



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ – ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ»

**«Η Θερμογραφία υπερύθρου ως μη καταστροφική τεχνική
ελέγχου ποιότητας υλικών»**

Δρ. Νεκτάριος Κ. Νασίκας

Επίκουρος Καθηγητής
Τομέας Μαθηματικών και Επιστημών Μηχανικού
Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων

Αθήνα, 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- ✓ Βασικές αρχές της θερμογραφίας υπερύθρου
- ✓ Μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας
- ✓ Βασικές τεχνικές θερμογραφίας
- ✓ Διαδικασίες ελέγχου και εφαρμογές

Θερμογραφία υπέρυθρου

Βασικές αρχές

Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμουν όλα τα σώματα τα οποία έχουν θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν 0K (-273 °C)

Τι είναι η θερμογραφία υπέρυθρου

Είναι η μέθοδος με την οποία μπορούμε να ανιχνεύσουμε τη θερμότητα την οποία εκπέμπει ένα αντικείμενο υπο την μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Να την μετατρέψουμε σε θερμοκρασία και να απεικονίσουμε την κατανομή της θερμοκρασίας ως θερμογράφημα!

Έλεγχος υλικών

Η θερμογραφία στον έλεγχο υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας υλικών, στην ανίχνευση βλαβών στη δομή των υλικών, για την ανίχνευση θερμικών απωλειών κτλ.

Θερμογραφία υπερύθρου

Ιστορικά στοιχεία για την θερμογραφία υπερύθρου

~1800 έγινε μια τυχαία ανακάλυψη του υπέρυθρου τμήματος του Η/Μ φάσματος, από τον Sir Frederick William Herschel (1738 – 1822). Βασιλικός Αστρονόμος του Βασιλιά Γεωργίου III της Αγγλίας. Ανακάλυψε τον πλανήτη Ουρανό.



Θέλοντας να παρατηρήσει τον ήλιο έψαχνε για διάφορα φίλτρα από χρωματισμένο γυαλί. Ωστόσο παρατήρησε ότι διάφορα φίλτρα άφηναν και διαφορετική ποσότητα θερμότητας να περάσει.

Μέτρησε λοιπόν τη θερμοκρασία του κάθε χρώματος του ορατού φάσματος με τη χρήση οπτικού πρίσματος και παρατήρησε ότι η θερμοκρασία αυξανόταν και σε περιοχές που δεν υπήρχε ορατό μήκος κύματος!

Θερμογραφία υπερύθρου

Ιστορικά στοιχεία για την θερμογραφία υπερύθρου

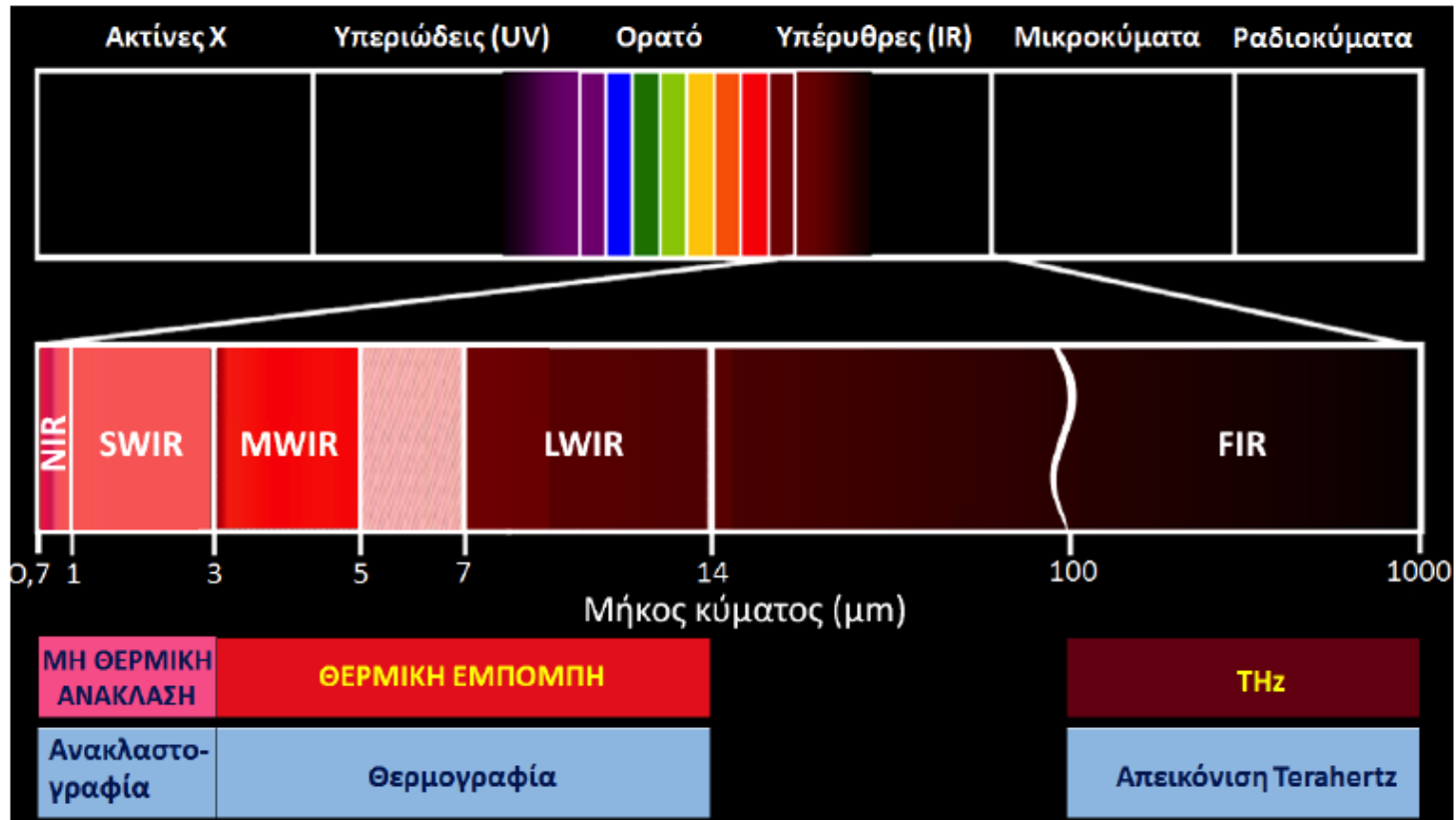
~1830 ο Ιταλός Macdonio Melloni (1798 – 1854) συνέχισε την έρευνα του Herschel και παρατήρησε ότι κρύσταλλοι ορυκτού άλατος παρήγαγαν επίσης διαθλάσεις του θερμικού φάσματος.

Πρώτος παγκόσμιος πόλεμος 1935 η Γερμανική Εταιρεία AEG ανακάλυψε την τεχνολογία νυχτερινής όρασης.

Θερμογραφία υπέρυθρου

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Η/Μ Φάσμα)

