγεθος του ανιχνευτή. Είναι σύνηθες για όλες τις κάμερες υπερύθρων και δεν μπορεί να αποφευχθεί εντελώς.



**Εικόνα 63: Η μέτρηση θερμοκρασίας αντικειμένου με μέγεθος μικρότερο του ανοίγματος του spot meter δεν είναι ακριβής<sup>[6]</sup>**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

#### 4.1 Θερμογραφήματα σε μετασχηματιστές

Η παρακάτω ανάλυση αφορά θερμογραφήματα που λήφθηκαν στο STATE HIGHER VOCATIONAL SCHOOL IN TARNOW (University of Applied Sciences), στην Πολωνία. Ελήφθησαν θερμογραφήματα από τρεις μετασχηματιστές των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

**Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών**

	Transformer 1.	Transformer 2.	Transformer 3.
winding voltage	220/110 kV	220/110 kV	400/110 kV
winding power	160/160 MVA	160/160 MVA	250/250 MVA
cooling	ONAN/ ONAF	ONAF	ONAN/ ONAF
Time of exploitation	~ 50 years	~ 10 years	~ 40 years

Οι μετασχηματιστές ποικίλουν σε χρονολογία παραγωγής, σε βαθμό μεταχείρισης και σε κατασκευή. Όλοι ήταν φορτισμένοι στο 40-50% του ονομαστικού τους φορτίου, τυπική συνιστώμενη τιμή που χρησιμοποιείται στους διαγνωστικούς ελέγχους και σε θερμικές δοκιμές

Εξετάστηκε η επιφανειακή εκπεμπικότητα των μετασχηματιστών. Τα σημεία που εξετάστηκαν, καλύφθηκαν με μπογιά. Ο ένας μετασχηματιστής βιάφτηκε με λευκή ματ μπογιά ενώ οι άλλοι δύο με γκρι ματ μπογιά. Η εκπεμπικότητα ήταν ίδια ανεξαρτήτως χρώματος. Για τη θερμογραφική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής  $\epsilon=0.96$ . Δεν έχουν αναλυθεί οι μεταλλικές επιφάνειες (για παράδειγμα γαλβανιζέ επιφάνειες των ψυκτρών) γιατί η εκπεμπικότητά τους είναι πολύ χαμηλή.

#### 4.2 Διαδικασία πειράματος

Ελήφθησαν περισσότερα από 300 θερμογραφήματα τον Ιανουάριο του 2010, Ιούλιο 2012, Αύγουστο 2016, Σεπτέμβριο 2016 και

Ιανουάριο 2017. Χρησιμοποιήθηκαν θερμοκάμερες μάρκας FLIR οι προδιαγραφές των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

**Πίνακας 3: Προδιαγραφές των θερμοκαμερών**

	FLIR InfraCAM SD	FLIR P640	FLIR E50
Spectral range	7.5 - 13 $\mu\text{m}$	7.5 - 13 $\mu\text{m}$	7.5 - 13 $\mu\text{m}$
Detector Type - focal plane array, uncooled microbolometer	120 $\times$ 120 pixels	640 $\times$ 480 pixels	240 $\times$ 180 pixels
Image refresh rate	9 Hz	30 Hz	60 Hz
Thermal sensitivity (N.E.T.D.)	0.12 $^{\circ}\text{C}$ , at + 25 $^{\circ}\text{C}$	0.03 $^{\circ}\text{C}$ , at + 30 $^{\circ}\text{C}$	0.05 $^{\circ}\text{C}$ , at + 30 $^{\circ}\text{C}$
Precision	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
Temperature range	-10 $^{\circ}\text{C}$ to 350 $^{\circ}\text{C}$	-40 $^{\circ}\text{C}$ to 500 $^{\circ}\text{C}$	-20 $^{\circ}\text{C}$ to 650 $^{\circ}\text{C}$
Operating temperature range (environmental specification)	-15 $^{\circ}\text{C}$ to +50 $^{\circ}\text{C}$	-15 $^{\circ}\text{C}$ to +50 $^{\circ}\text{C}$	-15 $^{\circ}\text{C}$ to +50 $^{\circ}\text{C}$
Time when the equipment was used in the experiment	2010, 2012, 2016, 2017	2016, 2017	2017

Οι μετρήσεις έγιναν υπό διαφορετική γωνία για κάθε μετασχηματιστή προκειμένου να καλυφθούν όσο το δυνατό περισσότερες επιφάνειες και να είναι δυνατή η σύγκριση πολλών περιοχών. Επίσης η απόσταση μεταξύ της θερμοκάμερας και του μετασχηματιστή ποικίλει από 2 μέχρι 4 μέτρα.

