



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

«Χώρος, Σχεδιασμός και Δομημένο Περιβάλλον»

Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

***«Ανίχνευση βλάβης και ρωγμών σε υφιστάμενες κατασκευές σκυροδέματος του
20^{ου} αιώνα με χρήση της μη καταστροφικής μεθόδου της υπέρυθρης
θερμογραφίας»***

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Προβιδάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων Καθηγητής)

Σταυρουλάκη Μαρία (Αναπληρώτρια Καθηγήτρια)

Τσομπανάκης Ιωάννης (Καθηγητής)

Επιμέλεια : Ντουντουλάκης Νικόλαος

Χανιά 2020

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας ως μίας μη καταστροφικής μέθοδο ελέγχου ανίχνευσης βλάβων και ρωγμών σε υφιστάμενες κατασκευές. Η συγκεκριμένη τεχνική, η οποία εξελίσσεται και εφαρμόζεται όλο και περισσότερο στον κλάδο της μηχανικής, δύναται να εφαρμοστεί στη δομή ιστορικών κτιρίων αλλά και σύγχρονων κατασκευών με σκοπό τον έλεγχο της δομικής τους ακεραιότητας. Πιο συγκεκριμένα ως πρώτος στόχος για την διεκπεραίωση της διπλωματικής τέθηκε η έρευνα σε θεωρητικό επίπεδο όλων των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου κατασκευών, η ιστορική αναδρομή της βασικής μεθοδολογίας που συνοδεύει την τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας, ο διαχωρισμός της σε ενεργητική και παθητική μέθοδο καθώς και η κατανόηση των διάφορων μεθόδων-τεχνικών που συνοδεύουν την ενεργητική προσέγγιση. Στη συνέχεια περιγράφεται το πειραματικό σκέλος στο εργαστήριο, όπου χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια σκυροδέματος και ένα μαρμάρου. Τα συγκεκριμένα δοκίμια, τα οποία είχαν εμφανείς ασυνέχειες, θερμάνθηκαν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και λήφθηκαν φωτογραφίες από την θερμική κάμερα κατά τη διάρκεια αυτού, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που απεικονίζονται οι βλάβες στα θερμογραφήματα. Τελικό στάδιο και βασικός στόχος της διπλωματικής διατριβής αποτέλεσε η προσπάθεια δημιουργίας ενός συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου, πιο πρακτικού, πιο οικονομικού το οποίο μετά από απαραίτητες βελτιώσεις θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερης κλίμακας υφιστάμενες κατασκευές. Το εν λόγω σύστημα αποτελούταν από πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες ως εξωτερική πηγή θέρμανσης και διεξήχθησαν νέα πειράματα σε δοκίμια σκυροδέματος ώστε να αποδειχτεί η χρησιμότητα των πιεζοηλεκτρικών στο μη καταστροφικό έλεγχο με τη βοήθεια της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Abstract

Subject of the thesis is the application of infrared thermography, a non-destructive technique, to identify damages and cracks in existing structures. Infrared thermography is a technique that is constantly being developed and applied in the engineering sector and can potentially be used in historic and newly constructed buildings to check for structural integrity/failures. Specifically, the first goal of the thesis was the bibliographic research and presentation of all the major non-destructive techniques, the historical background of the basic methodology that accompanies the technique of infrared thermography, its separation into active and passive method but also the understanding and presentation of the various methods-techniques that are related to the active method. Following, the experimental laboratory tests were described, where two concrete specimens and a marble specimen were examined. The specimens, which had obvious discontinuities, were heated for a certain period and photographs were taken by a thermal imager/thermal camera, in order to draw conclusions about how the faults in the thermographs are depicted. The final stage which was also the basic objective of the thesis was the attempt to create a non-destructive control system, more practical and economical which after necessary improvements can be used in larger scale existing constructions. The system consisted of piezoelectric actuators as an external source of heating and new experiments were performed on concrete specimens to demonstrate the usefulness of piezoelectric actuators in non-destructive testing with the help of infrared thermography.

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών , Χώρος, Σχεδιασμός και Δομημένο Περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα της 2^{ης} κατεύθυνσης με τίτλο *«Ολοκληρωμένη Προστασία Ιστορικού Δομημένου Περιβάλλοντος με Προηγμένες Τεχνολογίες και Υλικά»*.

Στο σημείο αυτό ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στον επιβλέποντα καθηγητή Προβιδάκη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια του σε οποιοδήποτε ζήτημα προέκυψε κατά την εκπόνηση της διατριβής καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επιπροσθέτως ευχαριστίες οφείλω να δώσω και στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής που αποτελείται από την αναπληρώτρια καθηγήτρια Σταυρουλάκη Μαρία και τον καθηγητή Τσομπανάκη Ιωάννη για το χρόνο τον οποίο διέθεσαν, τις διορθώσεις που μου πρότειναν στο τελικό κείμενο καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Πρόλογος	5
Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή	8
1.1 Δομή Εργασίας.....	8
Κεφάλαιο 2 – Βασικές έννοιες-Μεθοδολογίες	10
2.1 Βασική διαγνωστική μεθοδολογία	10
2.2 Βασικές Μη Καταστροφικές Τεχνικές (NDT).....	13
2.2 Οπτικός έλεγχος.....	13
2.3 Ραδιογραφία.....	16
2.4 Μέθοδος Ραντάρ	18
2.5 Υπέρηχοι	19
2.6 Ακουστική Εκπομπή.....	23
2.7 Δινορεύματα.....	25
Κεφάλαιο 3 – Υπέρυθρη Θερμογραφία	29
3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	30
3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	31
3.3 Μεταφορά θερμότητας	32
3.4 Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Θερμογραφίας.....	34
3.5 Τύποι θερμικών καμερών	35
3.6 Χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας στον κλάδο της μηχανικής-αρχιτεκτονικής.....	37
3.7 Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία	39
3.8 Τεχνικές Υπέρυθρης Θερμογραφίας.....	41
3.9 Παράμετροι και συνθήκες υπέρυθρης θερμογραφίας	51
3.10 Τεχνικές επεξεργασίας θερμικών εικόνων	53

3.11 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Υπέρυθρης Θερμογραφίας.....	54
Κεφάλαιο 4- 1^η σειρά πειραμάτων	55
4.1 Περιγραφή διαδικασίας για πρώτο δοκίμιο.....	55
4.2 Περιγραφή διαδικασίας για το δεύτερο δοκίμιο	66
4.3 Περιγραφή διαδικασίας για το τρίτο δοκίμιο	70
4. 4 Παρατηρήσεις-συμπεράσματα πρώτης σειράς πειραμάτων.....	74
Κεφάλαιο 5- Μέθοδος θερμογραφίας με δονήσεις.....	76
5.1 Εισαγωγή.....	76
5.2 Θερμογραφία με δονήσεις	76
5.3 Πιεζοηλεκτρικά-Βασικές Γνώσεις	78
5.4 Πρώτη σειρά πειραμάτων με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες.....	80
5.5 Δεύτερη σειρά πειραμάτων με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες	85
5.6 Συμπεράσματα διαδικασίας πειραμάτων με χρήση πιεζοηλεκτρικών	103
Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	106
6.1 Γενικά Συμπεράσματα	106
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	107
6.3 Επίλογος – αξιολόγηση της μεθόδου	108
Ελληνική Βιβλιογραφία	109
Ξένη Βιβλιογραφία	110
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	113

Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή

Η ανάγκη των τελευταίων δεκαετιών για τη συντήρηση και την αποκατάσταση των παλαιών κατασκευών καθώς και δομών που αποτελούν μνημεία εθνικής κληρονομιάς, έχει οδηγήσει σε έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με τους τρόπους σύμφωνα με τους οποίους θα μπορούσε να γίνει έλεγχος των υφιστάμενων αυτών κατασκευών, δίχως να επηρεαστεί η αρχική τους μορφή καθώς και τα υλικά από τα οποία έχουν αυτές κατασκευαστεί.

Είναι γεγονός, ότι η αποκατάσταση παλαιών ιστορικών δομών αποτελεί μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία την οποία οι μηχανικοί οφείλουν να αντιμετωπίσουν με διαφορετικό τρόπο από ότι τα συνήθη μεταγενέστερα κτίρια τόσο λόγω της δομής και της φθοράς των υλικών με την πάροδο των χρόνων αλλά και λόγω της πολιτιστικής και ιστορικής σημασίας που αυτές κουβαλάνε. Η διατήρηση, η ανάδειξη και η επανάχρηση αυτών των ιστορικών κτιρίων προσφέρει πολιτιστικά, περιβαλλοντικά αλλά και οικονομικά οφέλη.

Η συστηματική, λοιπόν, εποπτεία αυτών των δομών κρίνεται απαραίτητη τόσο για τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας τους όσο και για την έγκαιρη συντήρηση τους. Η έγκαιρη διάγνωση τυχόν δομικών προβλημάτων και μηχανικών βλαβών είναι ζήτημα ύψιστης σημασίας για αυτές τις δομές και η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας συνεισφέρει ώστε η αναγνώριση των μηχανικών χαρακτηριστικών των εν λόγω κατασκευών δια μέσω ενόργανων μετρήσεων να πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή των μεθόδων Μ.Κ.Ε που χρησιμοποιούνται για να εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη δομική ακεραιότητα των κατασκευών και ιδιαίτερα της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας, μιας ταχύτατα εξελισσόμενης μεθόδου η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διατριβής.

1.1 Δομή Εργασίας

Στη συνέχεια περιγράφεται η δομή και η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια :

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των βασικών εννοιών και μεθοδολογιών που ακολουθούνται για τον έλεγχο της δομικής υγείας των υφιστάμενων κατασκευών στη σημερινή εποχή. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ο διαχωρισμός των μεθοδολογιών αυτών στις 3 βασικές

διαγνωστικές τεχνικές και πραγματοποιείται η επεξήγηση τους και ο λόγος επιλογής τους ανάλογα με τις απαιτήσεις. Τέλος στο κεφάλαιο 2 αναλύονται οι βασικές μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των υφιστάμενων κατασκευών.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη μεθοδολογία της υπέρυθρης θερμογραφίας, η οποία και είναι η τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στην ιστορική αναδρομή της μεθόδου, στις βασικές αρχές που τη διέπουν, στο διαχωρισμό της σε παθητική και ενεργητική προσέγγιση, ενώ επίσης γίνεται και τεκμηρίωση των διαφόρων μεθοδολογιών που τη συνοδεύουν καθώς και αναφορά των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της τεχνικής.

Το κεφάλαιο 4 αφορά την πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα στους χώρους των εργαστηρίων του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορούσε τον έλεγχο συγκεκριμένων δοκιμίων με τη χρήση της ενεργητικής μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας, καθώς και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τη διαδικασία αυτή. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια σκυροδέματος και 1 δοκίμιο διονυσιακού μαρμάρου, όλα με εμφανείς ατέλειες και ασυνέχειες και ως εξωτερική πηγή θέρμανσης ένα αερόθερμο.

Το κεφάλαιο 5 πραγματεύεται την προσπάθεια εύρεσης μίας μεθόδου πιο πρακτικής και οικονομικής, η οποία μετά από βελτιώσεις που απαιτούνται, θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της υπέρυθρης θερμογραφίας σε μεγαλύτερες δομές και επιφάνειες. Η εν λόγω τεχνική, η οποία στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, βασίζεται στο γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων που προκύπτουν από τα πιεζοηλεκτρικά θα δημιουργήσει κίνηση των μορίων στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί τριβή στις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων και να απελευθερωθεί θερμότητα. Τη παραγόμενη θερμότητα στη συνέχεια θα την ανιχνεύσει η υπέρυθρη θερμική +κάμερα με αποτέλεσμα να υποδείξει τις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται οι ασυνέχειες.

Το κεφάλαιο 6 της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν μετά το πέρας των πειραμάτων, καθώς και προτάσεις για μελλοντική βελτίωση της τεχνικής της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Κεφάλαιο 2 – Βασικές έννοιες-Μεθοδολογίες

2.1 Βασική διαγνωστική μεθοδολογία

Είναι γεγονός ότι η αποκατάσταση κτιρίων και ιδιαίτερα ιστορικών δομών αποτελεί ένα διαθεματικό ζήτημα, για την επίλυση του οποίου είναι απαραίτητο να υπάρξει συνεργασία από πολλούς κλάδους επιστημόνων. Για αυτό το λόγο σε κάθε τέτοιου είδους έργο συμμετέχουν τόσο αρχιτέκτονες και μηχανικοί όσο και επιστήμονες από άλλους κλάδους, όπως αρχαιολόγοι, φυσικοί, χημικοί κλπ. Η ανάγκης γνώσης και ερμηνείας αυτών των ιστορικών κτιρίων προσέφερε τις τελευταίες δεκαετίες κάποιες συγκεκριμένες μεθοδολογίες σχετικά με τον χαρακτηρισμό τους.

Τα διαγνωστικά τεστ που χρησιμοποιούνται, συνήθως χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε έργου(Binda *et al.*, 2002). Αυτές είναι :

- Ποιοτικές δοκιμές οι οποίες παρέχουν γενικές γνώσεις και πληροφορίες και δεν μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, τα οποία αποτελούν τις κατασκευές.
- Ποσοτικές δοκιμές οι οποίες παρέχουν περισσότερες γνώσεις σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς της κατασκευής, τα υλικά που την αποτελούν και παρέχουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η μεθοδολογία και οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τον χαρακτηρισμό της δομικής ακεραιότητας των ιστορικών κτιρίων έχουν οριστεί μέσω εθνικών κωδίκων και διεθνών οργανισμών που ασχολούνται με τη συντήρηση και την αποκατάσταση αυτών και ακολουθούν τα παρακάτω βήματα(Cantini,2009-2011) :

1. Προσδιορισμός της τυπολογίας των κτιρίων
2. Προσδιορισμός της ποιότητας της δομής των κτιρίων
3. Σύγκριση των διαγνωστικών παραμέτρων με τις παραμέτρους που χαρακτηρίζονται από τους κανονισμούς
4. Ορισμός της δομικής επίδοσης των κτιρίων

Σύμφωνα με τους κανονισμούς υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες διαγνωστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση της δομικής ακεραιότητας των ιστορικών κτιρίων(Binda *et al.*, 2002):

- Μη καταστροφικές δοκιμές (NDT)
- Ελαφρώς καταστροφικές δοκιμές (MDT)
- Καταστροφικές δοκιμές (DT)

Οι πρώτες δύο κατηγορίες αφορούν τις δοκιμές οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν επί τόπου και είναι και αυτές που προτιμώνται σε κτίρια με υψηλή αρχιτεκτονική και πολιτιστική αξία, ενώ η τρίτη κατηγορία αφορά δοκιμές οι οποίες πραγματοποιούνται στο εργαστήριο μετά από την απαραίτητη δειγματοληψία και βασίζονται σε μηχανικές, φυσικές και χημικές αναλύσεις.

Ως μη καταστροφική δοκιμή(NDT) ορίζεται η πορεία επιθεώρησης, δοκιμής ή αξιολόγησης υλικών και κατασκευαστικών στοιχείων χωρίς να καταστρέφεται η δυνατότητα συντήρησης του μέρους ή του συστήματος. Σκοπός αυτής της τεχνικής είναι ο καθορισμός της ποιότητας και της ακεραιότητας των υλικών και των κατασκευαστικών στοιχείων χωρίς να επηρεάζεται η ικανότητα εκτέλεσης των προβλεπόμενων λειτουργιών τους. Ενώ οι καταστροφικές δοκιμές εξερευνούν μηχανισμούς αστοχίας για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, οι μη καταστροφικές δοκιμές εξερευνούν ενδείξεις ιδιοτήτων χωρίς να οδηγούν τα κατασκευαστικά στοιχεία σε αστοχία. Η κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών καθώς και των βασικών θεμάτων που σχετίζονται με την εφαρμογή τους στη δομική μηχανική αποτελούν το κλειδί για την επιτυχία κάποιας μη καταστροφικής μεθόδου αξιολόγησης. Τα βασικά βήματα για την επιλογή κάποιας επαρκούς μεθόδου είναι τα εξής(Helal *et al.*, 2015) :

- Κατανόηση της φυσικής φύσης του υλικού που πρόκειται να επιθεωρηθεί
- Κατανόηση των βασικών φυσικών διαδικασιών που διέπουν την μη καταστροφική μέθοδο
- Κατανόηση της φυσικής φύσης της αλληλεπίδρασης του πεδίου δοκιμής με το υλικό δοκιμής
- Κατανόηση των πιθανών περιορισμών στις διαθέσιμες τεχνολογίες μη καταστροφικών μεθόδων
- Εξέταση των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κανονιστικών παραγόντων που διαδραματίζουν ρόλο

Με την πάροδο των χρόνων καθώς και την εξέλιξη της τεχνολογίας γίνονται όλο και περισσότερες προσπάθειες για αναβάθμιση των ήδη υπαρχόντων μη καταστροφικών μεθόδων έτσι ώστε να αρθούν οι περιορισμοί που τους διέπουν, καθώς και προσπάθειες για την ανεύρεση νέων τεχνικών ικανών να υποδεικνύουν μηχανικές, ακουστικές, χημικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές και φυσικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών και δομών.

Όπως προαναφέρθηκε, στη δεύτερη κατηγορία διαγνωστικών τεχνικών ανήκουν οι λεγόμενες ελαφρώς καταστροφικές τεχνικές (MDT). Ο ορισμός αυτός αφορά μεθόδους οι οποίες προκαλούν ορισμένες μεταβολές στις υπάρχουσες δομές. Αποτελούνται από τεχνικές οι οποίες δεν μπορούν διατηρήσουν την υλική ακεραιότητα των στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται αλλά προκαλούν μικρές μεταβολές ή περιορισμένες ζημιές οι οποίες είναι εύκολα επανορθώσιμες. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα ποσοτικά αποτελέσματα, εξασφαλίζοντας βαθύτερο επίπεδο γνώσεων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη κτιρίου. Στην κατηγορία αυτή μεταξύ άλλων ανήκουν τεχνικές όπως η χρήση μίας ή διπλής επίπεδης υποδοχής (single-double flat jack), η αφαίρεση του πυρήνα του υλικού (coring), η εικονοσκόπηση (videoboroscopy), η δοκιμή γεώτρησης με σκόνη (powder drilling tests) κ.α.

Σε περίπτωση που οι μη καταστροφικές τεχνικές ή οι ελαφρώς καταστροφικές τεχνικές δεν επαρκούν για τη διερεύνηση της δομικής ακεραιότητας ενός ιστορικού κτιρίου, ορισμένες φορές λαμβάνονται κάποια δοκίμια με σκοπό να εξεταστούν στο εργαστήριο. Η τεχνική της δειγματοληψίας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς τα δείγματα που λαμβάνονται είναι απαραίτητο να προκαλούν τη λιγότερη ζημιά, τόσο αρχιτεκτονικά όσο και ιστορικά, ενώ συγχρόνως πρέπει να είναι και άθικτα έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά τόσο της υπάρχουσας δομής όσο και της αρχικής. Οι στόχοι των δοκιμών που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο είναι οι ακόλουθοι (Cantini, 2009-2011) :

- Χαρακτηρισμός του υλικού από χημική, φυσική και μηχανική άποψη
- Ανίχνευση της προέλευσης του ώστε να χρησιμοποιηθούν παρόμοια υλικά για την επισκευή
- Η γνώση της σύνθεσης του υλικού
- Η μέτρηση της συμπεριφοράς και της ανθεκτικότητας του σε σχέση με τα καινούρια υλικά που ενδεχομένως χρησιμοποιηθούν στις εργασίες αποκατάστασης

Η χρήση των καταστροφικών δοκιμών παρότι συνήθως είναι ικανή να προσφέρει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την δομική κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου σπάνια χρησιμοποιείται σε ιστορικές δομές καθώς ακόμα και το πιο μικρό δομικό υλικό αυτών των κτιρίων κουβαλάει μαζί του δεκαετίες ιστορικής και αρχιτεκτονικής κληρονομιάς.

2.2 Βασικές Μη Καταστροφικές Τεχνικές (NDT)

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές μη καταστροφικές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή καθώς και η βασική μεθοδολογία που συνοδεύει την καθεμία.

Όπως προαναφέρθηκε η επιλογή της χρήσης μίας η συνδυασμού μη καταστροφικών τεχνικών για την ανίχνευση βλάβων, ρωγμών και ασυνεχειών σε υπάρχουσες ιστορικές δομές είναι συνήθως η πρώτη επιλογή για τις μελέτες αποκατάστασης αυτών των κατασκευών καθώς είναι απαραίτητη η διατήρηση της αρχικής δομής τους. Οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες έχουν ως στόχο τα ακόλουθα(*Cantini,2009-2011*) :

- Ανίχνευση κρυφών δομικών στοιχείων τα οποία είτε μέσω ανακατασκευών είτε κατά τη διάρκεια των χρόνων χάθηκαν και είναι ιδιαιτέρως σημαντικά για τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής καθώς και την ενίσχυσης της
- Αξιολόγηση της έκτασης της μηχανικής βλάβης σε κατασκευές που χρήζουν ενίσχυσης
- Ανίχνευση της παρουσίας κενών και ασυνεχειών
- Αξιολόγηση της περιεκτικότητας σε υγρασία καθώς και ανίχνευση του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης
- Ανίχνευση των επιφανειακών ρωγμών
- Αξιολόγηση των κονιαμάτων και των μηχανικών ιδιοτήτων των υπολοίπων δομικών υλικών πλήρωσης (τούβλα, λίθοι κλπ)

2.2 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος είναι η πρώτη τεχνική που εφαρμόζεται για την ανίχνευση των δομικών βλαβών καθώς είναι απαραίτητο ο ελεγκτής-μελετητής να έρθει σε επαφή με την κατασκευή ώστε να εντοπίσει πιθανά προβλήματα. Η εν λόγω μεθοδολογία χρησιμοποιεί τα μάτια καθώς και άλλα απλά εργαλεία, έτσι ώστε να ανιχνεύσει τα σφάλματα στις κατασκευές. Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες :

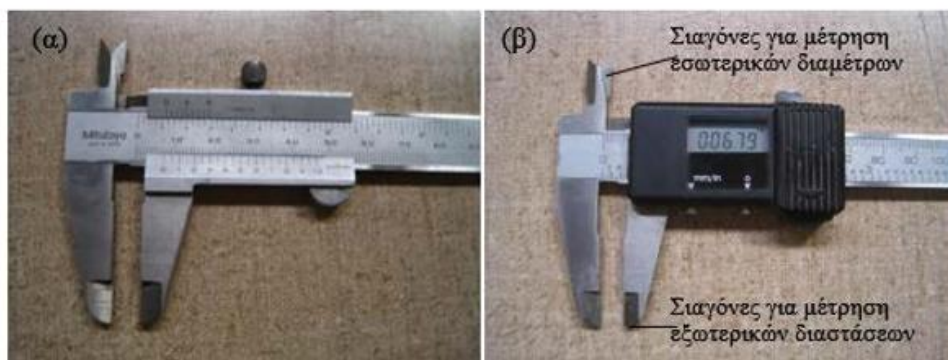
- Η πρώτη αφορά τον έλεγχο και την έρευνα
- Η δεύτερη αφορά κυρίως την εμπειρία και τις γνώσεις του ίδιου του ελεγκτή σε σχέση με τις ενδείξεις που αφορούν αστοχίες υλικών, ρηγματώσεις και δομικά προβλήματα

Σκοπός του οπτικού ελέγχου είναι να εντοπιστούν οι βλάβες, οι φθορές και οι ασυνέχειες που υπάρχουν στην υπάρχουσα δομή. Ο έλεγχος αυτός συνίσταται να στην καταγραφή σε σκαριφήματα στοιχείων όπως οι ρωγμές (θέση και εύρος) , τυχόν διαβρωμένων οπλισμών, προβλημάτων υγρασίας και γενικότερες φθορές στα υλικά κατασκευής.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του οπτικού ελέγχου είναι οι εξής (Ματίκας, Αγγελής, 2015):

- Η εμπειρία και οι γνώσεις του προσωπικού που θα αναλάβει την επιθεώρηση.
- Ο φωτισμός των περιοχών μελέτης.
- Η δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων της οπτικής επιθεώρησης.

Για την πραγματοποίηση του οπτικού ελέγχου σε κατασκευές υπάρχουν βοηθήματα τα οποία χρησιμεύουν στην καλύτερη καταγραφή των βλάβων. Τυπικοί χάρακες χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μεθοδολογία έτσι ώστε να προσδιοριστούν και να μετρηθούν οι διαστάσεις ρωγμών, ασυνεχειών κλπ, ενώ για υψηλότερη ακρίβεια χρησιμοποιούνται παχύμετρα ή και μικρόμετρα, τα οποία έχουν ακρίβεια μέχρι $2,4 \mu\text{m}$ (Εικόνες 1, 2).



Εικόνα 1 : (α) Παχύμετρο αναλογικό, (β) Παχύμετρο ψηφιακό(Ματίκας, Αγγελής, 2015)



Εικόνα 2 : Μικρόμετρο(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Τέλος αναφέρονται τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας του οπτικού ελέγχου (Ματίκας, Αγγελής, 2015):

Πλεονεκτήματα

- Μέθοδος εφαρμόσιμη σε όλο το εύρος των υλικών.
- Μέθοδος εύκολα εφαρμόσιμη.
- Το κόστος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρό.
- Ταχύς έλεγχος επιθεώρησης.
- Τα αποτελέσματα της επιθεώρησης δύναται να αποθηκευτούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.
- Η χρήση κάμερας και ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί να αυτοματοποιήσει τη μεθοδολογία.

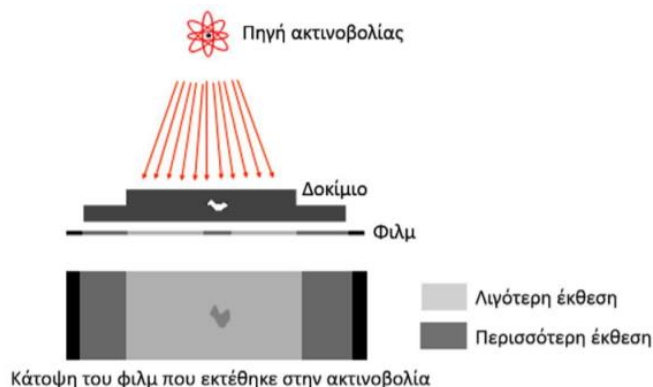
Μειονεκτήματα

- Εύρεση δομικών σφαλμάτων μόνο στην επιφάνεια κάποιου υλικού.
- Το αποτέλεσμα της επιθεώρησης σε ορισμένες περιπτώσεις εξαρτάται από την εμπειρία και τις γνώσεις του προσωπικού.
- Η απόκτηση της κατάλληλης εμπειρίας καθώς και των κατάλληλων γνώσεων είναι μία δύσκολη διαδικασία(Shull,2002).