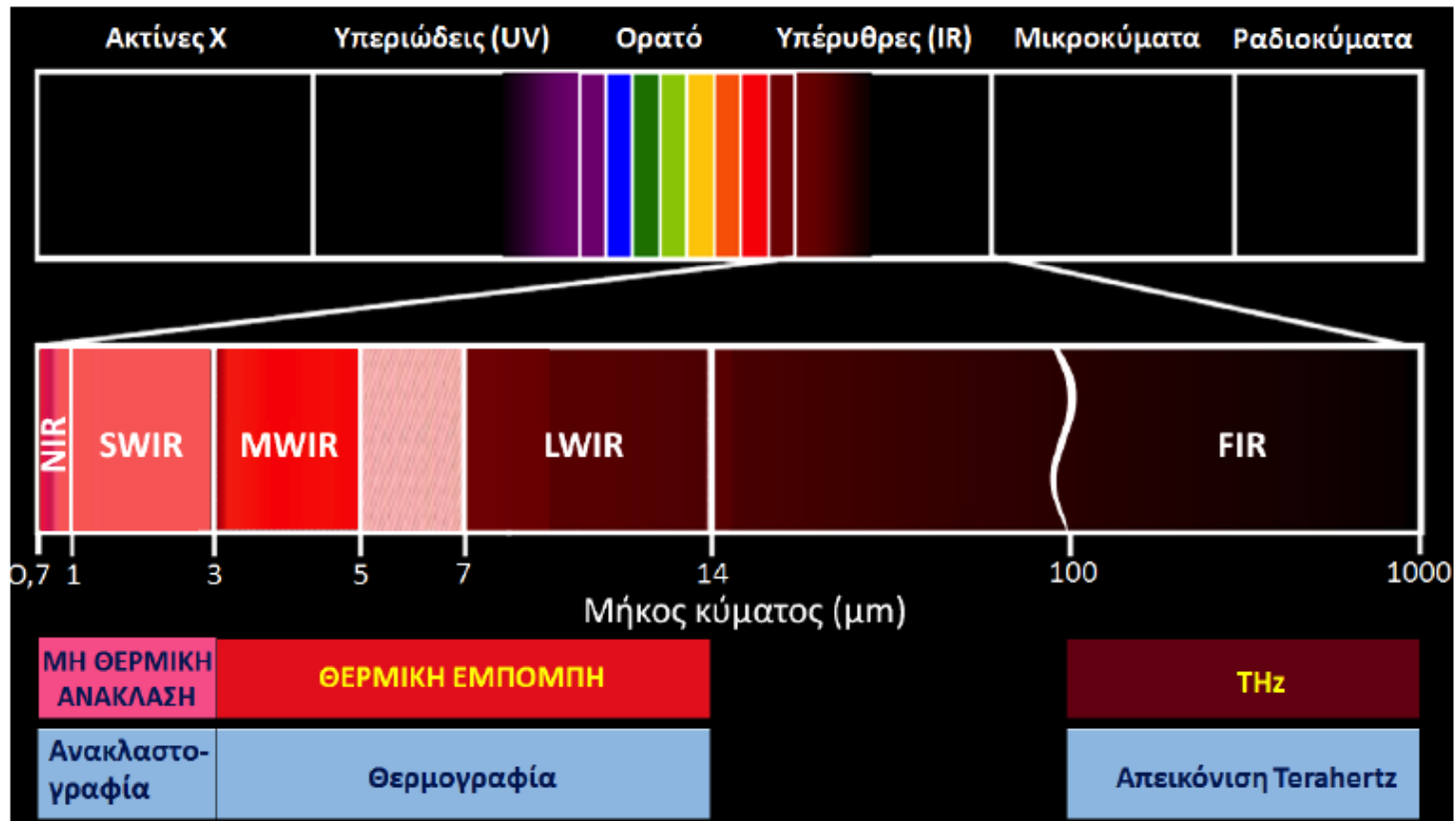
Το Η/Μ φάσμα χωρίζεται σε ζώνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικά μήκη κύματος και παράγουν διαφορετική ακτινοβολία (ακτίνες Χ, υπεριώδεις UV, ορατό φως, υπέρυθρες – IR, μικροκύματα, ραδιοκύματα).



Θερμογραφία υπέρυθρου

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Η/Μ Φάσμα)

Η θερμογραφία αξιοποιεί τη ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας του Η/Μ φάσματος. Η κλασική υπέρυθρη θερμογραφία περιλαμβάνει τις ζώνες όπου παρατηρείται θερμική εκπομπή (MWIR και LWIR).



Θερμογραφία υπερύθρου

Μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας

Για να αντιληφθούμε επαρκώς την χρήση της θερμογραφίας ως μεθόδου προσδιορισμού των χαρακτηριστικών των υλικών θα πρέπει να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς με τους οποίους διαδίδεται η θερμότητα στα υλικά.

Οι κύριοι μηχανισμοί είναι **τρεις**

1. Με αγωγή από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρό σώμα (conduction)
2. Με θερμική μεταβίβαση (convection)
3. Με ακτινοβολία (radiation)

Θερμογραφία υπερύθρου

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Όπως γνωρίζουμε η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή, μέσω της μάζας των σωμάτων. Το πόσο εύκολα ή δύσκολα θα γίνει αυτή η μεταφορά εξαρτάται από την γνωστή μας αγωγιμότητα του κάθε σώματος/υλικού. Ο δείκτης της ικανότητας της μεταφοράς θερμότητας ενός υλικού μέσω της μάζας του καλείται **συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας**.

Καλοί αγωγοί της θερμότητας είναι πχ τα μέταλλα, ενώ άλλα υλικά όπως το πλαστικό, το γυαλί ή ο αέρας είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας γενικά.

Η ποσότητα της θερμότητας Q που μεταφέρεται με αγωγή ακολουθεί τον νόμο του Fourier

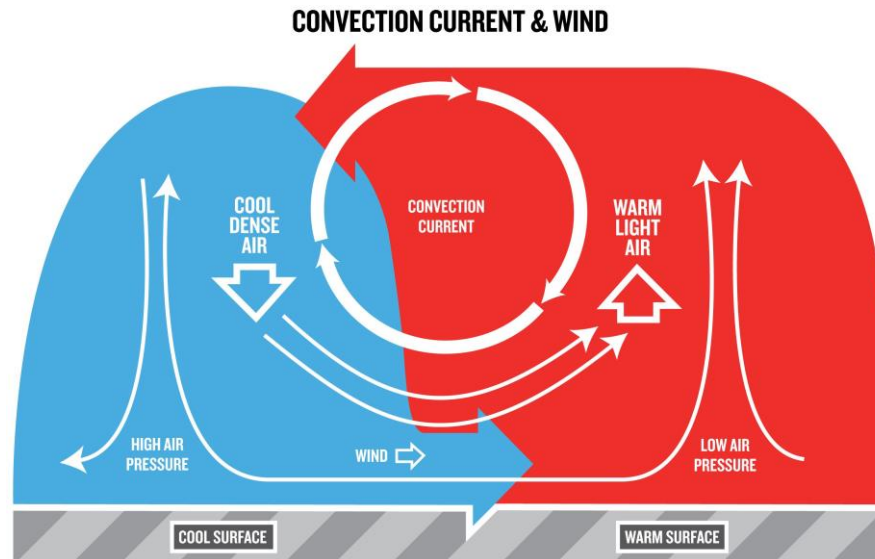
$$Q = \frac{k}{d} F (t_1 - t_2) a$$

k = Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, F = εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου, t_1 =θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου, t_2 =θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου, d = πάχος του υλικού, a = ο χρόνος ροής της θερμότητας

Θερμογραφία υπερύθρου

Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση

Η μεταφορά θερμότητας σε ένα μέσο στο οποίο υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές (πχ ο κρύος αέρας κινείται προς τα κάτω ενώ ο θερμός προς τα πάνω-βαρύτερος/ελαφρύτερος) τότε έχουμε φυσική διάχυση. Αν γινόταν το αντίθετο, με την χρήση κάποιου ανεμιστήρα π.χ. τότε θα είχαμε βίαιη διάχυση. Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση είναι ένα μακροσκοπικό φαινόμενο το οποίο παρατηρείται κατά την διάχυση των ρευστών.



Θερμογραφία υπερύθρου

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασία διάφορη του απόλυτου μηδέν εκπέμπουν ακτινοβολία. Η ποσότητα αυτής της ακτινοβολίας εξαρτάται από την θερμοκρασία, τον συντελεστή θερμικής εκπομπής και άλλες παραμέτρους.

Όταν θερμική ακτινοβολία προσπέσει πάνω σε ένα υλικό, τότε αυτή:

1. Θα απορροφηθεί
2. Θα ανακλαστεί
3. Θα μεταφερθεί

Η απορροφούμενη θερμότητα θα οδηγήσει και σε 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 σύγκριση μιας επιφάνειας σε θερμοκρασία T με το μέλαν σώμα μπορεί να δώσει με ακρίβεια την περιγραφή των χαρακτηριστικών της.

Θερμογραφία υπερύθρου

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Μέλαν σώμα: ιδανική επιφάνεια η οποία απορροφά και εκπέμπει τέλεια την θερμότητα. Χρησιμεύει ως πρότυπο με το οποίο πρέπει να συγκριθούν οι ιδιότητες ακτινοβολίας μιας επιφάνειας. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μήκους κύματος επιφανείας ενός μέλανος σώματος δίνεται από τον νόμο του Wien.

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

Με $C = 2897,6 \mu\text{mK}$ (constant)

Σύμφωνα με τον παραπάνω νόμο η μέγιστη ισχύς της φασματικής εκπομπής μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.

Η ποσότητα της ενέργειας που ακτινοβολείται από ένα σώμα (W) όταν σε αυτό προσπέσει ακτινοβολία, ακολουθεί τον νόμο των Stefan – Boltzmann

$$W(T) = \varepsilon\sigma T^4$$

Με W την εκπεμπόμενη ενέργεια σε Watt/m^2

ε τον συντελεστή εκπομπής (emissivity) του υλικού

σ την σταθερά των Stefan – Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

T την απόλυτη θερμοκρασία σε K

Θερμογραφία υπέρυθρου

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ο συντελεστής εκπομπής είναι μια φυσική ιδιότητα του υλικού και είναι ίσος με τη μονάδα για το Μέλαν Σώμα (λόγω 100% εκπομπής της θερμότητας)

Κατά συνέπεια με βάση την προηγούμενη εξίσωση, η θερμοκρασία στην επιφάνεια ενός αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί αν μετρήσουμε την **θερμική ενέργεια** που αυτό εκπέμπει (δηλαδή την υπέρυθρη ενέργεια).

