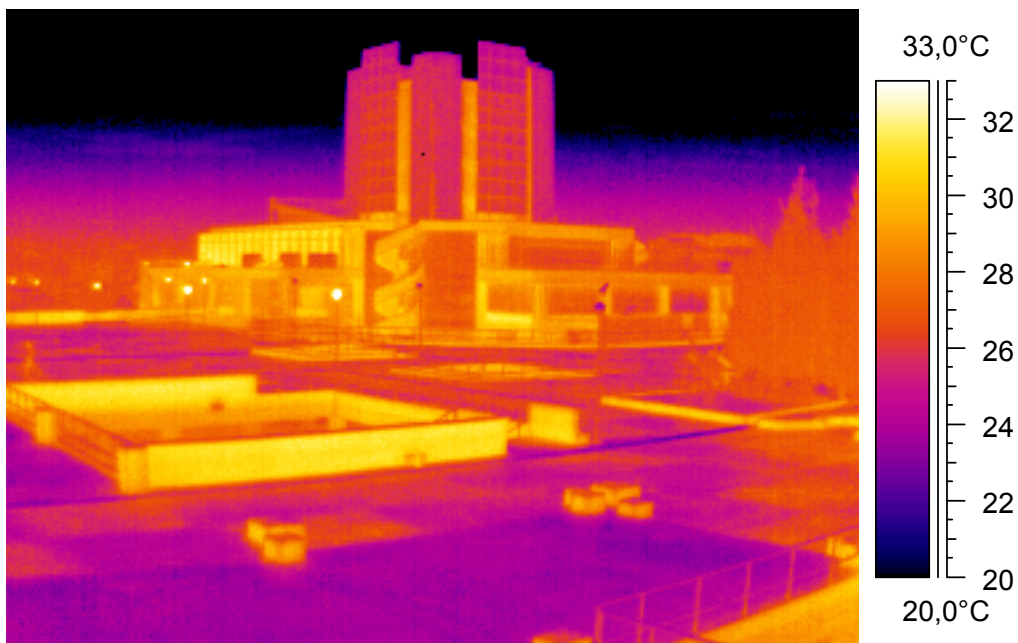


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΙΜ. Γ. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ

ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

ΑΙΜ. Γ. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
Γ.-ΦΟΙΒΟΣ ΣΑΡΓΕΝΤΗΣ ΥΠ.ΔΡ.Ε.Μ.Π.



Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών
Τεύχος 2

ΑΘΗΝΑ 2003

ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

ΑΙΜ. Γ. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
Γ.-ΦΟΙΒΟΣ ΣΑΡΓΕΝΤΗΣ ΥΠ.ΔΡ.Ε.Μ.Π.

Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών
Τεύχος 2

Διερεύνηση των δυνατοτήτων της θερμογραφίας στην θερμική συμπεριφορά των κτηρίων

Περίοδος εκτέλεσης: 2002-2003

Επιστημονικός υπεύθυνος: Καθ. Αιμ. Κορωνάιος

Κύριος ερευνητής: Υπ. Δρ. Γ.-Φ. Σαργέντης

Το τεύχος του ερευνητικού έργου είναι διαθέσιμο από τη διεύθυνση: www.ntua.gr/vitruvius/ress.htm

© 2003 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πρώτη έκδοση

Αθήνα, Ιούλιος 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος εικόνων	v
1 Περίληψη	vi
2 Εισαγωγή	1
2.1 Γενικά.....	1
2.2 Μεταφορά με αγωγή.....	1
2.3 Μεταφορά της θερμότητας με θερμική μεταβίβαση	2
2.4 Μεταφορά με ακτινοβολία	3
2.5 Συνθήκες μετρήσεως σε κτήρια.....	5
3 Ερμηνεία θερμογραφημάτων	6
3.1 Θερμική αντίσταση κτηριακού κελύφους, θερμικές γέφυρες	6
3.2 Εντοπισμός σημείων μεγάλων απωλειών θερμότητας	8
3.3 Εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών σε ειδικές περιπτώσεις	10
3.4 Αναγνώριση διαφόρων υλικών κατασκευής	12
3.5 Εντοπισμός νερού μέσα στα υλικά	14
3.6 Εντοπισμός ανωμαλιών κάτω από την επιφάνεια	15
4 Συμπεράσματα	17
5 Βιβλιογραφία	18

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	1
Εικόνα 2.2: Μεταφορά θερμότητας με διάχυση.....	2
Εικόνα 2.3: Μεταφορά θερμότητας με διάχυση (μεταβίβαση).....	2
Εικόνα 2.4: Μεταφορά θερμότητας μέσω τοίχου	3
Εικόνα 3.1: Θερμοκρασιακό διάγραμμα ερμηνείας εντοπισμού θερμικών απωλειών με θερμογραφία.....	7
Θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας	7
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	7
Εικόνα 3.2 Όψη του κτηρίου Υδραυλικής του Ε.Μ.Πολυτεχνείου	7
Εικόνα 3.3 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής.....	7
Εικόνα 3.4 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής (λεπτομέρεια).....	8
Εικόνα 3.5 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής (λεπτομέρεια).....	8
Εικόνα 3.6: Θερμοκρασιακό διάγραμμα διαφυγής αέρα	8
Εικόνα 3.7: Θερμογράφημα της όψης του «Ξυλουργείου» στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία.....	9
Εικόνα 3.8: Θερμογράφημα παραθύρου του «Ξυλουργείου» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία.....	9
Εικόνα 3.9: Θερμοκρασιακό διάγραμμα που προκύπτει από ύπαρξη θερμικών σωμάτων πίσω από τοιχοποιία	10
Εικόνα 3.10: Θερμογράφημα εξωτερικής όψης κτηρίου και αντίστοιχη φωτογραφία	10
Εικόνα 3.11: Θερμική κηλίδα που εμφανίζεται επάνω από κλιματιστικό στην «Βίλα Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία.....	10
Εικόνα 3.12: Θερμοκρασιακό διάγραμμα ανίχνευσης θερμών αγωγών	11
Εικόνα 3.13: Αγωγοί θερμού νερού εκτός της τοιχοποιίας της κατασκευής και αγωγοί θερμού νερού μέσα στο δάπεδο λουτρού.....	11
Εικόνα 3.14: Θερμοκρασιακό διάγραμμα για την αναγνώριση διαφορετικών υλικών με θερμογραφία.....	12
Εικόνα 3.15 Θερμογράφημα τοίχου στο «Ξυλουργείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία	12
Εικόνα 3.16 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία	13
Εικόνα 3.17 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ).....	13
Εικόνα 3.18: Θερμοκρασιακό διάγραμμα εντοπισμού νερού	14
Εικόνα 3.19: Τοιχοποιία στο Τ.Π.Π.Λ με εμφανή ίχνη ανερχόμενης υγρασίας και αντίστοιχο θερμογράφημα.....	14
Εικόνα 3.20: Εξωτερική παρειά τοίχου στον εσωτερικό προθάλαμο της «Βίλας Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ)	15
Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα της ανερχόμενης υγρασίας σε εξωτερικό τοίχο της «Βίλας Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ)	15
Εικόνα 3.22: Αρμός διαστολής στην οροφή των Πλατειών Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.....	15
Εικόνα 3.23: Θερμογράφημα αρμού διαστολής στις Πλατείες Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.....	15
Εικόνα 3.24 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία	16

1 Περίληψη

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της.

Στην παρούσα εργασία γίνεται καταγραφή των χαρακτηριστικών εφαρμογών της θερμογραφίας στα δομικά υλικά. Επίσης γίνεται και η ερμηνεία των διαφόρων φαινομένων με θερμοκρασιακά διαγράμματα.

2 Εισαγωγή

2.1 Γενικά

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της.

Για να ερμηνεύσουμε τις θερμικές εικόνες αναπτύσσονται οι αρχές της μεταφοράς θερμότητας

2.2 Μεταφορά με αγωγή

Η θερμότητα μεταδίδεται δια μέσου της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου των σωμάτων, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σώματος. Παράδειγμα καλών αγωγών είναι τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας. Η μεταφορά με αγωγή έχει σαν συνέπεια, απώλειες θερμότητας από ένα κτήριο. Οι απώλειες αυτές μπορούν να μειωθούν με την χρήση μονωτικών υλικών.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ [$W/m \cdot K$] των υλικών είναι δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας των υλικών διαμέσου της μάζας τους.