2.3 Ραδιογραφία

Η τεχνική της ραδιογραφίας (Radiographic Testing – R.T) είναι από τις σημαντικότερες μεθόδους του τομέα των μη καταστροφικών ελέγχων. Βασική αρχή της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η χρησιμοποίηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με υψηλή διεισδυτικότητα (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η τεχνική είναι βασισμένη στο γεγονός ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία βραχέος μήκους κύματος δύναται να διαπεράσει το κάθε υλικό με διαφορετικό τρόπο. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που εξέρχεται είναι συνδεδεμένη με το πάχος διείσδυσης και την πυκνότητα του υλικού(Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η ένταση της ακτινοβολίας δύναται να αποτυπωθεί με 2 τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω ενός βιομηχανικού φιλμ, το οποίο ο χρήστης θα τοποθετήσει πίσω από το εξεταζόμενο αντικείμενο, ενώ ο δεύτερος αφορά την τοποθέτηση μίας συστοιχίας αισθητήρων οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στην ακτινοβολία (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η τεχνική της ραδιογραφικής απεικόνισης είναι ανάλογη του βαθμού που απορροφάται η ακτινοβολία από το υπό έλεγχο δοκίμιο και χρησιμοποιείται για να ανιχνεύει ατέλειες στο εσωτερικό των υλικών(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Η διαδικασία που ακολουθείται για να εξεταστεί ένα δοκίμιο είναι η εξής : Αρχικά πραγματοποιείται τοποθέτηση του αντικείμενου ελέγχου ενδιάμεσα της πηγής που εκπέμπει ακτινοβολία και σε φιλμ με ευαισθησία στην ακτινοβολία(Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η πηγή που εκπέμπει την ακτινοβολία είναι είτε γεννήτρια ακτίνων Χ είτε ραδιενεργός πηγή. Κάποιο μέρος της ακτινοβολίας θα σταματήσει από το δοκίμιο, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής να σταματά σε περιοχές οι οποίες έχουν μεγαλύτερο πάχος και πυκνότητα. Η ακτινοβολία η οποία θα διαπεράσει το δοκίμιο, θα πραγματοποιήσει έκθεση του φιλμ και σκιαγράφιση του δοκιμίου(Ματίκας, Αγγελής, 2015).



Εικόνα 3: Αρχή του ελέγχου με ραδιογραφία(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Τα τελευταία χρόνια στις διαδικασίες μη καταστροφικού ελέγχου των υλικών οι συσκευές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι αυτές της ψηφιακής ραδιογραφίας λόγω της ύπαρξης σε αυτές επίπεδων ψηφιακών ανιχνευτών ακτινοβολίας, στη θέση των κλασικών φωτογραφικών φιλμ (Deprins, 2004) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Τα συστήματα ψηφιακής ραδιογραφίας μπορούν να χωριστούν σε δύο μορφές: (Deprins, 2004) (Ματίκας, Αγγελής, 2015):

1. Τη ψηφιακή απεικόνιση με άμεσο τρόπο. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία το σύστημα ψηφιακής ραδιογραφίας συνδέεται απευθείας με τον υπολογιστή και χρησιμοποιείται ανιχνευτής άμορφου πυριτίου μαζί με σπινθηριστή ώστε να μετατραπούν οι ακτίνες Χ ή Γ σε ορατό φως (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
2. Τη ψηφιακή απεικόνιση με έμμεσο τρόπο, μέσω της οποίας επαναχρησιμοποιείται πλάκα (αισθητήρα PSP - Photostimulable Phosphor Plate) στη θέση του φιλμ και πραγματοποιείται σάρωση με ψηφιακό τρόπο (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου της ραδιογραφίας είναι τα ακόλουθα (Ματίκας, Αγγελής, 2015) :

- Ο τύπος του υλικού και η πυκνότητα δεν περιορίζουν την τεχνική.
- Μπορεί να ανιχνεύσει τόσο επιφανειακές όσο και εσωτερικές βλάβες.
- Παροχή μόνιμης καταγραφής των επιθεωρούμενων περιοχών.
- Τεχνική με ευαισθησία στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του υλικού (π.χ το πάχος, η διάβρωση, η πυκνότητα κλπ).
- Αναγνώριση κενών και ασυνεχειών.
- Δεν απαιτείται μεγάλη επιφανειακή προετοιμασία.
- Καλή και εύκολη φορητότητα.

Αντίστοιχα τα μειονεκτήματα της είναι τα εξής :

- Απαιτούνται πολλές προφυλάξεις ασφαλείας σε περίπτωση χρήσης ακτινοβολίας υψηλής έντασης.
- Απαιτούνται πολλές ώρες εκπαίδευσης του προσωπικού.
- Αναγκαιότητα πρόσβασης αμφίπλευρα του υλικού εξέτασης.
- Για τον προσδιορισμό του βάθους κάποιας βλάβης είναι απαραίτητο να υπάρξουν αρκετές γωνίες έκθεσης.

- Υψηλό κόστος αγοράς του εξοπλισμού.

2.4 Μέθοδος Ραντάρ

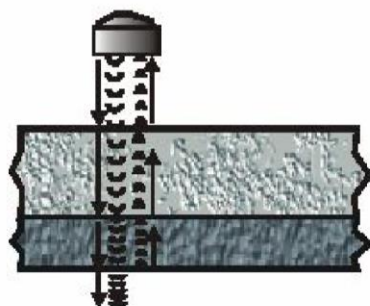
Η μέθοδος του ραντάρ που καλείται και ως μέθοδος ραντάρ εδαφικής εισχώρησης (GPR-Ground Penetrating Radar) αποτελεί άλλη μία μη καταστροφική μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται στην επιστήμη της μηχανικής(Σωτηρόπουλος, 2002). Πιο συγκεκριμένα η τεχνική του ραντάρ χρησιμοποιείται κυρίως σε επιθεωρήσεις που πραγματοποιούνται σε καταστρώματα οδών με ταχεία κυκλοφορία και σε γέφυρες. Επίσης, χρησιμοποιείται για να ανιχνευθούν κενά τα οποία υπάρχουν πίσω από τις εσωτερικές επενδύσεις σκυροδέματος σε σήραγγες (Σωτηρόπουλος, 2002). Όσον αφορά την χρήση της σε μικρότερα δομικά στοιχεία σκυροδέματος (δοκάρια, υποστυλώματα, τοιχία κλπ) είναι ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο (Σωτηρόπουλος, 2002).

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην τεχνική αυτή αποσκοπεί στο να παραχθούν και στη συνέχεια να μεταδοθούν βραχεία ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή κύματα αρμονικά με το χρόνο διαμέσου του πομπού με κατεύθυνση το αντικείμενο μελέτης. Στη συνέχεια αυτά τα διασκορπισμένα σήματα θα καταγραφούν.

Όταν αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έρθουν σε επαφή με ένα άλλο αντικείμενο διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, τότε κάποιο μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται, υφίσταται ανάκλαση από το όριο και η υπόλοιπη ενέργεια θα μεταφερθεί στο νέο δείγμα υπομένοντας κάποια διάθλαση ανάλογα των ιδιοτήτων του υλικού του νέου δείγματος και της γωνίας πρόσκρουσης(Σωτηρόπουλος, 2002). Με αυτό το τρόπο τα διασκορπισμένα σήματα που είχαν καταγραφεί στο δέκτη περιέχουν πληροφορίες των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού(Σωτηρόπουλος, 2002). Ο τρόπος απόκτησης αυτών των διασκορπισμένων σημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- Μέσω αμφιστατικού στησίματος, όπου υπάρχει διαχωρισμός πομπού και δέκτη μέσω δύο ξεχωριστών συσκευών.
- Μέσω μονοστατικού στησίματος, όπου υπάρχει σύμπτυξη πομπού και δέκτη.

Στη συνέχεια μέσω κατάλληλων αλγορίθμων απεικόνισης αυτά τα δεδομένα που πάρθηκαν χρησιμοποιούνται για ανακατασκευή χωρικών εικόνων του στόχου.



Εικόνα 4 : Μέθοδος ραντάρ (εδαφικής εισχώρησης) (Σωτηρόπουλος, 2002)

2.5 Υπέρηχοι

Ακόμα μία σημαντική μη καταστροφική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται αρκετά για την ανίχνευση βλάβων σε ιστορικές δομές, είναι αυτή των υπερήχων.

Τα ηχητικά κύματα τα οποία έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από το επίπεδο του φάσματος της ανθρώπινης ακοής, ονομάζονται υπέρηχοι (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Τα πολύ μικρότερα μήκη κύματος σε σχέση με τον ακουστικό ήχο είναι το χαρακτηριστικό που κάνει την τεχνική αυτή πολύ χρήσιμη για τον χαρακτηρισμό δομών και υλικών. Η τεχνική των υπερήχων βασίζεται στη χρησιμοποίηση ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας για την ανίχνευση των εσωτερικών ατελειών. (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

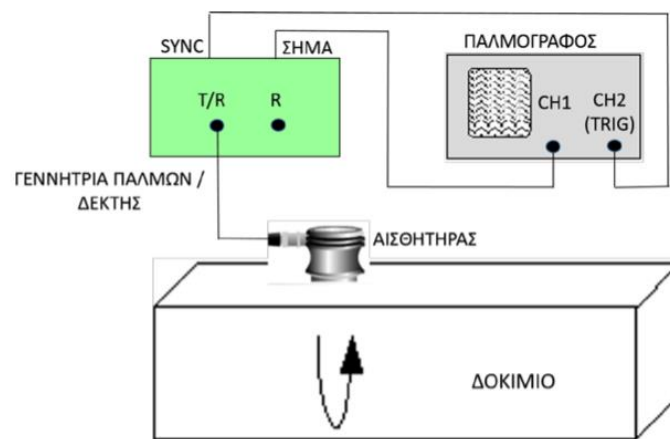


Εικόνα 5: Το φάσμα του ήχου (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Ο τρόπος διάδοσης των κυμάτων των υπερήχων σε ρευστά ή στερεά μέσα γίνεται μέσω μίας ακολουθίας από μηχανικές δονήσεις. Τα κύματα αυτά είναι είτε τασικά είτε μηχανικά (δηλ. ελαστικά κύματα). Οι μηχανικές αυτές δονήσεις διαδίδονται σε όλο το μέσο, από το ένα σημείο στο άλλο. Πιο συγκεκριμένα, οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ώστε να προσδιοριστούν οι ελαστικές ιδιότητες των εκάστοτε υλικών μέσω της εισαγωγής στο υπό εξέταση αντικείμενο τασικών κυμάτων με χαμηλή ένταση και υψηλή συχνότητα (Baaclini et al., 2000) (Ματίκας,

Αγγελής, 2015). Στη συνέχεια αυτά τα κύματα αλληλοεπιδρούν με το υλικό και τη μικροδομή του και ανιχνεύονται από ειδικούς αισθητήρες (Osmont *et al.*,) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Κατά τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων στο υλικό πραγματοποιείται τροποποίηση τους καθώς δημιουργείται ανάκλαση, σκέδαση, διάθλαση και εξασθένηση (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Το σήμα που φτάνει στην οθόνη, επεξεργάζεται και στη συνέχεια γίνεται ερμηνεία του με βάση το αρχικό κύμα που εισήχθη στο υλικό και λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της εσωτερικής του δομής.

Όσον αφορά το σύστημα ελέγχου των υπερήχων που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του μη καταστροφικού ελέγχου των υλικών απεικονίζεται μέσω του παρακάτω διαγράμματος.

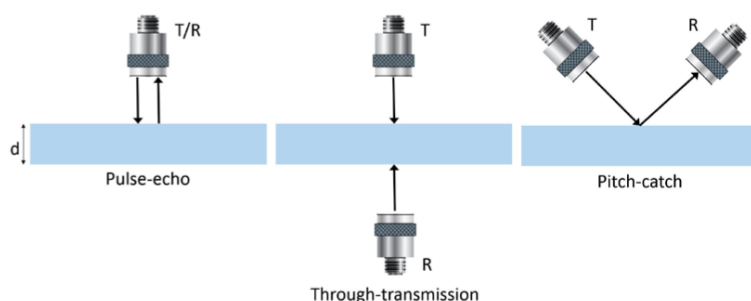


Εικόνα 6 : Πειραματική διάταξη εξοπλισμού για δοκιμή υπερήχων (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι ο εξής (Ματίκας, Αγγελής, 2015) :

- Γεννήτρια παλμών/ δέκτη υπερήχων στην οποία υπάρχει ένας χρονιστής. Μέσω του χρονιστή πραγματοποιείται έλεγχος του ρυθμού που δημιουργούνται οι παλμοί από τους υπέρηχους και επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός του σήματος.
- Συσκευή παλμογράφου.
- Αισθητήρας.
- Μέσο σύζευξης ανάμεσα στο εξεταζόμενο δοκίμιο και τον αισθητήρα (ειδικό ζελέ, couplant).

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάζονται παραπάνω από ένας αισθητήρας, ο ένας για να δημιουργεί τους παλμούς(πομπός) και ο άλλος για την ανίχνευση του σήματος (δέκτης)(*Karpur et al., 1995*) (*Ματίκας, Αγγελής, 2015*). Για τον έλεγχο των υλικών μέσω δύο αισθητήρων χρησιμοποιούνται τρεις κοινές τεχνικές ελέγχου, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 7 : Διάταξη πειραματικού εξοπλισμού για τρεις περιπτώσεις : παλμού-ηχούς , απ' ευθείας μετάδοση, και γωνιώδους ανάκλασης(*Ματίκας, Αγγελής, 2015*).

Για να απεικονιστούν τα δεδομένα που συλλέγονται από τη χρήση υπερήχων, χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις τρόποι(*Ματίκας, Αγγελής, 2015*):

- **A- Scan :** Κατά την απεικόνιση με τρόπο σάρωσης A παρουσιάζεται το ποσό της ενέργειας των υπερήχων που λαμβάνεται ως συνάρτηση του χρόνου ή του βάθους σε ένα σημείο του υπό έλεγχο δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός του μεγέθους κάποιας βλάβης της δομής του εξεταζόμενου αντικειμένου υπολογίζεται μέσω της σύγκρισης του πλάτους του σήματος που προκύπτει από τη βλάβη με εκείνο ενός γνωστού βαθμονομημένου ανακλαστήρα.
- **B- Scan :** Ως σάρωση B ορίζεται η λήψη μίας σειράς σάρωσης A μέσω αισθητήρα σε μία γραμμή κατά μήκος του υπό εξέταση υλικού και παρουσίαση των αποτελεσμάτων ως συνάρτησης του χρόνου
- **C- Scan :** Όταν πραγματοποιείται κίνηση του αισθητήρα παράλληλα της επιφάνειας του υπό εξέταση υλικού και η μεγαλύτερη τιμή του σήματος που λαμβάνεται, σχεδιάζεται βάση του σημείου που βρίσκεται ο αισθητήρας, τότε δημιουργείται η εικόνα C- Scan.

Όπως όλες οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου, έτσι και η μέθοδος των υπερήχων αποτελεί μία τεχνική με πολλά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα, τα οποία αναφέρονται επιγραμματικά στη συνέχεια(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Πλεονεκτήματα

- Η μεγάλη διεισδυτική ικανότητα των υπερήχων μπορεί να περιγράψει ατέλειες στη δομή των υλικών σε αρκετά μεγάλο βάθος.
- Παρέχεται μεγάλη ακρίβεια σχετικά με τη θέση, το μέγεθος των ατελειών, της μορφής τους και του τύπου τους.
- Απαιτείται η πρόσβαση σε μόνο τη μία πλευρά του υπό εξέταση υλικού.
- Τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν δυνατότητα υψηλής ευκρίνειας απεικονίσεων.
- Υπάρχει δυνατότητα ανίχνευσης ακόμη και πολύ μικρών ατελειών.
- Τα αποτελέσματα μπορούν να υποστούν μετέπειτα ψηφιακή επεξεργασία.
- Φορητός εξοπλισμός.
- Ασφάλεια για τους χειριστές του συστήματος.

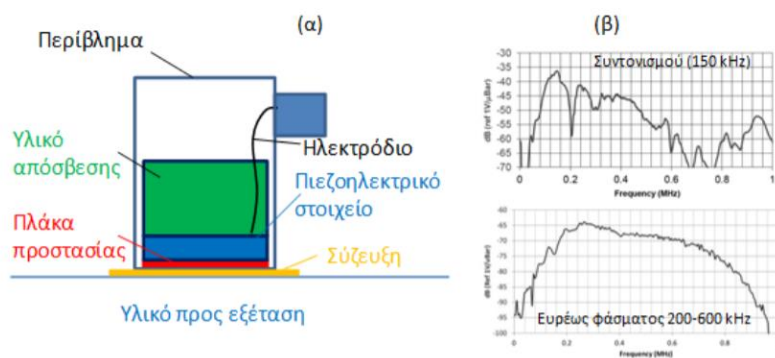
Μειονεκτήματα

- Δεν παρέχεται μόνιμη καταγραφή των δεδομένων.
- Τα αποτελέσματα της μεθόδου απαιτούν ερμηνεία από έμπειρους επιστήμονες.
- Υπάρχει περιορισμός ως προς τα αντικείμενα που μπορούν να ελεγχθούν(πχ αντικείμενα με τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα κλπ δημιουργούν δυσκολία στην εξέταση τους).
- Αναγκαιότητα ύπαρξης προσπελάσιμης επιφάνειας του αντικειμένου ελέγχου.
- Οι ατέλειες οι οποίες βρίσκονται σε περιοχές ακριβώς κάτω από την επιφάνεια , είναι δύσκολο να ελεγχθούν.
- Ασυνέχειες οι οποίες βρίσκονται παράλληλα της δέσμης των υπερήχων δεν ανιχνεύονται εύκολα.
- Απαιτείται η ύπαρξη προτύπων αναφοράς τόσο για τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού όσο και για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών.

2.6 Ακουστική Εκπομπή

Η ακουστική μέθοδος αποτελεί μια ελπιδοφόρα τεχνική όσον αφορά το μη καταστροφικό έλεγχο της δομικής κατάστασης υφιστάμενων κατασκευών. Η βάση της στηρίζεται στην καταγραφή και τη μελέτη ελαστικών κυμάτων τα οποία διεγείρονται από τις εσωτερικές βλάβες των δομών που ελέγχονται. Τα σήματα αυτά καταγράφονται και βοηθούν στην παροχή πληροφοριών χρήσιμων για την τοποθεσία της βλάβης καθώς και την πηγή της.

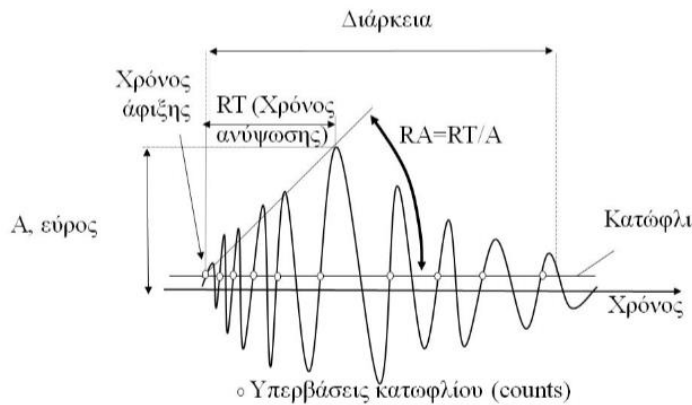
Αναλυτικότερα, η τεχνική της ακουστικής εκπομπής έχει ως στόχο την ανίχνευση και στη συνέχεια την καταγραφή των ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται μέσω μη αντιστρεπτών διαδικασιών σε ένα υλικό (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να είναι ρωγμές, ασυνέχειες, αποκολλήσεις, διαβρώσεις ή διαρροές. Στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού τοποθετούνται αισθητήρες (αφού έχει προηγηθεί τοποθέτηση κάποιου τζελ ως μέσου σύζευξης), οι οποίοι συντελούν στη μετατροπή κάθε μεταβολής της πίεσης της επιφάνειας τους σε ηλεκτρική κυματομορφή. Στη συνέχεια πραγματοποιείται τροφοδοσία αυτών των σημάτων στον προενισχυτή και στην κάρτα καταγραφής, ενώ μετρούνται οι κύριοι παράμετροι της κυματομορφής σε πραγματικό χρόνο (Grosse, Ohtsu, 2008) (Ματίκας, Αγγελής, 2015).



Εικόνα 8 : (α) Τυπικός αισθητήρας Α.Ε , (β) αισθητήρας συντονισμού (πάνω) και ευρέως φάσματος (κάτω) (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Τα πόσα σήματα καταγράφηκαν υποδηλώνουν την έκταση της βλάβης καθώς και τον αριθμό των ρωγμών στο υλικό και είναι το σημαντικότερο στοιχείο της μεθόδου αυτής. Επιπροσθέτως το σχήμα και η μορφή της κυματομορφής που έχει καταγραφεί παρέχει

σημαντικά στοιχεία της πηγής του σήματος. Οι βασικές παράμετροι μίας ΑΕ κυματομορφής παρουσιάζονται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9 : Αναπαράσταση κυματομορφής(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

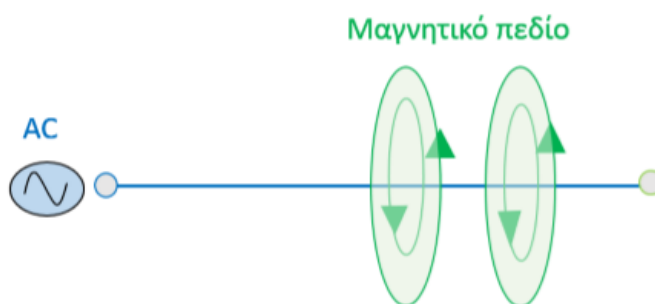
Το «κατώφλι» είναι βασικό στοιχείο του πειράματος, μια τιμή τάσης η οποία όταν ξεπεραστεί θα οδηγήσει στην αρχή της καταγραφής. Το εύρος, είναι η τάση στο υψηλότερο σημείο της κυματομορφής. Το χρονικό διάστημα από τη πρώτη υπέρβαση κατωφλίου μέχρι και τη μέγιστη κορυφή, καλείται ως χρόνος ανύψωσης. Αντίστοιχα διάρκεια θεωρείται το χρονικό διάστημα από τη πρώτη μέχρι τη τελευταία υπέρβαση του κατωφλίου(Ματίκας, Αγγελής, 2015). Το περιεχόμενο συχνότητας έχει και αυτό ιδιαίτερη σημασία και διάφοροι παράμετροι χρησιμοποιούνται ώστε να επεξεργαστεί καταλλήλως αυτή η πληροφορία. Η απλούστερη παράμετρος είναι η μέση συχνότητα, ενώ άλλες είναι η μέγιστη συχνότητα και η κεντρική συχνότητα. Μετά την ολοκλήρωση μίας κυματομορφής για να γίνει σωστά η μέτρηση των παραπάνω απαιτείται μετασχηματισμός Fournier σε πραγματικό χρόνο(Grosse, Ohtsu, 2008).Ο τρόπος σύμφωνα με τον οποίο εξάγονται οι απαιτούμενες πληροφορίες από τις μετρήσεις, εξαρτάται από τη πειραματική διάταξη, την εφαρμογή, και τις προτιμήσεις του χρήστη.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής για τον μην καταστροφικό χαρακτηρισμό υλικών και δομών θεωρείται ως μία τεχνική καθολικού ελέγχου, καθώς με έναν

μικρό αριθμό αισθητήρων είναι δυνατό να αξιολογηθεί ένα μεγάλο μέρος της κατασκευής. Αντίθετα η παρόμοια τεχνική των υπερήχων θεωρείται ως σημειακή μέθοδος μιας και καταγράφει δεδομένα μόνο τοπικά. Εφόσον η τεχνική της ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση θραύσης, είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί εξωτερικό μηχανικό ή θερμικό φορτίο έτσι ώστε να ακολουθήσει κινητικότητα στις υπάρχουσες ρωγμές της κατασκευής ή του δοκιμίου. Επιπρόσθετα σε αντίθεση με τους υπερήχους η ακουστική εκπομπή δεν είναι μια επαναλήψιμη μέθοδος μιας και κάθε γεγονός θραύσης είναι μοναδικό. Τέλος, η ύπαρξη ή μη θορύβου κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του στόχου και στην καλύτερη κατανόηση της υπάρχουσας δομικής κατάστασης. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στον έλεγχο κατασκευών στο πεδίο καθώς αστάθμητοι περιβαλλοντικοί παράγοντες ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

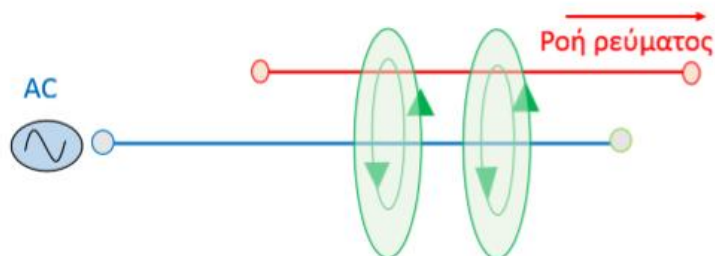
2.7 Δινορεύματα

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή αποτελεί τη βασική αρχή που διέπει τη δημιουργία των δινορευμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου ρεύματος σε έναν αγωγό αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο γύρω και μέσα από τον αγωγό (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η επέκταση αυτού του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται μέσω της αύξησης του εναλλασσόμενου ρεύματος ως το μέγιστο και η σύμπτυξη του πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της μείωσης του ρεύματος στο μηδέν. (Ματίκας, Αγγελής, 2015).



Εικόνα 10 : «Παρουσίαση της ανάπτυξης μαγνητικού πεδίου σε έναν αγωγό από τον οποίο διέρχεται εναλλασσόμενο ρεύμα»(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Η εισροή ενός δεύτερου ηλεκτρικού αγωγού στο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του πρώτου, θα προκαλέσει αποτέλεσμα αντίθετο σε σχέση με πριν.



Εικόνα 11 : «Δημιουργία επαγωγικού ρεύματος σε αγωγό που εισέρχεται σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο»(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Για τη δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων για τον μη καταστροφικό έλεγχο υλικών είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος αισθητήρας. Σύμφωνα με τους Ματίκα και Αγγελή, «στο εσωτερικό του αισθητήρα υπάρχει ηλεκτρικός αγωγός που σχηματίζει ένα πηνίο. Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα, IP , ρέει σ' ένα πηνίο με συχνότητα που επιλέγεται για το συγκεκριμένο έλεγχο, τότε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στο πηνίο. Όταν το πηνίο τοποθετείται κοντά σε έναν αγωγό (που είναι το υπό έλεγχο υλικό), δευτερογενή δινορεύματα, IS , παράγονται στον αγωγό αυτόν. Τα δινορεύματα παράγουν ένα δευτερογενές πεδίο που αντιτάσσεται στο πρωτογενές πεδίο του πηνίου. Το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο πηνίο (πρωτογενές πεδίο) έχει πυκνότητα ροής BP , και το δευτερογενές μαγνητικό πεδίο που προκαλείται στον αγωγό (δοκίμιο), έχει πυκνότητα ροής BS » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Όσον αφορά τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, διαχωρίζονται στα αναλογικά και τα ψηφιακά(Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η εξέταση των ψηφιακών μέτρησης στοχεύει κυρίως σε ένα ειδικό χαρακτηριστικό των υλικών, όπως η αγωγιμότητα, ενώ αντίθετα τα αναλογικά όργανα μέτρησης δύναται να χρησιμοποιηθούν σε

μεγάλο εύρος διαφορετικών ελέγχων όπως ανίχνευση ρωγμών, μέτρηση του πάχους των υλικών, κλπ.