Στα πλαίσια των μετρήσεων λήφθηκαν υπόψη και άλλες πληροφορίες, όπως: ατμοσφαιρική θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες έχουν ως εξής:

- Στις 06-01-2010 η θερμοκρασία ήταν 4 $^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 30%
- Στις 17-07-2012 η θερμοκρασία ήταν 20 $^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 90%
- Στις 12-08-2016 η θερμοκρασία ήταν 15 $^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 30%
- Στις 27-09-2016 η θερμοκρασία ήταν 14.5 $^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 30%
- Στις 9-12-2016 η θερμοκρασία ήταν 4 $^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 90%

- Στις 03-01-2017 η θερμοκρασία ήταν  $-2^{\circ}\text{C}$  και η σχετική υγρασία 30%

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο ουρανός ήταν νεφελώδης, η ταχύτητα του ανέμου μικρότερη από 1 m/s, συνεπώς η απώλεια θερμότητας από τις επιφάνειες λόγω μεταγωγής ήταν η ελάχιστη δυνατή.

Προκειμένου να αποφευχθούν αντικατοπτρισμοί ή απευθείας ακτινοβολία που θα μπορούσε να αλλοιώσει την ανάλυση), οι μετρήσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες πραγματοποιήθηκαν νύχτα. Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα πραγματοποιήθηκαν σε πολύ συννεφιασμένες μέρες και όχι τη νύχτα καθώς η ατμοσφαιρική θερμοκρασία που έπεφτε στο  $\square 15^{\circ}\text{C}$  θα αλλοίωνε τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Η επιφάνεια του μετασχηματιστή διαιρέθηκε σε 3 κομμάτια: Το πάνω μέρος (4/5 του ύψους), το μεσαίο μέρος (1/2 του ύψους) και το κάτω μέρος (1/5 του ύψους). Για κάθε θερμογράφημα αναλύθηκε η θερμοκρασία της εμφανούς επιφάνειας. Λήφθηκε επίσης υπόψη η θερμοκρασία των σωλήνων ή των βιδών επειδή ήταν υψηλότερη σε σχέση με αυτή των υπολοίπων εξαρτημάτων.

Κάθε θερμογράφημα επεξεργάστηκε και αναλύθηκε με το πρόγραμμα "FLIR Tools professional" της θερμοκάμερας. Οι προς επεξεργασία πληροφορίες που μπήκαν στο πρόγραμμα ήταν: ατμοσφαιρική θερμοκρασία, σχετική υγρασία, εκπεμπικότητα και απόσταση της κάμερας από το υπό εξέταση αντικείμενο. Τα αποτελέσματα αφορούσαν την κατανομή της θερμοκρασίας και τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας για τη συγκεκριμένη περιοχή. Προσοχή δόθηκε στα θερμά σημεία (hot spots) στις υπό εξέταση περιοχές. Αναλύθηκαν θερμογραφήματα για νέους αλλά και για παλιούς μετασχηματιστές με διαβρωμένη μόνωση. Δύο από τους μετασχηματιστές ήταν του ίδιου κατασκευαστή αλλά διέφεραν στην κατασκευή και επιλέχθηκαν για στατιστικούς λόγους. Ο πρώτος ήταν σε καλή κατάσταση (περίπου 10 χρόνια λειτουργίας), ενώ ο άλλος μετασχηματιστής δεν ήταν σε καλή κατάσταση (50 χρόνια λειτουργίας).

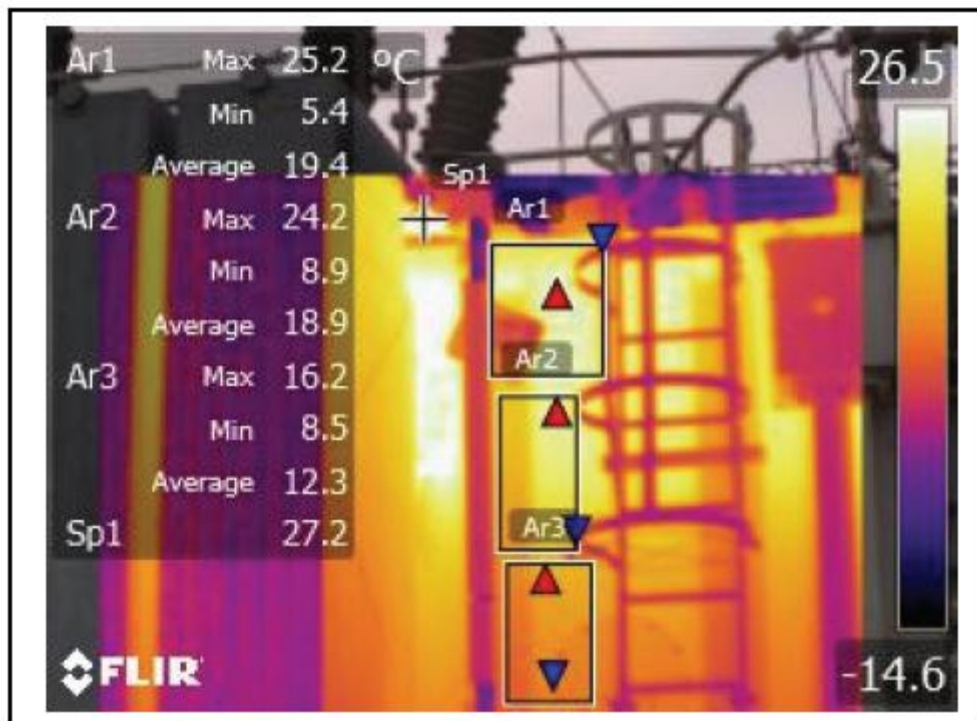
Τα θερμογραφήματα χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με την εποχή που ελήφθησαν: καλοκαίρι, φθινόπωρο, χειμώνας. Σε όλους τους μετασχηματιστές, ανεξαρτήτως εποχής, οι πιο θερμές περιοχές καταγράφηκαν στα πάνω τμήματα. Επίσης οι υψηλότερες θερμοκρασίες καταγράφηκαν στους μετασχηματιστές 400/110 kV σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές 220/110 kV