Συνήθως η θερμοκρασία ενός αντικειμένου το οποίο μετράμε με τη μέθοδο της θερμογραφίας βρίσκεται να είναι μικρότερη της πραγματικής και αυτό οφείλεται στον συντελεστή εκπομπής του αντικειμένου. Γι' αυτό και θα πρέπει να γίνεται **διόρθωση** για τη θερμοκρασία, λαμβάνοντας υπόψη και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Αν λοιπόν η μετρούμενη θερμοκρασία ενός αντικειμένου με μια θερμική (υπέρυθρη) κάμερα είναι T_K τότε η ακτινοβολία από την επιφάνεια του αντικειμένου εμπεριέχει την εκπομπή της θερμότητας από το αντικείμενο αλλά και την ανάκλαση από την επιφάνεια σύμφωνα με τη σχέση:

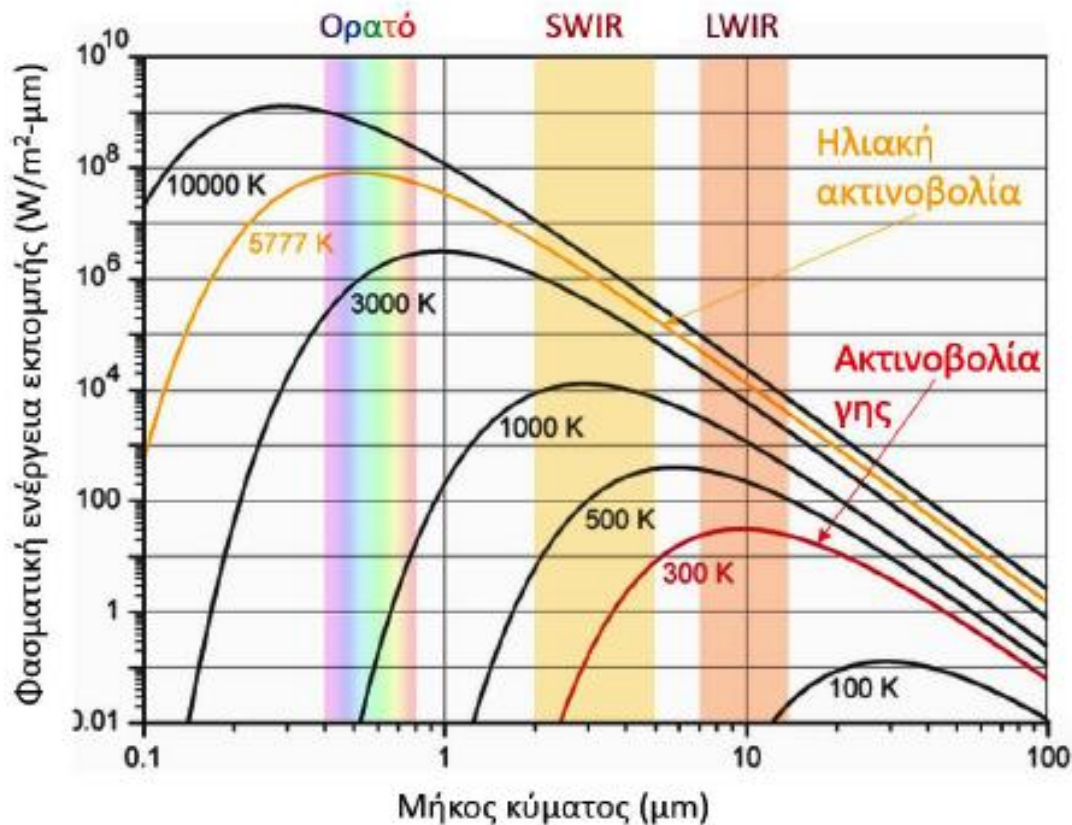
$$W(T_K) = \varepsilon W(T_s) + (1 - \varepsilon)W(T_\pi)$$

W =εκπεμπόμενη θερμοκρασία από τον νόμο S-B, T_K η φαινόμενη θερμοκρασία, T_s η πραγματική θερμοκρασία της επιφάνειας, ε ο συντελεστής εκπομπής και T_π η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Θερμογραφία υπερύθρου

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Με βάση τον νόμο του Planck μπορούμε να σχεδιάσουμε την καμπύλη της ενέργειας εκπομπής σε σχέση με την συχνότητα ή το μήκος κύματος για δεδομένη θερμοκρασία. Ο νόμος του Planck περιγράφει την Η/Μ ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα σε θερμική ισορροπία για συγκεκριμένη θερμοκρασία.

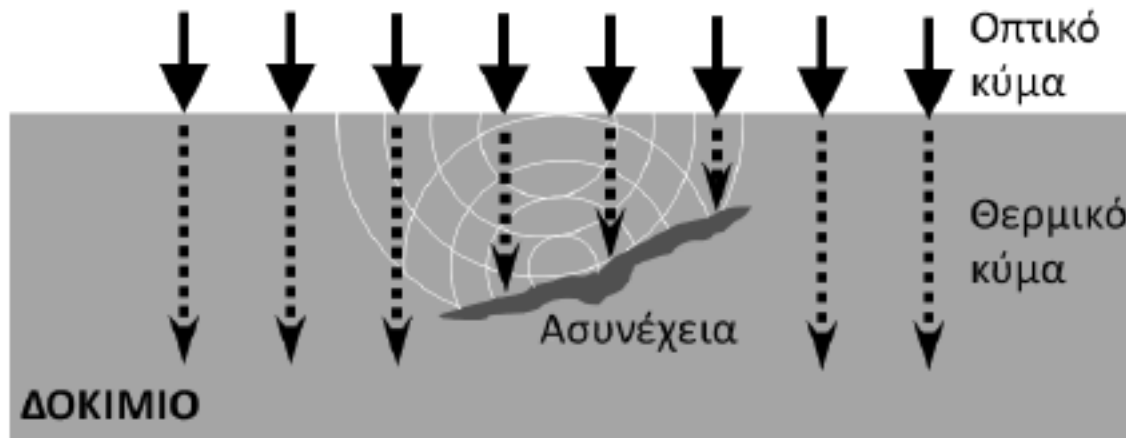


Θερμογραφία υπερύθρου

Βασικές αρχές της θερμογραφίας

Η θερμογραφία υπερύθρου βασίζεται στην αρχή ότι οι ασυνέχειες στην δομή ενός υλικού οι οποίες βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία του υπο εξέταση υλικού.

Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στην διαφορετική διάδοση και μεταφορά της θερμότητας λόγω ασυνεχειών. Η μέθοδος της θερμογραφίας είναι σε θέση να ανιχνεύσει την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του υλικού και να παράξει μια οπτική απεικόνιση από το θερμικό σήμα η οποία είναι ανάλογη του μεγέθους της εσωτερικής ατέλειας. Το μήκος κύματος της εκπομπής είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αυξανόμενη της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται μικρότερο και για πολύ μεγάλες θερμοκρασίες βρίσκεται στο ορατό.



Θερμογραφία υπερύθρου

Θερμικά κύματα

Όταν μια επιφάνεια θερμαίνεται, αναπτύσσονται πολύ κοντά σε αυτή εξασθενημένα θερμικά κύματα. Τα κύματα αυτά παίζουν σπουδαίο ρόλο για τον μη καταστροφικό έλεγχο υλικών καθώς μπορούν να δημιουργηθούν και να ανιχνευθούν από απόσταση.

Στην περίπτωση που θερμότητα εναποτίθεται σε ένα υλικό από μια ομοιόμορφη περιοδική πηγή με γωνιακή συχνότητα ω , η μαθηματική προσέγγιση γίνεται μονοδιάστατη και η θερμοκρασία T μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του βάθους Z και του χρόνου t που διαρκεί η θερμική διέγερση.

$$T(x, t) = T_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right)$$

Με μ το μήκος θερμικής διάχυσης (thermal diffusion length)

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

Με k την θερμική αγωγιμότητα του υλικού σε Watt/mK, ρ την πυκνότητα σε Kg/m³, c την ειδική θερμότητα σε J/KgK, ω την γωνιακή συχνότητα σε rad/s, a την θερμική διαχυτικότητα m²/s και λ το μήκος του θερμικού κύματος σε m.