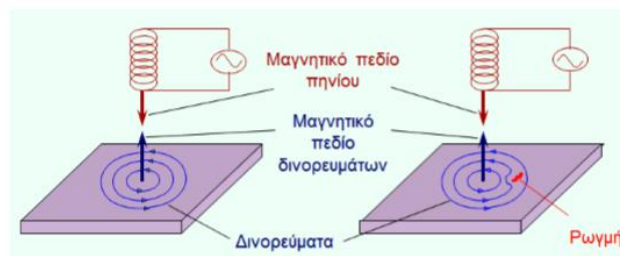


Εικόνα 12 : (α) Ψηφιακό όργανο, (β) Αναλογικό όργανο(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και πριν πραγματοποιηθεί η επιλογή τους είναι αναγκαίο να λαμβάνονται κάποιοι παράγοντες υπόψη. Σύμφωνα με τους Ματίκα και Αγγελή αυτοί είναι:

- «Βάθος διείσδυσης» (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Ευαισθησία» (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Τύπος σύνδεσης του αισθητήρα με το όργανο μέτρησης δινορευμάτων» (Ματίκας, Αγγελής, 2015)
- «Αντιστοιχία της εμπίδησης του αισθητήρα με αυτή του οργάνου μέτρησης» (Ματίκας, Αγγελής, 2015)
- «Μέγεθος αισθητήρα»(Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Τύπος αισθητήρα» (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Η τεχνική των δινορευμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά την ανίχνευση ρωγμών, καθώς η ύπαρξη τους θα δημιουργήσει διαταραχές της κυκλικής ροής του επαγωγικού ρεύματος και θα αποδυναμωθεί η ισχύς τους. Τις μεταβολές αυτές της ισχύος των δινορευμάτων δύναται να τις ανιχνεύσει ο αισθητήρας(Ματίκας, Αγγελής, 2015) (Burrows, 1964).



Εικόνα 13 : Ανίχνευση ρωγμής(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια από τα πλεονεκτήματα καθώς και οι περιορισμοί που συνοδεύουν την τεχνική των δινορευμάτων (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Πλεονεκτήματα

- Μέθοδος ευαίσθητη σε μικρές ασυνέχειες και βλάβες.
- Ανίχνευση επιφανειακών και υποεπιφανειακών ελαττωμάτων.
- Αμεσότητα αποτελεσμάτων.
- Φορητότητα.
- Ελάχιστος χρόνος προετοιμασίας του εξεταζόμενου αντικειμένου.
- Έλεγχος αγωγίμων υλικών σύνθετου σχήματος και μεγέθους.
- Μη απαίτηση αναλώσιμων.
- Ποικιλία επιλογής αισθητήρων.
- Μέθοδος αυτοματοποιημένης λειτουργίας.

Μειονεκτήματα

- Έλεγχος μόνο αγωγίμων υλικών.
- Αναγκαιότητα ύπαρξης προσπελάσιμης επιφάνειας στους αισθητήρες.
- Απαίτηση περισσότερης ικανότητας και κατάρτισης του προσωπικού σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.
- Πιθανή πρόκληση παρεμβολών λόγω τραχύτητας της επιφάνειας μελέτης.
- Απαίτηση πρότυπων αναφοράς.
- Αναγνώριση ατελειών μόνο σε μικρό βάθος.
- Δυσκολία ανίχνευσης αποκολλήσεων λόγω της παραλληλότητας τους προς τον αισθητήρα

Κεφάλαιο 3 – Υπέρυθρη Θερμογραφία

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το βασικό θέμα της διπλωματικής διατριβής, το οποίο πραγματεύεται την πρακτική της υπέρυθρης θερμογραφίας ως μη καταστροφικής μεθόδου ελέγχου της δομικής υγείας κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα είναι ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα δομικά υλικά και αντιπροσωπεύει πάνω από το 50% των υπαρχόντων κτιρίων ανά τον κόσμο. Αν και οι κατασκευές από σκυρόδεμα διακρίνονται για την υψηλή τους θλιπτική αντοχή δεν ισχύει το ίδιο και την εφελκυστική τους αντοχή. Αποτέλεσμα αυτής της ευαισθησίας των κατασκευών αυτών στις τάσεις εφελκυσμού είναι να δημιουργούνται ρωγμές και ασυνέχειες. (Jang, Kyu An, 2018)

Οι ρωγμές αποτελούν κομμάτι άμεσα συνδεδεμένο με τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος καθώς επιδεικνύουν οπτικά την παραμορφωσιμότητα του φορέα. Οι ρωγμές διαχωρίζονται σε ενεργές και ανενεργές ρωγμές. Η ύπαρξη ενεργών ρωγμών στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος προκαλεί ανησυχία για τη δομική υγεία της δομής, καθώς λόγω των συνεχιζόμενων μετακινήσεων αυξάνεται το μήκος και το εύρος τους (Καλλιανιώτης, 2009). Αντιθέτως, η ύπαρξη μη-ενεργών ρωγμών δεν οδηγεί στην παρουσίαση περαιτέρω μετακινήσεων και ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται μόνο στις περιπτώσεις εμφάνισης υγρασίας που θα οδηγήσει στη διάβρωση των οπλισμών. Η αναγνώριση του ανεκτού εύρους των ρωγμών στις κατασκευές σκυροδέματος εξαρτάται από τη φύση των χρησιμοποιούμενων επιχρισμάτων αλλά και από τη χρήση της κατασκευής που εξετάζεται (Καλλιανιώτης, 2009). Σε κάθε περίπτωση ύπαρξης ρωγμών κρίνεται απαραίτητο να υπάρξει επανέλεγχος αλλά και επεμβάσεις όταν αυτές απαιτούνται. Οι δομές σκυροδέματος περιέχουν ενδογενή ελαττώματα, όπως πόρους γεμάτους με νερό, κενά αέρα, κλπ. Όλα αυτά τα ελαττώματα προκαλούν μικρορωγμές ακόμη και πριν από την επιβολή κάποιου φορτίου και οφείλονται στο ότι το σκυρόδεμα δεν είναι ομοιογενές υλικό. Αυτά τα ελαττώματα, και ειδικά οι μικρές ρωγμές, αναπτύσσονται σταθερά κάτω από εξωτερική φόρτιση, συνενώνονται με υπάρχουσες ή νεοσύστατες ρωγμές με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες θραύσεις που οδηγούν στην κατάρρευση της δομής. Όταν μάλιστα υπάρξει και κάποιο εξωτερικό στατικό φορτίο, γύρω από αυτές τις περιοχές των ρωγμών θα εφαρμοστούν τάσεις πολύ υψηλότερες από ότι στην υπόλοιπη δομή με αποτέλεσμα να υπάρξει αστοχία. (Sih, DiTommasso, 1985)

Με δεδομένο το γεγονός ότι οι υπόλοιπες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου κατασκευών, όπως οι μέθοδοι των ραντάρ, των υπερήχων καθώς οι ηχητικές μέθοδοι είναι κυρίως κατάλληλες για την ανίχνευση, τον χαρακτηρισμό και την εύρεση ρωγμών, ασυνεχειών και ανομοιογενειών βαθύτερα από 5 έως 10 cm, η θερμογραφία υπέρυθρου μπορεί και ελέγχει με αποτελεσματικότητα τις περιοχές κοντά στην επιφάνεια του υλικού και μέχρι το βάθος των 10 cm. (Milovanović , Banjad Pećur, 2016)

Εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας πραγματοποιείται από όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδέν. Η συγκεκριμένη τεχνική οδηγεί στην ανίχνευση της θερμότητας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, στη συνέχεια οδηγεί στη μετατροπή της σε θερμοκρασία και τέλος αυτή απεικονίζεται ως θερμογράφημα .

3.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία της υπέρυθρης ακτινοβολίας ξεκίνησε το 1593 και πήρε πολλά χρόνια έτσι ώστε να επιτευχθεί το επίπεδο χρήσης το οποίο υπάρχει στη σημερινή εποχή. Ο Jean Batista Della Porta από τη Νάπολη της Ιταλίας στις μελέτες του απέδειξε ότι ο άνθρωπος μπορεί να αισθανθεί τη θερμότητα μέσω αντανάκλασης. Πιο συγκεκριμένα, τα λεγόμενα του τα απέδειξε μέσω ενός κεριού το οποίο τοποθέτησε μπροστά από ένα ασημένιο πιάτο, όταν λοιπόν απομάκρυνε το ασημένιο πιάτο από το κερί η αίσθηση της θερμότητας από τη φλόγα του κεριού μειώθηκε (Gabriel et al., 2012). Στη συνέχεια, το 1800, 200 περίπου χρόνια αργότερα ο William Herschel, ερασιτέχνης αστρονόμος στην Αγγλία άρχισε να ερευνά τις θερμαντικές δυνάμεις των ξεχωριστών χρωμάτων του φάσματος, προκειμένου να βελτιώσει τα οπτικά του βλέφαρα για τηλεσκόπια. Ο Βασιλικός Σύλλογος του Λονδίνου δημοσίευσε τα ευρήματα ότι η θερμομετρία μπορεί να ανιχνεύσει αυξημένη θερμοκρασία πέρα από το ορατό κόκκινο.

Το 1840, ο γιος του John Herschel , συνέχισε του πειράματα του πατέρα του και έκανε μία απλή εικόνα εξατμίζοντας ένα μίγμα άνθρακα και αλκοόλ χρησιμοποιώντας ηλιακό φως. Ονόμασε την εικόνα, θερμογράφημα. Ακόμα ένα σημαντικό πόρισμα δημοσιεύτηκε το 1935 όταν ο JD Hardy, ένας Αμερικανός φυσικός, έδειξε ότι η ανθρώπινη επιφάνεια του δέρματος έχει τα χαρακτηριστικά ενός σχεδόν τέλειου θερμαντικού σώματος, το οποίο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (Hardy, 1934). Στο μεταξύ, οι φυσικοί μελετούσαν

τους τρόπους μέσω των οποίων θα αυξήσουν την ευαισθησία της θερμομετρίας, ειδικά από τους ηλεκτρικούς αγωγούς και τα θερμοζεύγη. Ο Αμερικανός καθηγητής Samuel Langley συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη ενός βολόμετρου. Αυτό ήταν ένα μέσο τηλεπισκόπησης της θερμοκρασίας και αποτέλεσε τη βάση για μία νέα γενιά τεχνολογίας αισθητήρων θερμότητας. Στη Γερμανία, ο Marianus Czerny, ο οποίος ήταν καθηγητής φυσικής στο πανεπιστήμιο της Φρανκφούρτης, έθεσε τη βάση για τη δημιουργία θερμικών αισθητήρων. Ένας από τους μαθητές του, ο Bowling Barnes πήγε στην Αμερική και κατασκεύασε την πρώτη θερμική απεικόνιση στη δεκαετία του 1950.

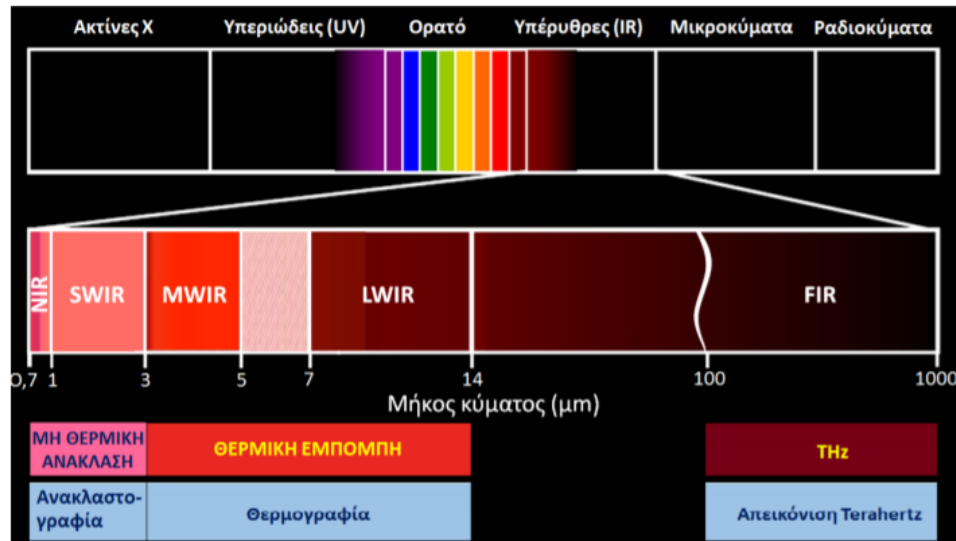
Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και του 1960, η Texas Instruments, η Hughes Aviation και η Honeywell ανέπτυξαν ανιχνευτές ενός στοιχείου που σάρωναν σκηνές και παρήγαγαν εικόνες γραμμών. Ο στρατός είχε κλειδώσει την τεχνολογία επειδή ήταν ακριβή και είχε ευαίσθητες στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτοί οι βασικοί ανιχνευτές οδήγησαν στην ανάπτυξη σύγχρονης θερμικής απεικόνισης. Είναι γεγονός ότι τα πρώτα χρόνια εφαρμογής της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποσκοπούσαν κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές τόσο από τον γερμανικό άξονα όσο και από τις συμμαχικές δυνάμεις. Αυτό άλλαξε κατά την πρώτη δεκαετία του 1960, όπου η θερμογραφία άρχισε να χρησιμοποιείται και για ειρηνικούς σκοπούς και ξεκίνησε η έρευνα ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί και στον κλάδο της αρχιτεκτονικής-μηχανικής.

3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ανάλογα με το μήκος κύματος του κάθε τύπου ακτινοβολίας που παράγεται πραγματοποιείται ο διαχωρισμός τους στις διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η θερμογραφία εντάσσεται στη ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ζώνη των υπέρυθρων συχνά υποδιαιρείται σε πέντε μικρότερες ζώνες. Αυτές ταξινομούνται ως εξής(Ματίκας, Αγγελής, 2015):

- «Ζώνη των εγγύς υπέρυθρων (*Near Infrared – NIR*) με μήκη κύματος $0,7-1 \mu\text{m}$ » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Ζώνη υπέρυθρων βραχέος μήκους κύματος (*Short Wave Infrared – SWIR*) με μήκη κύματος $1-3 \mu\text{m}$ » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Ζώνη υπέρυθρων μεσαίου μήκους κύματος (*Medium Wave Infrared – MWIR*) με μήκη κύματος $3-5 \mu\text{m}$ » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

- «Ζώνη υπερύθρων μακρού μήκους κύματος (Long Wave Infrared – LWIR) με μήκη κύματος 7–14 μm » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- «Ζώνη των μακρινών υπερύθρων (Far Infrared – FIR) με μήκη κύματος 100–1000 μm » (Ματίκας, Αγγελής, 2015).



Εικόνα 14 : Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν είναι εφικτό να ανιχνευθεί από το ανθρώπινο μάτι, όμως οι ζώνες των υπερύθρων μεσαίου και μακρού μήκους κύματος δύναται να γίνουν αντιληπτές με τη αίσθηση της αφής ως θερμότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμότητα της οποία γίνεται εύκολα αντιληπτή από τον άνθρωπο.

3.3 Μεταφορά θερμότητας

➤ Μεταφορά θερμότητας με διάχυση

Για τη μεταφορά θερμότητας με διάχυση απαιτείται να υπάρξει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των μαζών δύο ρευστών ή ενός στερεού και ενός ρευστού. Η διάχυση διαχωρίζεται στη φυσική διάχυση, όπου η κίνηση αυτών των μαζών πραγματοποιείται σε κάποιο φυσικό μέσο, στο οποίο

αναπτύσσονται θερμοκρασιακές διαφορές ή διαφορές στην πυκνότητα και στην εξαναγκασμένη διάχυση, όπου η κίνηση των μαζών πραγματοποιείται με “βίαιο” τρόπο. Οι συνθήκες που οδηγούν σε εξαναγκασμένη διάχυση είναι εξαρτώμενες του είδους, των φυσικών ιδιοτήτων, της ταχύτητας ροής και της θερμοκρασίας του ρευστού, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του σώματος πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η διάχυση (Τσανάκας, 2013).

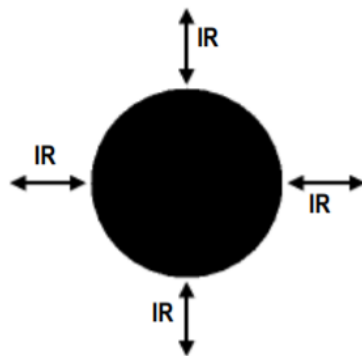
➤ **Μεταφορά θερμότητας με αγωγή**

Για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι απαραίτητο να υπάρξει άμεση επαφή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων ή τμημάτων αυτών. Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, ο τρόπος που μεταφέρεται η θερμότητα από ένα υλικό σε ένα άλλο, πραγματοποιείται από το υλικό που έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία στο υλικό που έχει πιο χαμηλή και η δυσκολία της διαδικασίας αυτής είναι ανάλογη με το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του κάθε σώματος.

➤ **Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα σώματα που έχουν θερμοκρασία πιο υψηλή από το απόλυτο μηδέν, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του τόσο μεγαλύτερη θερμότητα εκπέμπει προς το περιβάλλον. Για να μεταφερθεί θερμότητα μέσω ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού ενδιάμεσα. Για να καταστεί εφικτό να πραγματοποιηθεί χαρακτηρισμός της θερμικής ακτινοβολίας από πραγματικές επιφάνειες πρέπει αυτές να συγκριθούν με το μέλαν σώμα. Μέλαν σώμα ορίζεται το αντικείμενο το οποίο έχει την ικανότητα απορρόφησης όλης της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας.

Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του σώματος αυτού είναι η ιδανική επιφάνεια, καθώς είναι ικανό να απορροφήσει και στη συνέχεια να μεταβιβάσει με βέλτιστο τρόπο τη θερμότητα. Πρέπει να επισημανθεί ότι στην πράξη τα μέλανα σώματα δεν υπάρχουν, επομένως χρησιμοποιούνται ιδεατά ώστε να υπολογιστεί η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία και στη συνέχεια να συγκριθεί η θερμική ακτινοβολία από πραγματικά σώματα ως προς αυτήν (Τσανάκας, 2013).

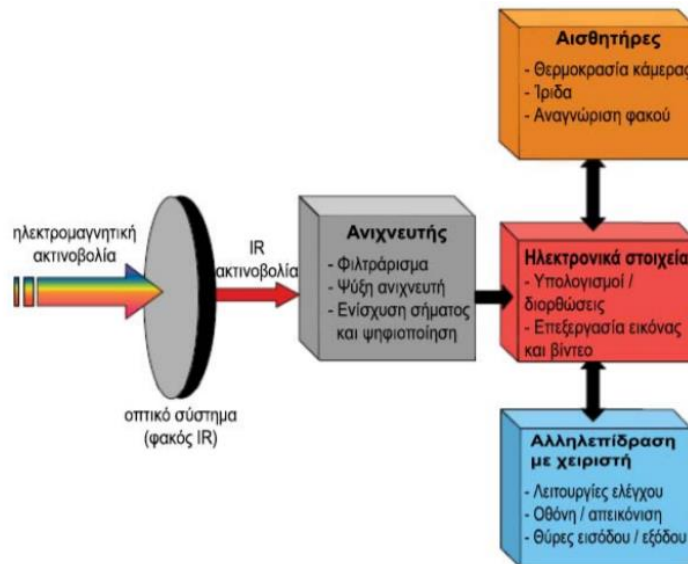


Εικόνα 15: Μέλαν σώμα(Τσανάκας, 2013)

3.4 Βασικές Αρχές Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Η υπέρυθρη θερμογραφία καλείται ως η μέθοδος η οποία προσδιορίζει τη χωρική κατανομή και τη χρονική εξάρτηση της θερμότητας στα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται υπό εξέταση. Η βασική αρχή που την διέπει είναι ο μετασχηματισμός μίας εικόνας υπέρυθρης ακτινοβολίας, μέσω του συστήματος απεικόνισης, σε μία εικόνα ορατού φως.(Τσανάκας, 2013) Αυτά τα συστήματα απεικόνισης δημιουργούν μη καταστροφικές μετρήσεις θερμοκρασιών, μέσω της οπτικοποίησης υπέρυθρων ακτίνων. Μέσω λοιπόν της υπέρυθρης απεικόνισης δεν απεικονίζεται απ' ευθείας η θερμοκρασία της επιφάνειας ενός υλικού αλλά μετράται η μεταβολή της επιφανειακής της ακτινοβολίας υπερύθρου. Λόγω ατελειών, ασυνεχειών, κλπ σε ένα υλικό, πολλές φορές παρατηρούνται τοπικές διαφορές στην επιφανειακή του θερμοκρασία και μέσω της υπέρυθρης θερμογραφίας καθίσταται δυνατό να ανιχνευθούν τόσο οι θέσεις τους όσο και η σοβαρότητα αυτών για το αντικείμενο.

Στην εικόνα 16 παρουσιάζονται τα κύρια μέρη των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την υπέρυθρη θερμογραφία. Από τη συνολική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία διαχέεται, η ακτινοβολία υπερύθρου του εξεταζόμενου αντικείμενου συλλέγεται μέσω του οπτικού συστήματος της θερμικής κάμερας στη συνέχεια φιλτράρεται και καταλήγει σε κάποιο ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας ο οποίος και την μετατρέπει σε θερμική εικόνα.



Εικόνα 16 : Βασικά τμήματα υπέρυθρης απεικόνισης(Τσανάκας, 2013)

3.5 Τύποι θερμικών καμερών

Οι θερμικές κάμερες χωρίζονται σε δύο βασικά είδη:

1. Το πρώτο είδος περιλαμβάνει τις θερμικές κάμερες των οποίων οι ανιχνευτές της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ψυχόμενοι. Οι εν λόγω ανιχνευτές τοποθετούνται εν κενό σε ειδικές θήκες με κρυογενή ψύξη , γεγονός το οποίο αυξάνει σε σημαντικό βαθμό της ευαισθησία τους, μιας και η θερμοκρασία των εξεταζόμενων αντικειμένων είναι μεγαλύτερη από ότι σε αυτούς.

Σημαντικό μειονέκτημα αυτού του είδους των θερμικών καμερών αποτελεί το κόστος που απαιτείται για να παραχθούν και να λειτουργήσουν. Η διαδικασία για τη ψύξη και της κένωση είναι τόσο ενεργοβόρα όσο και χρονοβόρα λόγω της αναγκαιότητας της θερμικής κάμερας να ψυχθεί για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να τεθεί σε λειτουργία(Τσανάκας, 2013). Μπορεί οι διατάξεις που αφορούν τη ψύξη και τον έλεγχο να είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων ογκώδεις και με πολύ υψηλό κόστος, όμως σε σύγκριση με τις θερμικές κάμερες μη ψυχόμενων ανιχνευτών, παρέχουν άριστης ποιότητας θερμογραφήματα. Για να πραγματοποιηθεί η ψύξη του ανιχνευτή η βασική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι η χρήση υψηλής καθαρότητας

αζώτου σε υψηλή πίεση (Τσανάκας, 2013). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των αισθητήρων είναι τα βολόμετρα πυριτίου, τα οποία ψύχονται με υγρό ήλιο και με μεγάλη ποικιλία από φθηνότερες ημιαγωγικές διατάξεις στενού διακένου (Τσανάκας, 2013).

2. Στο δεύτερο είδος, ανήκουν οι θερμικές κάμερες μη ψυχόμενων ανιχνευτών. Οι θερμικές κάμερες αυτού του είδους χρησιμοποιούν είτε έναν αισθητήρα με λειτουργία σε θερμοκρασία ίδια με το περιβάλλον είτε έναν αισθητήρα ο οποίος βρίσκεται σταθεροποιημένος σε θερμοκρασία κοντά σε αυτήν του περιβάλλοντος. Οι σύγχρονοι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν αισθητήρια τα οποία λειτουργούν βάσει της μεταβολής της αντίστασης, του ρεύματος ή της τάσης τους κατά τη διάρκεια της προσβολής και της θέρμανσης τους από υπέρυθρη ακτινοβολία (Τσανάκας, 2013). Στη συνέχεια πραγματοποιείται μέτρηση αυτών των μεταβολών και σύγκριση τους με τη θερμοκρασία λειτουργίας των αισθητηρίων.

Λόγω του ότι για τις συγκεκριμένες θερμικές κάμερες δεν απαιτείται ψύξη σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν είναι απαραίτητη η χρήση των ενεργοβόρων και με υψηλό κόστος κρυογενικών ψυκτικών, συνεπώς μειώνεται κατά πολύ το κόστος αγοράς και λειτουργίας τους. Η κατασκευή αυτής της τεχνολογίας ανιχνευτών βασίζεται ως επί το πλείστον στα πυροηλεκτρικά και φεροηλεκτρικά υλικά, καθώς και στη μικροβολομετρική τεχνολογία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των συστοιχιών των ανιχνευτών είναι η άμορφη σιλικόνη, το λανθάνιο μαγγανικό βαρίου, το ζirkονικό-τιτανικό άλας μολύβδου κ.α .

Λόγω της αυξημένης χρήσης τους, τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες εταιρίες κατασκευάζουν διαφορετικού τύπου θερμικές κάμερες καθώς κάθε τύπος από αυτές εξυπηρετεί εφαρμογές συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Έτσι, για να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα θερμικής απεικόνισης είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη από τον χρήστη τα ακόλουθα κριτήρια επιλογής. (Botsaris, Tsanakas, 2008)

1. **Φορητότητα** : Σε αρκετές περιπτώσεις το βάρος και η φορητότητα είναι ζητήματα ύψιστης σημασίας ανάλογα και με την εφαρμογή και την τοποθεσία του εξεταζόμενου αντικειμένου.

2. **Ευχρηστία :** Λόγω της πολυπλοκότητας της συγκεκριμένης μεθόδου είναι σημαντικό τη χρήση της θερμικής κάμερας να συνοδεύει κάποιο πρακτικό λογισμικό το οποίο θα επεξεργάζεται τις θερμικές εικόνες και θα εξάγει με βέλτιστο τρόπο τις θερμογραφικές αναφορές.
3. **Ποιότητα θερμικής κάμερας:** Καθοριστικός παράγοντας για τη σωστή θερμογράφιση των αντικειμένων ελέγχου αποτελεί η ύπαρξη στη θερμικών καμερών συγκεκριμένων προδιαγραφών όπως, υψηλή ανάλυση των θερμικών εικόνων και της θερμοκρασίας, μετρήσεις καθορισμένων περιοχών, μεγάλο εύρος μετρούμενης θερμοκρασίας κλπ.
4. **Απομακρυσμένος έλεγχος :** Η δυνατότητα χρήσης της θερμικής κάμερας από απόσταση σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία καθώς είτε λόγω έλλειψης χώρου είτε λόγω ότι το εξεταζόμενο αντικείμενο βρίσκεται σε περιβάλλον δυσμενές για τον άνθρωπο, δεν είναι εφικτή η άμεση πρόσβαση στο αντικείμενο μελέτης.
5. **Αυτονομία :** Σε περιπτώσεις μετρήσεων μεγάλων χώρων σε απομακρυσμένες περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικό η επιλεγμένη θερμική κάμερα να διαθέτει συσσωρευτές με μεγάλη διάρκεια ζωής.
6. **Κόστος :** Σημαντικός, τέλος, είναι και ο παράγοντας της αγοράς, της λειτουργίας και της συντήρησης του εξοπλισμού που απαιτείται για την θερμική απεικόνιση.