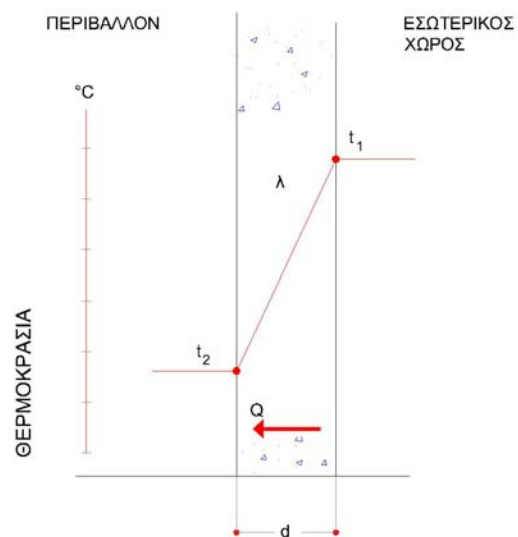
Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από πέτασμα με συγκεκριμένη επιφάνεια για δεδομένο πάχος διατυπώνεται ως εξής.

$$Q = (\lambda/d) * F * (t_1 - t_2) * z$$

Όπου:

- Q Η ποσότητα της θερμότητας η οποία διέρχεται σε μία ώρα από την μία πλευρά στην άλλη
- λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού
- F το εμβαδόν της επιφάνειας
- t_1 θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής
- t_2 θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής
- d το πάχος του υλικού
- z ο χρόνος ροής του θερμότητας

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως νόμος μεταφοράς του Fourier



Εικόνα 2.1: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

2.3 Μεταφορά της θερμότητας με θερμική μεταβίβαση

Η θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφέρεται και μέσω της μάζας του με την κίνηση του. Αν η κίνηση γίνεται σε φυσικό μέσο όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές (ο κρύος αέρας κινείται προς τα κάτω ενώ ο ζεστός αέρας κινείται προς τα πάνω) την κίνηση αυτή την ονομάζουμε φυσική διάχυση ενώ αν η κίνηση γίνεται βεβιασμένα (ανεμιστήρες, ανεμοπίεση) την ονομάζουμε βίαη διάχυση.

Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση είναι μακροσκοπικό φαινόμενο και παρατηρείται κατά την διάχυση των ρευστών. Η διαφορά πυκνοτήτων διαφόρων ρευστών προκαλεί φυσική διάχυση. Αντίστοιχα η μηχανική ανάμειξη προκαλεί βεβιασμένη διάχυση.

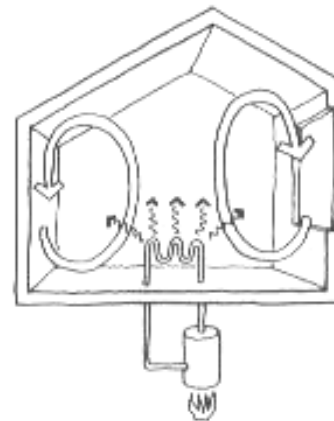
Μεταφορά με θερμική μεταβίβαση παρατηρείται και μεταξύ ρευστού με στερεό σώμα. Έτσι παρατηρείται μεταφορά με θερμική μεταβίβαση από ένα αέριο στην τοιχοποιία, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως εξής

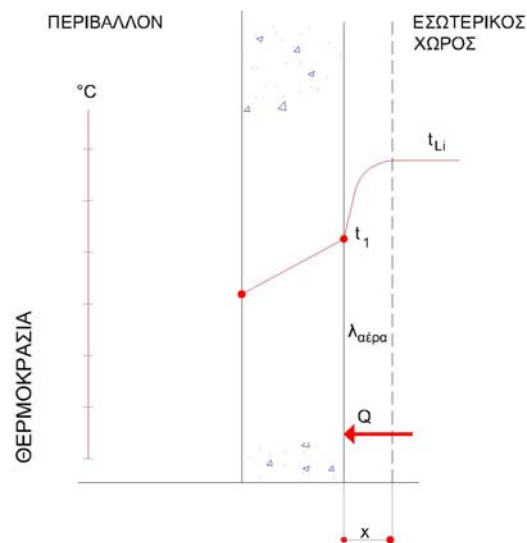
$$Q = (\lambda_{\text{αέρα}}/x) * F * (t_{\text{Li}} - t_1)$$

Επειδή δεν μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος του στρώματος στο οποίο γίνεται η διάχυση της θερμότητας, ο παράγοντας λ/x αντικαθίσταται με έναν διορθωτικό συντελεστής α [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], που ονομάζεται συντελεστής θερμικής μεταβίβασης και εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του αέρα.

Η μεταφορά της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον διατυπώνεται ως εξής:

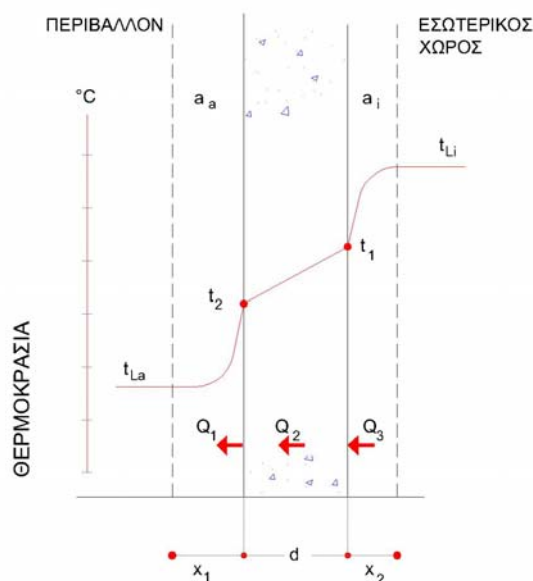


Εικόνα 2.2: Μεταφορά θερμότητας με διάχυση



Εικόνα 2.3: Μεταφορά θερμότητας με διάχυση (μεταβίβαση)

$$\begin{aligned}
Q &= K * F * (t_{Li} - t_{La}) * z = \\
&= \alpha_i * F * (t_{Li} - t_1) * z = \\
&= (\lambda/d) * F * (t_1 - t_2) * z = \\
&= \alpha_a * F * (t_2 - t_{La}) * z
\end{aligned}$$



Εικόνα 2.4: Μεταφορά θερμότητας μέσω τοίχου

Όπου:

Q Το ποσόν θερμότητας που διέρχεται σε μία ώρα από τον εσωτερικό χώρο στο περιβάλλον

K ο συντελεστής θερμοπερατότητας του απλού μέλους κατασκευής

λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

F το εμβαδόν της επιφάνειας

α συντελεστής θερμικής μεταβίβασης (i εσωτερικού χώρου, a εξωτερικού χώρου)

t_{Li} η θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου

t_{La} η θερμοκρασία περιβάλλοντος

t₁ θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

t₂ θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

d το πάχος του υλικού

z ο χρόνος ροής του θερμότητας

2.4 Μεταφορά με ακτινοβολία

2.4.1 Γενικά

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους, και διάφορες άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη αποκλειστικά με αυτό τον τρόπο μεταφοράς.

Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε ένα άλλο σώμα ή θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση θερμοκρασίας ενός σώματος.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα εκφράζεται ως εξής:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Όπου

q εκπεμπόμενη ενέργεια [w/m²]

ε συντελεστής εκπομπής υλικού

σ σταθερά Stefan - Boltzmann

T απόλυτη θερμοκρασία °K

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

Οι ιδιότητες αυτές αξιοποιούνται από την θερμογραφία έτσι ώστε να προκύπτουν τα θερμογραφήματα.

2.4.2 Θερμογραφία

Η θερμογραφία ή η υπέρυθη φωτογράφιση, ανιχνεύει την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και προκύπτει οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν μέτραται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας.

Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Με την θερμογραφία εντοπίζουμε θερμικές γέφυρες στο κέλυφος του κτηρίου, σημεία διαφυγής θερμού αέρα από το κτήριο, αγωγούς θερμού κρύου νερού ή αέρα μέσα στην κατασκευή ενός κτηρίου, διαφορετικά υλικά μέσα σε μία κατασκευή, ύπαρξη νερού μέσα στα υλικά και υποεπιφανειακές ανωμαλίες στα υλικά

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

Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τον συντελεστή εκπομπής του υλικού. Γενικά τα δομικά υλικά έχουν μεγάλο συντελεστή εκπομπής (μεγαλύτερο από 0,8).

2.5 Συνθήκες μετρήσεως σε κτήρια

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων για την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια πρέπει να έχουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασιών ανάμεσα στο εσωτερικό της κατασκευής και το περιβάλλον. Ο ιδανικότερος χρόνος μέτρησης είναι το χειμώνα ημέρα με ελάχιστη ή κατά προτίμηση καθόλου ηλιοφάνεια. Η προς μέτρηση επιφάνεια πρέπει να είναι κατά το δυνατόν κάθετη προς τον άξονα της μέτρησης.

Η θερμογραφία μας εξυπηρετεί στο να ερμηνεύσουμε την κατάσταση αλλά και μερικές φορές το είδος των υλικών που βρίσκονται στην κατασκευή. Ποιοτικά μας βοηθάει:

<ul style="list-style-type: none">• στον εντοπισμό θερμικών γεφυρών (κακής μόνωσης)	Ιδανικές συνθήκες: <ul style="list-style-type: none">• ελάχιστη ή καθόλου ηλιακή ακτινοβολία• αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας σε ένα κτήριο για αρκετό χρονικό διάστημα• ύπαρξη μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών ανάμεσα στο εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο του κτηρίου
<ul style="list-style-type: none">• στον εντοπισμό διαφυγών θερμού αέρα μέσα από την κατασκευή	
<ul style="list-style-type: none">• στον εντοπισμό αγωγών	Ιδανικές συνθήκες: <ul style="list-style-type: none">• ροή ζεστού ή ψυχρού υγρού ή αέρα μέσα στους αγωγούς
<ul style="list-style-type: none">• στην ύπαρξη διαφορετικών υλικών πίσω από ενιαία επιφάνεια (π.χ. ξύλο, πέτρα ή σκυρόδεμα κάτω από μία ενιαία επιχρισμένη επιφάνεια)	Ιδανικές συνθήκες: <ul style="list-style-type: none">• καθαρός ουρανός• έντονη ηλιακή ακτινοβολία• ασθενείς άνεμοι• η θερμοκρασία εδάφους να είναι πάνω από 0°C• κατά την νυχτερινή θερμογράφιση δεν θα πρέπει να υπάρχουν σύννεφα (γιατί αντανακλούν την υπέρυθρη ακτινοβολία).• η θερμογράφιση να γίνεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της θέρμανσης ή της ψύξης είναι μεγάλος δηλαδή είτε νωρίς το πρωί είτε αμέσως μετά την δύση του ηλίου.
<ul style="list-style-type: none">• στην ύπαρξη εσωτερικών ανωμαλιών, κενών ή ρωγμών σε επιφάνειες (π.χ. σε καταστρώματα γεφυρών)	
<ul style="list-style-type: none">• στον εντοπισμό υγρασίας στα υλικά	
	Κατάσταση υλικού <ul style="list-style-type: none">• καθαρισμός της επιφάνειας από χαλαρά υλικά• να μην γίνεται έλεγχος σε επιφάνειες με νερό πάγο ή χιόνι. Οι υγρές επιφάνειες να στεγνώσουν επί τουλάχιστον ένα εικοσιτετράωρο (εκτός των περιπτώσεων ανίχνευσης νερού μέσα στα υλικά)

3 Ερμηνεία θερμογραφημάτων

3.1 Θερμική αντίσταση κτηριακού κελύφους, θερμικές γέφυρες

Για να εντοπίσουμε τις περιοχές στις οποίες έχουμε διαφορές στην μεταφορά θερμότητας από το κέλυφος ενός κτηρίου (θερμικές γέφυρες) προσδιορίζονται οι κατανομές θερμοκρασιών στις διάφορες περιοχές του κελύφους του κτηρίου.

Γενικά, στο κέλυφος του κτηρίου υπάρχουν τμήματα ή δομικά στοιχεία, όπου η θερμική τους αντίσταση η οποία εν γένει είναι ομοιόμορφη, μεταβάλλεται κατά αισθητό τρόπο, από τις εξής αιτίες:

- Ολικής ή μερικής παρεμβολής στο ομοιογενές τμήμα του κελύφους, ενός στοιχείου με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα.
- Αλλαγής πάχους στη δομή του τμήματος του κελύφους.
- Ύπαρξης διαφοράς εμβαδού μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς, όπως αυτό συμβαίνει στις γωνιακές συναντήσεις διαφόρων στοιχείων.

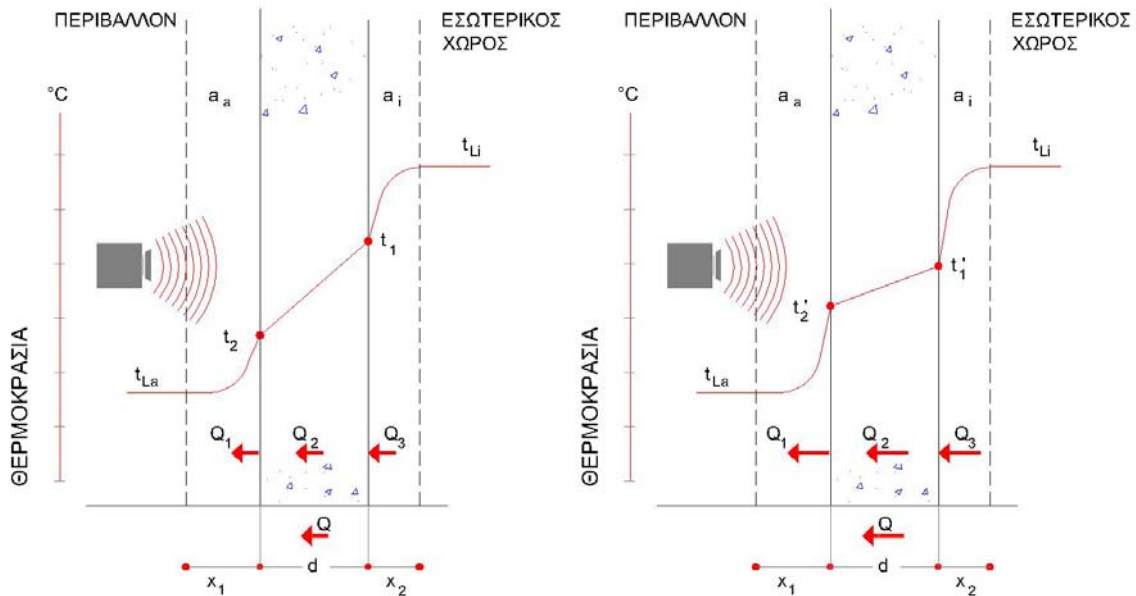
Σε όλα αυτά τα στοιχεία, όπου η θερμική τους αντίσταση είναι μειωμένη και κατά συνέπεια αυξημένος ο συντελεστής θερμοπερατότητας, οι επιφανειακές εσωτερικές θερμοκρασίες είναι πολύ μικρότερες των αντίστοιχων ομοιογενών στοιχείων και τείνουν να πλησιάσουν, τη χειμερινή περίοδο, την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.

Στα στοιχεία αυτά γίνεται μια γρήγορη γεφύρωση της θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, εφόσον δεν υπάρχει θερμομονωτικό στοιχείο που να διακόπτει αυτή τη γεφύρωση. Στοιχεία στα οποία παρουσιάζονται αυτές οι διαταραχές στη ροή θερμότητας, ονομάζονται θερμικές γέφυρες.