Θερμογραφία υπερύθρου

Θερμικά κύματα

Παράρτημα Α – Θερμική διαχυτικότητα διαφόρων υλικών ^{17,18}

Υλικό	Θερμική Διαχυτικότητα
	(mm ² /s)
Αέρας (300 K)	19
Αζωτο (300 K, 1 atm)	22
Αλκοόλη	0,07
Αλουμίνιο	84,18
Αλουμίνιο, κράμα 6061-T6	64
Αλουμίνιο, οξείδιο (πολύκρυσταλλικό)	12
Αλουμίνιο, κράμα Al-10Si-Mn-Mg (Silafont 36) @ 20 °C	74,2
Αλουμίνιο, κράμα Al-5Mg-2Si-Mn (Magsimal-59) @ 20 °C	44
Αργό (300 K, 1 atm)	22
Αργυρος, καθαρός (99,9%)	165,63
Διοξείδιο του πυριτίου (πολύκρυσταλλικό)	0,83
Ήλιο (300 K, 1 atm)	190
Inconel 600 @ 25 °C	3.428
Καουτσούκ	0,089 - 0,13
Κασσίτερος	40
Λάδι μηχανής (100 °C)	0,0738

Θερμογραφία υπερύθρου

Θερμικά κύματα

Μολυβδαίνιο (99,95%) @ 25 °C	54,3
Νάυλον	0,09
Νερό @ 25 °C	0,143
Νερό, ατμός (1 atm, 400 K)	23,38
Ξύλο (Πεύκη)	0,082
Παραφίνη @ 25 °C	0,081
Πυρίτιο	88
Πυρολιτικός γραφίτης, κάθετα στις στρώσεις	3,6
Πυρολιτικός γραφίτης, παράλληλα στις στρώσεις	1220
PC (πολυκαρβονικό) @ 25 °C	0,144
PP (πολυπροπυλένιο) @ 25 °C	0,096
PTFE (πολυτετραφθοροαιθυλένιο) @ 25 °C	0,124
PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο)	0,08
Σίδηρος	23
Σύνθετο υλικό άνθρακα/άνθρακα @ 25 °C	216,5
Si3 N4 δίχως CNTs 26 °C	8.605
Si3 N4 με CNTs 26 °C	9.142
Τούβλο	0,52
Υαλος (παράθυρο)	0,34
Υδρογόνο (300 K, 1 atm)	160

Θερμογραφία υπερύθρου

Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία

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

1. Την ειδική θερμότητα
2. Την πυκνότητα
3. Θερμική αγωγιμότητα
4. Θερμική διάχυση
5. Συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
6. Θερμοκρασία
7. Συντελεστή εκπομπής

Επειδή η θερμογραφία εξαρτάται από τις διαφορές των υλικών στα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να οριστεί ένα μετρήσιμο και πολλές φορές εντοπισμένο διαφορικό της θερμοκρασίας.

Για παράδειγμα ένα υλικό με διαφορετική πυκνότητα σε κάποια σημεία του θα σημάνει ότι αυτό θα θερμανθεί ή θα ψυχθεί με διαφορετικό τρόπο, πιο αργά ή πιο γρήγορα (αργα στις περιοχές με μεγάλη πυκνότητα και γρήγορα αλλού).

Αυτή η διαφορά στον τρόπο διάδοσης της θερμότητας μπορεί να αποτυπωθεί με την θερμογραφία.

Θερμογραφία υπερύθρου

Τεχνικές Θερμογραφίας

Κύριες τεχνικές θερμογραφίας είναι η **Παθητική και η Ενεργητική θερμογραφία.**

Παθητική θερμογραφία: Έλεγχος των υλικών και αντίστοιχων δομών χωρίς την χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας.

Για την τεχνική αυτή απαιτείται να υπάρχει μεγάλη θερμική αντίθεση μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται.

Η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται κυρίως σε βιομηχανικές διεργασίες όπου η θερμοκρασία παίζει σπουδαίο ρόλο για την κατεργασία των υλικών.

Ένα επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης της παθητικής θερμογραφίας είναι η εφαρμογή της για την ανίχνευση υγρασίας σε μέρη αεροσκαφών αμέσως μετά την προσγείωση, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα στην σωστή λειτουργία του αεροσκάφους που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια της πτήσης και των επιβατών.

Θερμογραφία υπερύθρου

Τεχνικές Θερμογραφίας

Κύριες τεχνικές θερμογραφίας είναι η **Παθητική** και η **Ενεργητική θερμογραφία**.

Ενεργητική θερμογραφία: Βασίζεται στην ύπαρξη μιας εξωτερικής πηγής θερμικής ενέργειας με σκοπό να υπάρξουν και να μπορέσουν να μετρηθούν οι σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Στην ενεργητική θερμογραφία απαιτείται η δημιουργία θερμικής αντίθεσης με την χρήση μιας εξωτερικής θερμικής πηγής, όταν το υπο μελέτη υλικό βρίσκεται σε θερμική ισορροπία.

Θερμογραφία υπέρυθρου

Τεχνικές Θερμογραφίας

Θερμογραφία παλμού: Στην θερμογραφία παλμού εφαρμόζουμε ένα παλμό συγκεκριμένης ενέργειας στην επιφάνεια του υλικού που θέλουμε να εξετάσουμε. Δημιουργείται ένα θερμικό μέτωπο το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού με διάχυση (diffusion). Ο παλμός αυτός μπορεί να προέλθει από λαμπτήρες αλογόνου, δέσμη laser, δέσμη αέρα ή ακόμα και νερού. Η θερμική διέγερση που επιτυγχάνεται μπορεί να είναι θερμή ή ψυχρή καθώς αυτό που έχει σημασία είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που θα προκύψει και όχι η απόλυτη θερμοκρασία.

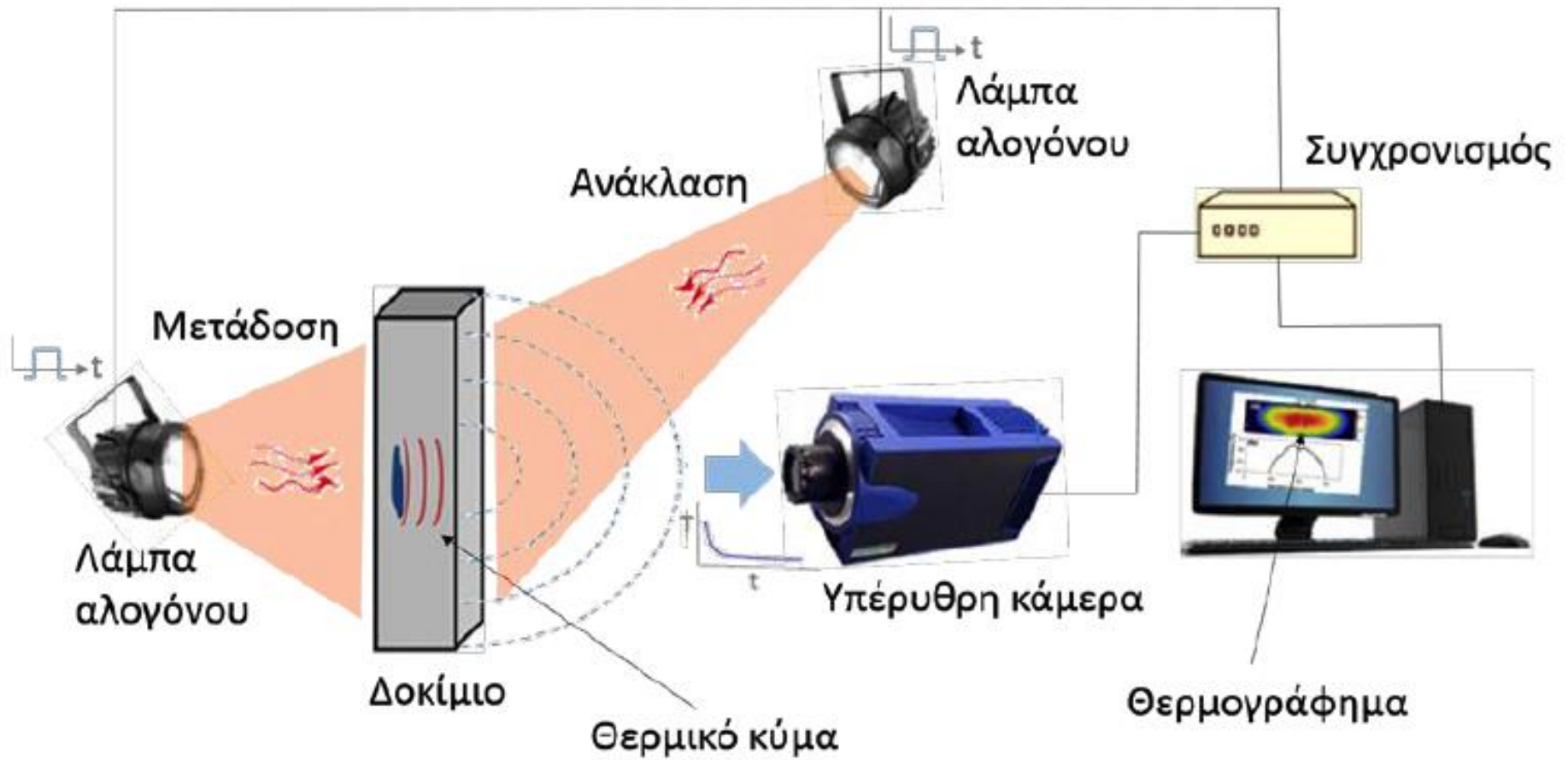
Η διάρκεια του παλμού είναι από μερικά μs μέχρι μερικά s αναλόγως του πάχους και της θερμικής αγωγιμότητας κάθε υλικού.