3.6 Χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας στον κλάδο της μηχανικής-αρχιτεκτονικής

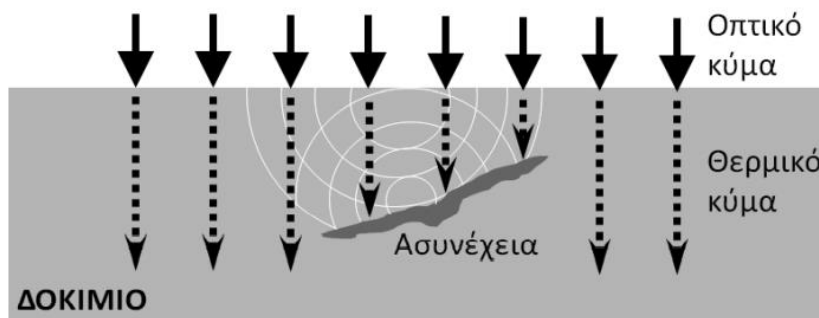
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η χρήση της θερμογραφικής απεικόνισης τα πρώτα χρόνια αφορούσε κατά κύριο λόγο εφαρμογές του στρατού, όμως στη συνέχεια η χρήση της βρήκε πρακτική και σε άλλους τομείς όπως της ιατρικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αρχιτεκτονικής-μηχανικής.

Το γεγονός ότι αποτελεί μια μεθοδολογία η οποία δεν απαιτεί την επαφή του χρήστη με το εξεταζόμενο αντικείμενο (Μη καταστροφική μέθοδος επιθεώρησης) έχει προσδώσει σημαντικά πλεονεκτήματα στη χρήση της για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας υφιστάμενων δομών. Πιο συγκεκριμένα, η έλλειψη επαφής αποτρέπει το υπό επιθεώρηση αντικείμενο σε οποιαδήποτε μορφή αλλοίωση της κατάστασης του, στοιχείο ιδιαίτερο σημαντικό καθώς

ορισμένες φορές τα εξεταζόμενα αντικείμενα αποτελούν μνημειακές κατασκευές, πολύτιμα έργα τέχνης κ.α. Επίσης η έλλειψη επαφής διευκολύνει και προστατεύει από οποιοδήποτε κίνδυνο τον χειριστή της θερμικής κάμερας και του δίνει τη δυνατότητα ταχείας επιθεώρησης μεγάλης έκτασης επιφανειών, όπως μια πρόσοψη ενός κτιρίου.(Meola, 2013) Η πρώτη χρήση της θερμογραφικής απεικόνισης ως μίας μη καταστροφικής μεθόδου χρονολογείται στις αρχές του περασμένου αιώνα αλλά λόγω της περιπλοκότητας και της δυσκολίας ερμηνείας των θερμογραμμάτων δεν είχε ευρεία χρήση.

Η δεκαετία του 1980 κατέστη σημαντική ως προς τη χρήση της μεθόδου καθώς έγινε κατανοητή η σημασία των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας για την ερμηνεία των εικόνων από τις θερμικές κάμερες. Η αυξημένη χρήση της τα επόμενα χρόνια λειτούργησε ως απαρχή για την κατασκευή νέων συσκευών υπέρυθρης ακτινοβολίας, οι οποίες διαφέρουν ως προς το βάρος, τις διαστάσεις, το σχήμα, την απόδοση και το κόστος, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι επιθυμίες πολλών χρηστών σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Παρότι κατασκευάστηκαν αυτές οι νέες συσκευές απαραίτητο στοιχείο για την πλήρη εκμετάλλευση της υπέρυθρης θερμογραφίας απαιτεί η κατανόηση της βασικής θεωρίας καθώς και η εφαρμογή των συνήθων διαδικασιών.(Meola, 2013)

Η κύρια χρήση της στον κλάδο του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών στηρίζεται στο γεγονός ότι οι υπό-επιφανειακές ατέλειες οι οποίες υπάρχουν σε κάποιο υλικό θα οδηγήσουν σε τοπικές διαφορές της επιφανειακής θερμοκρασίας του αντικειμένου ελέγχου. Αυτές οι διαφορές, μπορούν να προκληθούν λόγω των διαφορετικών βαθμών θερμικής μεταφοράς στις περιοχές ύπαρξης των ασυνεχειών (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η τεχνική της θερμογραφίας θα ανιχνεύσει τη θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του υλικού και στη συνέχεια θα οδηγήσει στην παραγωγή μιας οπτικής εικόνας μέσω του θερμικού σήματος, βάσει της οποίας πραγματοποιείται συσχέτιση του μεγέθους της εσωτερικής ασυνέχειας (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Το μήκος κύματος που θα δημιουργηθεί από αυτήν τη διαδικασία αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αντικειμένου τόσο το μήκος κύματος που εκπέμπεται γίνεται βραχύτερο, ενώ στις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες βρίσκεται στο ορατό φάσμα. Αντίστοιχα όταν το υπό εξέταση αντικείμενο βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου, το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας βρίσκεται στην υπέρυθρη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



Εικόνα 17 : Βασική αρχή της θερμογραφίας υπερύθρου (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

3.7 Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία

Οι τρόποι που μεταδίδεται η θερμότητα αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο όμως ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το είδος του κάθε υλικού καθώς οι μηχανισμοί αυτοί μετάδοσης εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε αντικείμενου μελέτης. Συνοπτικά στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά αυτά που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο (Κορδάτος, 2013), (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

- **Ειδική θερμότητα(c) :** Η ειδική θερμότητα αναφέρεται στο ποσοστό θερμότητας που θα απορροφηθεί από τη μάζα του υλικού για ένα δεδομένο εύρος θερμοκρασίας.
- **Πυκνότητα(d) :** Η πυκνότητα μετράται ως η μάζα του κάθε υλικού ανά μονάδα όγκου.
- **Θερμική αγωγιμότητα(k) :** Η θερμική αγωγιμότητα αναφέρεται στη δυσκολία ή ευκολία που διαδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό κάποιου αντικειμένου.
- **Θερμική διάχυση(a) :** Η θερμική διάχυση αναφέρεται στη ταχύτητα μεταφοράς της θερμότητας από κάποια περιοχή στην οποία υπάρχει υψηλή θερμοκρασία στο υλικό.
- **Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας(h) :** Ο συντελεστής αυτός παρουσιάζει την αποτελεσματικότητα βάσει της οποίας ανταλλάσσεται η θερμότητα μεταξύ κάποιας επιφάνειας του αντικειμένου και μίας ροής υγρού ή αερίου.
- **Θερμοκρασία(t) :** Το χαρακτηριστικό αυτό αναφέρεται στη θερμική ενέργεια η οποία περιέχεται στο κάθε αντικείμενο.

- **Συντελεστής εκπομπής(e) :** Ο συντελεστής αυτός αναφέρεται στο πόσο αποδοτική είναι μία επιφάνεια ως θερμαντικό σώμα.

Η διαφορά στα χαρακτηριστικά αυτά από υλικό σε υλικό αποτελεί το πιο σημαντικό παράγοντα ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί σωστά η τεχνική της θερμογραφίας καθώς εξαρτάται από αυτά για τον ορισμό ενός διαφορικού θερμοκρασίας το οποίο να είναι μετρήσιμο (Ματίκας, Αγγελής, 2015) . Για παράδειγμα η θέρμανση ενός υπό εξέταση υλικού στο οποίο η πυκνότητα δεν είναι ίδια σε όλη του τη μάζα, τότε παρατηρείται αλλαγή θερμοκρασίας με πιο αργό τρόπο στις περιοχές υψηλότερης πυκνότητας (Ματίκας, Αγγελής, 2015) .

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι ο συντελεστής εκπομπής του κάθε υλικού. Μέσω του συντελεστή αυτού περιγράφεται το πόσο αποδοτική είναι μία επιφάνεια η οποία λειτουργεί ως θερμαντικό σώμα κατά τη διάρκεια που προσπίπτει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το μέλαν σώμα, το οποίο όπως προαναφέρθηκε εκπέμπει ακριβώς το ίδιο ποσό θερμότητας το οποίο προσπίπτει σε αυτό, έχει συντελεστή εκπομπής ίσο με το 1, ενώ όλα τα υπόλοιπα υλικά έχουν συντελεστή εκπομπής μικρότερο από τη μονάδα (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Ο συντελεστής εκπομπής σε κάθε αντικείμενο περιγράφει το λόγο της ενέργειας, η οποία θα ακτινοβοληθεί από αυτό, ως προς την ενέργεια η οποία θα ακτινοβολούταν αν αυτό το αντικείμενο ήταν μέλαν σώμα. Ο λόγος για τον οποίο τα υπόλοιπα αντικείμενα έχουν συντελεστή μικρότερο από τη μονάδα είναι το γεγονός ότι καθώς πραγματοποιείται η μετακίνηση της ενέργειας μέσα στο εσωτερικό του και προς την επιφάνεια, ορισμένη ποσότητα από αυτήν, λόγω ανάκλασης θα επιστρέψει και πάλι πίσω. Συνοπτικά, ο συντελεστής εκπομπής αποτελεί ένα συντελεστή ο οποίος σχετίζεται με την ενέργεια της ακτινοβολίας υπερύθρου, την οποία εκπέμπει το υλικό και όχι με τη θερμοκρασία αυτού και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι μπορούν να δημιουργήσουν λανθασμένα αποτελέσματα στη θερμογραφία εφόσον δεν μελετηθούν. Αυτοί οι παράγοντες αφορούν τόσο το ίδιο το υλικό, όσο και το χρήστη και την ικανότητα αυτού να εκτελέσει σωστά τη διαδικασία. Όσον αφορά το υλικό, παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το συντελεστή εκπομπής είναι το είδος του υλικού, καθώς κάθε υλικό έχει διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, το χρώμα του υλικού καθώς και η επιφάνεια του, για παράδειγμα ένα δοκίμιο το οποίο βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία θα δημιουργήσει διαφορές θερμοκρασίας στις περιοχές που η επιφάνεια του είναι τραχύτερη από τις υπόλοιπες. Επίσης σε περίπτωση που η τεχνική της θερμογραφίας πραγματοποιηθεί σε γωνίες του δοκιμίου καθώς και σε κοιλότητες

και οπές θα παρατηρηθεί αύξηση του συντελεστή εκπομπής λόγω ανάκλασης πολλαπλών διαδρομών.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι το μέγεθος του συντελεστή εκπομπής εξαρτάται από το βάθος και το εύρος της οπής, καθώς η αύξηση των στοιχείων αυτών οδηγεί και στην αύξηση του συντελεστή εκπομπής (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Όσον αφορά το χρήστη της θερμικής κάμερας ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι η σωστή γωνία μέτρησης καθώς ο συντελεστής εκπομπής δεν διαφοροποιείται από την κάθετη γωνία πρόσπτωσης μέχρι και τις πενήντα μοίρες. Μετά το όριο των πενήντα μοιρών αρχίζει και μειώνεται και μετά τις εξήντα μοίρες μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, επομένως στις περιπτώσεις που απαιτείται η μέτρηση να γίνει υπό γωνία ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει ότι τα τμήματα που βρίσκονται πιο κοντά στη θερμική κάμερα θα έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτά που είναι απομακρυσμένα. (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Κοινές πρακτικές που χρησιμοποιούνται στην μη καταστροφική εξέταση των δομικών υλικών με θερμική κάμερα και αφορούν την αποφυγή κάθε προβλήματος που προκαλείται από το συντελεστή εκπομπής είναι ο προσεκτικός καθαρισμός των επιφανειών που πρόκειται να ελεγχθούν και η χρησιμοποίηση μαύρης βαφής καθώς το μαύρο χρώμα έχει υψηλό συντελεστή εκπομπής (0,90-0,98) επομένως και πολύ χαμηλή ανάκλαση.

3.8 Τεχνικές Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής θερμογραφικής απεικόνισης αποτελεί το βασικότερο παράγοντα για την πραγματοποίηση ακριβούς και αξιόπιστου ελέγχου. Οι δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών στις οποίες μπορεί να διαιρεθεί η εν λόγω μεθοδολογία είναι η παθητική και η ενεργητική προσέγγιση και η χρησιμοποίησή τους είναι ανάλογη με την ύπαρξη ή όχι του εξεταζόμενου αντικειμένου σε θερμική ισορροπία (Ματίκας, Αγγελής, 2015) .

- **Παθητική Προσέγγιση**

Η παθητική θερμογραφία αποτελεί τη μέθοδο η οποία δεν χρησιμοποιεί κάποια εξωτερική πηγή θέρμανσης για να πραγματοποιήσει τον έλεγχο υλικών και δομών. Αποτελεί μία τεχνική της οποίας η αποτελεσματικότητα προϋποθέτει την ύπαρξη αρκετής θερμικής αντίθεσης μεταξύ του περιβάλλοντος και του υπό εξέταση αντικειμένου έτσι ώστε να είναι εφικτό αυτή η αντίθεση να μετρηθεί με την υπέρυθρη θερμική κάμερα. Είναι γεγονός ότι η τεχνική της παθητικής

θερμογραφίας χρησιμοποιείται κυρίως για να πραγματοποιηθούν ποιοτικές μετρήσεις , καθώς κυρίαρχος στόχος είναι να ελεγχθούν μεγάλες επιφάνειες και να προσεγγιστούν τα σημεία εκείνα τα οποία δημιουργούν ενδεχόμενες «ανωμαλίες» ή βλάβες. Κατά κανόνα σε περιοχές οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ίδιο υλικό και βρίσκονται σε παραπλήσια θέση εάν παρατηρηθεί μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας θεωρείται ότι υπάρχει κάποια ρωγμή ή ασυνέχεια και απαιτούνται διαδικασίες αποκατάστασης-συντήρησης. Είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται αρκετά για την ανίχνευση υγρασίας σε κτίρια και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. (Ματίκας, Αγγελής, 2015) Η παθητική μέθοδος της ενεργής θερμογραφίας έχει ως κύριο πλεονέκτημα το γεγονός ότι είναι μία τεχνική φτηνή με φιλικότητα προς το περιβάλλον και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μεγάλων επιφανειών, αντίθετα τα μειονεκτήματα που τη συνοδεύουν είναι, ότι δημιουργείται σχετικά χαμηλή θερμαντική ισχύ επομένως και γίνεται δύσκολο το εγχείρημα του ελέγχου, επίσης σημαντικό μειονέκτημα είναι η άμεση σύνδεση της με τις καιρικές συνθήκες, τον προσανατολισμό της επιφάνειας ελέγχου καθώς και το χρώμα αυτής. (Milovanovi'c , Banjad Pe'cur , 2016)

- **Ενεργητική Προσέγγιση**

Σε αντίθεση με την τεχνική της παθητικής θερμογραφίας, όπου στο αντικείμενο ελέγχου πραγματοποιείται ανάπτυξη εσωτερικής θερμοκρασίας λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται καθώς και από τον τρόπο λειτουργίας του, στην ενεργητική προσέγγιση απαιτείται η ύπαρξη κάποιας εξωτερικής πηγής θέρμανσης ώστε να αναπτυχθούν θερμοκρασιακές διαφορές και στη συνέχεια αυτές να μετρηθούν. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή απαιτεί τη δημιουργία θερμικών αντιθέσεων με τη βοήθεια κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας, όταν το εξεταζόμενο υλικό είναι σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Ανάλογα με το είδος του ελέγχου που απαιτείται, αυτή η εξωτερική πηγή ενέργειας μπορεί να είναι η χρήση ζεστού-ψυχρού αέρα, η δημιουργία ελαστικών κυμάτων με διάφορες συχνότητες και πλάτος κ.α. Τα εξωτερικά ερεθίσματα τα οποία απαιτούνται μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες οπτικών, μηχανικών, ηλεκτρομαγνητικών κλπ. Στην κατηγορία της οπτικής διέγερσης για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν λαμπτήρες, οι οποίοι δημιουργούν ανάπτυξη θερμότητας της επιφάνειας του αντικειμένου, η οποία θα μεταδοθεί με τη μορφή θερμικού κύματος μέσω του υλικού στις υποεπιφανειακές ατέλειες και στο τέλος θα επιστρέψει πάλι στην επιφάνεια, όπου και θα ανιχνευθεί από τους αισθητήρες της θερμικής κάμερας. Η διέγερση μέσω της μηχανικής ενέργειας θεωρείται ως ένα

τρόπος εσωτερικής διέγερσης καθώς δημιουργείται θερμότητα στην περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ της βλάβης και του υλικού και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διάδοση αυτής στην επιφάνεια του εξεταζόμενου στόχου(Ματίκας, Αγγελής, 2015) .

Με κριτήριο κατηγοριοποίησης την πηγή του εξωτερικού ερεθίσματος το οποίο χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της υπέρυθρης θερμογράφησης, η ενεργητική προσέγγιση διαχωρίζεται ως εξής (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

- 1) Τις τεχνικές με θερμογραφία παλμού (Ματίκας, Αγγελής, 2015).
- 2) Τις τεχνικές με διαμόρφωση (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσεται και η τεχνική της κλιμακωτής θέρμανσης, η οποία χρησιμοποιεί μακρύ παλμό διέγερσης(Ματίκας, Αγγελής, 2015) . Όσον αφορά τη θερμογραφία lock-in (L.I.T) εντάσσεται στις τεχνικές διαμόρφωσης. Επίσης, διαχωρισμός των τεχνικών ενεργητικής προσέγγισης πραγματοποιείται και λόγω του εξωτερικού ερεθίσματος που οδηγεί σε θερμική αντίθεση. Οι τεχνικές της θερμογραφίας παλμού και της θερμογραφίας lock-in χρησιμοποιούν ως διέγερση, οπτική, μηχανική ή ηλεκτρομαγνητική. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται οπτική διέγερση τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται ως επί το πλείστον με απεικονίσεις της θερμικής κατάστασης στην περιοχή της επιφάνειας του εκάστοτε υλικού εξέτασης, τα λεγόμενα θερμογραφήματα. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται μηχανική διέγερση με χρήση παλμών υπερήχων, ή με διαμόρφωση της συχνότητας, ή με διαμόρφωση τόσο της συχνότητας όσο και του πλάτους, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η θερμογραφία με χρήση υπερήχων(U.T) και η θερμογραφία δονήσεων(VT) (Ματίκας, Αγγελής, 2015) . Τέλος, όσον αφορά τις μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική διέγερση με τη χρήση δινορευμάτων χρησιμοποιούνται οι τεχνικές της επαγωγικής θερμογραφίας(Induction thermography) καθώς και η τεχνική της θερμογραφίας δινορευμάτων (E.C.T). Τα δεδομένα που καταγράφονται με τις τεχνικές της θερμογραφίας παλμού ή της θερμογράφησης Lock-in και τα οποία λαμβάνονται με οπτική διέγερση στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω μετασχηματισμού Fourier. Στις περιπτώσεις που αυτά τα δεδομένα είναι δεδομένα παλμού χρησιμοποιείται η θερμογραφία φάσης παλμού (P.P.T), ενώ στις περιπτώσεις που πρόκειται για δεδομένα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται η τεχνική της θερμογραφίας γωνίας φάσης(P.A.T). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές τις τεχνικές στη συνέχεια παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων φάσης. Τα διαγράμματα αυτά παραθέτουν απεικονίσεις στην επιφάνεια του

εξεταζόμενου υλικού, οι οποίες δείχνουν την καθυστέρηση φάσης του σήματος που εξέρχεται ως προς το σήμα εισέρχεται, δηλαδή τις ασυνέχειες που υπάρχουν στην επιφάνεια του υλικού αυτού (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι κυριότερες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας οι οποίες και χρησιμοποιούνται στον κλάδο της μηχανικής:

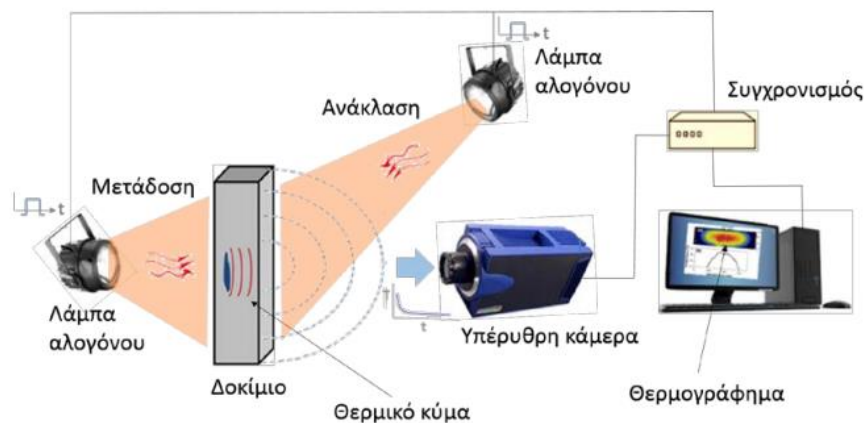
- **Θερμογραφία Παλμού**

Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές ενεργητικής προσέγγισης λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και είναι σχετικά απλή η διάταξη και το είδος του εξοπλισμού που απαιτείται για τη χρησιμοποίησή της. Πιο συγκεκριμένα στην εν λόγω τεχνική, εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου ένας παλμός ενέργειας, ο οποίος οδηγεί στη δημιουργία θερμικού μετώπου το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού, μέσω διάχυσης (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Οι παλμοί που δημιουργούνται μπορούν να δημιουργούν με διάφορους τρόπους, με τους πιο συνηθισμένους από αυτούς να είναι οι λαμπτήρες αλογόνου, η δέσμη λέιζερ καθώς και οι δέσμες αέρα ή νερού (Maldaque, 1994) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Αξίζει να αναφερθεί ότι η θερμική διέγερση που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της τεχνικής αυτής, δεν είναι απαραίτητα θερμή καθώς το πιο σημαντικό στοιχείο είναι οι θερμοκρασιακές διαφορές που θα προκύψουν και όχι η απόλυτη θερμοκρασία (Cielo et al., 1987) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Ανάλογα του είδους του υλικού που εξετάζεται καθώς και το εάν είναι θερμικά αγωγίμο ή όχι ποικίλει και ο χρόνος διάρκειας του παλμού. Για παράδειγμα για υλικά τα οποία έχουν μικρό πάχος και διαθέτουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως τα μέταλλα, η διάρκεια του παλμού είναι μερικά msec. Αντίθετα για υλικά τα οποία είναι μεγάλου πάχους και υλικά τα οποία διαθέτουν σχετικά μικρή αγωγιμότητα, όπως τα πλαστικά και το ξύλο, η διάρκεια του παλμού μπορεί να διαρκέσει έως λίγα δευτερόλεπτα. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εκπόνηση της διαδικασίας της θερμογραφίας παλμού είναι ο ακόλουθος :

- 1) Επιθυμητός αριθμός λαμπτήρων με στιγμιαία λάμψη.
- 2) Μία τράπεζα που θα στηρίζει τη διάταξη με τους λαμπτήρες.
- 3) Μία μονάδα πρόσκτησης δεδομένων η οποία και θα συνδέεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

- 4) Εξειδικευμένο άτομο που θα αναλάβει να συγχρονίσει τη μονάδα που προσκομίζονται τα δεδομένα με την πειραματική διάταξη που ακολουθούν οι λαμπτήρες.
- 5) Μία κάμερα με δυνατότητα συγχρονισμού με τη διάταξη του ελεγκτή.
- 6) Προστατευτική μάσκα για το χειριστή λόγω της έκθεσης του σε επαναλαμβανόμενες ισχυρές λάμπες.

Όσον αφορά τη διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή της θερμογραφίας παλμού, αυτή μπορεί να συμβεί με 2 διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος μιας τυπικής διάταξης θερμογράφησης περιλαμβάνει την τοποθέτηση της πηγής θερμικής ενέργειας και της κάμερας υπερύθρων μπροστά από το εξεταζόμενο αντικείμενο, με την κάμερα να ανιχνεύει τη θερμότητα η οποία ανακλάται από το αντικείμενο. Αντίθετα, ο δεύτερος τρόπος θερμογράφησης με παλμούς προϋποθέτει την τοποθέτηση της θερμικής κάμερας και της πηγής θερμότητας εκατέρωθεν του αντικειμένου, με την κάμερα αυτή τη φορά να πραγματοποιεί ανίχνευση της μετάδοσης της θερμότητας δια μέσω του αντικειμένου ελέγχου. Κατά τη διαδικασία της θερμογραφίας παλμού και των αποτελεσμάτων της είναι δυνατή η ποσοτική ανάλυση τους, μέσω των θερμικών αντιθέσεων των θερμογραφημάτων.



Εικόνα 18 : Θερμογραφία παλμού(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η άμεση και γρήγορη εφαρμογή της καθώς οι απαιτούμενες θερμικές αντιθέσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε σύντομο χρονικό

διάστημα. Όπως προαναφέρθηκε είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος υπέρυθρης θερμογραφίας και οι εφαρμογές της για την ανίχνευση ρωγμών, ασυνεχειών καθώς και η δυνατότητα χαρακτηρισμού του μεγέθους και του βάθους των ατελειών της επιφάνειας δομών είναι ιδιαίτερα σημαντική.

- **Εστιασμένη Θερμογραφία(Lock-In Thermography-LIT)**

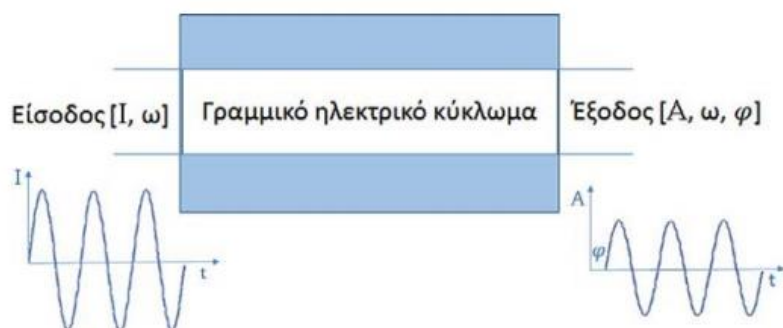
Η επόμενη τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας που θα αναφερθεί είναι η διαμορφωμένη ή συγχρονισμένη θερμογραφία ή λεγόμενη θερμογραφία Lock- In. Μέσω αυτής της τεχνικής δημιουργούνται θερμικά κύματα τα οποία παράγονται από μία θερμική διέγερση περιοδικής μορφής(Giorleo, Meola) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Για τις ανάγκες της τεχνικής συνήθως χρησιμοποιείται μία ημιτονοειδής θερμική διέγερση, αν και τίθεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και άλλες.