Για να εντοπίσουμε θερμικές γέφυρες με θερμογραφήματα, πρέπει το σύστημα εσωτερικό-περιβάλλον χώρος του κτηρίου να βρίσκεται σε ισορροπία. Αυτό συμβαίνει κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν έχουμε θερμαινόμενους εσωτερικούς χώρους, χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ικανοποιητική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξώτερου χώρου (τουλάχιστον 20°C). Επίσης το σύστημα πρέπει να έχει ισορροπήσει, δηλαδή, η θερμοκρασιακή διαφορά να έχει παραμείνει σταθερή για τουλάχιστον τρεις ώρες.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αλλοιώνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό προτιμώνται τα νυχτερινά θερμογραφήματα. Πάντως έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα και ημέρες στις οποίες έχουμε χαμηλές θερμοκρασίες και ελάχιστη έως μηδενική ηλιοφάνεια.

Οι καλοκαιρινοί μήνες, λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις πρωινές ώρες και της αποθηκευμένης θερμότητας που εκπέμπεται από τα υλικά τις νυχτερινές ώρες δεν είναι κατάλληλοι για την διεξαγωγή μετρήσεων.



Εικόνα 3.1: Θερμοκρασιακό διάγραμμα ερμηνείας εντοπισμού θερμικών απωλειών με θερμογραφία

$$Q_{ολ} = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \alpha_a * F * (t_2 - t_{L,a}) * z$$

Όπου

t_2 Θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας

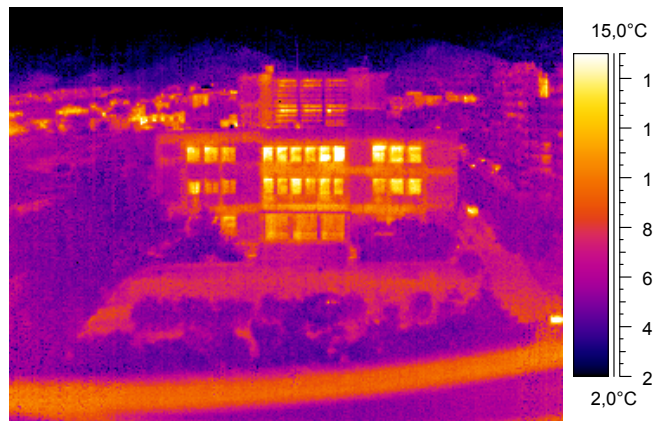
$t_{L,a}$ Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ($t_2 - t_{L,a}$) για την κατασκευή τόσο μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας έχουμε από το εσωτερικό στο εξωτερικό της κατασκευής.

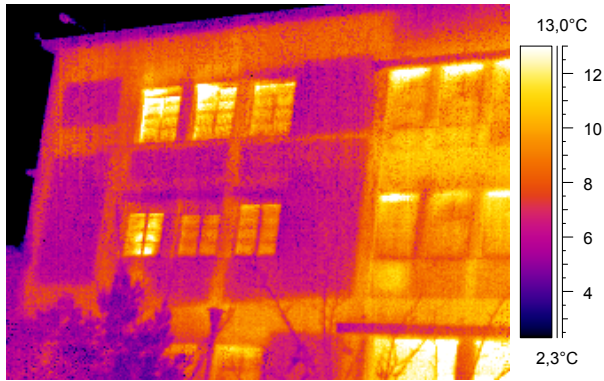
Αύξηση της θερμοκρασίας στην εξωτερική πλευρά σε ένα ομοιογενή τοίχο προκύπτει στην περίπτωση που έχει αποκολληθεί ή διαβραχεί η μόνωση με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμομονωτική ικανότητα.



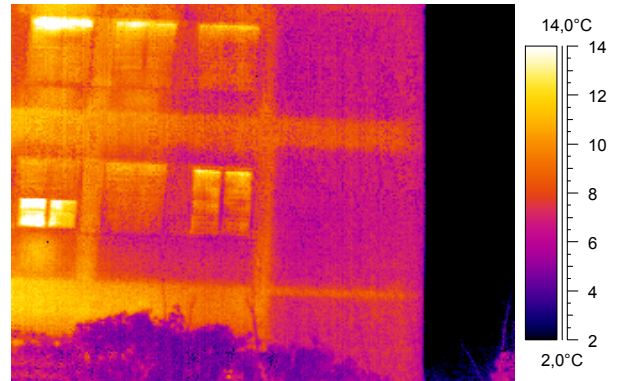
Εικόνα 3.2 Όψη του κτηρίου Υδραυλικής του Ε.Μ.Πολυτεχνείου



Εικόνα 3.3 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής



Εικόνα 3.4 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής (λεπτομέρεια)



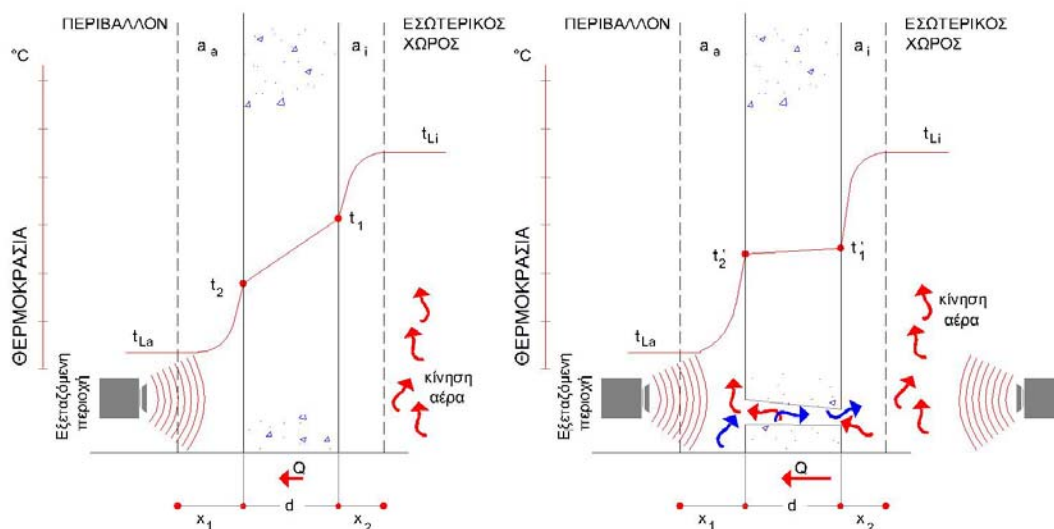
Εικόνα 3.5 Θερμογράφημα του κτηρίου Υδραυλικής (λεπτομέρεια)

3.2 Εντοπισμός σημείων μεγάλων απωλειών θερμότητας

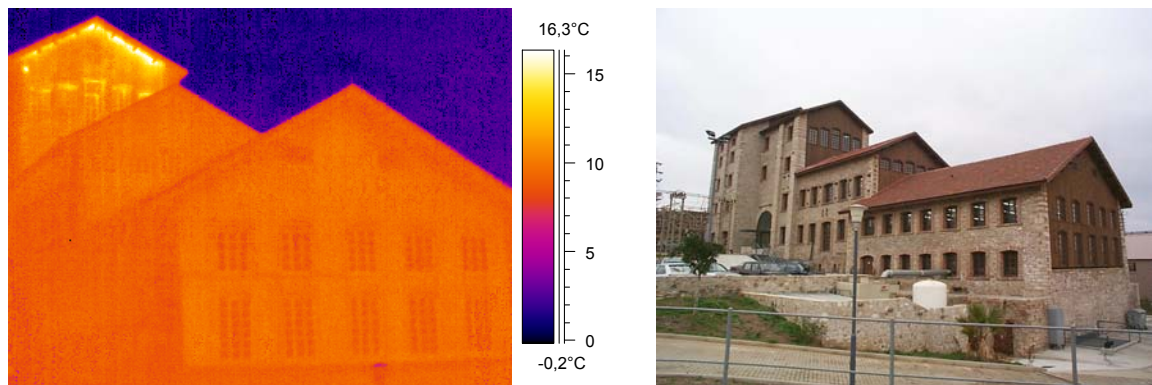
Συνήθης ποιοτικός έλεγχος των κατασκευών με την θερμογραφία είναι ο εντοπισμός τυχόν διαρροής θερμού αέρα από την κατασκευή.