Για έναν μετασχηματιστή με καλή μόνωση, οι χαμηλότερες περιοχές ήταν ψυχρότερες. Στον πίνακα φαίνονται τρεις ομάδες με διαφορετικά γράμματα (επάνω, μεσαίο και κάτω μέρος του μετασχηματιστή με καλή μόνωση). Οι πιο ψυχρές περιοχές καταγράφηκαν στο κάτω μέρος.

Στην περίπτωση ενός μετασχηματιστή με καλή μόνωση, οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές καταγράφηκαν μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους ανεξαρτήτως εποχής, γεγονός που καθιστά την ψύξη του μετασχηματιστή πολύ αποδοτική.

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η υπερβολική ηλιακή ακτινοβολία και η υψηλή υγρασία συμβάλλουν αρνητικά στην ψύξη του μετασχηματιστή. Έτσι το πιο ζεστό λάδι συγκεντρώνεται στο πάνω μέρος του μετασχηματιστή, όπου και ανιχνεύτηκαν οι πιο μεγάλες θερμοκρασίες.

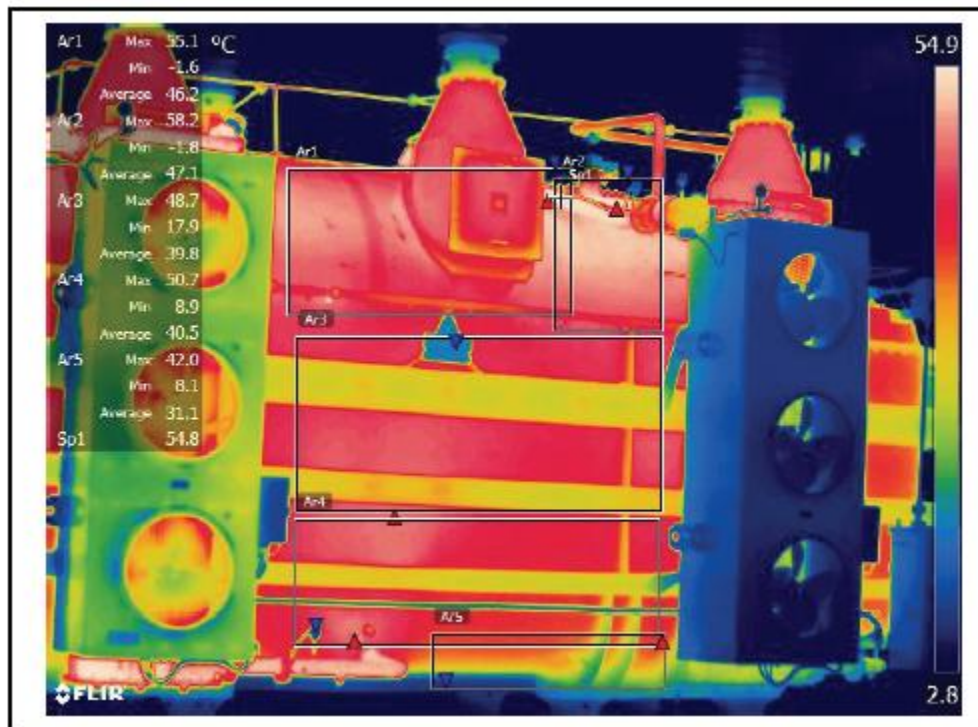


**Εικόνα 64:Θερμογράφημα ενός μετασχηματιστή με καλή ηλεκτρική μόνωση (10 χρόνια λειτουργίας). Τα κάτω μέρη είναι συνήθως τα πιο ψυχρά<sup>[7]</sup>**

Στην περίπτωση ενός μετασχηματιστή με όχι καλή μόνωση, ανιχνεύτηκαν διαφορετικά πράγματα. Θερμά σημεία ανιχνεύτηκαν σε όλα τα τμήματα του μετασχηματιστή. Στον πίνακα φαίνεται ότι δεν υπήρχε διαφοροποίηση στη θερμοκρασία στα τμήματα του

μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Κατά τους φθινοπωρινούς και τους χειμερινούς μήνες δεν παρουσιάστηκαν διαφορές θερμοκρασίας στο μεσαίο και στο χαμηλότερο μέρος του μετασχηματιστή.