Κατά τη διάρκεια της περιοδικά διαμορφωμένης θερμικής διέγερσης δημιουργούνται θερμικά κύματα, τα οποία διαδίδονται εσωτερικά του εξεταζόμενου υλικού. Οι τρόποι μέσω των οποίων παράγονται τα θερμικά κύματα ποικίλουν, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο λυχνίες και δινορεύματα, όσο και υπέρηχοι και μικροκύματα. Τα θερμικά αυτά κύματα στη συνέχεια εντοπίζονται από απόσταση από τη θερμική κάμερα.

Ο όρος Lock-in που χρησιμοποιείται σε αυτή την εφαρμογή της ενεργητικής θερμογραφίας αναφέρεται στην ανάγκη του ακριβούς ελέγχου της χρονικής εξάρτησης μεταξύ του σήματος που εξέρχεται και του σήματος που εισέρχεται, μέσω ενός ενισχυτή Lock-in. Οι ατέλειες οι οποίες βρίσκονται στο εσωτερικό του υλικού εξέτασης θα ενεργήσουν ως εμπόδιο στο να διαδοθεί η θερμότητα, προκαλώντας μεταβολές του πλάτους καθώς και καθυστέρηση φάσης του σήματος απόκρισης στην επιφάνεια. Για την εξαγωγή της πληροφορίας πλάτους και φάσης εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές και συνήθως χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση Fourier με σκοπό τη δημιουργία εικόνων φάσης (phasegrams) και πλάτους (ampligrams) (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Αυτές οι εικόνες συσχετίζονται με το χρόνο που απαιτείται για να διαδοθούν τα θερμικά κύματα και έχοντας ως δεδομένο ότι δεν υπάρχει επηρεασμός τους λόγω τοπικών εξωτερικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το μη καταστροφικό έλεγχο της δομικής ακεραιότητας υλικών(Ματίκας, Αγγελής, 2015). Το πόσο ευρύ είναι το βάθος μίας εικόνας φάσης είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα που

δημιουργεί η θερμική διέγερση, με αποτέλεσμα οι μέγιστες συχνότητες να οδηγούν σε περιορισμό της ανάλυσης κάποιας περιοχής παραπλήσιας της επιφάνειας του δοκιμίου (Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Στη συνέχεια αναφέρεται ένα παράδειγμα ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η έννοια της τεχνικής αυτής. Στο παράδειγμα αυτό χρησιμοποιείται ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα και μια περιοδικά διαμορφωμένη ημιτονοειδής είσοδος I με γωνιακή συχνότητα ω και παρατηρούμε ως έξοδο την ίδια ημιτονοειδή συχνότητα ω αλλά με διαφορετική φάση και πλάτος, όπως φαίνεται στην εικόνα 19 (Ματίκας, Αγγελής, 2015) .



Εικόνα 19 : Ερμηνεία της θερμογραφίας Lock-In(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Χρησιμοποιώντας αντί του γραμμικού κυκλώματος ένα δοκίμιο στο εργαστήριο ή μια επιφάνεια κάποιας υφιστάμενης κατασκευής στο πεδίο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Όταν εισάγεται σε κάποιο υπό εξέταση υλικό θερμότητα πλάτους I και γωνιακής συχνότητας ω δημιουργείται θερμικό κύμα το οποίο διαπερνά την επιφάνεια του υλικού και στη συνέχεια απορροφάται και υπόκειται σε μετατόπιση φάσης.

Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν ατέλειες, ασυνέχειες κλπ στο υλικό το κύμα που εισέρχεται υφίσταται μερική ανάκλαση. Ταυτόχρονα το τμήμα που ανακλάται θα δημιουργήσει αλληλεπίδραση με το κύμα εισόδου που εισέρχεται στην επιφάνεια του υλικού προκαλώντας ένα μοτίβο κατανομής της τοπικής επιφανειακής θερμοκρασίας, η οποία και δονείται με συχνότητα ίδια με αυτή του θερμικού κύματος (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Αυτή η μετατόπιση φάσης της τοπικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια σε σχέση με το κύμα που εισέρχεται και η θερμοκρασιακή

διαφορά που προκύπτει, καταγράφονται από τη θερμική κάμερα και στην ουσία οδηγεί το χειριστή της θερμικής κάμερας να αναγνωρίσει εάν η εσωτερική δομή του υλικού διαθέτει ατέλειες(Ματίκας, Αγγελής, 2015).

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εκπόνηση της διαδικασίας της θερμογραφίας Lock-In είναι ο ακόλουθος(Μπότσαρης, Τσανάκας, 2009) :

1. Μία πηγή περιοδικής εναπόθεσης θερμότητας(πχ λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας).
2. Μία τράπεζα που θα στηρίζει την πηγή περιοδικής εναπόθεσης θερμότητας.
3. Μία μονάδα απόκτησης δεδομένων η οποία συνδέεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.
4. Ένα ελεγκτή ο οποίος θα συγχρονίζει τη μονάδα που προσκομίζει τα δεδομένα με την πηγή που εναποθέτεται περιοδικά η θερμότητα.
5. Η κατάλληλη θερμική κάμερα για τις ανάγκες της εφαρμογής.



Εικόνα 20 : Βασική διάταξη εξοπλισμού θερμογραφίας Lock-In(Τσανάκας, 2013)

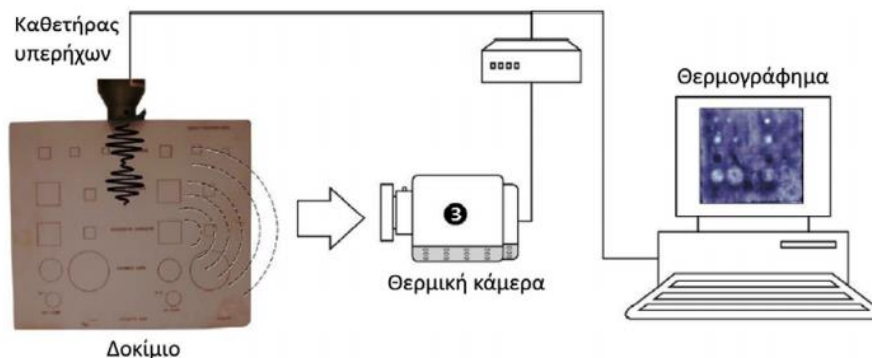
Όπως και όλες οι τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου, έτσι και η μέθοδος της θερμογραφίας Lock-In αποτελεί μία μέθοδο με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αντίθεση με τη θερμογραφία παλμού η εν λόγω τεχνική είναι γενικά αργότερη καθώς απαιτείται κάποιος χρόνος σταθεροποίησης πριν επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας. Παρόλα αυτά υπάρχει μία άμεση σχέση

μεταξύ του βάθους και της συχνότητας ελέγχου η οποία επιτρέπει να εκτιμηθεί το βάθος από τα δεδομένα πλάτους ή φάσης δίχως να πραγματοποιηθεί περαιτέρω επεξεργασία. (Kordatos *et al.*, 2014) Επιπροσθέτως η ενέργεια που απαιτείται για να εκτελεστεί η μεθολογία είναι συνήθως μικρότερη από ότι στις υπόλοιπες τεχνικές, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για ελέγχους σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, σε έργα τέχνης και σε τοιχογραφίες, στα οποία πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην αλλοιωθούν ούτε στο ελάχιστο τα εξεταζόμενα υλικά.

Οι κυριότεροι έλεγχοι στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνική Lock-In είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στον μη καταστροφικό έλεγχο υφιστάμενων δομών οπλισμένου σκυροδέματος καθώς περιλαμβάνουν: Ανίχνευση ρωγμών και ασυνεχειών, ανίχνευση διάβρωσης, προσδιορισμού πάχους επικαλύψεων, ανίχνευση αποκολλήσεων και άλλα.

- **Θερμογραφία με δονήσεις (VibroThermography-VT)**

Ακόμα μία τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας η οποία εφαρμόζεται για τον μη καταστροφικό έλεγχο υφιστάμενων δομών είναι η μέθοδος της θερμογραφίας χρησιμοποιώντας δονήσεις. Η συγκεκριμένη τεχνική αποσκοπεί στην ανίχνευση της παραγόμενης θερμότητας, που προκαλείται μέσω βλάβων στο εσωτερικό του υλικού, χρησιμοποιώντας εξωτερικές μηχανικές δονήσεις ή διέγερση με υπερήχους. Η μη καταστροφική αυτή τεχνική προτάθηκε πρώτη φορά από τον Hennecke τη δεκαετία του 80, άλλα έγινε ευρέως γνωστή στο τέλος της δεκαετίας του 90.



Εικόνα 21 : Βασική διάταξη εξοπλισμού θερμογραφίας με δονήσεις (Ματίκας, Αγγελής, 2015)

Βασική αρχή της μεθοδολογίας αυτής είναι το γεγονός της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας που προκύπτει από τις εξωτερικές δονήσεις, σε θερμική ενέργεια με αποτέλεσμα την απελευθέρωσης θερμότητας μέσω της τριβής στις ακριβείς θέσης, όπου εμφανίζονται ρωγμές, ασυνέχειες, αποκολλήσεις κλπ.

Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή στο να ανιχνεύει ατέλειες δύσκολα ανιχνεύσιμες από τις υπόλοιπες μεθόδους ενεργητικής θερμογραφίας, όπως βλάβων λόγω μηχανικής κόπωσης, φθορές στις επικαλύψεις των υλικών ενώ επίσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για να ελέγχει μεγάλες επιφάνειες στο πεδίο.

Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων διαχέεται η ενέργεια δόνησης στο σημείο όπου υπάρχει η βλάβη εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βλάβης καθώς και από τις παραμέτρους του υλικού, ενώ η ενέργεια που παράγεται είναι εξαρτώμενη της συχνότητας και της θέσης της πηγής θερμότητας (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Αντίστοιχα με την οπτική διέγερση, η μέθοδος της μηχανικής διέγερσης επιτυγχάνεται τόσο μέσω της θερμογραφίας με παλμούς όσο και μέσω της θερμογραφίας Lock-In (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι ανίχνευσης ζημιών, μέσω εργαστηριακών δοκιμών, έτσι ώστε να υπολογίζονται και να ανιχνεύονται ασυνέχειες και ρωγμές σε σύνθετα υλικά όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα.

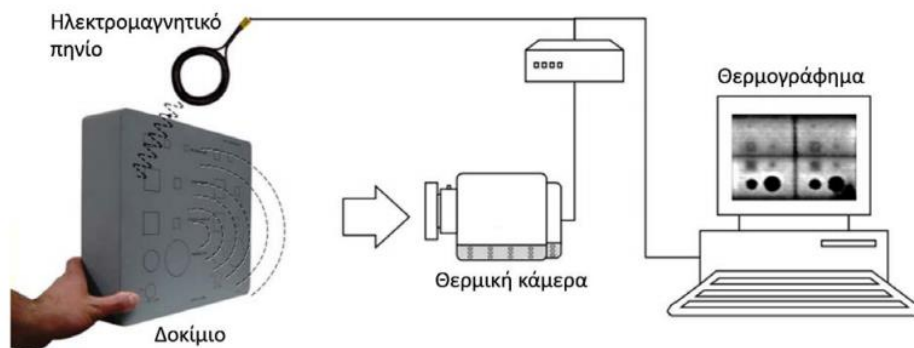
Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εν λόγω τεχνική είναι ο ακόλουθος (Μπότσαρης, Τσανάκας, 2009, Maldaque, 2001).

1. Μία πηγή δονήσεων/ υπερήχων.
2. Κάποιος μηχανισμός κίνησης για να μεταφερθεί και να προσεγγιστεί η πηγή δονήσεων στο αντικείμενο ελέγχου.
3. Ένα πλαίσιο το οποίο θα χρησιμεύσει στη τοποθέτηση και τη στήριξη της πηγής δονήσεων αλλά και του μηχανισμού στήριξης
4. Μονάδα η οποία θα λαμβάνει τα δεδομένα και θα μπορεί να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή.
5. Μία θερμική κάμερα ψυχόμενου ανιχνευτή
6. Ακουστικά, τα οποία θα προστατεύουν το χειριστή από τους ήχους που παράγονται

- **Επαγωγική θερμογραφία(Induction Thermography-IT)**

Η μέθοδος της επαγωγικής θερμογραφίας (ή θερμογραφίας με δινορεύματα) αποτελεί μία από τις πιο πρόσφατες τεχνικές της ενεργητικής θερμογράφησης. Ο τρόπος λειτουργίας της είναι η παραγωγή δινορευμάτων, στο εσωτερικό ηλεκτρικά αγωγίμων υλικών, σε συγκεκριμένο βάθος. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι να θερμανθεί όλο το δοκίμιο, επομένως και οι εσωτερικές ασυνέχειες. Οι επιφανειακές και οι υποεπιφανειακές ατέλειες που υπάρχουν θα προκαλέσουν μεταβολή στην κίνηση των δινορευμάτων με αποτέλεσμα να μεταβληθεί η θερμοκρασιακή κατανομή. Αυτές οι διαφορές στη θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του υπό εξέταση αντικειμένου είναι εφικτό να καταγραφούν με τη θερμική κάμερα και να προσδιοριστούν οι θέσεις στις οποίες υπάρχουν ενδεχομένως ασυνέχειες, ρωγμές κλπ.

Η μέθοδος της θερμογραφίας με δινορεύματα βρίσκει κυρίως εφαρμογή στο να ανιχνεύει ρωγμές σε υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ επίσης ανιχνεύει τις βλάβες σύνθετων υλικών κ.α (Ματίκας, Αγγελής, 2015). Η αντίστοιχη πειραματική διάταξη του εξοπλισμού της παρουσιάζεται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22 : Βασική διάταξη εξοπλισμού θερμογραφίας με δινορεύματα(Ματίκας, Αγγελής, 2015)

3.9 Παράμετροι και συνθήκες υπέρυθρης θερμογραφίας

Λόγω του γεγονότος ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και η εκπεμπόμενη ηλιακή ενέργεια δύναται να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό το φάσμα και την ένταση της ακτινοβολίας υπέρυθρου που ανιχνεύεται , σημαντικό είναι να ρυθμίζονται ορισμένοι παράμετροι του

εξοπλισμού της θερμογραφίας. Οι παράμετροι αυτοί των οποίων η σωστή ρύθμιση θα συμβάλει στην εξαγωγή αληθών αποτελεσμάτων είναι οι εξής :

- **Συντελεστής ικανότητας εκπομπής**

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η σπουδαιότερη ίσως παράμετρος ρύθμισης πριν τη διαδικασία της θερμογραφίας είναι αυτή του συντελεστή εκπομπής, καθώς αποτελεί το στοιχείο με τη μεγαλύτερη επιρροή στην ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Επιφάνειες οι οποίες είναι λείες έχουν ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή εκπομπής σε σύγκριση με περισσότερο τραχιές επιφάνειες, επομένως ανάλογα με το εξεταζόμενο υλικό είναι αναγκαίο να μεταβάλλει στη θερμική κάμερα ο χρήστης την τιμή του ϵ (emissivity).

- **Αντιστάθμιση του φόντου**

Σημαντική παράμετρος στην υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί και η αντιστάθμιση του φόντου καθώς ορισμένες φορές διάφορα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται σε παραπλήσιες θέσεις σε σχέση με το εξεταζόμενο στόχο έχουν είτε μεγαλύτερη θερμοκρασία είτε διαφορετικό συντελεστή εκπομπής με αποτέλεσμα να προστίθεται η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία τους και να εξάγονται ψευδή αποτελέσματα. Οι σύγχρονες θερμικές κάμερες για να εξαλείψουν τα λάθη τα οποία μπορεί να προκύψουν από την αντιστάθμιση του φόντου διαθέτουν ενσωματωμένο αλγόριθμο, μέσω του οποίου παρέχεται η δυνατότητα της κατάλληλης διόρθωσης του σφάλματος που προκύπτει από το φόντο. Η δυνατότητα αυτή ονομάζεται αντιστάθμιση ανακλώμενης θερμοκρασίας. (Μπότσαρης, Τσανάκας, 2009)

- **Αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας**

Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας δύναται να επηρεαστούν και από τα χαρακτηριστικά που διέπουν την ατμόσφαιρα, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ της θερμικής κάμερας και του υπό εξέταση αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της θερμικής κάμερας είναι μεγάλη και το αντικείμενο είναι ευρισκόμενο σε παρόμοια θερμοκρασία με αυτή του περιβάλλοντος, τότε η υπέρυθρη ακτινοβολία των στοιχείων που περιβάλλουν το στόχο, καθώς και η ίδια η ατμόσφαιρα θα δημιουργήσουν αντανάκλαση από το αντικείμενο προς τον αισθητήρα που διαθέτει η θερμική κάμερα και θα μετρώνται σαν επιπλέον εκπεμπόμενη ακτινοβολία, προκαλώντας με αυτό τον τρόπο ψευδή αποτελέσματα (Τσανάκας, 2013). Αντιστοίχως με την περίπτωση της αντιστάθμισης του φόντου, οι νέες γενιές θερμικές

κάμερες διαθέτουν ενσωματωμένο αλγόριθμο ο οποίος ρυθμίζει την αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας. Ο υπολογισμός αυτής της τιμής αντιστάθμισης πραγματοποιείται αυτόματα βάση των τιμών -εισόδων της θερμοκρασίας αέρα, της απόστασης σε σχέση με το αντικείμενο, καθώς και της σχετικής υγρασίας (Τσανάκας, 2013).

- **Γεωμετρική διακριτική ικανότητα**

Ως γεωμετρική διακριτική ικανότητα ονομάζεται το ελάχιστο μέγεθος αντικειμένου, το οποίο για συγκεκριμένη απόσταση θερμικής κάμερας-αντικειμένου εξέτασης, προβάλλεται σε ένα εικονοστοιχείο του αισθητηρίου(Τσανάκας, 2013). Για μία υπέρυθρη θερμογράφηση με αξιόπιστα αποτελέσματα, το ελάχιστο μετρούμενο μέγεθος αντικειμένου σε συγκεκριμένη απόσταση, θεωρείται αυτό που καλύπτει την επιφάνεια 2-4 pixels(Τσανάκας, 2013). Ως εκ τούτου για να πραγματοποιηθεί μία αξιόπιστη μέτρηση είναι αναγκαίο να παραμένει στην ίδια απόσταση η θερμική κάμερα με το εξεταζόμενο αντικείμενο(Τσανάκας, 2013).

3.10 Τεχνικές επεξεργασίας θερμικών εικόνων

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της υπέρυθρης θερμογραφίας ορισμένες φορές είναι αναγκαίο οι θερμικές εικόνες οι οποίες έχουν παραχθεί να υπαχθούν σε μία περαιτέρω επεξεργασία, έτσι ώστε να αποκαλυφθούν ενδεχόμενες ανωμαλίες, οι οποίες δεν ήταν να εφικτό να αναγνωριστούν στην αρχική μορφή των θερμικών εικόνων.

Κατά την πλειοψηφία τους οι τεχνικές επεξεργασίας των θερμικών εικόνων αφορούν ήδη χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους και μεθόδους, με αποδεδειγμένα αποτελέσματα σε εφαρμογές που ασχολούνται με υπολογιστική όραση και επεξεργασία συμβατικών εικόνων. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι το φιλτράρισμα, η ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος κ.α(Τσανάκας, 2013). Κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω μεθόδων είναι η προσπάθεια εξάλειψης των εξωτερικών θορύβων και σημάτων, στοιχεία τα οποία εμποδίζουν την σωστή ανάγνωση των αποτελεσμάτων των αρχικών θερμογραφημάτων. Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η ενεργητική προσέγγιση της θερμογραφίας υπέρυθρου συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές επεξεργασίας με μετασχηματισμούς, με κλασικό παράδειγμα τους μετασχηματισμούς Fourier (Τσανάκας, 2013).

3.11 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Όπως και οι υπόλοιπες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου της δομικής ακεραιότητας κατασκευών έτσι και η εξεταζόμενη μέθοδος έχει πλεονεκτήματα αλλά διέπεται και από κάποιους προβληματισμούς. Τα πλεονεκτήματα τα οποία συνοδεύουν τη μέθοδο είναι τα εξής (Τσανάκας, 2013, Ματίκας, Αγγελής, 2015):

- 2 Το πρώτο πλεονέκτημα αφορά το γεγονός ότι αποτελεί μη καταστροφική μέθοδο, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τον έλεγχο μνημειακών κατασκευών.
- 3 Αποτελεί μία τεχνική πλήρους πεδίου καθώς δύναται να ελεγχθούν μεγάλες επιφάνειες.
- 4 Αποτελεί μια τεχνική με ταχύ ρυθμό ελέγχου.
- 5 Χαρακτηρίζεται από ασφάλεια, καθώς δεν χρησιμοποιούνται ακτινοβολίες που μπορούν να βλάψουν το προσωπικό που πραγματοποιεί τη διαδικασία ελέγχου.
- 6 Τα θερμογραφήματα τα οποία προκύπτουν από τον αρχικό έλεγχο είναι σχετικά απλό να ερμηνευτούν.
- 7 Το εύρος των εφαρμογών στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μεγάλο.
- 8 Είναι η μοναδική τεχνική η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βλάβες στην επιφάνεια του υλικού(στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις έργων τέχνης, κεραμικών επικαλύψεων κλπ.).
- 9 Παρέχει τη δυνατότητα πρόληψης σε περιπτώσεις πρόωρων βλαβών.

Αντίθετα τα μειονεκτήματα-περιορισμοί που διακρίνουν τη μέθοδο αυτή είναι τα εξής :

- Το υψηλό κόστος (το οποίο μειώνεται όσο περνάνε τα χρόνια) και η πολυπλοκότητα των διατάξεων θερμικής διέγερσης..
- Οι θερμικές απώλειες, συχνά οδηγούν σε ψευδή αποτελέσματα πλήττοντας με αυτό τον τρόπο την αξιοπιστία της μεθόδου
- Σε περίπτωση μη σωστής ρύθμισης των παραμέτρων ενδέχεται τα αποτελέσματα να είναι ψευδή.
- Παρέχεται δυνατότητα να ελεγχθούν είτε επιφανειακές είτε σε πολύ μικρό βάθος βλάβες.
- Για την ανίχνευση ασυνεχειών και ατελειών στο αντικείμενο είναι απαραίτητο να προκύψουν θερμοκρασιακές μεταβολές, διαφορετικά δεν ανιχνεύονται.

Κεφάλαιο 4- 1^η σειρά πειραμάτων

Το κεφάλαιο 4 αφορά την πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα στους χώρους των εργαστηρίων του Πολυτεχνείου Κρήτης και αφορούσε τον έλεγχο συγκεκριμένων δοκιμών χρησιμοποιώντας την ενεργητική προσέγγιση της υπέρυθρης θερμογραφίας, καθώς και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τη διαδικασία αυτή. Σε όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας στόχος ήταν να αποδειχθεί το γεγονός ότι στις περιοχές στις οποίες υπάρχουν κενά, ασυνέχειες, ρωγμές κλπ εμφανίζεται τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η υπέρυθρη **θερμική κάμερα Flir C3** και για την μετέπειτα επεξεργασία των εικόνων το λογισμικό **Flir Tools**.



Εικόνα 23 : Θερμική κάμερα Flir C3

4.1 Περιγραφή διαδικασίας για πρώτο δοκίμιο

Για τη διεξαγωγή του πρώτου πειράματος ενεργητικής προσέγγισης της θερμογραφίας, επιλέχτηκε η μέθοδος της θερμογραφίας παλμού. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκε ο δεύτερος τρόπος χρήσης της θερμογραφίας παλμού καθώς η θερμική κάμερα και η πηγή θερμότητας τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του αντικειμένου, με την κάμερα να ανιχνεύει τη μετάδοση της θερμότητας δια μέσω του αντικειμένου εξέτασης.

Ως αντικείμενα ελέγχου επιλέχτηκαν τρία δοκίμια σκυροδέματος τα οποία τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο. Η συνδεσμολογία που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την τοποθέτηση ενός

τανιστή(συρματόσχοινο), περιμετρικά των δοκιμίων ώστε μετά το κατάλληλο σφίξιμο του να δημιουργηθεί ένα μονολιθικό σώμα και να αποφευχθεί η δημιουργία έντονων διεπιφανειών μεταξύ των τριών δοκιμίων. Με τη δημιουργία αυτού του μονολιθικού σώματος η θερμική ενέργεια που θα παραχθεί για τις ανάγκες του πειράματος θα μπορέσει να διαδοθεί και στα τρία δοκίμια σαν να πρόκειται για ένα ομογενές σώμα.

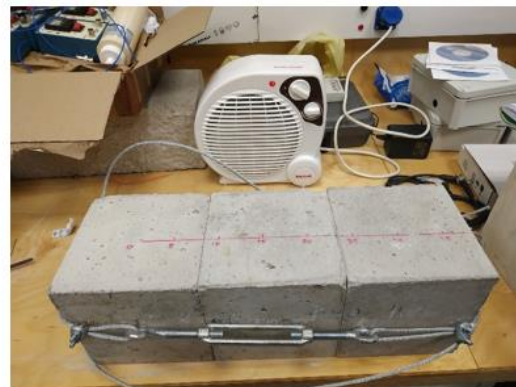


Εικόνα 24 : Περίδεση δοκιμίων σκυροδέματος για διεξαγωγή πειράματος

Ως εξωτερική πηγή θέρμανσης των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε αερόθερμο με μέγιστη ισχύ 2000 Watt το οποίο και τοποθετήθηκε στη πίσω πλευρά των δοκιμίων και σε σταθερή απόσταση 15 cm για όλες τις μετρήσεις.