Η θερμογραφία παλμού μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους. Πρώτον με το να τοποθετηθεί η θερμική διέγερση και η υπέρυθρη κάμερα στην ίδια πλευρά του υλικού και να μετρηθεί η ανακλώμενη θερμότητα ή να είναι από διαφορετικές πλευρές του υλικού και να μετρηθεί η διάδοση της θερμότητας.

Οι εφαρμογές της θερμογραφίας παλμού περιλαμβάνουν τα ακόλουθα σενάρια για τον ποιοτικό έλεγχο υλικών: Διάβρωση μετάλλων, ανίχνευση ρωγμών, αποκολλήσεις, βλάβη από κρούση σε σύνθετα υλικά, έλεγχος πτερυγίων στροβιλοκινητήρων, πορώδες, χαρακτηρισμός βάθους και μεγέθους ατέλειας, θερμικές ιδιότητες υλικού, έλεγχος έργων τέχνης.

Θερμογραφία υπέρυθρου

Τεχνικές Θερμογραφίας



Θερμογραφία υπερύθρου

Τεχνικές Θερμογραφίας

Θερμογραφία lock-in: Η θερμογραφία lock-in είναι επίσης γνωστή και ως θερμογραφία διαμόρφωσης (modulated thermography) και βασίζεται στην δημιουργία θερμικών κυμάτων τα οποία παράγονται από μι απεριοδική θερμική διέγερση. Η διέγερση αυτή είναι συνήθως ημιτονοειδής και κατά την αλληλεπίδραση της με το υλικό διαδίδονται σε αυτό θερμικά κύματα. Η παραγωγή των κυμάτων μπορεί να γίνει με τη χρήση λυχνιών εκκένωσης, δινορεύματα, υπερήχους, μικροκύματα κτλ. Και να ανιχνευθούν μέσω θερμικής κάμερας. Ο όρος lock-in αναφέρεται στην ανάγκη ελέγχου της ακριβούς χρονικής εξάρτησης του σήματος εισόδου και εξόδου, το οποίο επιτυγχάνεται με έναν ενισχυτή τύπου lock-in.

Η θερμογραφία lock-in χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του πάχους των επικαλύψεων, ανίχνευση αποκολλήσεων μεταξύ στρώσεων σε σύνθετα υλικά (delamination) προσδιορισμό των ινών σε σύνθετα υλικά, ανίχνευση διάβρωσης, ανίχνευση ρωγμών κτλ.

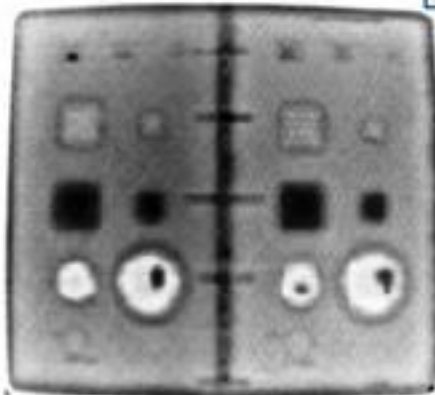
Θερμογραφία υπερύθρου



Σύγκριση των τεχνικών και των αντίστοιχων εικόνων που λαμβάνουμε από την χρήση τους.

Πρότυπο δοκίμιο

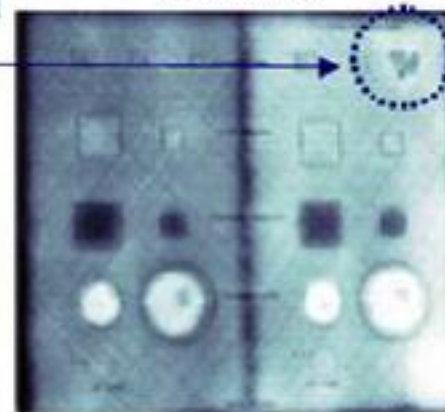
Θερμογραφία παλμού
(οπτική)



Αποκολλημένη βαφή
από την επιφάνεια του
δοκίμιου



Θερμογραφία lock-in
(οπτική)



Θερμογραφία υπέρυθρου

Θερμικές κάμερες υπέρυθρου

Θερμικές κάμερες υπέρυθρου: Για τις περισσότερες θερμογραφικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε όπως είναι φυσικό, υπέρυθρες κάμερες. Κάμερες δηλαδή οι οποίες ανιχνεύουν και απεικονίζουν την υπέρυθρη ακτινοβολία και όχι την ορατή, όπως κάνουν οι περισσότερες συνηθισμένες κάμερες που χρησιμοποιούμε.



(α)



(β)

Θερμογραφία υπερύθρου

Θερμικές κάμερες υπερύθρου

Θερμικές κάμερες υπερύθρου: Για την απεικόνιση της θερμοκρασίας, τα πιο «φωτεινά» ή «θερμά» τμήματα της εικόνας έχουν χρώμα λευκό ενώ οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες χρώμα κόκκινο και κίτρινο. Τα πιο σκούρα ή ψυχρά χρώματα απεικονίζονται μαύρα. Αντίστοιχα υπάρχει χρωματική κλίμακα η οποία αντιστοιχεί τα χρώματα με τις θερμοκρασίες.



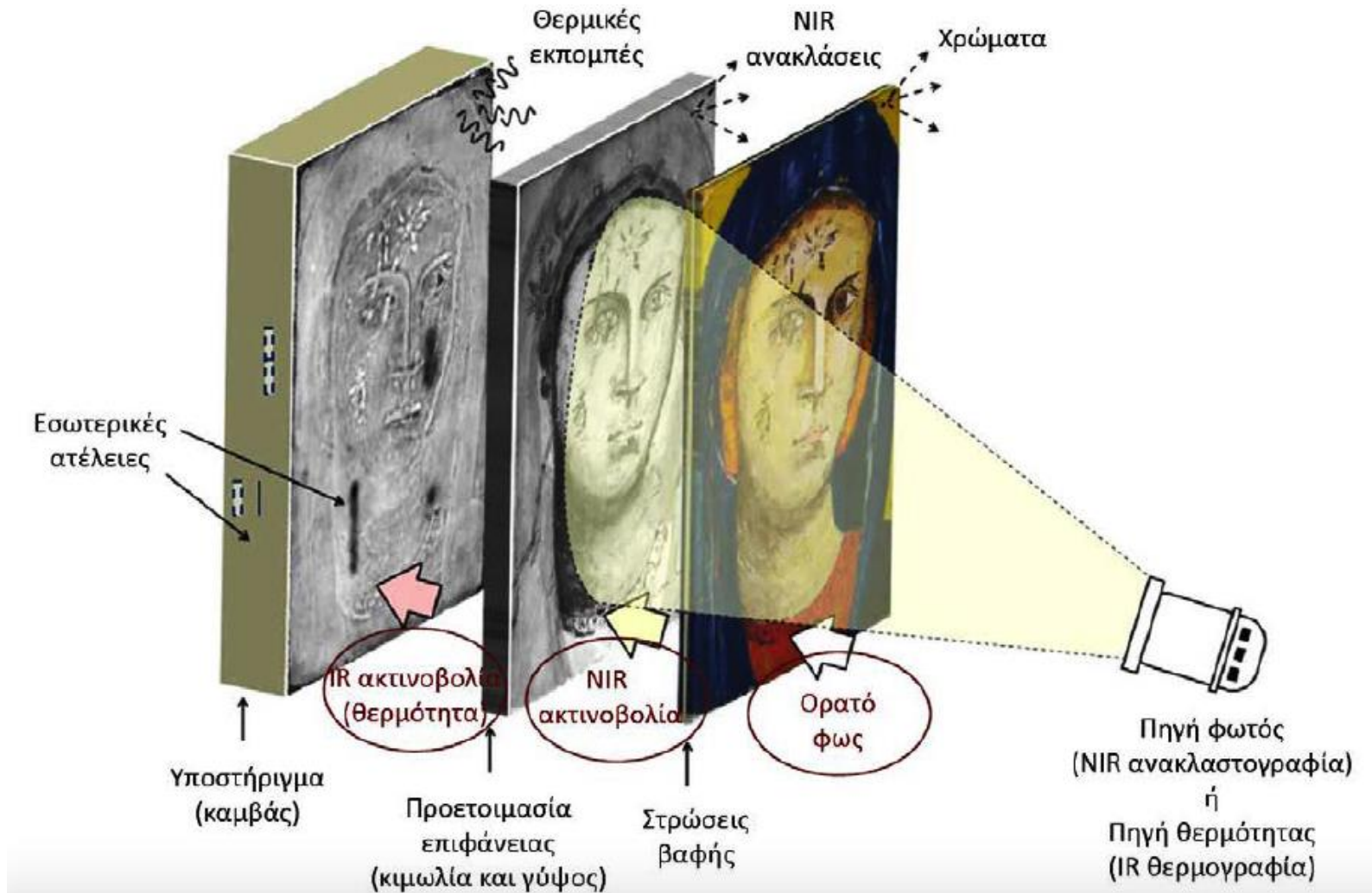
Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου

Ορατή φωτογραφία

NIR κάμερα (0,9-1,7 μm)
λάμπα πυρακτώσεως 90 V

IR κάμερα (3-5 μm)
PPT φάσης $f=75 \text{ mHz}$



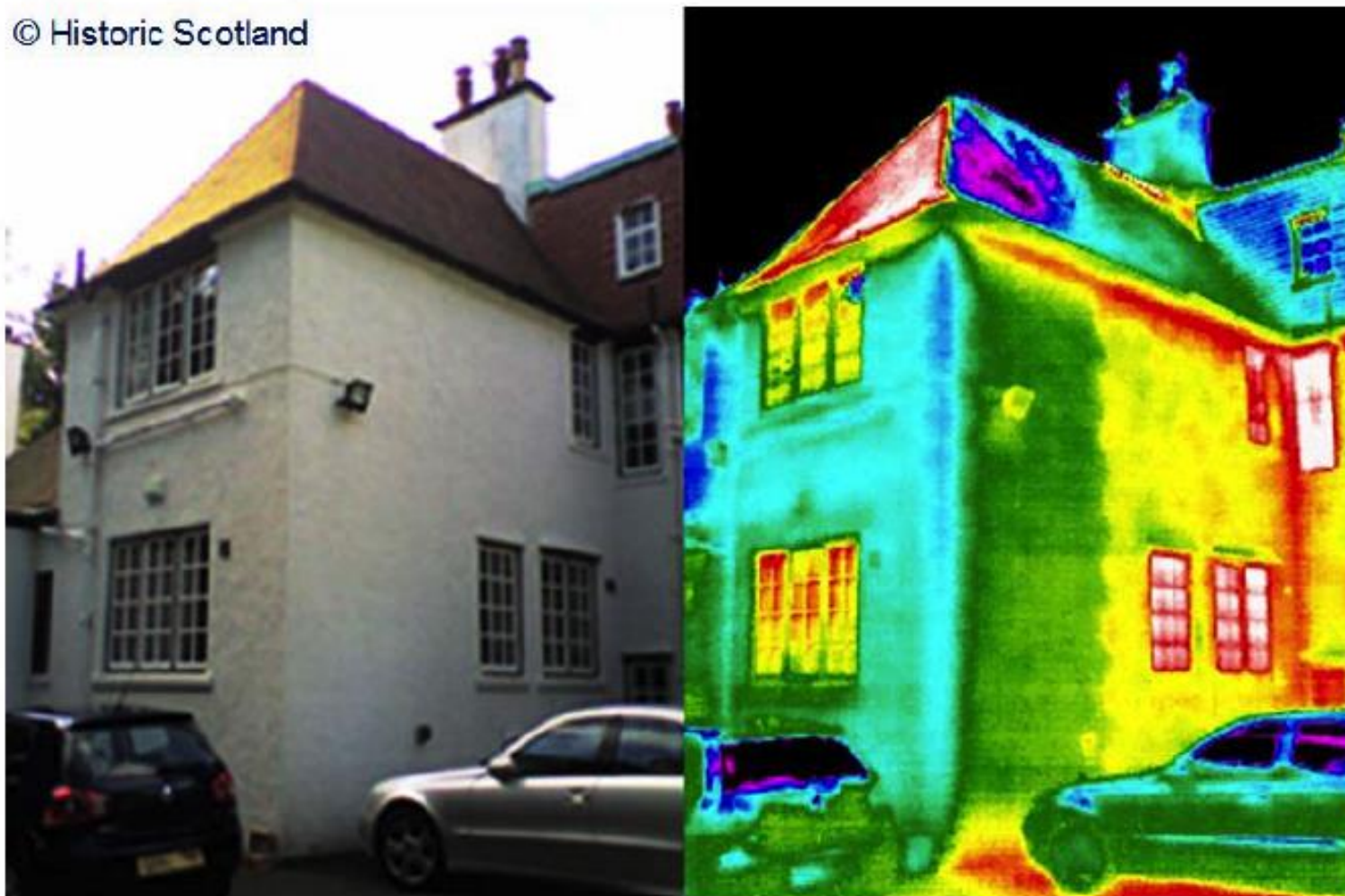
Κρυμμένα σχέδια

Ατέλειες

Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου

© Historic Scotland



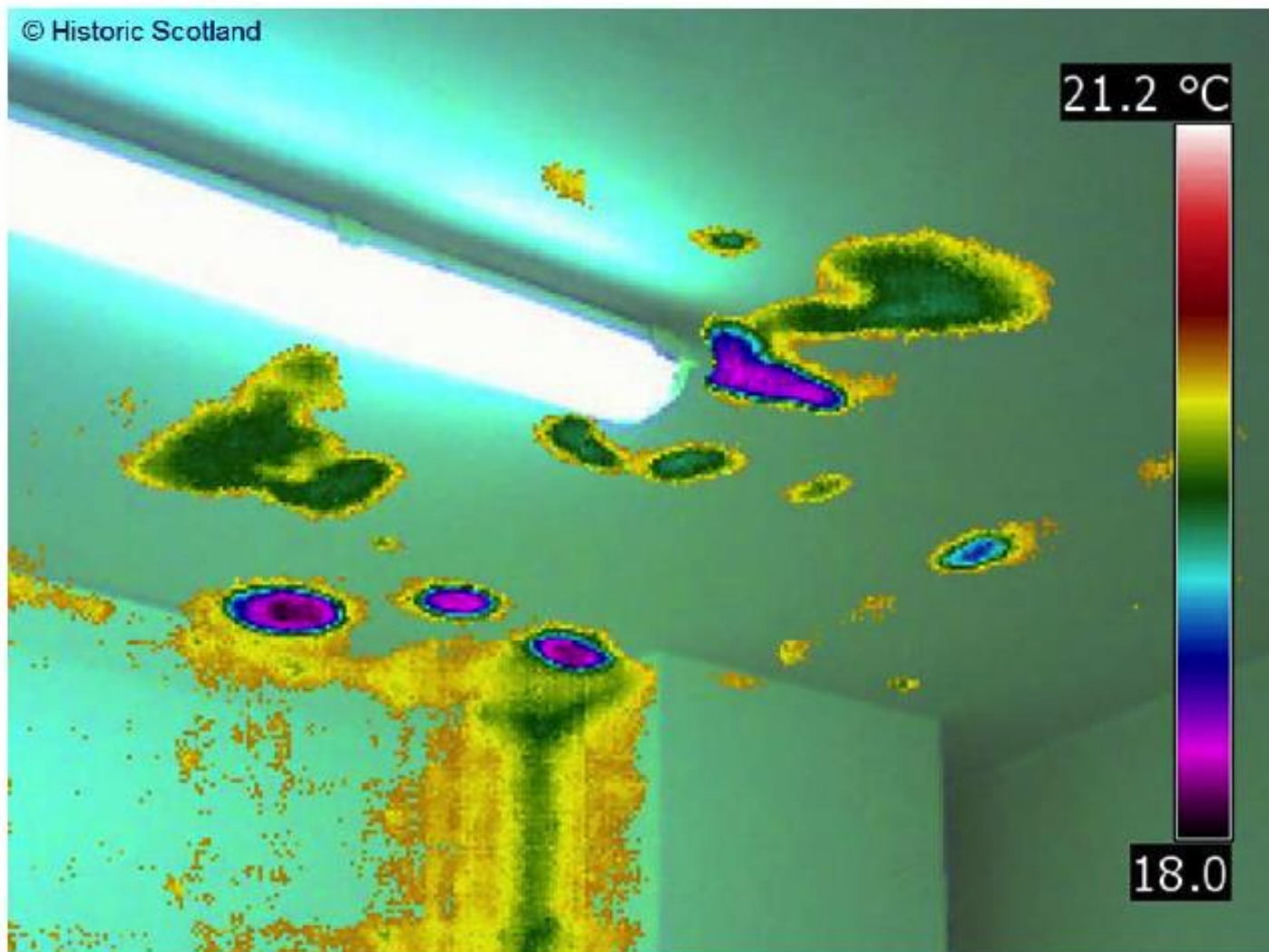
Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