Στο σημείο της διαρροής αέρα, η εξωτερική παρειά του τοίχου είναι περισσότερο θερμή από την υπόλοιπη τοιχοποιία ενώ η εσωτερική παρειά του τοίχου παρουσιάζει μικρότερη θερμοκρασία από την υπόλοιπη τοιχοποιία.. Χαρακτηριστικά σημεία τέτοιων διαφυγών είναι οι αρμοί των κουφωμάτων των παραθύρων ή θυρών και οι αρμοί μεταξύ στέγης και τοιχοποιίας.

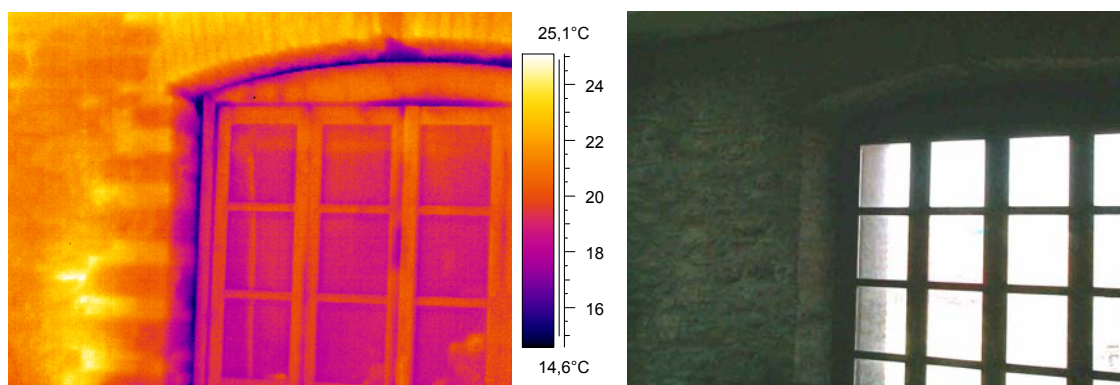
Η διαρροή θερμού αέρα παρουσιάζεται στην εξωτερική πλευρά του κελύφους στα θερμογραφήματα σε διάταξη γραμμών.



Εικόνα 3.6: Θερμοκρασιακό διάγραμμα διαφυγής αέρα



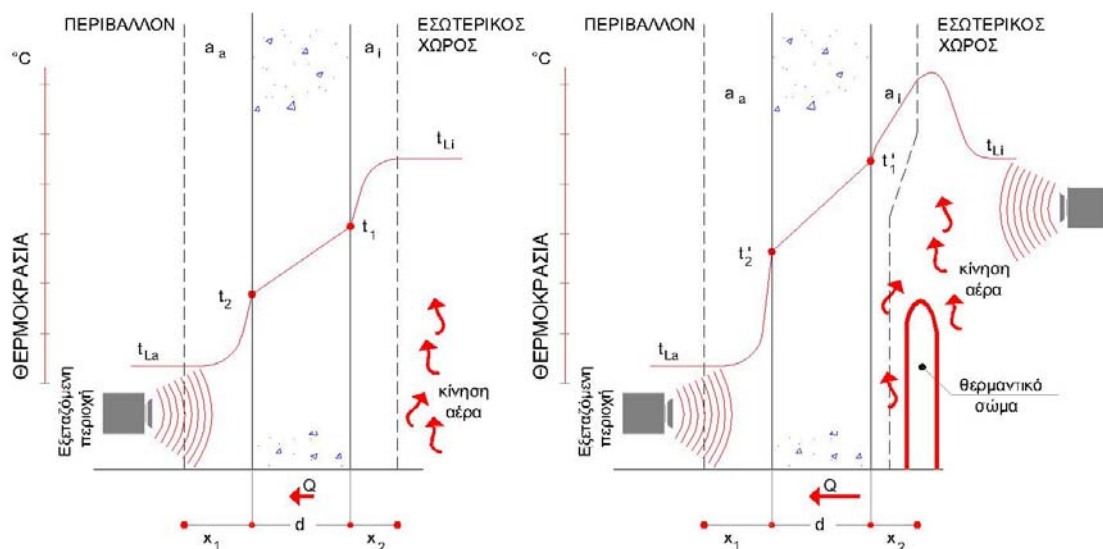
Εικόνα 3.7: Θερμογράφημα της όψης του «Ξυλουργείου» στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία
 Διαπιστώνεται έντονη απώλεια θερμότητας στην ένωση της οροφής με την τοιχοποιία στο βόρειο μέρος του κτηρίου



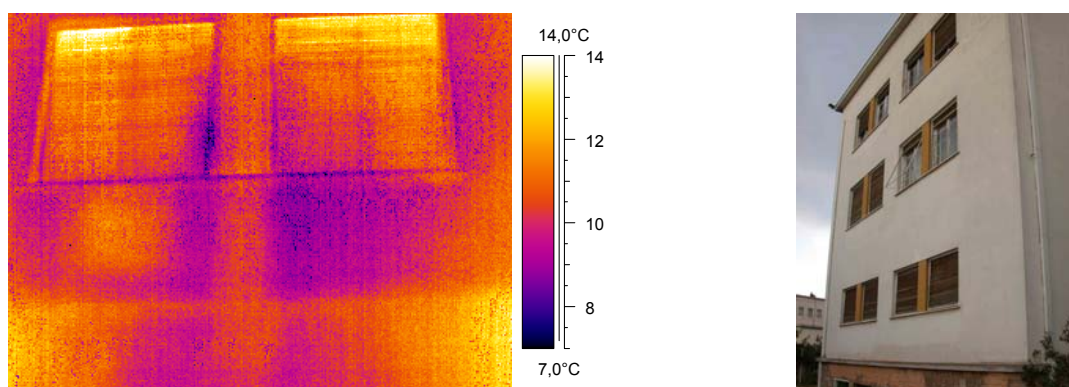
Εικόνα 3.8: Θερμογράφημα παραθύρου του «Ξυλουργείου» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία
 Διαπιστώνεται ότι στο εσωτερικό του κτηρίου στην θέση του αρμού του κουφώματος αναπτύσσονται χαμηλές θερμοκρασίες (σε ορισμένα σημεία σχεδόν όση η θερμοκρασία περιβάλλοντος την ημέρα των μετρήσεων 14 °C)

3.3 Εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών σε ειδικές περιπτώσεις

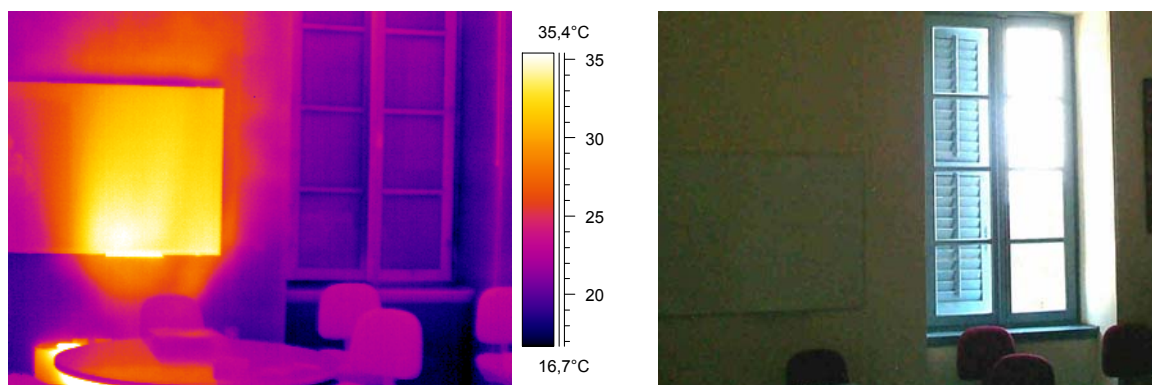
Οι θερμικές κηλίδες είναι δυνατό να οφείλονται π.χ. σε θερμαντικά σώματα στο πίσω μέρος της τοιχοποιίας. Η μεταφορά θερμότητας σε αυτήν την περίπτωση και οι προκύπτουσες θερμικές μεταβολές δίδονται στην Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Θερμοκρασιακό διάγραμμα που προκύπτει από ύπαρξη θερμικών σωμάτων πίσω από τοιχοποιία