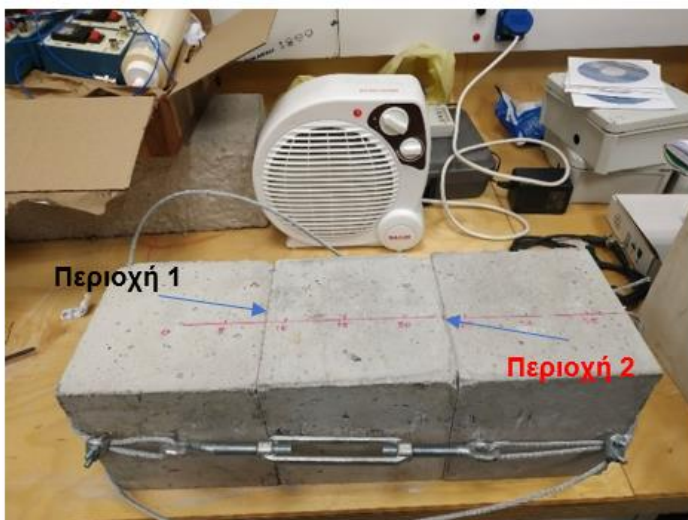
Εικόνα 25: Εξωτερική πηγή θέρμανσης



Εικόνα 26: Δοκίμια υπό θέρμανση

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής. Αφού μέσω του τανιστή δημιουργήθηκε ένα μονολιθικό σώμα στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε απόσταση 15 cm πίσω από αυτό, το αερόθερμο, το οποίο και ξεκίνησε να λειτουργεί σε μέγιστη ισχύ. Ο συνολικός χρόνος θέρμανσης του δοκιμίου ήταν 3 ώρες και ανά μία ώρα λαμβάνονταν απεικονίσεις με τη θερμική κάμερα, υπό σταθερή απόσταση(50 cm) και γωνία, κάθετα στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Σύμφωνα με τη θεωρία στις περιοχές στις οποίες υπάρχουν ασυνέχειες, ρωγμές, κενά κλπ αυξάνεται ο συντελεστής εκπομπής(λόγω ανάκλασης πολλαπλής διαδρομής) με αποτέλεσμα να υπάρξει τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Οι περιοχές μελέτης οι οποίες λοιπόν ενδιαφέρουν είναι οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται στην διεπιφάνεια των δοκιμίων, στις οποίες και αναμένεται να υπάρξει τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές των δοκιμίων.

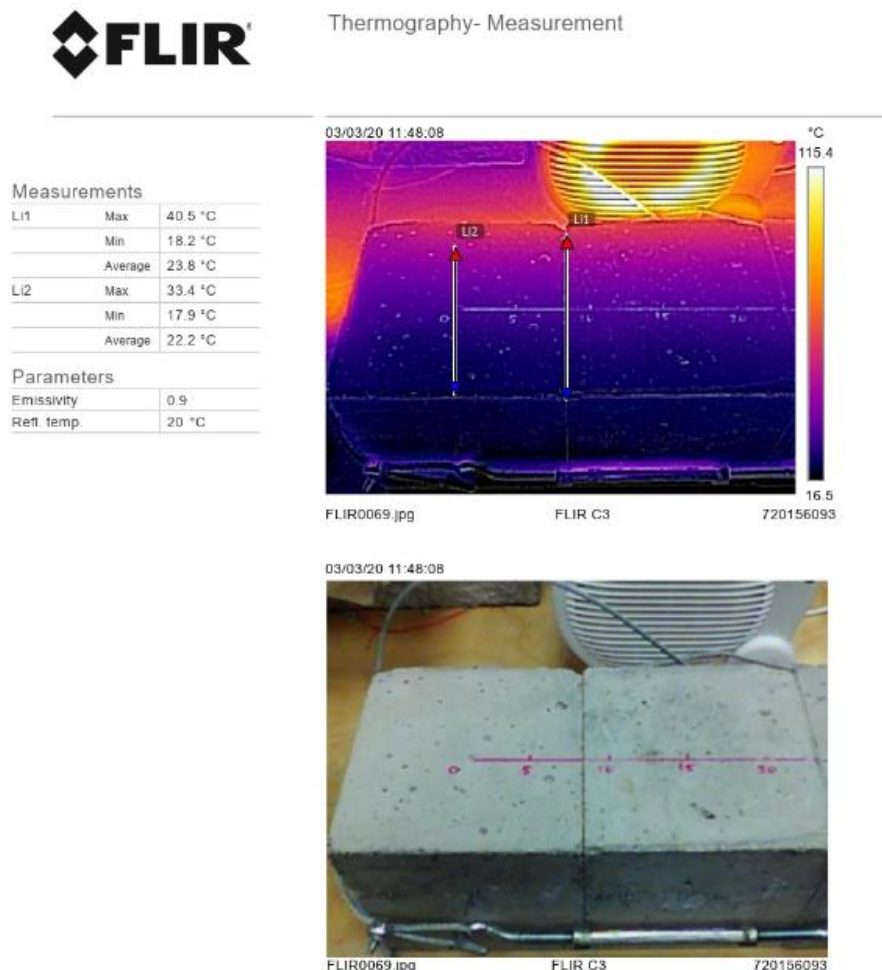


Εικόνα 27: Περιοχές μελέτης

Αξίζει να αναφερθεί ότι λόγω του γεγονότος ότι το σκυρόδεμα είναι ένα κρύο υλικό και η μία πηγή θερμικής διέγερσης (αερόθερμο), ίσως να μην έφτανε για να θερμανθεί όλο το δοκίμιο δεν παρατηρήθηκε εξ ολοκλήρου θέρμανση του δοκιμίου, ακόμα και μετά από τις 3 ώρες θέρμανσης του. Παρόλα αυτά σε όλες τις θερμικές εικόνες που θα παρουσιαστούν εμφανίζεται μία αύξηση της θερμοκρασίας στις περιοχές 1&2, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τον μη καταστροφικό έλεγχο υφιστάμενων κατασκευών καθώς εάν στη θέση των δοκιμίων υπήρχε κάποια υφιστάμενη κατασκευή ο μελετητής θα γνώριζε ότι στις περιοχές αυτές είτε υπάρχουν ήδη ρωγμές και ασυνέχειες είτε τείνουν να δημιουργηθούν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θερμικές εικόνες του δοκιμίου, μετά από 1,2 και 3 ώρες θέρμανσης.

- Απεικόνιση μετά από 1 ώρα θέρμανσης



Εικόνα 28: Απεικόνιση μετά από 1 ώρα θέρμανση- Περιοχή μελέτης 1

Ο πρώτος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορά την περιοχή 1, την διεπιφάνεια δηλαδή των δοκιμίων 1 και 2, μετά από συνεχόμενη θέρμανση μίας ώρας.

Μέσω της θερμικής κάμερας πραγματοποιήθηκε κάθετη φωτογραφική λήψη της επιφάνειας 1 και στη συνέχεια η θερμική εικόνα εισήχθη στο λογισμικό Flir Tools, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί

η επεξεργασία της. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για την περιοχή νούμερο 1(Li1) και μία τυχαία περιοχή Li2. Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την πρώτη απεικόνιση αφορούν τη μέγιστη θερμοκρασία, την ελάχιστη θερμοκρασία και το μέσο όρο θερμοκρασιών της περιοχής αυτές. Η μπάρα η οποία βρίσκεται στα δεξιά της θερμικής εικόνας ενημερώνει χρωματικά για την κύμανση των θερμοκρασιών σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Μετά από τη 1 ώρα θέρμανσης παρατηρείται χαμηλή μεταφορά θερμότητας δια μέσω του δοκιμίου καθώς αύξηση θερμοκρασίας παρατηρείται χρωματικά μόνο της περιοχής μπροστά από την πηγή θερμότητας. Παρόλα αυτά μέσω του πίνακα των θερμοκρασιακών διαφορών των 2 περιοχών μελέτης εμφανίζεται αύξηση θερμοκρασίας συνολικά σε όλη την περιοχή Li1, λόγω της ύπαρξης του σχετικού κενού ανάμεσα της 2 επιφάνειες.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται συγκεντρωμένες οι θερμοκρασιακές διαφορές των 2 περιοχών μελέτης.

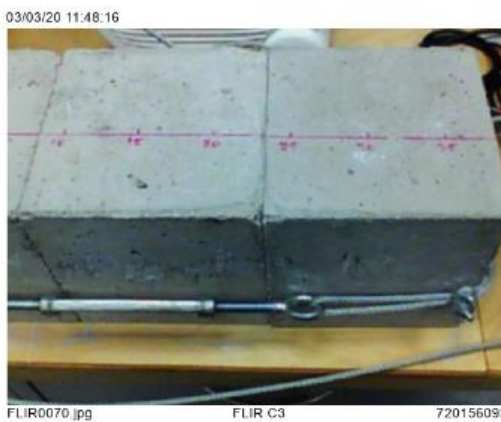
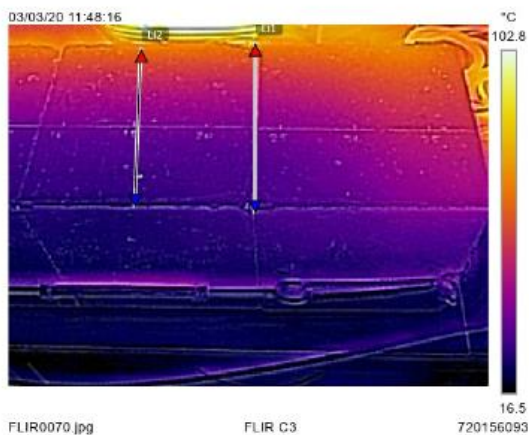
Πίνακας 1: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	40.5	33.4
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	18.2	17.9
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	23.8	22.2

Η επόμενη μέτρηση αφορά τον έλεγχο της περιοχής 2, τη διεπιφάνεια δηλαδή των δοκιμίων 2 και 3, πάλι μετά την ολοκλήρωση της μίας ώρας θέρμανσης. Σε απόλυτη αντιστοιχία με τη πρώτη μέτρηση, λόγω της ύπαρξης του κενού αναμένεται να υπάρξει τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο σημείο.

Στην επόμενη εικόνα εμφανίζεται η σύγκριση της περιοχής 2(Li1) με μία τυχαία περιοχή Li2 η οποία παρότι βρίσκεται πιο κοντά στην εξωτερική πηγή θέρμανσης παρουσιάζει χαμηλότερη θερμοκρασία λόγω της δομικά αέρας περιοχής της.

Measurements		
Li1	Max	49.8 °C
	Min	20.2 °C
	Average	26.6 °C
Li2	Max	43.7 °C
	Min	19.3 °C
	Average	25.6 °C
Parameters		
Emissivity	0.95	
Ref. temp.	20 °C	



Εικόνα 29: Απεικόνιση μετά από 1 ώρα θέρμανση- Περιοχή μελέτης 2

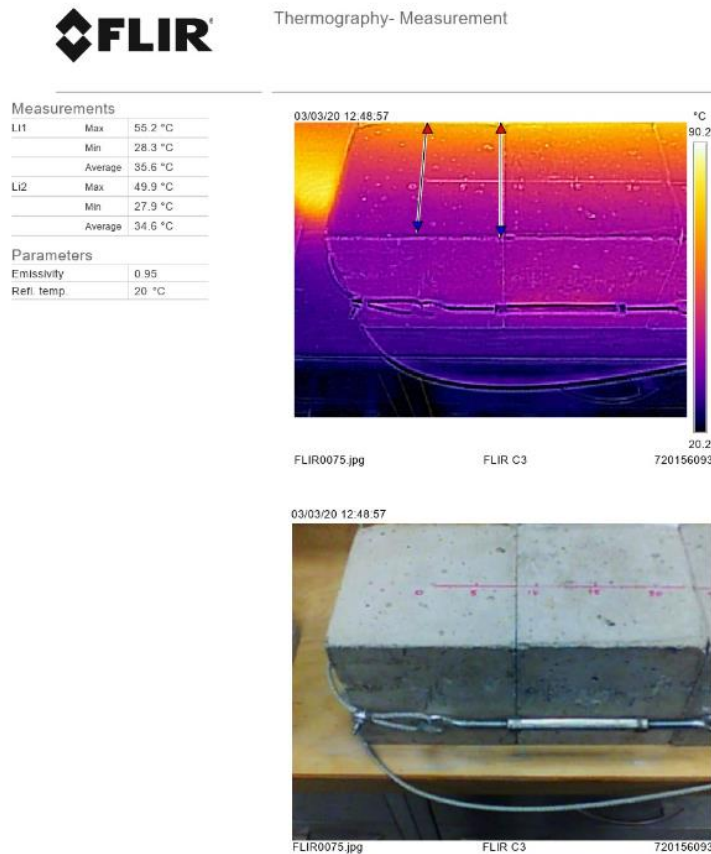
Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται συγκεντρωμένες οι θερμοκρασιακές διαφορές των 2 περιοχών μελέτης.

Πίνακας 2: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	49,8	43,7
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	20,2	19,3
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	26,6	25,6

- Απεικόνιση μετά από 2 ώρες θέρμανσης

Αφού το δοκίμιο συνεχίστηκε να θερμαίνεται με τον ίδιο τρόπο για ακόμη μία ώρα, στη συνέχεια λήφθηκαν εκ νέου θερμικές απεικονίσεις με τον ίδιο τρόπο και πραγματοποιήθηκε αντίστοιχος έλεγχος.



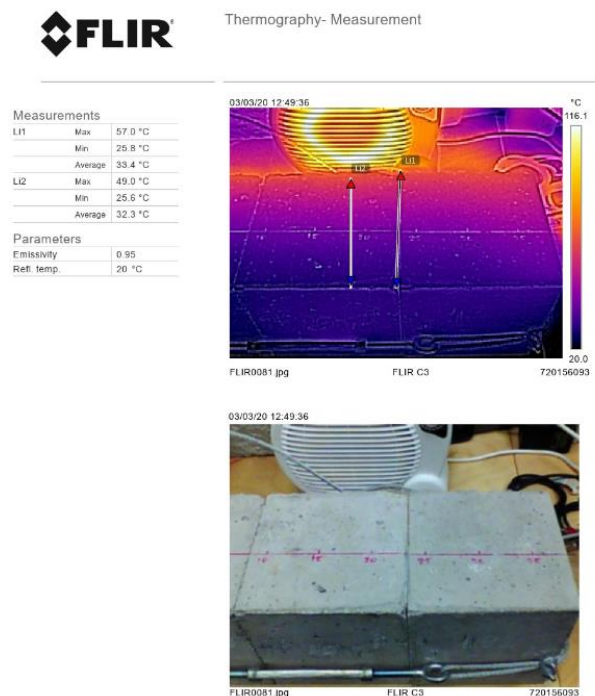
Εικόνα 30: Απεικόνιση μετά από 2 ώρες θέρμανσης- Περιοχή μελέτης 1

Μετά της 2 ώρες θέρμανσης αυτό που παρατηρείται τόσο χρωματικά όσο και αριθμητικά στο θερμογράφημα είναι το γεγονός ότι η θερμότητα έχει ξεκινήσει και διαχέεται στο δοκίμιο, δίχως να έχει θερμανθεί αυτό όλο. Όσον αφορά της περιοχές μελέτης και σε αυτή την περίπτωση διακρίνεται τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στην υφιστάμενη ασυνέχεια(περιοχή 1-Li1) σε σχέση με μία τυχαία περιοχή Li2. Οι θερμοκρασιακές διαφορές εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	55,2	49,9
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	28,3	27,9
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	35,6	34,6

Συνολικά παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών σε σχέση με την πρώτη ώρα αλλά το ΔT των δύο περιοχών διατηρείται σχετικά σταθερό, στοιχείο που αποδεικνύει ότι η ύπαρξη ρωγμών και ασυνεχειών θα εμφανιστεί στο θερμογράφημα ανεξάρτητα από τη διάρκεια της θέρμανσης.



Εικόνα 31: Απεικόνιση μετά από 2 ώρες θέρμανσης- Περιοχή μελέτης 2

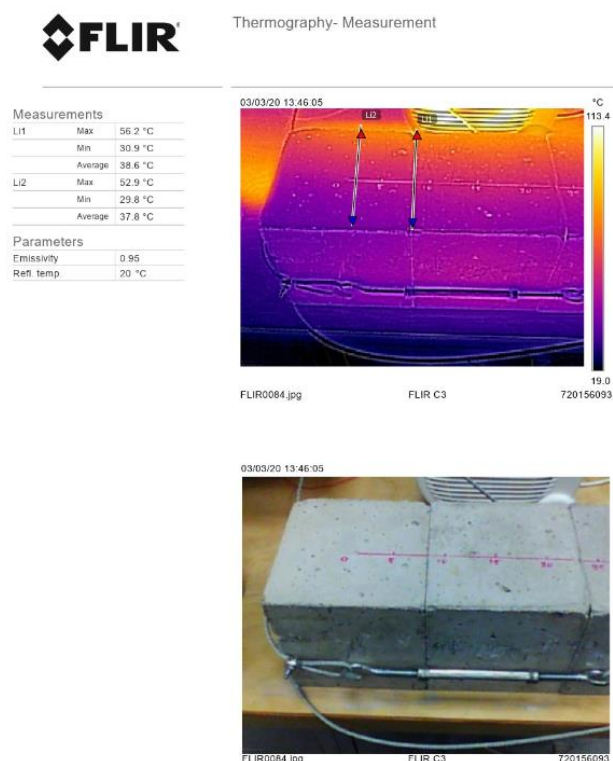
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο έλεγχος της περιοχής 2 :

Πίνακας 4: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	57	49
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	25,8	25,6
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	33,4	32,3

Σε απόλυτη αντιστοιχία με τους προηγούμενους ελέγχους, η περιοχή 2 (Li1) στην οποία εμφανίζεται το κενό της διεπιφάνειας των 2 δοκιμίων, αναπτύσσει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τις υπόλοιπες περιοχές της επιφάνειας λόγω ανάκλασης πολλαπλών διαδρομών.

- Απεικόνιση μετά από 3 ώρες θέρμανσης



Εικόνα 32: Απεικόνιση μετά από 3 ώρες θέρμανσης- Περιοχή μελέτης 1

Ο τελευταίος έλεγχος για το συγκεκριμένο δοκίμιο πραγματοποιήθηκε μετά από 3 ώρες θέρμανσης. Παρατηρείται ότι ακόμη και μετά τις 3 ώρες θέρμανσης το δοκίμιο δεν έχει θερμανθεί πλήρως, στοιχείο το οποίο θα μπορούσε να επηρεάσει την αξιολόγηση της δομικής του ακεραιότητας σε περίπτωση που δεν ήταν ήδη γνωστή η ασυνέχεια η οποία υπάρχει σε αυτό. Ενδεχομένως ακόμη μία εξωτερική πηγή θέρμανσης ή μία πηγή με μεγαλύτερη ισχύ να οδηγούσαν σε καλύτερα αποτελέσματα για το εν λόγω δοκίμιο.

Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα που αφορούν την περιοχή 1(Li1) και μία άλλη τυχαία περιοχή Li2 συνεχίζουν να είναι τα επιθυμητά, καθώς η τοπική αύξηση στην περιοχή της ασυνέχειας συνεχίζει να υφίσταται.

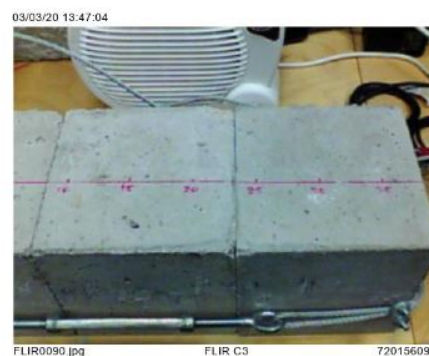
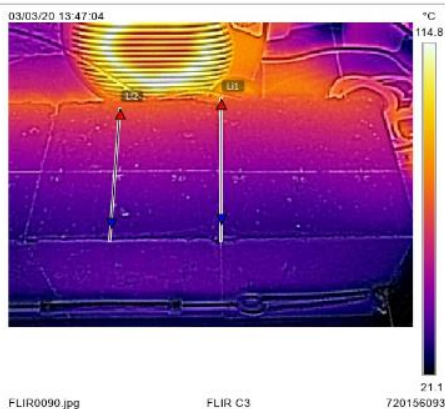
Ο πίνακας 5 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις θερμοκρασιακές διαφορές των περιοχών Li1 και Li2.

Πίνακας 5: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	56,2	52,9
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	30,9	29,8
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	38,6	37,8

Τέλος, παρουσιάζεται το θερμογράφημα της περιοχής 2 (Li1) και μίας άλλης τυχαίας περιοχής Li2. Η περιοχή 2 όπως αναμενόταν έχει και σε αυτή την περίπτωση αυξημένη θερμοκρασία, επιβεβαιώνοντας τη θεωρία και τη μεθοδολογία που συνοδεύει την υπέρυθρη θερμογράφιση.

Measurements		
Li1	Max	56.4 °C
	Min	30.2 °C
	Average	37.2 °C
Li2	Max	52.1 °C
	Min	30.1 °C
	Average	36.6 °C
Parameters		
Emissivity	0.95	
Ref. temp.	20 °C	



Εικόνα 33: Απεικόνιση μετά από 3 ώρες θέρμανσης- Περιοχή μελέτης 2

Ο πίνακας 6 στη συνέχεια παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις θερμοκρασιακές διαφορές των περιοχών Li1 και Li2.

Πίνακας 6: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	Li1	Li2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	56,4	52,1
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	30,2	30,1
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	37,2	36,6

4.2 Περιγραφή διαδικασίας για το δεύτερο δοκίμιο

Η μέθοδος της ενεργητικής θερμογραφίας παλμού εφαρμόστηκε και για τη διεξαγωγή της επόμενης πειραματικής διαδικασίας που αφορούσε ένα μικρότερο δοκίμιο σκυροδέματος, στο οποίο είχε διανοιχτεί για τις ανάγκες του πειράματος μία οπή στη πίσω πλευρά του η οποία εκτεινόταν για περίπου 4-5 εκατοστά στο εσωτερικό του. Ο συνολικός χρόνος θέρμανσης του δοκιμίου ήταν 3 ώρες και ανά 1 ώρα πραγματοποιήθηκαν οι φωτογραφικές λήψεις κάθετα στην επιφάνεια του σκυροδέματος.



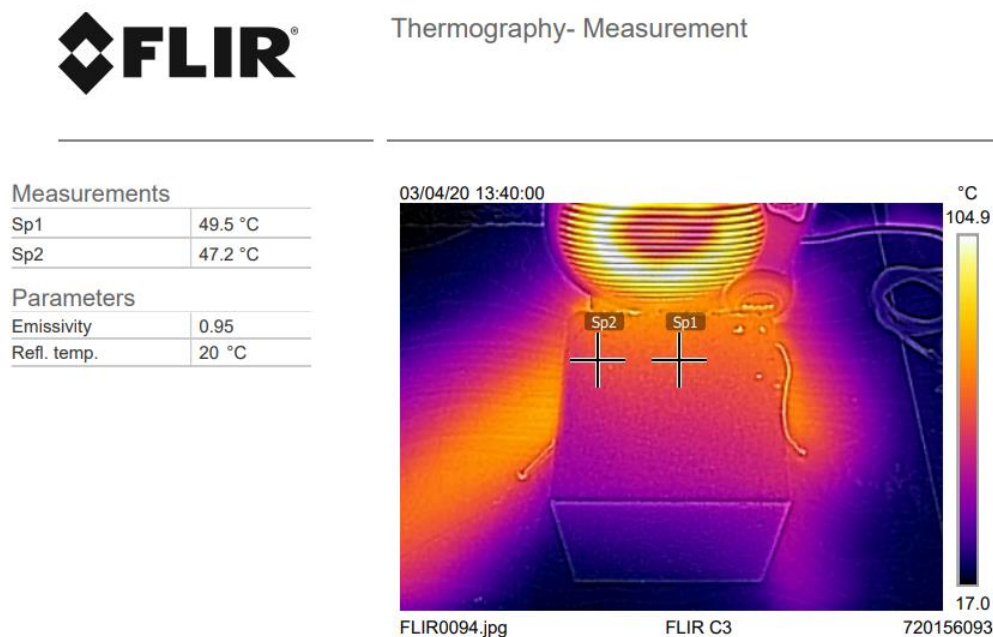
Εικόνα 34: Οπή στην πίσω πλευρά του δοκιμίου



Εικόνα 35: Δοκίμιο υπό θέρμανση

Η πειραματική διάταξη που ακολουθήθηκε καθώς και ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν οι φωτογραφικές λήψεις με τη θερμική κάμερα είναι σε απόλυτη αντιστοιχία με το πρώτο πείραμα. Λόγω της ύπαρξης της οπής στην πίσω πλευρά του δοκιμίου αναμένεται να υπάρξει αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτή την περιοχή, στοιχείο το οποίο θα συντελούσε στην έγκαιρη επισκευή-ενίσχυση του σε περίπτωση που αυτό βρισκόταν σε υφιστάμενη κατασκευή.

- Αεικόνιση μετά από 1 ώρα θέρμανσης



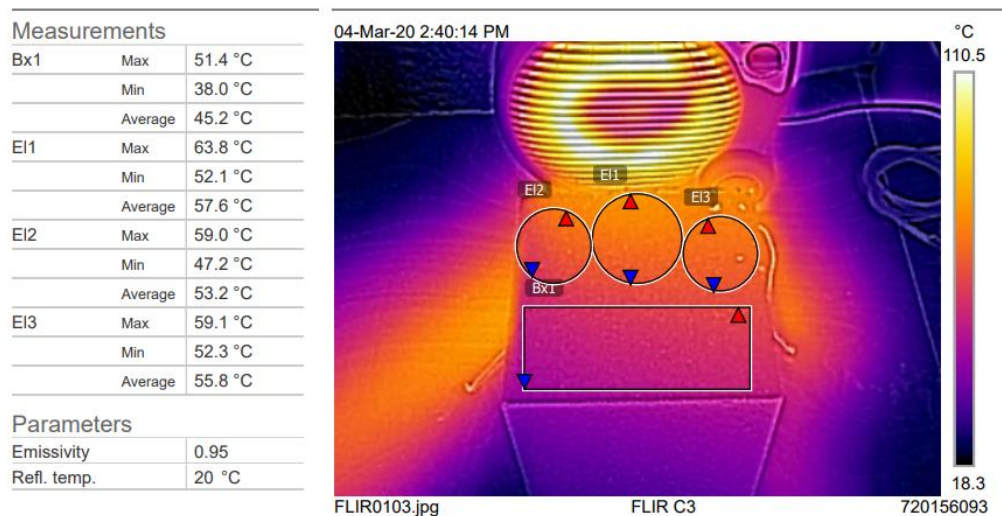
Εικόνα 36: Θερμογράφημα δοκιμίου σκυροδέματος μετά από 1 ώρα θέρμανση

Στο θερμογράφημα παραπάνω και μετά τη μία ώρα θέρμανσης παρατηρείται χρωματικά μία αύξηση θερμοκρασίας του δοκιμίου μέχρι περίπου τη μέση του καθώς η θερμότητα δεν έχει μεταδοθεί σε όλο τον όγκο του. Πιο συγκεκριμένα για τις ανάγκες σύγκρισης των υγριών περιοχών του συγκεκριμένου δοκιμίου σκυροδέματος τοποθετήθηκαν μέσω του λογισμικού Flir Tools οι 2 στόχοι-κέσορες που φαίνονται στην εικόνα. Ο ένας στόχος τοποθετήθηκε στο σημείο όπου έχει δημιουργηθεί η οπή(Sp1) και ο δεύτερος σε μία τυχαία περιοχή Sp2, η οποία όμως βρίσκεται και αυτή στο πρώτο μισό του δοκιμίου και έχει θερμανθεί το ίδιο. Η θερμοκρασία στο σημείο Sp1 είναι 49,5 °C ενώ στην περιοχή Sp2 47,2 °C. Η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο σημείο αυτό ενδεχομένως υπάρχει κάποια βλάβη.