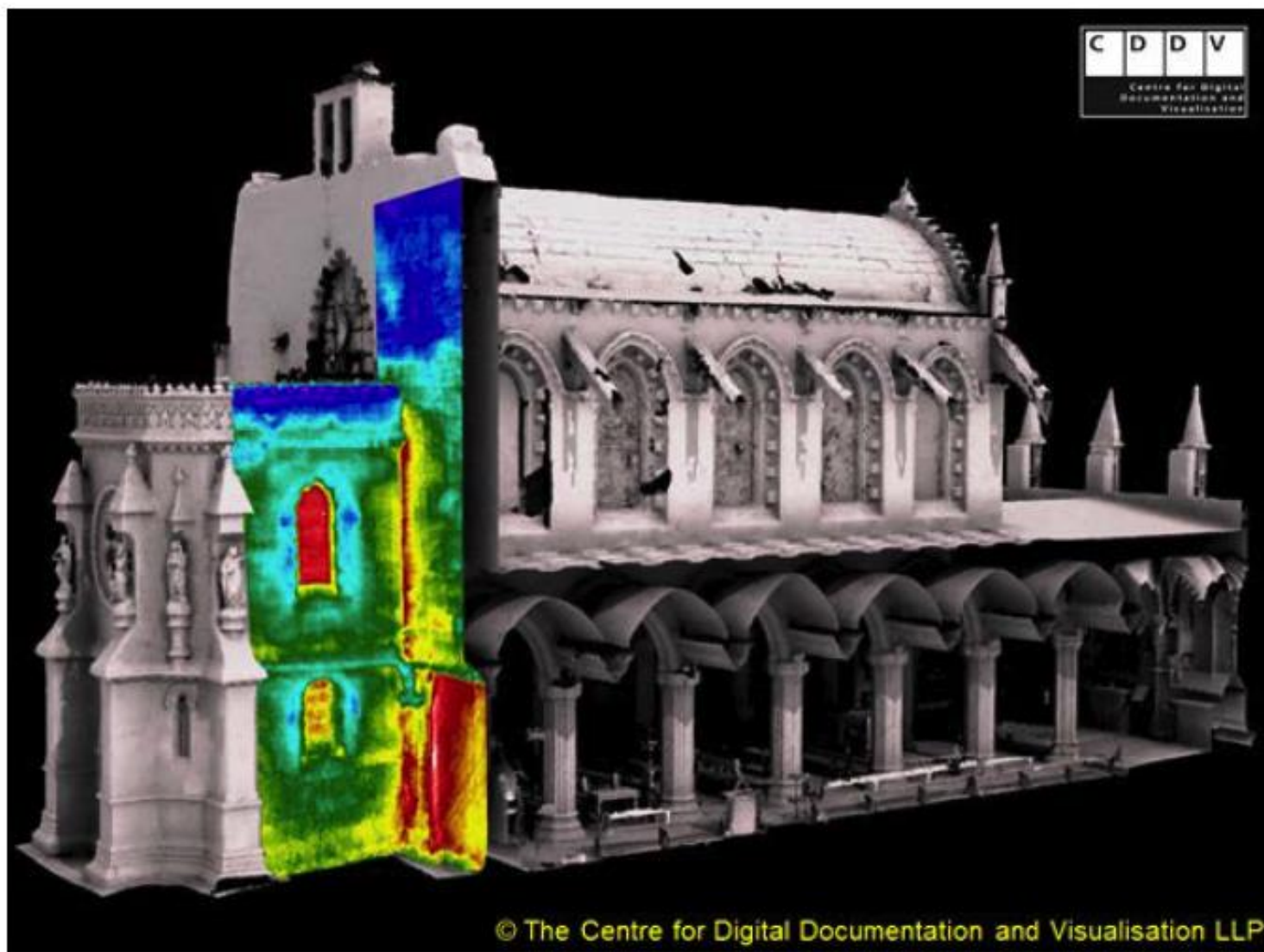
Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου

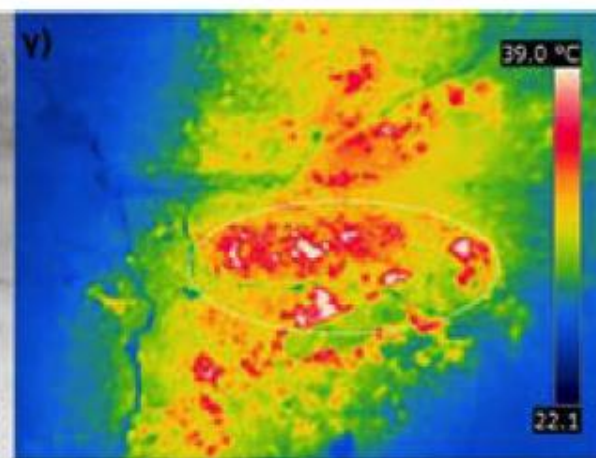
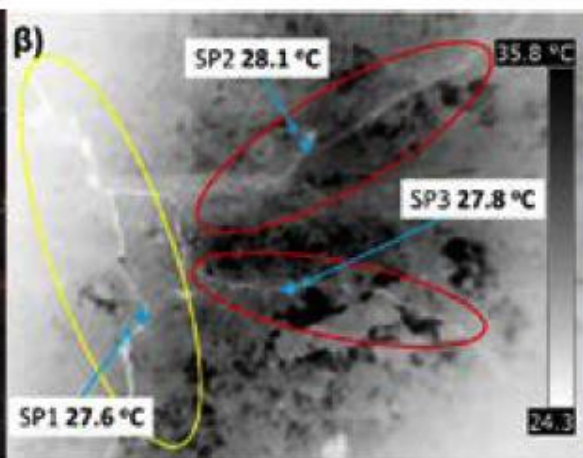


Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Θερμογραφία υπερύθρου



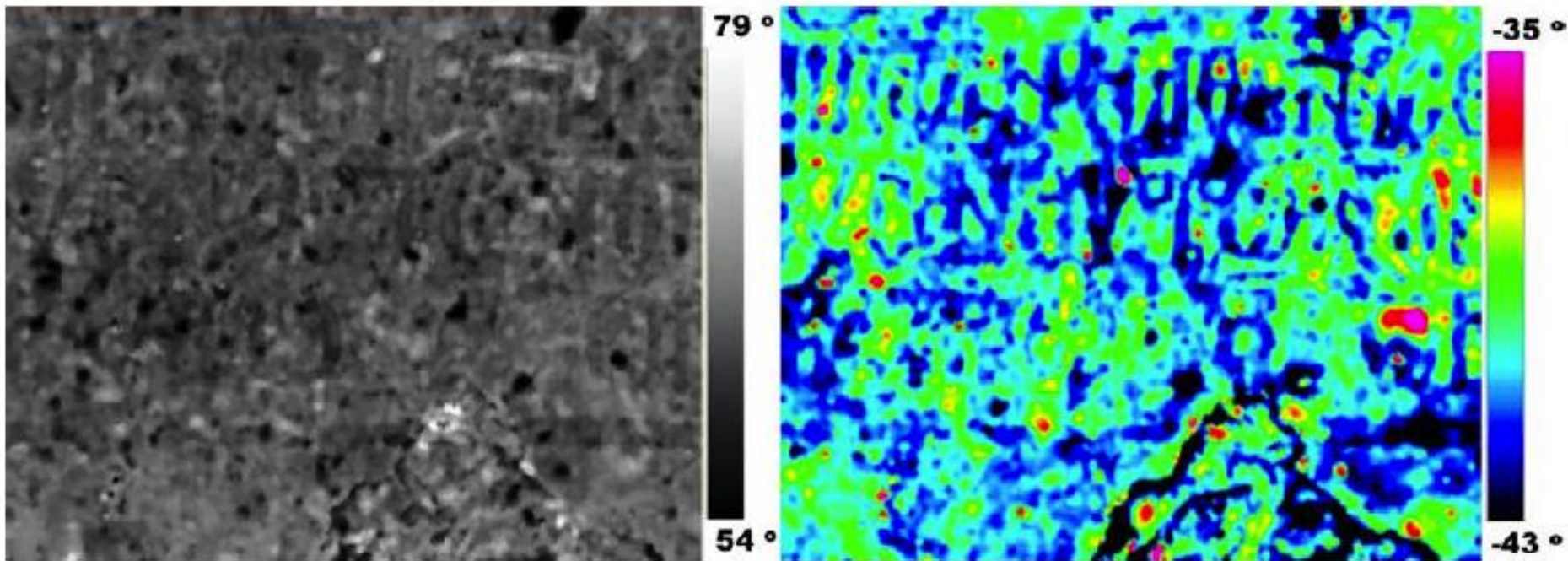
Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