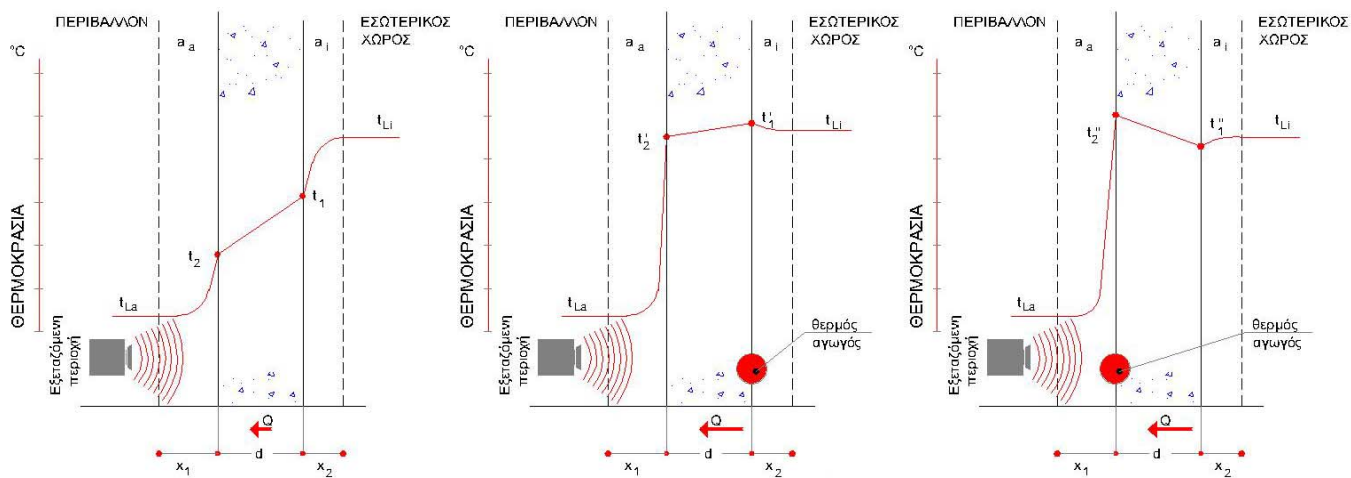


Εικόνα 3.10: Θερμογράφημα εξωτερικής όψης κτηρίου και αντίστοιχη φωτογραφία
Στην πίσω πλευρά του αριστερού παραθύρου υπάρχει θερμαντικό σώμα

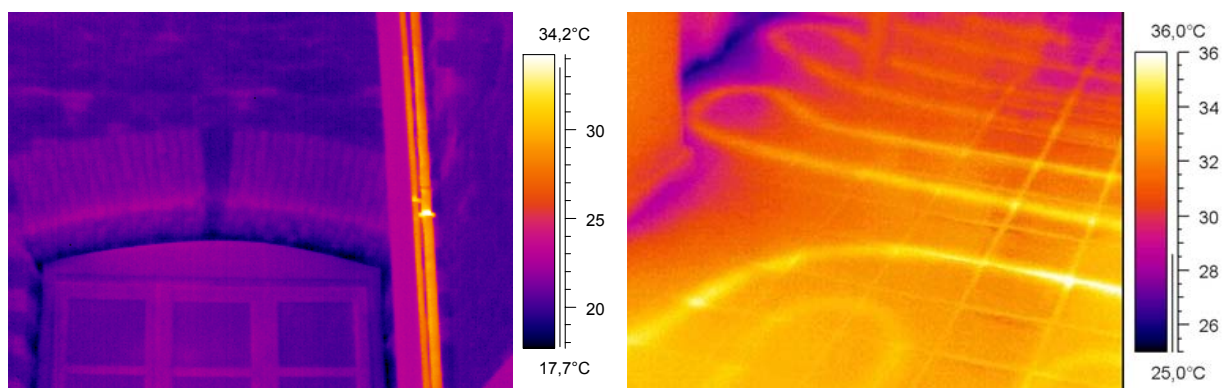


Εικόνα 3.11: Θερμική κηλίδα που εμφανίζεται επάνω από κλιματιστικό στην «Βίλα Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία

Με την μέθοδο της θερμογραφίας ανιχνεύονται επίσης θερμικοί αγωγοί που βρίσκονται εντός ή εκτός της τοιχοποιίας της κατασκευής και μεταφέρουν θερμό νερό ή θερμό αέρα.



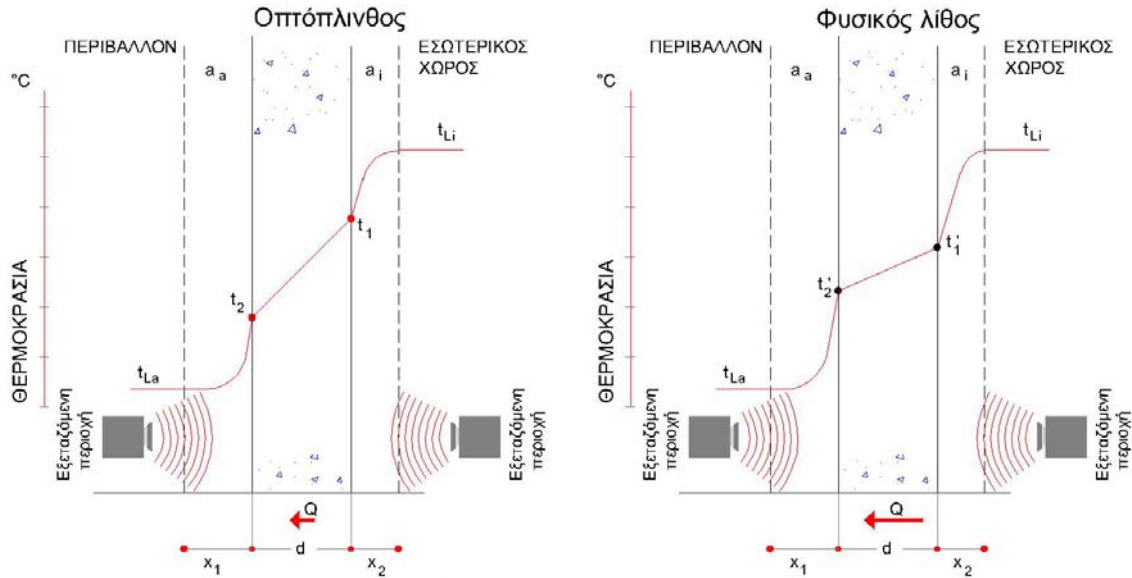
Εικόνα 3.12: Θερμοκρασιακό διάγραμμα ανίχνευσης θερμών αγωγών



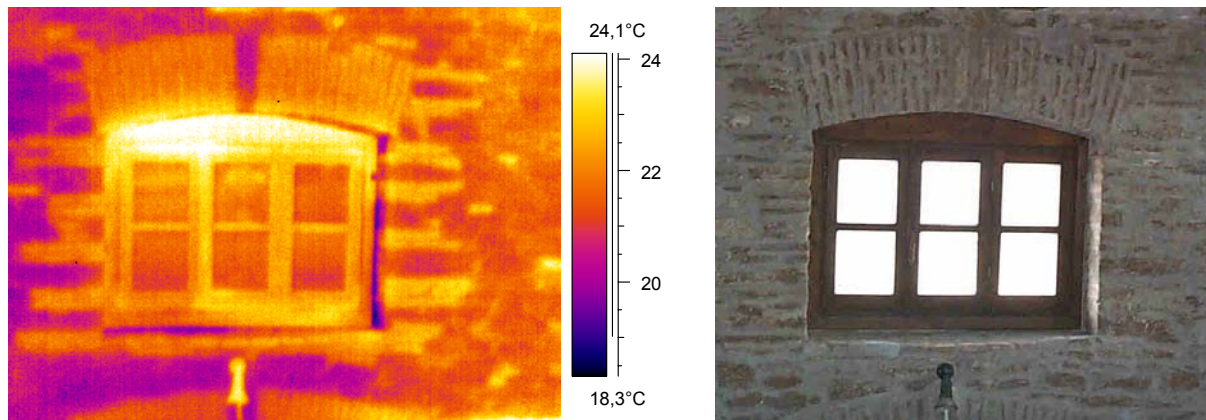
Εικόνα 3.13: Αγωγοί θερμού νερού εκτός της τοιχοποιίας της κατασκευής και αγωγοί θερμού νερού μέσα στο δάπεδο λουτρού