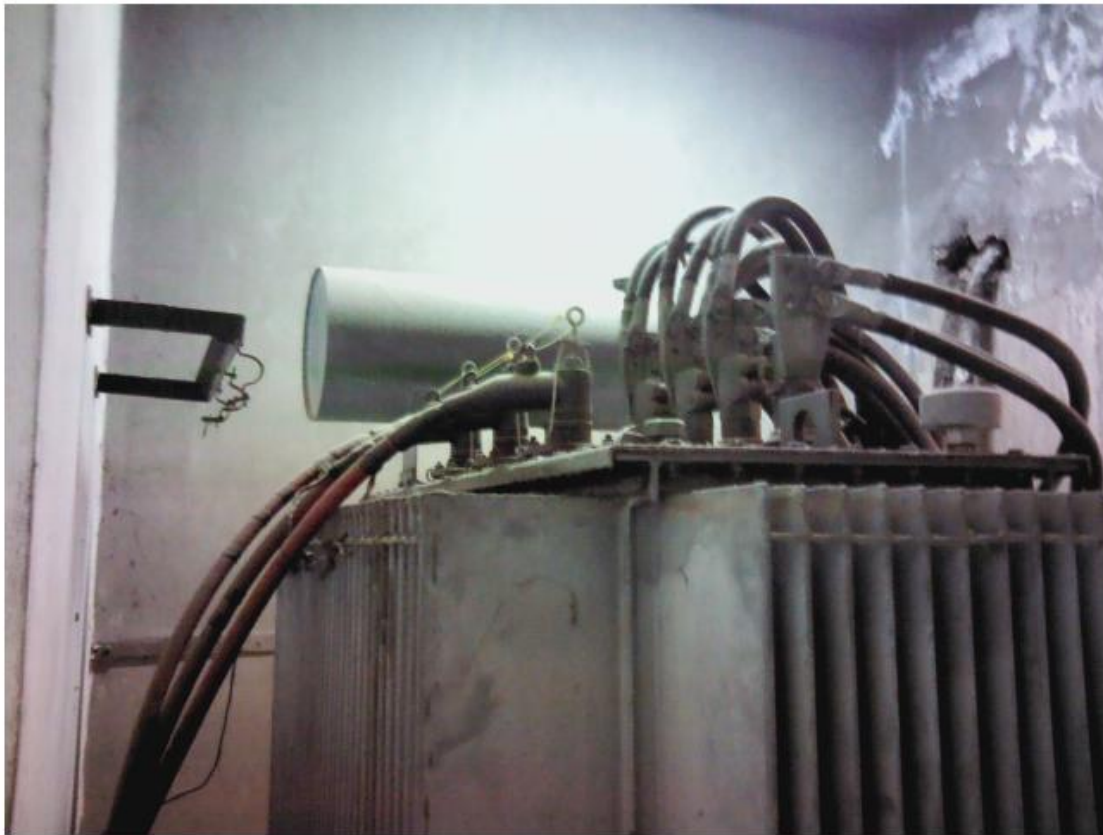
Σε πολλά θερμογραφήματα που λήφθηκαν κατά τις απογευματινές ώρες του καλοκαιριού, εντοπίστηκαν σημεία με υψηλές θερμοκρασίες στα χαμηλότερα σημεία του μετασχηματιστή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι για πολλές ώρες η ατμοσφαιρική θερμοκρασία και η υγρασία ήταν σε υψηλά επίπεδα, οπότε η ψύξη του μετασχηματιστή ήταν δύσκολο να επιτευχθεί.



**Εικόνα 65:Θερμογράφημα του μετασχηματιστή με την μη ικανοποιητική μόνωση<sup>[7]</sup>**

### 4.3 Πραγματικές μετρήσεις και αποτελέσματα σε μετασχηματιστή 20kV/400V

Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες ενός Μ/Σ 20kV/0.4kV και σφάλματα που εντοπίστηκαν με τη χρήση της θερμοκάμερας