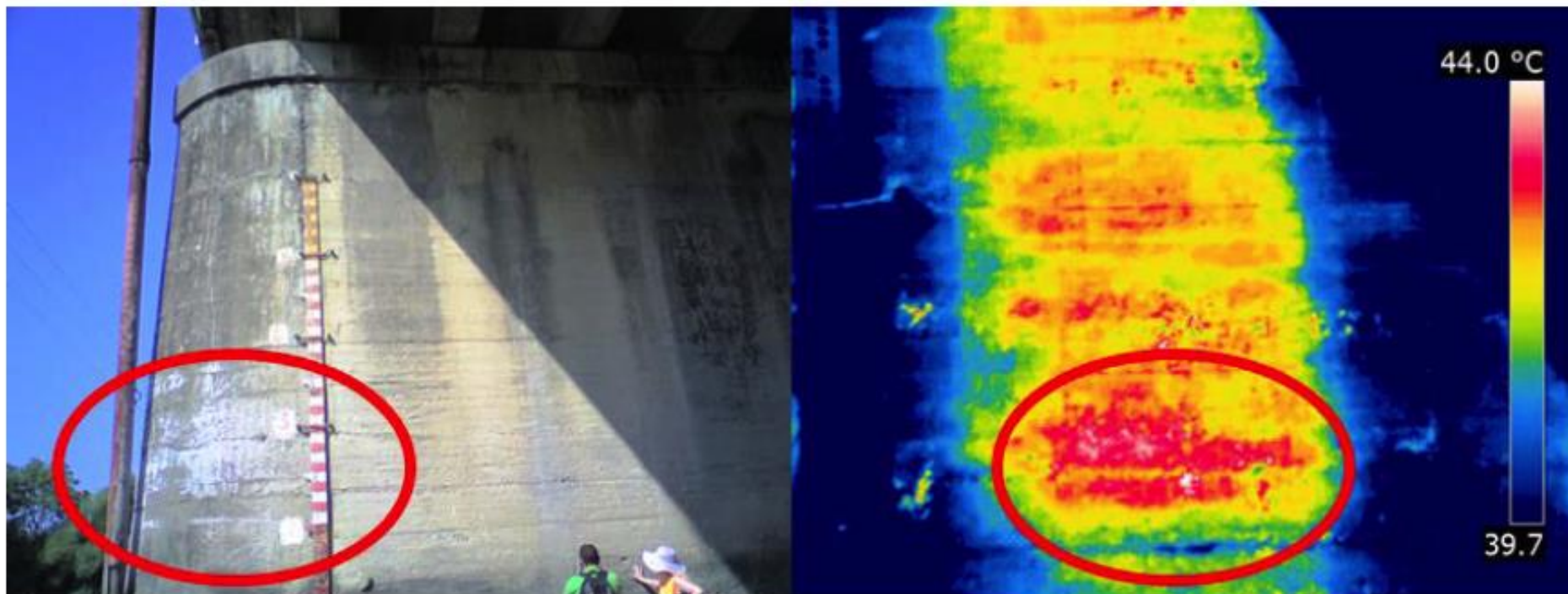
Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Θερμογραφία υπερύθρου

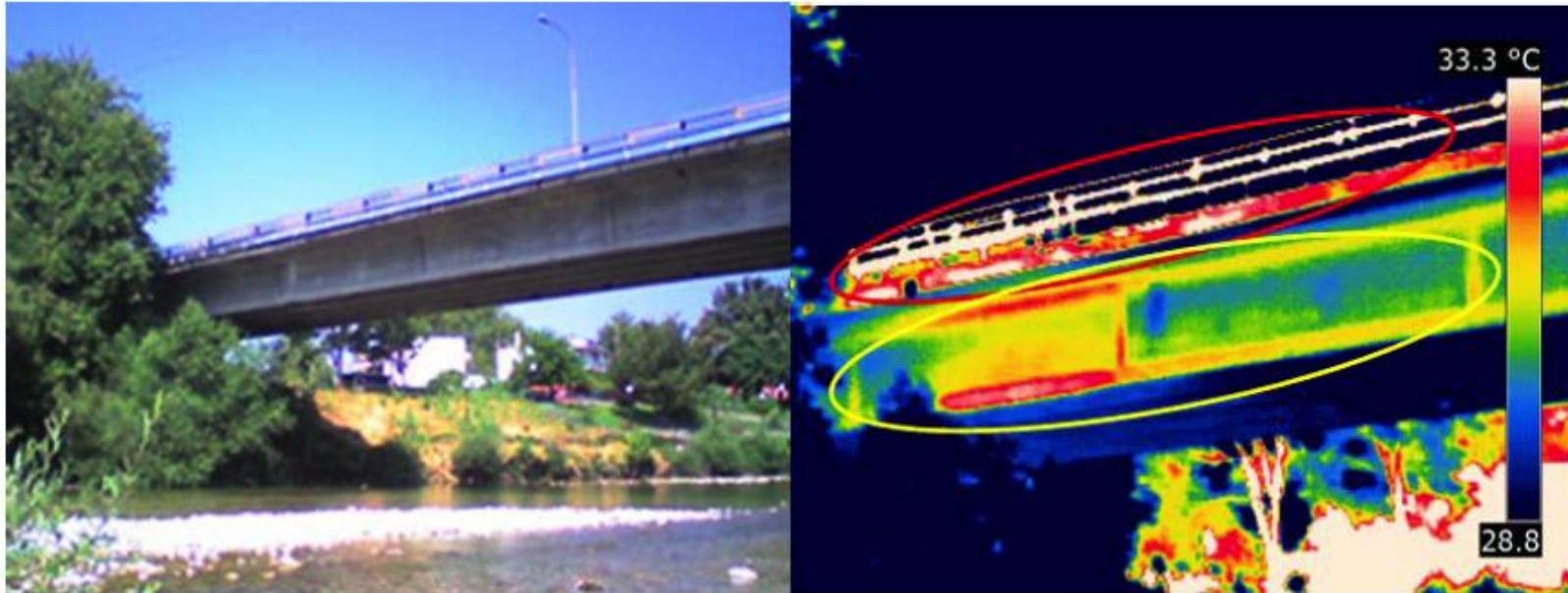
Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Σχήμα 4.27 Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Περιοχή με πιθανό πορώδες ⁶².

Θερμογραφία υπερύθρου

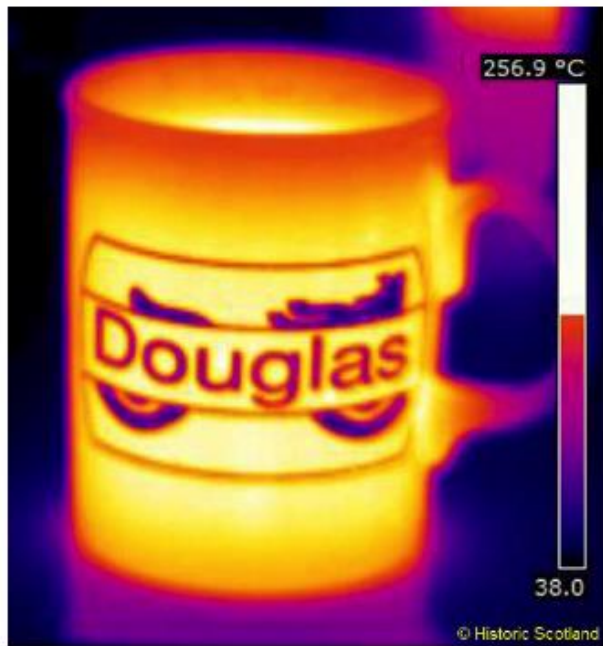
Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Σχήμα 4.28 Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Εμφανή προβλήματα στις υδρορροές (κόκκινος κύκλος), και ύπαρξη αυξημένης υγρασίας στη δοκό (κίτρινος κύκλος) ⁶².

Θερμογραφία υπερύθρου

Εφαρμογές θερμογραφίας υπερύθρου



Σχήμα 4.29 Θερμογράφημα κούπας που περιέχει ζεστό νερό. Η διακόσμηση της κούπας εμφανίζεται να είναι ψυχρότερη από την υπόλοιπη επιφάνεια λόγω του διαφορετικού συντελεστή εκπομπής της ⁵⁷.

Θερμογραφία υπερύθρου

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμογραφίας υπερύθρου

Πλεονεκτήματα

1. Είναι τεχνική πλήρους πεδίου με γρήγορο ρυθμό ελέγχου
2. Μη καταστροφική τεχνική, δεν ερχεται σε επαφή με το δείγμα
3. Ασφαλής για τον χειριστή
4. Εύκολη εξαγωγή των αποτελεσμάτων (φωτογραφία)
5. Μεγάλο εύρος εφαρμογής
6. Είναι η μοναδική τεχνική που μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε συγκεκριμένα υλικά πχ συγκεκριμένα κεραμικά

Θερμογραφία υπερύθρου

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμογραφίας υπερύθρου

Μειονεκτήματα

1. Μπορεί να υπάρξουν ψευδή αποτελέσματα λόγω θερμικών απωλειών
2. Κόστος εξοπλισμού (μεγάλο)
3. Η ανίχνευση των ατελειών ή των ρωγμών γίνεται μόνο αν αυτές δίνουν διαφορετικό θερμικό σήμα
4. Ο έλεγχος γίνεται σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια
5. Μη ακριβής γνώση του συντελεστή θερμικής εκπομπής δημιουργεί προβλήματα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας.