3.4 Αναγνώριση διαφόρων υλικών κατασκευής

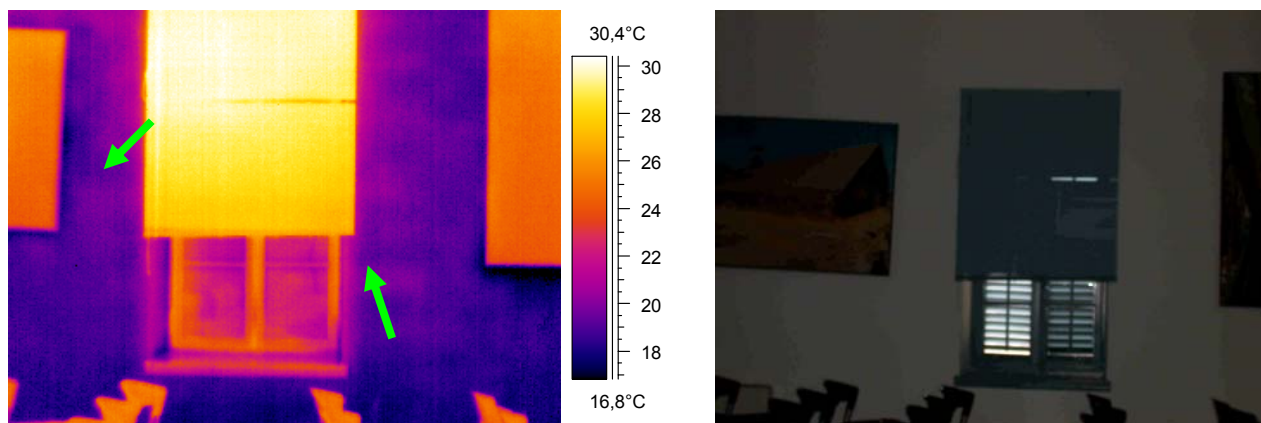
Με την θερμογραφία αναγνωρίζουμε υλικά με διαφορετική θερμική αντίσταση που βρίσκονται στο ίδιο κατασκευαστικό μέλος λόγω της διαφορετικής ταχύτητας μεταφοράς της θερμότητας.



Εικόνα 3.14: Θερμοκρασιακό διάγραμμα για την αναγνώριση διαφορετικών υλικών με θερμογραφία



Εικόνα 3.15 Θερμογράφημα τοίχου στο «Ξυλουργείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία. Στα θερμογραφήματα διακρίνονται ευχερώς οι περιοχές που είναι από οπτόπλινθους (θερμές περιοχές) οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη θερμική αντίσταση και υψηλή θερμοκρασία, σε αντίθεση με τις περιοχές δομημένες με φυσικούς λίθους που παρουσιάζουν μικρή θερμική αντίσταση (χαμηλή θερμοκρασία).



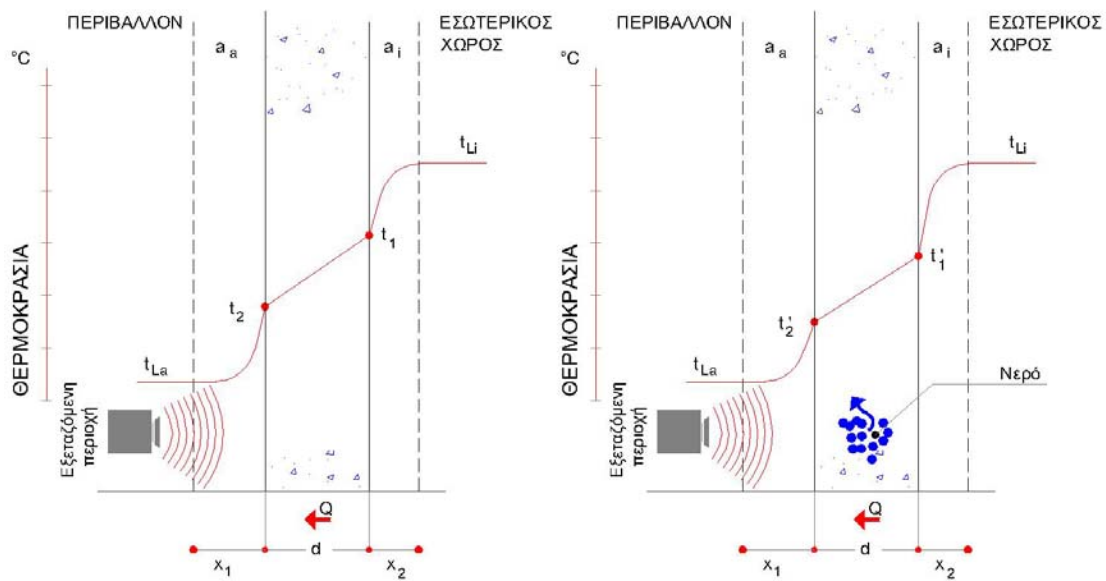
Εικόνα 3.16 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία. Στο θερμογράφημα σημειώνονται οι θερμές περιοχές της τοιχοποιίας δίπλα από το κούφωμα του παραθύρου οι οποίες είναι από οπτοπλινθοδομή σε αντίθεση με τις ψυχρές περιοχές οι οποίες δομημένες με φυσικούς λίθους.



Εικόνα 3.17 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ). Στο θερμογράφημα σημειώνονται οι θερμές περιοχές της τοιχοποιίας δίπλα στο κούφωμα του παραθύρου οι οποίες είναι από οπτοπλινθοδομή σε αντίθεση με τις ψυχρές περιοχές οι οποίες είναι δομημένες με φυσικούς λίθους.

Ο έλεγχος είναι πλέον ευχερής όταν το επίχρισμα έχει μικρό πάχος έτσι ώστε να μην εξισορροπούνται οι θερμοκρασίες. Στο θερμογράφημα του τοίχου παρατηρούμε ότι μπορούμε να έχουμε μία εικόνα της ποιότητας της κατασκευής, η οποία όμως παρουσιάζεται διαφορετική από την εικόνα που έχουμε από την τοιχοποιία του «Ξυλουργείου». Αυτό οφείλεται στην εξισορρόπηση των θερμοκρασιών λόγω μεγάλου πάχους επιχρίσματος του τοίχου.

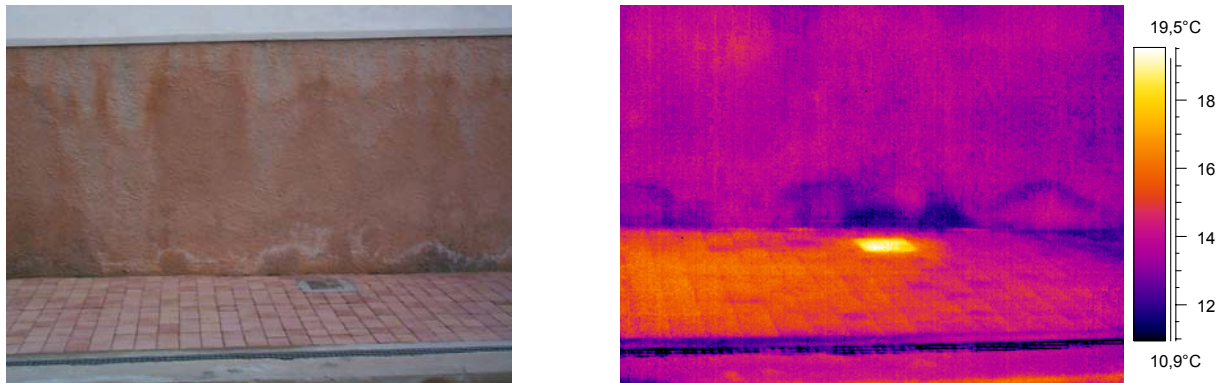
3.5 Εντοπισμός νερού μέσα στα υλικά



Εικόνα 3.18: Θερμοκρασιακό διάγραμμα εντοπισμού νερού

Με την θερμογραφία μπορεί να εντοπιστεί η ύπαρξη νερού ή υγρασίας σε δομικά υλικά (π.χ. ύπαρξη νερού μέσω των τριχοειδών από το έδαφος). Η κίνηση του νερού μέσω των τριχοειδών καθώς επίσης και η διαφορετική θερμική του συμπεριφορά λόγω μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του, έχει σαν συνέπεια θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια της κατασκευής. Έτσι κατά τις πρώτες πρωινές ώρες ή κατά τις πρώτες βράδυνες ώρες, το νερό βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από την θερμοκρασία του υλικού