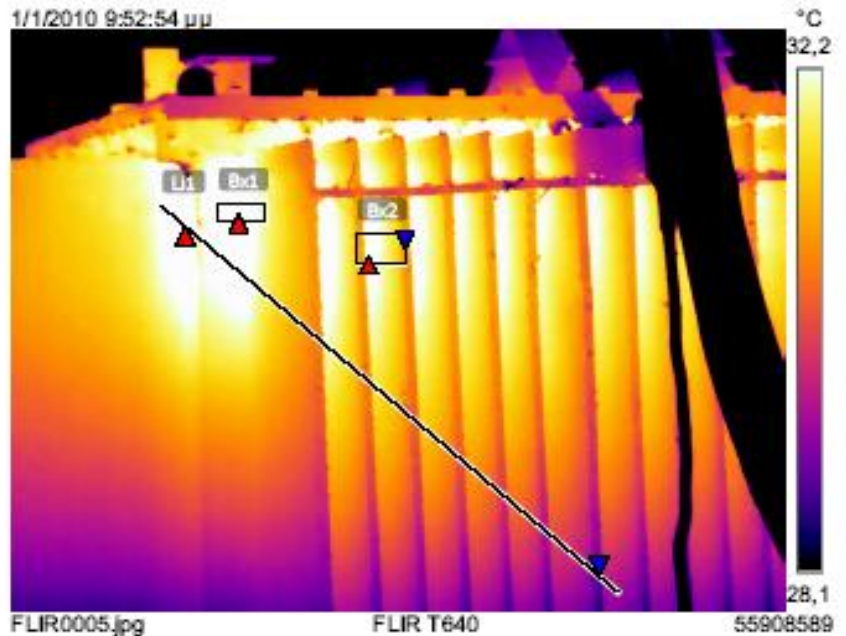
FLIR0008.jpg

**Εικόνα 66: Ο μετασχηματιστής στο χώρο λειτουργίας του<sup>[8]</sup>**

Μετρήσεις		°C
Bx1	Max	32,6
Bx2	Max	32,5
	Min	30,7
	Average	31,7
Li1	Max	32,6
	Min	28,8
	Average	31,0

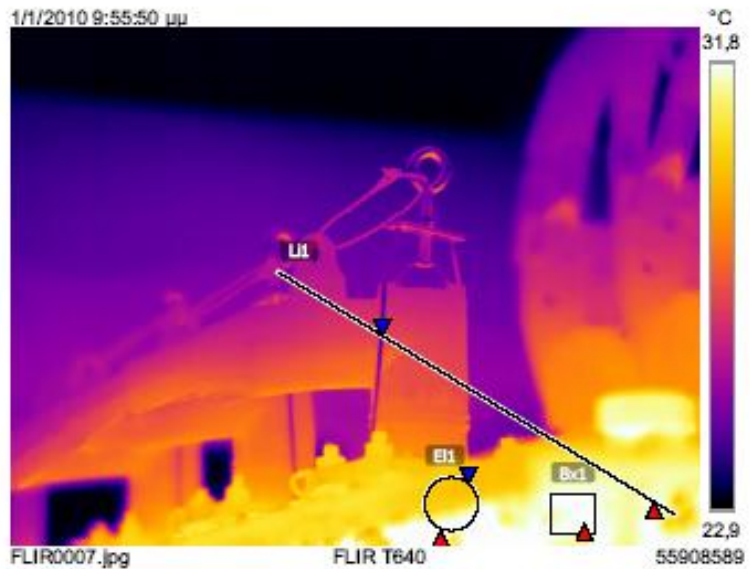
Παράμετροι	
Συντελεστής εκπομπής	0.95
Θερμ. ανάκλ.	20 °C
Απόσταση	15 m
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία	20 °C
Θερμοκρασία εξωτερικών οπτικών	20 °C
Διαπερατότητα εξωτερικών οπτικών	1
Σχετική υγρασία	50 %

Γεωγραφική θέση	
Πυξίδα	45° ΒΑ



**Εικόνα 67: Διαφορά θερμοκρασίας στο άνω μέρος των ψηκτρών<sup>[8]</sup>**

Μετρήσεις		°C
Bx1	Max	31,8
E11	Max	32,2
	Min	29,6
L11	Average	30,6
	Max	31,7
	Min	24,4
Average		27,7
Παράμετροι		
Συντελεστής εκπομπής	0.95	
Θερμ. ανάκλ.	20 °C	
Απόσταση	15 m	
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία	20 °C	
Θερμοκρασία εξωτερικών οπτικών	20 °C	
Διαπερατότητα εξωτερικών οπτικών	1	
Σχετική υγρασία	50 %	
Γεωγραφική θέση		
Πυξίδα	168° N	