- Απεικόνιση μετά από 2 ώρες θέρμανσης



Thermography-Measurement



Εικόνα 37: Θερμογράφημα δοκιμίου σκυροδέματος μετά από 2 ώρες θέρμανσης

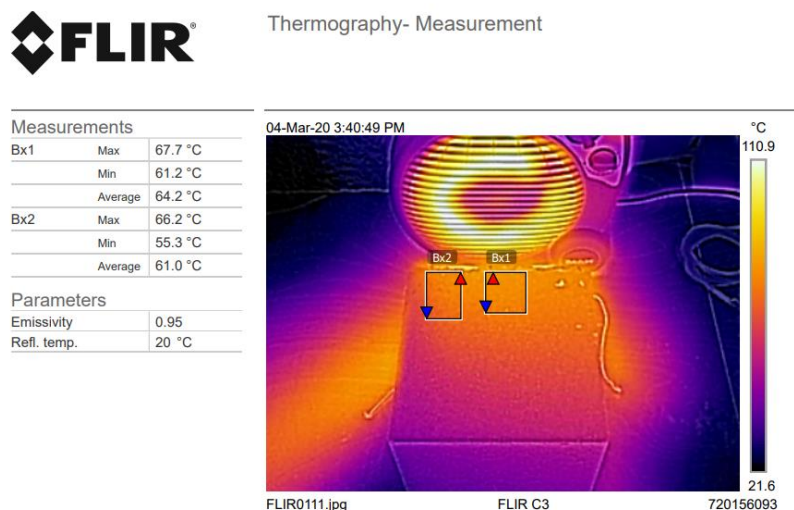
Πίνακας 7: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές μελέτης	EI1	EI2	EI3	Bx1
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	63,8	59	59,1	51,4
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	52,1	47,2	52,3	38
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	57,6	53,2	55,8	45,2

Μετά τις 2 ώρες θέρμανσης εξετάστηκε μέσω των παραπάνω σχημάτων όλη η επιφάνεια του δοκιμίου. Ο κύκλος EI1 αντιπροσωπεύει την οπή που έχει δημιουργηθεί για τις ανάγκες της θερμογράφησης, ενώ τα υπόλοιπα σχήματα είναι τυχαία και χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί

όλη η επιφάνεια του δοκιμίου. Παρατηρείται και εδώ το γεγονός ότι η θερμοκρασία στο σημείο της οπής είναι αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες.

- Απεικόνιση μετά από 3 ώρες θέρμανσης



Εικόνα 38: Θερμογράφημα δοκιμίου σκυροδέματος μετά από 2 ώρες θέρμανσης

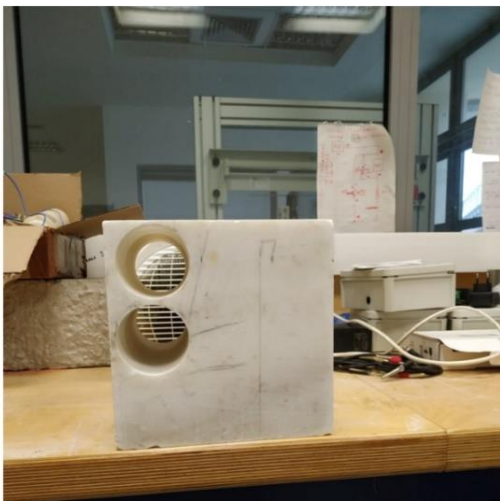
Τέλος, ακολούθησε η θερμική απεικόνιση του δοκιμίου μετά τις 3 ώρες θέρμανσης. Στο θερμογράφημα της εικόνας 38 παρατηρείται ότι πλέον ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας δια μέσω του δοκιμίου έχει αυξηθεί κάτι που αποτυπώνεται και χρωματικά. Η μέτρηση που αφορά την περιοχή στο Bx1, η οποία και είναι η περιοχή της οπής και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με την περιοχή που βρίσκεται στο Bx2 αλλά και με όλες τις άλλες περιοχές της επιφάνειας.

Πίνακας 8: Θερμοκρασιακές Διαφορές

Περιοχές Μελέτης	BX1	BX2
Μέγιστη Θερμοκρασία(°C)	67,7	66,2
Ελάχιστη Θερμοκρασία(°C)	61,2	55,3
Μέσος Όρος Θερμοκρασιών(°C)	64,2	61.0

4.3 Περιγραφή διαδικασίας για το τρίτο δοκίμιο

Το τρίτο δοκίμιο που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής ήταν ένα δοκίμιο από μάρμαρο Διονύσου το οποίο είχε διανοιγμένες 2 οπές στην μία πλευρά του οι οποίες εκτείνονταν σε όλο του το πλάτος. Το δοκίμιο θερμάνθηκε για τρεις ώρες και ανά μία ώρα πραγματοποιούταν κάθετη φωτογραφική απεικόνιση της επιφάνειάς του. Λόγω του διαμπερούς των οπών τα αποτελέσματα ήταν ακόμη πιο ξεκάθαρα σε σχέση με τις προηγούμενες πειραματικές διαδικασίες καθώς πλέον οι διαφορές θερμοκρασίας φαίνονται και χρωματικά.

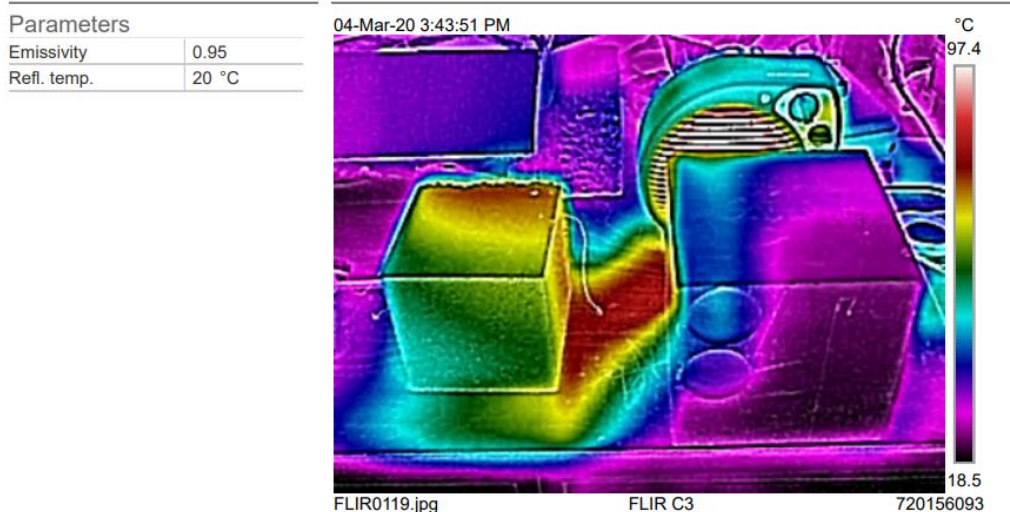


Εικόνα 39: Δοκίμιο από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 40: Δοκίμιο υπό θέρμανση

Η πρώτη θερμική εικόνα τραβήχτηκε στο πρώτα λεπτά της θέρμανσης του δοκιμίου από το μάρμαρο Διονύσου ενώ ταυτόχρονα διακρίνεται και το προηγούμενο δοκίμιο κατά την ώρα που αυτό ξεκινάει και ψύχεται.



Εικόνα 41: Δοκίμια 2 &3

Παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα διακρίνονται ορισμένα ενδιαφέροντα στοιχεία, από τη χρωματική απεικόνιση των θερμοκρασιών, τα οποία και επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι θερμογραφία υπερύθρου είναι μία ιδιαίτερα σημαντική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου. Όσον αφορά το προηγούμενο δοκίμιο φαίνεται η αυξημένη θερμοκρασία που υπάρχει στην περιοχή της οπής. Παρότι η κόκκινη περιοχή η οποία και υποδηλώνει αυξημένη θερμοκρασία υπάρχει και σε άλλα σημεία της επιφάνειας, παρατηρείται συγκεντρωμένη σε μεγαλύτερο βαθμό στο σημείο στο οποίο γνωρίζουμε ότι υπάρχει η οπή. Σε περίπτωση λοιπόν που εμφανιζόταν μία τέτοια εικόνα σε θερμική μέτρηση στο πεδίο ο χειριστής της θερμικής κάμερας θα αντιλαμβανόταν ότι στη συγκεκριμένη περιοχή υφίσταται κάποια ασυνέχεια στο υλικό η οποία και χρήζει επιδιόρθωσης.

Για την περίπτωση του δοκιμίου από μάρμαρο Διονύσου τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα, ακόμη και μετά τα πρώτα λεπτά της θέρμανσης του λόγω των διαμπερών οπών που υπάρχουν σε αυτό. Έτσι, εμφανίζεται με μπλε χρώμα(αυξημένη θερμοκρασία) τόσο το σημείο στο οποίο υπάρχουν οι οπές όσο και η περιοχή την οποία καταλαμβάνουν.

Λόγω του γεγονότος ότι οι οπές είναι διαμπερείς και διακρίνεται εύκολα χρωματικά η περιοχή των ασυνεχειών, παρουσιάζονται απλώς οι θερμικές εικόνες επεξεργασμένες, δίχως να γίνει σύγκριση μεταξύ των υγιών περιοχών και των περιοχών των οπών.

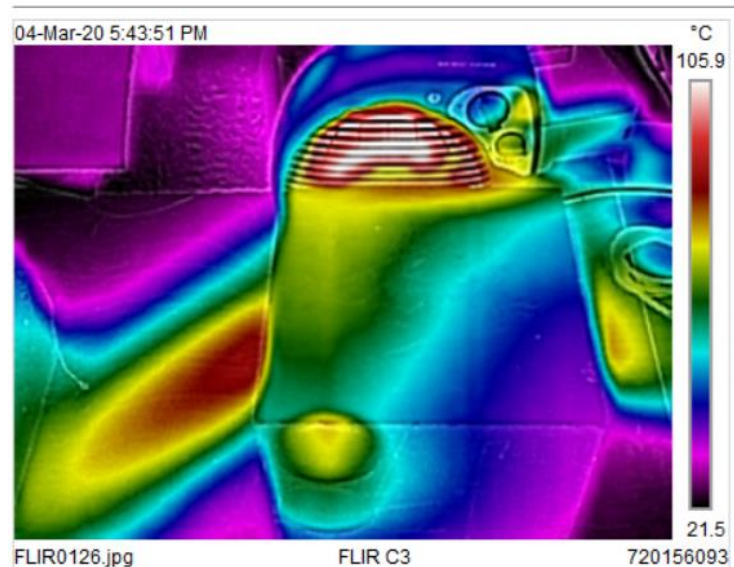
- **Απεικόνιση μετά από 1 ώρα θέρμανσης**

Μετά τη 1 ώρα θέρμανσης παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου σε σχέση με την προηγούμενη θερμική εικόνα και φαίνεται χρωματικά η περιοχή που καταλαμβάνουν οι οπές.



Εικόνα 42: Αυξημένη θερμοκρασία στην περιοχή της οπής μετά την 1 ώρα θέρμανσης

- Απεικόνιση μετά από 2 ώρες θέρμανσης



Εικόνα 43: Αυξημένη θερμοκρασία στην περιοχή της οπής μετά τις 2 ώρες θέρμανσης

- Απεικόνιση μετά από 3 ώρες θέρμανσης



Εικόνα 44: Αυξημένη θερμοκρασία στην περιοχή της οπής μετά τις 3 ώρες θέρμανσης

Αντίστοιχα με την εικόνα 42 έτσι και στις υπόλοιπες παρατηρείται χαρακτηριστικά η θερμοκρασιακή διαφορά των υγειών περιοχών σε σχέση με τις περιοχές των οπών. Σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια που ανάλογα με το χρόνο θέρμανσης παρατηρούνταν αλλαγές στη

θερμοκρασία των σαθρών περιοχών, στην περίπτωση αυτή ακόμα και μετά τις 3 ώρες θέρμανσης τα αποτελέσματα είναι σχεδόν τα ίδια. Αυτό είναι κάτι λογικό καθώς η ροή της θερμότητας λόγω των διαμπερών οπών δεν συνεχίζεται και στο υπόλοιπο υλικό.

4. 4 Παρατηρήσεις-συμπεράσματα πρώτης σειράς πειραμάτων

Μετά την πρώτη σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τα 3 διαφορετικά δοκίμια μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα αλλά και κάποιοι προβληματισμοί σχετικά με την μεθοδολογία.

- Τα δοκίμια σκυροδέματος τα οποία και είχαν λιγότερο εμφανείς ασυνέχειες δεν εμφανίζουν χαρακτηριστικές χρωματικές διαφορές στις σαθρές περιοχές και απαιτείται επιπλέον αριθμητικός έλεγχος των θερμοκρασιακών διαφορών, έτσι ώστε να φανεί το που απαιτείται επιδιόρθωση. Σε περιπτώσεις που απαιτείται έλεγχος μεγάλων δομών σκυροδέματος με τη μέθοδο της ενεργητικής θερμογραφίας αυτό θα αποτελέσει πρόβλημα καθώς θα απαιτείται περισσότερος χρόνος ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.
- Σε δομές σκυροδέματος απαιτείται ισχυρότερη πηγή θέρμανσης καθώς ακόμα και μετά τις 3 ώρες θέρμανσης δεν παρατηρήθηκε συνολική θέρμανση όλου του δοκιμίου. Στις συγκεκριμένες πειραματικές διαδικασίες όπου ήταν γνωστές οι περιοχές των ασυνεχειών δεν απαιτούνταν η θέρμανση ολόκληρου του αντικειμένου, όμως σε περίπτωση όπου αυτές δεν ήταν γνωστές και σκοπός ήταν ο εξολοκλήρου δομικός έλεγχος μίας κατασκευής σκυροδέματος τα αποτελέσματα ενδέχεται να ήταν λανθασμένα.
- Ανεξάρτητα από την ώρα θέρμανσης τους, ο μέσος όρος των θερμοκρασιακών διαφορών των σαθρών περιοχών σε σχέση με τις υγιείς κυμαίνεται στους 1-2 °C.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία φαίνεται να δίνουν οι μέγιστες θερμοκρασιακές των περιοχών, οι οποίες και εμφανίζουν μεγαλύτερη συνολική θερμοκρασιακή διαφορά των υγιών περιοχών σε σχέση με τις σαθρές.
- Η θερμική εικόνα που δημιουργήθηκε για το δοκίμιο 2 κατά την περίοδο ψύξης του, έδωσε καλύτερα χρωματικά αποτελέσματα όσον αφορά τις θερμοκρασιακές διαφορές της επιφάνειας του υπό εξέταση αντικειμένου.

- Τα αποτελέσματα στο δοκίμιο από μάρμαρο Διον, όπου οι οπές ήταν διαμπερείς και μεγάλες ήταν χαρακτηριστικά και δεν απαιτήθηκε περαιτέρω επεξεργασία. Οι θερμοκρασιακές διαφορές των υγρών περιοχών σε σχέση με τις περιοχές όπου υπήρχαν οπές ήταν μεγαλύτερες των 10°C , στοιχείο το οποίο αποδεικνύει ότι σε περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασιακές διαφορές κοντινών περιοχών μίας επιφάνειας είναι μεγάλες, απαιτείται άμεση επιδιόρθωση και επισκευή.
- Η θερμοκρασία στις περιοχές όπου υπήρχαν ασυνέχειες ήταν υψηλότερη σε όλες τις περιπτώσεις σε σχέση με αυτή των υγρών περιοχών, επιβεβαιώνοντας τη θεωρία.

Κεφάλαιο 5- Μέθοδος θερμογραφίας με δονήσεις

5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο 4 αφορούσε την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας για την απλή μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας, όπου ως εξωτερική πηγή θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε, ένα αερόθερμο ως πηγή θερμότητας. Αντίθετα, η συνέχεια των πειραμάτων και ο βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας, αποσκοπεί στην προσπάθεια για δημιουργία ενός συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου, πιο πρακτικού, πιο οικονομικού το οποίο μετά από απαραίτητες βελτιώσεις θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερης κλίμακας υφιστάμενες κατασκευές. Αυτή τη φορά τη θέση του αερόθερμου, χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες ως πηγή θέρμανσης με τα αποτελέσματα να αποδεικνύουν και πάλι το γεγονός ότι στις σαθρές περιοχές παρατηρείται αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας, στοιχείο το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το δομικό έλεγχο υφιστάμενων κατασκευών. Η μεθοδολογία αυτή ανήκει στην κατηγορία της θερμογραφίας με δονήσεις(vibrothermography).

5.2 Θερμογραφία με δονήσεις

Η τεχνική της θερμογραφίας με δονήσεις, βασίζεται στο γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων που προκύπτουν από τα πιεζοηλεκτρικά θα δημιουργήσει κίνηση των μορίων στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί τριβή στις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων και να απελευθερωθεί θερμότητα. Τη παραγόμενη θερμότητα στη συνέχεια θα την ανιχνεύσει η υπέρυθρη θερμική κάμερα με αποτέλεσμα να υποδείξει τις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται οι ασυνέχειες.

Ο παραπάνω μηχανισμός παραγωγής θερμότητας λόγω τριβής μπορεί να εξηγηθεί και μαθηματικά ως εξής.(*X. Chi, et all, 2019*). Το σύνολο του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν επί μίας κατασκευής αποτελείται από δύο μέρη.

$$W = W_{\text{εφαρμ.}} + W_{\text{συντ.}}$$

Όπου $W_{\text{εφαρμ.}}$ είναι το σύνολο του έργου που επιτελείται από την εφαρμοζόμενη δύναμη και $W_{\text{συντ.}}$ είναι το έργο που επιτελείται από δυνάμεις όπως αυτή της βαρύτητας. Στις περιπτώσεις που δεν

υπάρχει απώλεια ενέργειας στο σύστημα, το συνολικό έργο που επιτελείται από την εφαρμοζόμενη δύναμη ισούται με τις αλλαγές στη συνολική μηχανική ενέργεια της δομής, η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε κινητική ενέργεια και δυνητική ενέργεια.

$$W_{\text{εφαρμ.}} = \Delta K + \Delta U$$

Η δυνητική ενέργεια παρουσιάζεται υπό τη μορφή καταπόνησης, η οποία είναι η ενέργεια η οποία παραμορφώνει το σώμα μετά την άσκηση εξωτερικών δυνάμεων. Η μαθηματική έκφραση της ενέργειας καταπόνησης μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$U = \frac{1}{2} F \Delta = \frac{1}{2} V \sigma \varepsilon$$

Όπου F είναι η δύναμη, Δ είναι η μετατόπιση, V είναι ο όγκος, σ είναι η τάση, μία φυσική ποσότητα που εκφράζει τις εσωτερικές δυνάμεις που ασκούν τα γειτονικά σωματίδια ενός συνεχούς υλικού μεταξύ τους και ε είναι η καταπόνηση, δηλαδή το μέτρο παραμόρφωσης του υλικού. '

Στις περιπτώσεις όπου λαμβάνεται υπόψη ο κραδασμός της δομής, η ενέργεια στη δομή μεταβάλλεται μεταξύ της μορφής της κινητικής ενέργειας και της δυνητικής ενέργειας. Όταν η δομή φτάσει τη μέγιστη κάμψη σε κάθε κύκλο κραδασμών, υπάρχει μία στιγμιαία στιγμή που η δομή είναι (οιονεί) στατική και έτσι σχεδόν όλη η μηχανική ενέργεια είναι υπό μορφή ενέργειας καταπόνησης. (*X. Chi, et all, 2019*) Αντιστοίχως όταν η δομή βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, η ταχύτητα κραδασμού είναι στο μέγιστο και έτσι το σύνολο της μηχανικής ενέργειας βρίσκεται σε μορφή κινητικής ενέργειας. Σε πραγματικές κατασκευές όπου η απώλεια ενέργειας είναι αναπόφευκτη μία ποσότητα μηχανικής ενέργειας στο σύστημα θα χάνεται σε κάθε κύκλο κραδασμών- δονήσεων.

Όταν η κύρια πηγή ενεργειακής απώλειας είναι η παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής, η ποσότητα της ενεργειακής απώλειας λόγω της τριβής μπορεί να καθοριστεί από διάφορες παραμέτρους, όπως η διατμητική τάση(τ) μεταξύ των επιφανειών επαφής, το συνολικό μήκος της σχετικής κίνησης(διαδρομή ολίσθησης) γ , και η περιοχή επαφής , έτσι ώστε η συνολική παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής στην περιοχή A να είναι.

$$P_A = \iint P_{fr} dA = \iint \tau \gamma dA$$

Για την παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής, η διατμητική τάση στην περιοχή επαφής μπορεί να υπολογιστεί από την πίεση επαφής p και το συντελεστή τριβής μ και προκύπτει η εξής σχέση:

$$\tau = \mu p$$

Είναι γεγονός ότι οι μηχανισμοί μέσω των οποίων διαχέεται η ενέργεια δόνησης στη βλάβη δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα το ακριβές ποσοστό θερμότητας το οποίο θα διαχυθεί από ορισμένες ασυνέχειες να μην είναι γνωστό από πριν. Παρόλα αυτά λόγω του γεγονότος ότι στα πειράματα που θα ακολουθήσουν οι ρωγμές και οι ασυνέχειες έχουν δημιουργηθεί από το χρήστη της θερμικής κάμερας επιβεβαιώνεται η θεωρία ότι στις σαθρές περιοχές η θερμοκρασία είναι αυξημένη.

5.3 Πιεζοηλεκτρικά-Βασικές Γνώσεις

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στόχος της εν λόγω σειράς πειραμάτων ήταν να πραγματοποιηθεί θέρμανση των δοκιμίων μέσω της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών. Πιο συγκεκριμένα, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά διαθέτουν ως χαρακτηριστική ιδιότητα την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση όταν προς τη διεύθυνση αυτή ασκείται μηχανική δύναμη (Λιαράκος, 2015). Αυτός ο τρόπος συμπεριφοράς των πιεζοηλεκτρικών ονομάζεται ως Ευθύ Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο. (Λιαράκος, 2015). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα υλικά, δύναται να λειτουργήσουν και με τον αντίστροφο τρόπο, καθώς μπορούν να εμφανίσουν μηχανική παραμόρφωση σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση όταν σε αυτή εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο (Λιαράκος, 2015). Η συμπεριφορά αυτή ονομάζεται Αντίστροφο Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. (Giurgiutiu, 2008), (Λιαράκος, 2015).

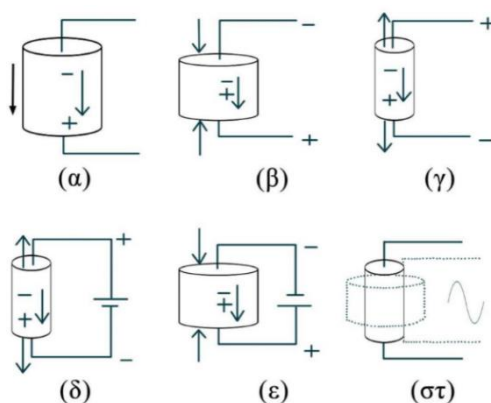
Στον μη καταστροφικό έλεγχο των κατασκευών τα πιεζοηλεκτρικά αποτελούν ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο καθώς δύναται να χρησιμοποιηθούν τόσο ως στοιχεία αισθητήρων όσο και ως διεγέρτες μηχανικών ταλαντώσεων. Όταν χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες πραγματοποιείται το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο το υλικό και ένα μηχανικό κύμα το οποίο διαδίδεται αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης προς τη διεύθυνση ταλάντωσης του κύματος (Λιαράκος, 2015). Αντιθέτως στη δεύτερη περίπτωση δύναται να πραγματοποιηθεί η

εκπομπή ενός μηχανικού κύματος με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης .
(Λιαράκος, 2015).

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να διαχωριστούν στα φυσικά(χαλαζίας, τουρμαλίνης) και στα τεχνητά, τα οποία είναι υλικά κατασκευασμένα από κεραμικά και κατασκευάζονται από κονιάματα που προκύπτουν από χημικές ενώσεις του οξυγόνου με κάποια μέταλλα(βάριο, τιτάνιο,μόλυβδος κ.α) (Giurgiutiu, 2008, (Λιαράκος, 2015), (PI Ceramics,2014).

Όσον αφορά τη γεωμετρία των πιεζοηλεκτρικών ποικίλει και μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορών ειδών και μεγεθών πιεζοηλεκτρικά, όπως πλακίδια, ράβδοι, δίσκοι κ.λ.π (Λιαράκος, 2015). Τα πιεζοκεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο για τις ανάγκες του μη καταστροφικού ελέγχου είναι τα οξείδια των Τιτανίου, Βαρίου, Μολύβδου καθώς και τα οξείδια τωνΖirkονίου, Τιτανίου-PZT (Λιαράκος, 2015. Τα PZT τα οποία χρησιμοποιούνται σε τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου έχουν συνήθως τη μορφή από δισκοειδή πλακίδια ή παραλληλόγραμμα επιθέματα με πάχος μεταξύ των 0.2 και 20 χιλιοστών και επιφάνεια μεταξύ των 5 τετραγωνικών χιλιοστών και 20 τετραγωνικών εκατοστών (Λιαράκος, 2015).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια μπλοκ σχημάτων όπου διακρίνονται οι πιθανοί τρόποι αντίδρασης που δύναται να έχουν οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι ανάλογα της δράσης που θα ασκηθεί σε αυτούς (Καλλιάρas, 2019).



Εικόνα 45: Πιθανές καταστάσεις πιεζοηλεκτρικών υλικών(Καλλιάρas, 2019)

- «Στην πρώτη περίπτωση(α) δεν έχει υπαχθεί το υλικό σε καμία διαδικασία» (Καλλιάρas, 2019).

- «Στην δεύτερη περίπτωση έχει ασκηθεί θλίψη και μία τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης προκύπτει μεταξύ των ηλεκτροδίων» (Καλλιάρας, 2019).
- «Στην τρίτη περίπτωση(γ) όπου ασκείται εφελκυσμός, εμφανίζεται τάση ανάστροφη προς την πόλωση» (Καλλιάρας, 2019).
- «Μία τάση η οποία είναι ανάστροφης πόλωσης ως προς την τάση πόλωσης θα προκαλέσει διαστολή του υλικού (δ)» (Καλλιάρας, 2019).
- «Αντιθέτως στην πέμπτη περίπτωση(ε) όπου υπάρχει τάση ίδιας πολικότητας προκαλείται συστολή του υλικού» (Καλλιάρας, 2019).
- «Στην τελευταία περίπτωση (στ) όπου έχει εφαρμοστεί εναλλασσόμενο σήμα το υλικό θα δονείται σύμφωνα με τη συχνότητα του σήματος» (Καλλιάρας, 2019).