Λόγω αυτού εντοπίζεται μέσα στα υλικά με την βοήθεια θερμογραφημάτων



Εικόνα 3.19: Τοιχοποιία στο Τ.Π.Π.Α με εμφανή ίχνη ανερχόμενης υγρασίας και αντίστοιχο θερμογράφημα



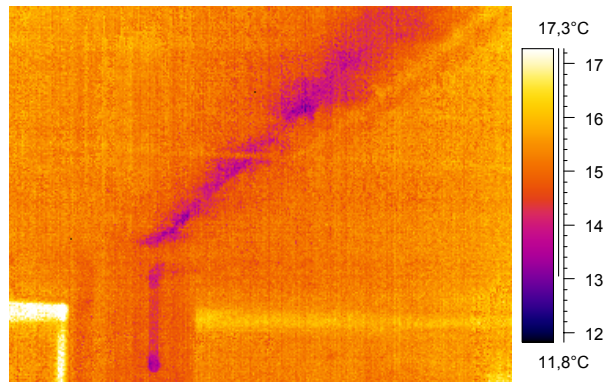
Εικόνα 3.20: Εξωτερική παρειά τοίχου στον εσωτερικό προθάλαμο της «Βίλας Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ)



Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα της ανερχόμενης υγρασίας σε εξωτερικό τοίχο της «Βίλας Σερπιέρι» (ΤΠΠΑ)



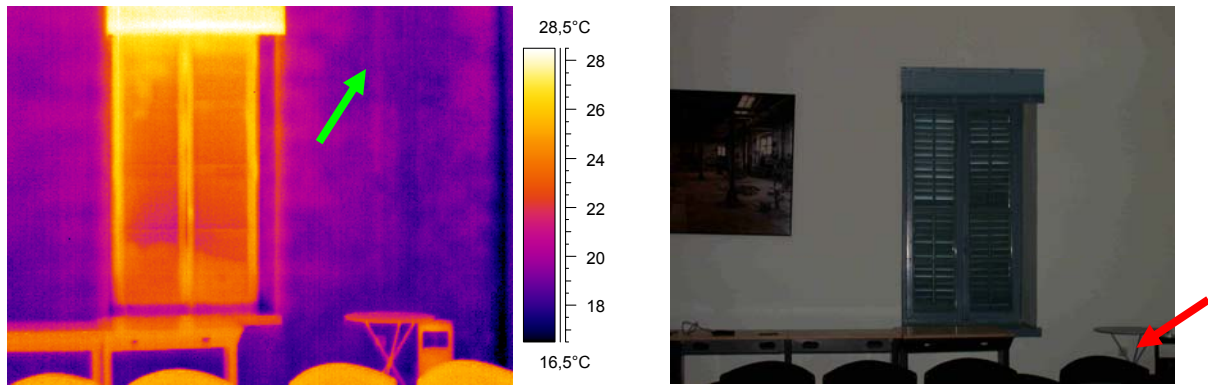
Εικόνα 3.22: Αρμός διαστολής στην οροφή των Πλατειών Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου



Εικόνα 3.23: Θερμογράφημα αρμού διαστολής στις Πλατείες Κέντρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

3.6 Εντοπισμός ανωμαλιών κάτω από την επιφάνεια

Με την θερμογραφία είναι δυνατόν να εντοπίσουμε ανωμαλίες κάτω από την επιφάνεια των υλικών. Γενικά, οι κάτω από την επιφάνεια ανωμαλίες επηρεάζουν την ροή της θερμότητας. Αν οι ανωμαλίες ή οι ανομοιομορφίες του υλικού δεν είναι σε πολύ μεγάλο βάθος τότε η μεταβολή της θερμικής ροής συνεπάγεται και μεταβολή στις επιφανειακές θερμοκρασίες. Συνήθως, η απαραίτητη διαφοροποίηση στην ροή της θερμότητας επιτυγχάνεται με θέρμανση είτε τεχνητώς με την χρήση ειδικών θερμικών λαμπτήρων είτε με φυσική μεταφορά θερμότητας τόσο κατά την θέρμανση στην αρχή της ημέρας λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (θερμική ροή προς το εσωτερικό της κατασκευής) όσο και κατά την ψύξη το απόγευμα (εκπομπή θερμότητας από το εσωτερικό της κατασκευής προς το περιβάλλον). Με τέτοιου τύπου θερμικές φορτίσεις μπορούμε να ερευνήσουμε αστοχία, ανωμαλίες, και ασυνέχειες στο υλικό χωρίς να αποκλείεται ο εντοπισμός ανωμαλιών κάτω από την επιφάνεια χωρίς ιδιαίτερες θερμικές φορτίσεις.



Εικόνα 3.24 Θερμογράφημα τοίχου στο «Φαρμακείο» (ΤΠΠΑ) και αντίστοιχη φωτογραφία. Στο θερμογράφημα εμφανίζονται στην περιοχή όπου παρουσιάζεται γραμμική θερμοκρασιακή μεταβολή, οι αγωγοί της ηλεκτρικής εγκατάστασης του κτηρίου. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η θέση ρευματοδότη.

4 Συμπεράσματα

Η θερμογραφία είναι ένα πολύτιμο, δια μη καταστροφής, εργαλείο του μηχανικού για την μελέτη των κατασκευών, όπου σε κακοτεχνίες που παρουσιάζονται πολύ συχνά δεν είναι εφικτή μία ασφαλής προσέγγιση της ποιότητάς τους.

Στην παρούσα εργασία διαπιστώνεται ότι η θερμογραφία έχει άριστες εφαρμογές τόσο στην μελέτη της θερμικής θωράκισης των κτηρίων, όσον και στην ανίχνευση σημείων μεγάλων απωλειών θερμότητας, την αναγνώριση διαφόρων τύπων υλικών, την ανίχνευση αγωγών μέσα στα υλικά, την ανίχνευση νερού μέσα στα υλικά αλλά και την ανίχνευση ανωμαλιών κάτω από την επιφάνεια των υλικών .

5 Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ 1364, Θερμομόνωση- Ανίχνευση θερμικών ανομοιομορφιών σε κελύφη κτηρίων-Μέθοδος υπέρυθρων ακτίνων, Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης ΑΕ

Κορωναίος Αιμ., Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά 2, εκδ. Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα 2002

Σπανός Χ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών, ΤΕΕ, Αθήνα 2002

ASTM D4788-88 Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography, 2001

Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T., Quantitative infrared thermography in buildings, Energy and Buildings 29, p. 1-9, 1998

Recktenwald G., Use of superposition to describe heat transfer from multiple electronic components, Mechanical Engineering Department, Portland, 2001

Haralambopoulos D. A. and G.F. Paparsenos, Assessing the thermal insulation of old buildings-the need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography, Energy Convers, Mgmt Vol. 39, No ½, pp 65-79, 1998

Titman D. J., Applications of thermography in non-destructive testing of structures, NDT &E International 34 p.149-154, 2001

Sakagami T., Kubo S., Development of a new non- destructive testing technique for quantitative evaluations of delaminating defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock- in thermography, Infrared physics & Technology, 43 p.311-316, 2002