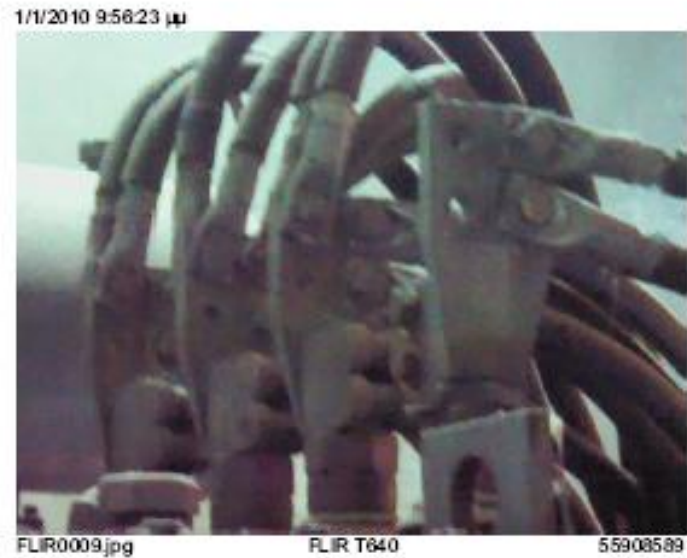
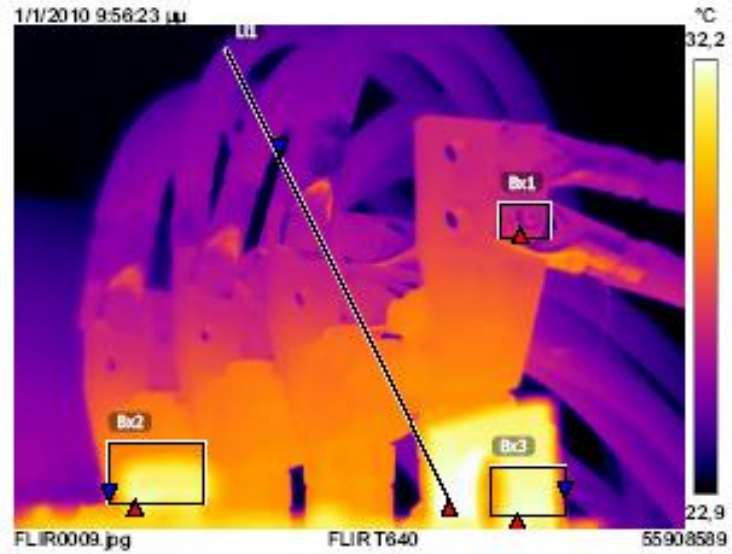


**Εικόνα 68: Αυξημένη θερμοκρασία στο επάνω μέρος του Μ/Σ , η είσοδος του Μ/Σ 20kv και πίσω η αναχώρηση Χ.Τ.<sup>[8]</sup>**

Μετρήσεις		°C
Bx1	Max	27,0
Bx2	Max	31,9
	Min	25,7
	Average	30,3
Bx3	Max	32,0
	Min	25,4
	Average	30,9
Li1	Max	32,2
	Min	23,1
	Average	27,1

Παράμετροι	
Συντελεστής εκπομπής	0.95
Θερμ. ανάκλ.	20 °C
Απόσταση	15 m
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία	20 °C
Θερμοκρασία εξωτερικών οπτικών	20 °C
Διαπερατότητα εξωτερικών οπτικών	1
Σχετική υγρασία	50 %

Γεωγραφική θέση	
Πυξίδα	177° N

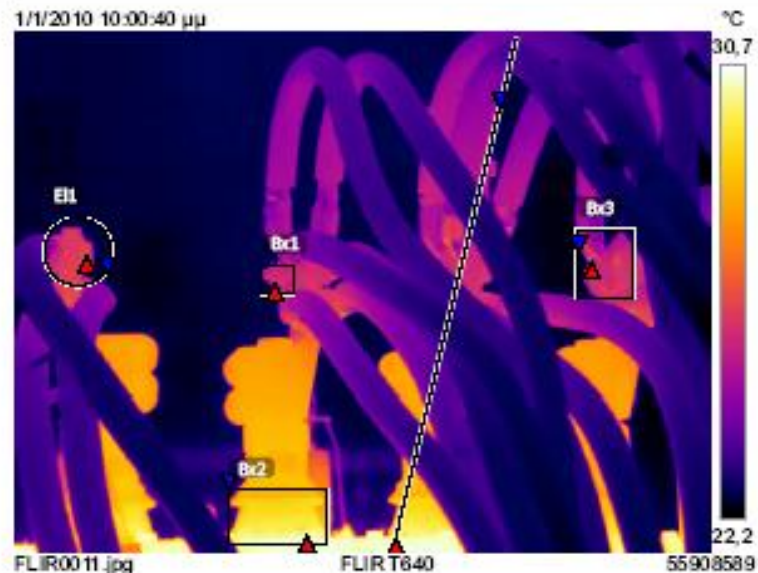


**Εικόνα 69: Αυξημένη θερμοκρασία στις αναχωρήσεις Χ.Τ. [8]**

Μετρήσεις		°C
Bx1	Max	28,0
	Min	22,8
	Average	29,1
Bx2	Max	30,7
	Min	22,3
	Average	24,8
Bx3	Max	27,1
	Min	22,3
	Average	24,8
E11	Max	26,3
	Min	22,4
	Average	24,4
Li1	Max	30,4
	Min	22,7
	Average	24,7

Παράμετροι	
Συντελεστής εκπομπής	0.95
Θερμ. ανάκλ.	20 °C
Απόσταση	15 m
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία	20 °C
Θερμοκρασία εξωτερικών οπτικών	20 °C
Διαπερατότητα εξωτερικών οπτικών	1
Σχετική υγρασία	50 %

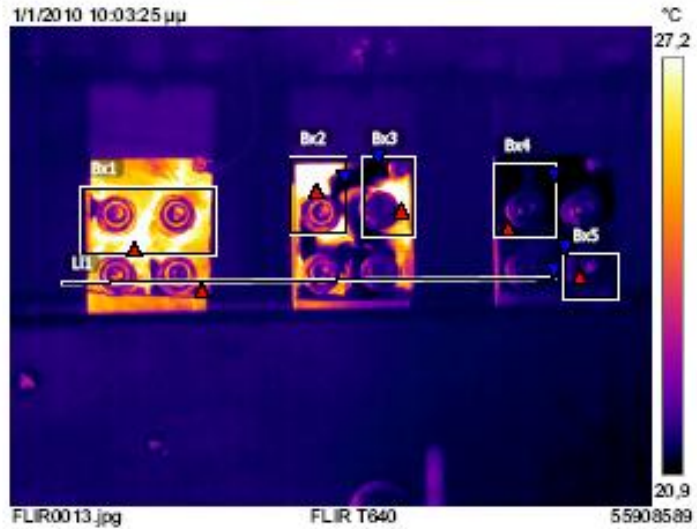
Γεωγραφική θέση	
Πυξίδα	38° ΒΑ



**Εικόνα 70: Αυξημένη θερμοκρασία στις αναχωρήσεις Χ.Τ. <sup>[8]</sup>**

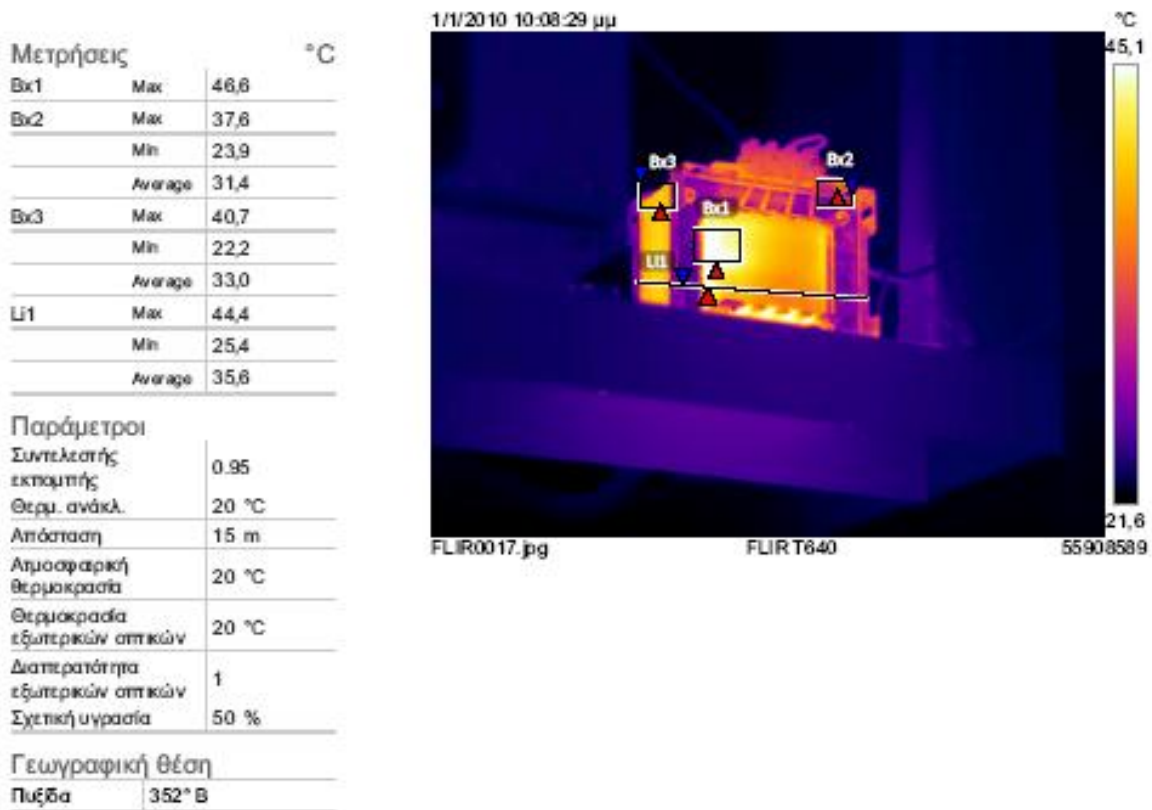
Μετρήσεις		°C
Bx1	Max	30,7
Bx2	Max	30,8
	Min	20,9
	Average	24,8
Bx3	Max	29,7
	Min	20,8
	Average	23,0
Bx4	Max	24,2
	Min	20,8
	Average	21,1
Bx5	Max	22,6
	Min	20,9
	Average	21,3
Li1	Max	26,8
	Min	21,0
	Average	22,2

Παράμετροι	
Συντελεστής εκπομπής	0.95
Θερμ. ανάκλ.	20 °C
Απόσταση	15 m
Ατμοσφαιρική θερμοκρασία	20 °C
Θερμοκρασία εξωτερικών οπτικών	20 °C
Διαπερατότητα εξωτερικών οπτικών	1
Σχετική υγρασία	50 %
Γεωγραφική θέση	
Πυξίδα	46° ΒΑ



**Εικόνα 71: Αυξημένη θερμοκρασία στην αναχώρηση Χ.Τ. από το διακόπτη φορτίου<sup>[8]</sup>**





**Εικόνα 72: Αυξημένη θερμοκρασία στο διακόπτη φορτίου<sup>[8]</sup>**

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiCle2N5JfeAhVDp4sKHe0fCEAQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fclass.duth.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Findex.php%3Fcourse%3DTME148%26download%3D%2F4ac9a0bdh4cp%2F54b16792sVXu.pdf&usg=AOvVaw1yCK-5RyDJ4Z6tn-3DHhib>
- [2] <https://study.com/academy/lesson/infrared-waves-definition-uses-examples.html>
- [3] <https://www.slideshare.net/nickstiv/ss-62832900>
- [4] [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3602/1/05\\_Chapter\\_4.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3602/1/05_Chapter_4.pdf)
- [5] [https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjI8lLc6JfeAhUEto\\_sKHTLDDqsQFjAAegQICBAC&url=http%3A%2F%2Fokeanis.lib.teipir.gr%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F2670%2F%25CE%25A4%25CE%2595%25CE%25A7%25CE%259D%25CE%2599%25CE%259A%25CE%259F%2520%25CE%2595%25CE%2593%25CE%25A7%25CE%2595%25CE%2599%25CE%25A1%25CE%2599%25CE%2594%25CE%2599%25CE%259F%2520%25CE%25A7%25CE%25A1%25CE%2597%25CE%25A3%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%25A4%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%259C%25CE%2595%25CE%2598%25CE%259F%25CE%2594%25CE%259F%25CE%25A5%2520%25CE%25A4%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%2598%25CE%2595%25CE%25A1%25CE%259C%25CE%259F%25CE%2593%25CE%25A1%25CE%2591%25CE%25A6%25CE%2599%25CE%2591%25CE%25A3%2520%25CE%25A0%25CE%25BB%25CE%25AE%25CF%2581%25CE%25B7%25CF%2582.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw02RG01bTPQtuFI8GbpDGmh](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjI8lLc6JfeAhUEto_sKHTLDDqsQFjAAegQICBAC&url=http%3A%2F%2Fokeanis.lib.teipir.gr%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F2670%2F%25CE%25A4%25CE%2595%25CE%25A7%25CE%259D%25CE%2599%25CE%259A%25CE%259F%2520%25CE%2595%25CE%2593%25CE%25A7%25CE%2595%25CE%2599%25CE%25A1%25CE%2599%25CE%2594%25CE%2599%25CE%259F%2520%25CE%25A7%25CE%25A1%25CE%2597%25CE%25A3%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%25A4%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%259C%25CE%2595%25CE%2598%25CE%259F%25CE%2594%25CE%259F%25CE%25A5%2520%25CE%25A4%25CE%2597%25CE%25A3%2520%25CE%2598%25CE%2595%25CE%25A1%25CE%259C%25CE%259F%25CE%2593%25CE%25A1%25CE%2591%25CE%25A6%25CE%2599%25CE%2591%25CE%25A3%2520%25CE%25A0%25CE%25BB%25CE%25AE%25CF%2581%25CE%25B7%25CF%2582.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw02RG01bTPQtuFI8GbpDGmh)

- [6] ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ,ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΕΡΩΝ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ, ΔΕΗ, ΑΘΗΝΑ 2003
- [7] [https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKEwiS1bC\\_hfzdAhXKJVAKH4iBGoQFjAHegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fyadda.icm.edu.pl%2Fyadda%2Felement%2Fbwmeta1.element.baztech-9fb653a6-5525-41fc-ad32-15b0f9b22efb%2Fc%2FLisowska-Lis\\_thermographic\\_MAM\\_4\\_2017.pdf&usg=AOvVaw1uyXIZEehZwP0Ld1cBQA2R](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=2ahUKEwiS1bC_hfzdAhXKJVAKH4iBGoQFjAHegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fyadda.icm.edu.pl%2Fyadda%2Felement%2Fbwmeta1.element.baztech-9fb653a6-5525-41fc-ad32-15b0f9b22efb%2Fc%2FLisowska-Lis_thermographic_MAM_4_2017.pdf&usg=AOvVaw1uyXIZEehZwP0Ld1cBQA2R)
- [8] Θερμικές φωτογραφίες από έναν Μ/Σ 20kV/400V (Οκτώβριος 2017) Χειριστής:Χαρίτος Βασίλειος