5.4 Πρώτη σειρά πειραμάτων με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα μικρό κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος, το οποίο δεν φέρει ρωγμές, ασυνέχειες κ.λ.π. στο οποίο προσκολλήθηκε ένας πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης στο μέσο της επάνω επιφάνειας του. Η θέση που προσκολλήθηκε το πιεζοηλεκτρικό ήταν στη μέση καθώς είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Σκοπός του πειράματος αυτού ήταν να αποδειχτεί το γεγονός ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί θέρμανση μέσω της δημιουργίας μηχανικής ενέργειας καθώς και εάν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτούνταν για την εξ ολοκλήρου θέρμανση του συγκεκριμένου δοκιμίου. Το τελευταίο στοιχείο θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό καθώς στη συνέχεια θα μπορούσε να προσδιοριστεί και ο κánaβος πιεζοηλεκτρικών που θα απαιτούνταν για τον έλεγχο μίας μεγαλύτερης επιφάνειας όπως για παράδειγμα ενός υποστυλώματος ή μίας δοκού σε κάποια υφιστάμενη κατασκευή. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ακόλουθος:

1. Πιεζοηλεκτρικός Διεγέρτης

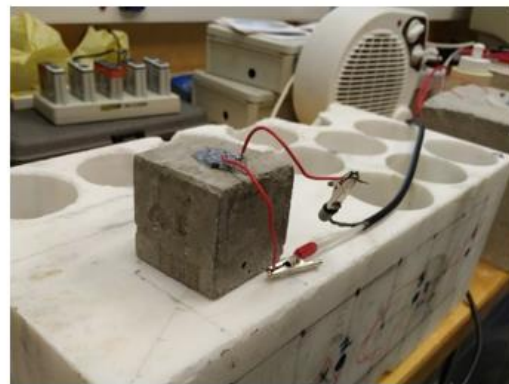
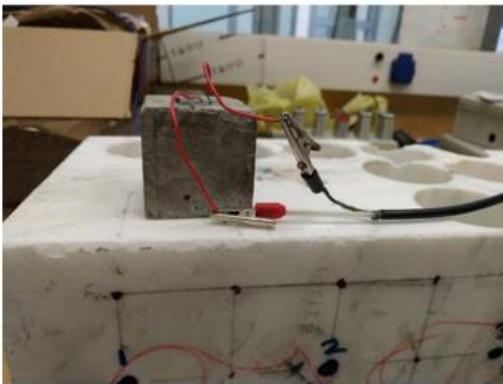


Εικόνα 46: Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης

Ο τύπος του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη που χρησιμοποιήθηκε ήταν της μορφής PIC151 και ανήκει στην κατηγορία των PZT. Το συγκεκριμένο πιεζοηλεκτρικό διαθέτει μεγάλο συντελεστή σύζευξης και υψηλό συντελεστή πιεζοηλεκτρικής φόρτισης. Αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα πιεζοηλεκτρικά για εφαρμογές τέτοιου είδους και έχει διαστάσεις $10 \times 10 \times 0.3$ mm.

Ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης έχει συνδεθεί με τη γεννήτρια συχνοτήτων, μέσω της οποίας δέχεται σταθερή τάση ημιτονοειδούς κύματος και δημιουργεί την επιθυμητή μηχανική ταλάντωση στο δοκίμιο. Με τη χρήση του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο πλακίδιο το οποίο συνδέεται στο δοκίμιο και πραγματοποιείται εκπομπή μηχανικών κυμάτων τα οποία δημιουργούν παραγωγή θερμότητας λόγω της τριβής, η οποία και ανιχνεύεται στη συνέχεια από τη θερμική κάμερα.

2. Δοκίμιο σκυροδέματος



Εικόνα 47: Πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης συνδεδεμένος στο δοκίμιο σκυροδέματος

Στην εικόνα 47 παρουσιάζεται το κυβικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία, στην επιφάνεια του οποίου είναι προσκολλημένο το πιεζοηλεκτρικό PIC151.

3. Γεννήτρια συχνοτήτων



Εικόνα 48: Γεννήτρια συχνοτήτων

Στην εικόνα 48 παρουσιάζεται η γεννήτρια συχνοτήτων, η οποία χρησιμοποιήθηκε για να προκαλέσει την ταλάντωση του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη.

Οι γεννήτριες αυτές είναι όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για την παροχή κυμάτων συνήθως με τη μορφή τάσης ή ρεύματος. Τα σήματα τα οποία μπορούν να παραχθούν από τη γεννήτρια είναι είτε επαναλαμβανόμενα είτε μη-επαναλαμβανόμενα. Οι γεννήτριες συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επαναλαμβανόμενων κυματομορφών. Η πιο βασική επαναλαμβανόμενη κυματομορφή που χρησιμοποιείται είναι η ημιτονοειδής, ενώ άλλες βασικές κυματομορφές είναι η πριονωτή και η τριγωνική (Μεϊμαρίδης, Πάλλης, 2013). Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας παρήχθησαν μέσω της γεννήτριας επαναλαμβανόμενα ημιτονοειδή κύματα ώστε να ενεργοποιηθεί με αυτό το τρόπο η πλακέτα του πιεζοηλεκτρικού.

Κυματομορφή με ημιτονοειδές σήμα είναι η κυματομορφή εκείνη της οποίας η μεταβολή του μεγέθους και της κατεύθυνσης είναι ομαλή ως προς το χρόνο (Φιωτάκης, 2018).

Όσον αφορά το ημιτονείδες σήμα το οποίο παράγεται, είναι ένα σήμα περιοδικής μορφής του οποίου η τάση μεταβάλλεται με ημιτονοειδή μορφή(Φιωτάκης, 2018). Τα παραπάνω περιγράφονται μαθηματικά ως εξής :

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

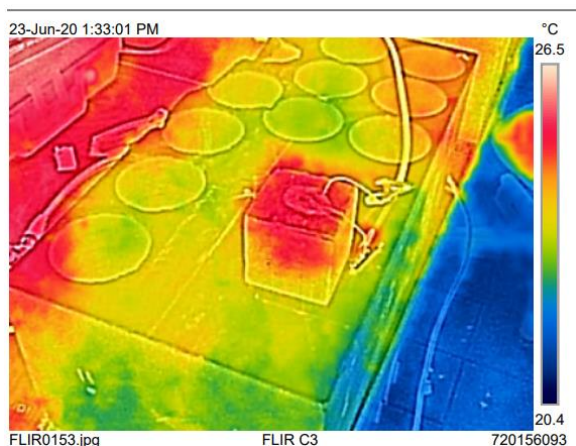
Όπου V_0 είναι το πλάτος της κυματομορφής στο οποίο παρουσιάζεται το μέγιστο

ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και ισχύει ότι $\omega = 2\pi f$ (με f να είναι η συχνότητα και $\pi=3,14$)

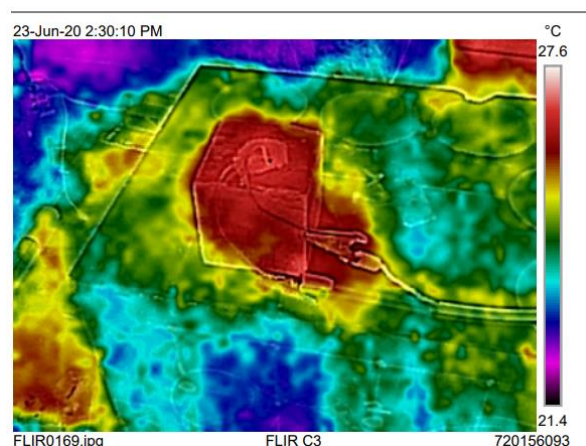
t είναι η χρονική στιγμή που περιγράφει τη μέτρηση από την αρχή των χρόνων που ορίζει ο χειριστής.

Αφού λοιπόν δημιουργήθηκε η επιθυμητή πειραματική διάταξη, ενεργοποιήθηκε η γεννήτρια συχνοτήτων και ξεκίνησε η παραγωγή μηχανικών κυμάτων προς το δοκίμιο σκυροδέματος, μέσω του πιεζοηλεκτρικού. Η γεννήτρια παρέμεινε σε λειτουργία για τρεις συνολικά ώρες και ανά μία ώρα με τη βοήθεια της θερμικής κάμερας λαμβάνονταν φωτογραφικές απεικονίσεις της επιφάνειας έτσι ώστε να αποδειχθεί το γεγονός ότι η δημιουργία μηχανικής ενέργειας θα δημιουργήσει τριβή μεταξύ των μορίων και στη συνέχεια το δοκίμιο θα θερμανθεί.

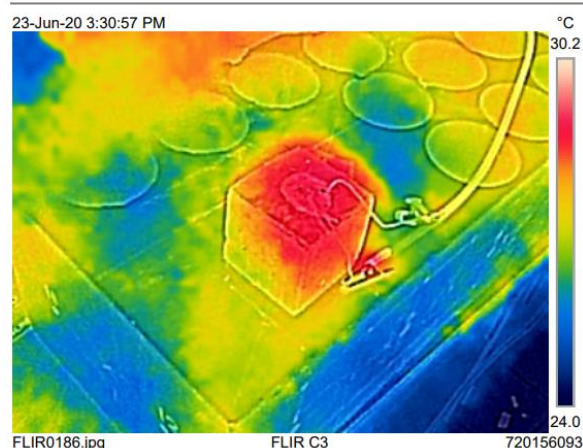
- **Απεικονίσεις κατά τη διάρκεια των τριών ωρών**



Εικόνα 49: Απεικόνιση μετά τη μία ώρα



Εικόνα 50: Απεικόνιση μετά τις δυο ώρες



Εικόνα 51: Απεικόνιση μετά τις τρεις ώρες

Πράγματι παρατηρώντας τις θερμικές εικόνες παραπάνω επιβεβαιώνεται η θεωρία, ότι η ταλάντωση του πιεζοηλεκτρικού θα δημιουργήσει θερμότητα. Αυτή η παραγόμενη θερμότητα καταγράφηκε από τη θερμική κάμερα και διακρίνεται παραπάνω. Στα δεξιά των θερμικών εικόνων βρίσκεται η χρωματική μπάρα των θερμοκρασιών. Όπως ήταν αναμενόμενο η υψηλότερη θερμοκρασία σε βρίσκεται στις περιοχές δίπλα από τον πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη. Όσον αφορά τη συνολική θερμοκρασία παρατηρείται ότι πράγματι με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται αλλά δεν έχει διαχυθεί σε όλο το δοκίμιο.

Σημαντικός στόχος της παραπάνω διαδικασίας ήταν να μπορέσει να γίνει αντιληπτό το ακριβές χρονικό διάστημα το οποίο θα απαιτούταν για να θερμανθεί ομοιόμορφα όλο το δοκίμιο, από το συγκεκριμένου μεγέθους πιεζοηλεκτρικού. Μετά και το πέρας των τριών ωρών λειτουργίας αυτό δεν φάνηκε να συμβαίνει καθώς είτε θα χρειαζόταν μεγαλύτερου μεγέθους πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης είτε χρειαζόταν περισσότερα από ένα πιεζοηλεκτρικά.

Παρόλα αυτά σε περίπτωση που υπήρχαν είτε επιφανειακές ασυνέχειες είτε ασυνέχειες σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια η θερμική κάμερα θα μπορούσε να τις ανιχνεύσει.

5.5 Δεύτερη σειρά πειραμάτων με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες

Η πρώτη σειρά πειραμάτων με τους πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες αποσκοπούσε στο να αποδειχθεί το γεγονός ότι μεταφέρεται θερμότητα μέσω αυτών, ικανή να αναγνωριστεί από τη θερμική κάμερα.

Το επόμενο στάδιο αφορούσε τη δημιουργία ρωγμών και αποκολλήσεων σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος, στο οποίο στη συνέχεια προσκολλήθηκαν 2 διαφορετικού είδους πιεζοηλεκτρικά σε σχέση με το PIC151, ώστε να θερμανθεί και να αποδειχθεί εκ νέου τόσο το γεγονός ότι το δοκίμιο θερμαίνεται μέσω των πιεζοηλεκτρικών όσο και ότι οι περιοχές των ρωγμών αναπτύσσουν μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τις υγιείς.

Για να δημιουργηθούν οι επιθυμητές ρωγμές, το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε μηχανή θραύσης στο εργαστήριο όπου και πραγματοποιήθηκε μονοαξονική θλίψη μέχρι και τη στιγμή θραύσης του.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός :

1) Γεννήτρια συχνοτήτων:

Σε απόλυτη αντιστοιχία με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να δημιουργηθούν μηχανικά κύματα μέσω της ημιτονοειδούς ταλάντωσης, τα οποία θα οδηγηθούν στο εξεταζόμενο υλικό. Η συγκεκριμένη γεννήτρια η οποία και φτάνει μέχρι τα 20Volt, προγραμματίστηκε να λειτουργεί στα 10Volt και με συχνότητα ημιτονοειδούς ταλάντωσης τα 4KHZ.



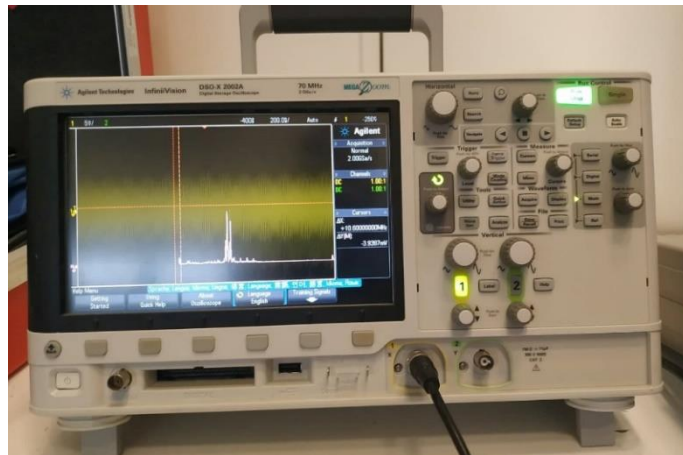
Εικόνα 52: Γεννήτρια σημάτων

2) Παλμογράφος

Ο παλμογράφος αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά όργανα κάθε εργαστηρίου ηλεκτρονικών.

Η χρησιμοποίηση του αφορά τη μέτρηση και την παρατήρηση κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, όπως τη συχνότητα μίας κυματομορφής, τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυματομορφών, το πλάτος κάποιας κυματομορφής κλπ. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το πλάτος του σήματος και στον οριζόντιο άξονα ο χρόνος. Ο παλμογράφος στη συγκεκριμένη διάταξη συνδέθηκε με τη γεννήτρια συχνοτήτων και το πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη που προσκολλήθηκε στο υλικό.

Η χρησιμότητα του παλμογράφου για τη διαδικασία που ακολούθησε ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μέσω αυτού ήταν εφικτό να ελέγχεται η μορφή και το μέγεθος της ημιτονοειδούς ταλάντωσης που παραγόταν από τη γεννήτρια συχνοτήτων.



Εικόνα 53: Παλμογράφος

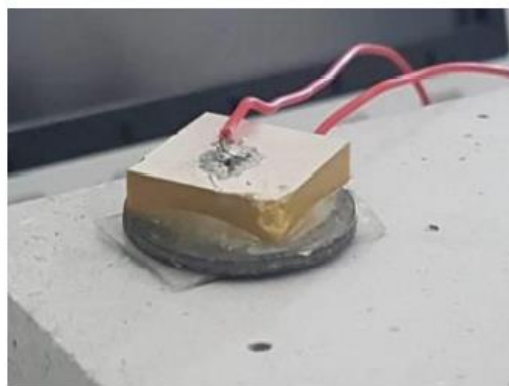
3) Πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων με τους πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικό της σειράς PIC151, το οποίο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν λειτούργησε με βέλτιστο τρόπο καθώς δεν κατάφερε να θερμάνει το μικρό κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν 2 πιεζοηλεκτρικά αυτή τη φορά, της σειράς PIC251, τα οποία είναι και αυτά κεραμικά πιεζοηλεκτρικά, μεγαλύτερων όμως διαστάσεων από ότι το

PIC151. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο η υπέρυθρη θερμογραφία έχει ως στόχο να ανιχνεύσει τις επιφανειακές ανωμαλίες ή και τις υποεπιφανειακές που βρίσκονται σε βάθος μικρό από την επιφάνεια.

Για αυτό το λόγο τα 2 πιεζοηλεκτρικά τοποθετήθηκαν σε μικρή απόσταση από τις 2 επάνω άκρες του δοκιμίου έτσι ώστε τα παραγόμενα κύματα να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο που θα μπορέσει να θερμάνει εξ'ολοκλήρου και ομοιόμορφα την περιοχή μελέτης. Σε περίπτωση για παράδειγμα όπου τα 2 πιεζοηλεκτρικά τοποθετούνταν σε μικρή απόσταση το ένα από το άλλο θα χρειαζόταν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ώστε να διανύσουν τα κύματα ολόκληρη την επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου.



Εικόνα 54: Πιεζοηλεκτρικό τύπου PIC251

4) Δοκίμιο σκυροδέματος τοποθετημένο σε μηχανή θραύσης



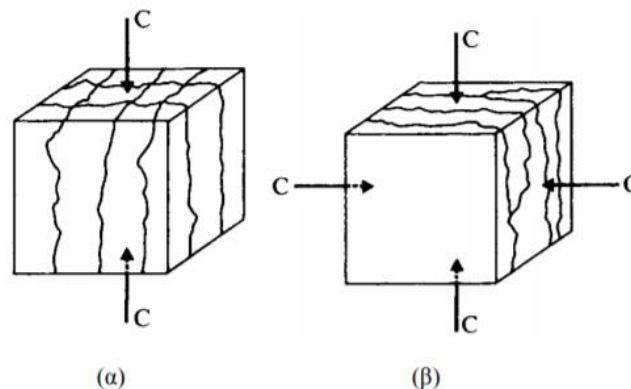
Εικόνα 55: Δοκίμιο σε διαδικασία θλίψης

Επιλέχθηκε για τις ανάγκες της διαδικασίας ένα “υγιές” κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος, διαστάσεων 150mm*150mm, σύμφωνα με τους κανονισμούς, στο οποίο προσκολλήθηκαν τα

2 πιεζοηλεκτρικά(PIC251) και στη συνέχεια αυτό τοποθετήθηκε στη μηχανή θραύσης του εργαστηρίου ώστε να τεθεί σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Το δοκίμιο είναι σημαντικό να τοποθετηθεί κατά το δυνατόν στη μέση της μεταλλικής πλάκας της μηχανής θραύσης ώστε να το επιβαλλόμενο φορτίο να κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε αυτό.

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η αντοχή του σε θλίψη, καθώς το σκυρόδεμα ακόμα και άοπλο εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή θλιπτική αντοχή και λόγω αυτού παρατηρείται η έντονη χρήση του στις κατασκευές.

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο βασική ίσως τεχνική για να προσδιοριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, καθώς αποτελεί μία τεχνική η οποία είναι σχετικά απλή για την εφαρμογή της και παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται για πρακτικούς λόγους κυρίως μικρά δοκίμια, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας(εικόνα 54). Η δοκιμή σε θλίψη μπορεί να διακριθεί σε μονοαξονική θλίψη, διαξονική, τριαξονική θλίψη κ.λ.π , ανάλογα με το πόσες δυνάμεις αντίθετης φοράς τείνουν να συμπιέσουν το δοκίμιο. Στην εικόνα 55 απεικονίζονται οι μορφές θραύσης κυβικού δοκιμίου σε δοκιμή μονοαξονικής και διαξονικής θλίψης.

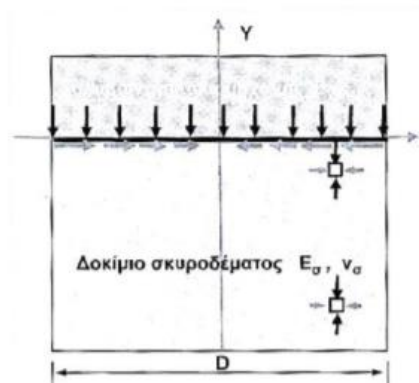


Εικόνα 56: Μορφές θραύσης μονοαξονικής θλίψης(α) και διαξονικής θλίψης(β), (Κυριακόπουλος, 2012)

Στη μονοαξονική θλίψη παρατηρείται το γεγονός ότι σχηματίζονται ρωγμές οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο παράλληλες με το επιβαλλόμενο φορτίο. Αυτές οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και τελικώς το δοκίμιο αστοχεί.(Κυριακόπουλος, 2012). Στη δοκιμή της διαξονικής θλίψης αντιθέτως δημιουργούνται ρωγμές οι οποίες είναι παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο φορτίσεις.

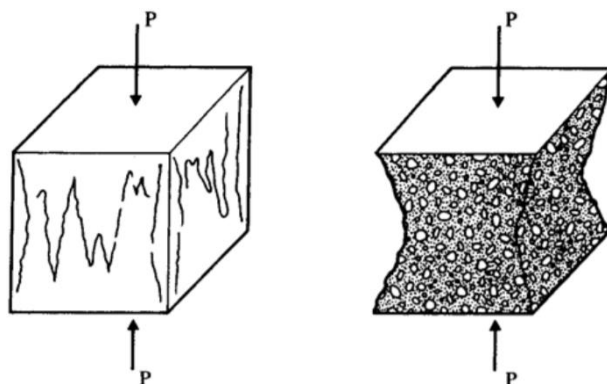
Στις δοκιμές θλίψης που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο παρατηρούνται διαφορετικής μορφής αστοχίες, λόγω της επαφής του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες που υπάρχουν στις μηχανές θραύσης. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη δοκιμή θλίψης το σκυρόδεμα παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις χαλύβδινες πλάκες, γεγονός που οδηγεί στην παρεμπόδιση της οριζόντιας παραμόρφωσης και στην ανάπτυξη συνθηκών τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα αυτής της τριαξονικής θλίψης είναι η φαινομενική αύξηση της αντοχής του δοκιμίου. (Κυριακόπουλος, 2012)

E=Μέτρο ελαστικότητας	$\varepsilon_{\chi\alpha\lambda} = \nu_{\chi\alpha\lambda} * \frac{\sigma_y}{E_{\chi\alpha\lambda}}$	
V=Λόγος Poisson		$\varepsilon_{\sigma} = \nu_{\sigma} * \frac{\sigma_y}{E_{\sigma}}$
σ = τάση		$\frac{\nu_{\sigma}}{E_{\sigma}} > \frac{\nu_{\chi\alpha\lambda}}{E_{\chi\alpha\lambda}} \quad \text{άρα} \quad \varepsilon_{\sigma} > \varepsilon_{\chi\alpha\lambda}$



Εικόνα 57: Τάσεις στην διεπιφάνεια πλάκας-σκυροδέματος(Κυριακόπουλος, 2012)

Οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται σε κυβικά δοκίμια είναι αυτές που διακρίνονται στην εικόνα 58

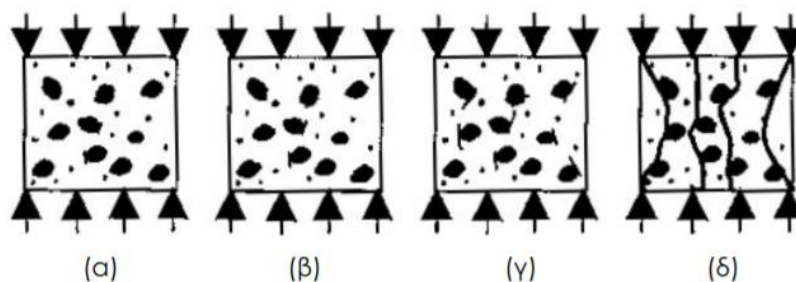


Εικόνα 58: Μορφές αστοχία σε κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος (Κυριακόπουλος, 2012)

Καθώς κινούμαστε προς το μέσο του κυβικού δοκιμίου οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν με αποτέλεσμα στις πλευρές του να σχηματίζονται κατακόρυφες ρωγμές ή και να διασπώνται τελείως με τον πυρήνα να παραμένει επί της ουσίας άθικτος. (Κυριακόπουλος, 2012)

Αφού δημιουργήθηκε η επιθυμητή διάταξη στη συνέχεια ξεκίνησε η διαδικασία μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες ρωγμές και αποκολλήσεις τις οποίες στη συνέχεια θα ανιχνεύσει η θερμική κάμερα υπερύθρων. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας το δοκίμιο υποβάλλεται σε αξονική θλίψη με αργό και ομοιόμορφο ρυθμό μέχρι και τη θραύση του.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μοντέλα αστοχίας της αντοχής του σκυροδέματος τα οποία δείχνουν την πορεία της αντοχής του μέχρι και τη στιγμή της θραύσης του. (Κάνος, 2004)



Εικόνα 59: Αστοχία δοκιμίου από σκυρόδεμα (Κάνος, 2004)

A) 25%-30% της τελικής αντοχής : Παρουσίαση τυχαίων ρωγμών της μεταβατικής ζώνης γύρω από αδρανή με μεγάλο μέγεθος (Κάνος, 2004).

B) 50% της τελικής αντοχής : Αργή επέκταση ρωγμών και στον τσιμεντοπολτό και εμφάνιση μερικών μέσα σε αυτόν(Κάνος, 2004).

Γ) 75% της τελικής αντοχής : Ένωση ρωγμών που βρίσκονταν στον τσιμεντοπολτό με αυτές που βρίσκονταν στη μεταβατική ζώνη με αποτέλεσμα να σχηματιστούν μεγαλύτερες και πιο σοβαρές ρωγμές. Λόγω της αύξησης των τάσεων οι σημαντικές και μεγάλες ρωγμές ανοίγουν, ενώ παρατηρείται κλείσιμο των μικρών (Κάνος, 2004).

Δ) Τελική αντοχή: Εμφάνιση αστοχίας μετά την ευθυγράμμιση σημαντικών ρωγμών κατά την κατακόρυφο διεύθυνση διαχωρίζοντας το αντικείμενο μελέτης(Κάνος, 2004).

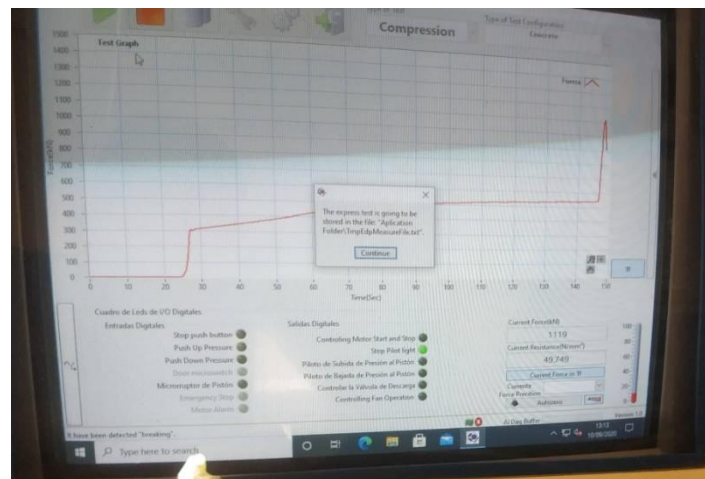
Η αντοχή του σκυροδέματος στη δοκιμασία της θλίψης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το σχήμα του δοκιμίου που θα χρησιμοποιηθεί και πιο συγκεκριμένα ο λόγος ύψους προς διάσταση βάσης, το μέγεθος του δοκιμίου και η ηλικία του δοκιμίου.

Στην εικόνα 59 παρουσιάζεται το δοκίμιο μετά τη θραύση του, όπου και διακρίνονται οι επιφανειακές ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί και θα βοηθήσουν στη μετέπειτα εξέταση του με τη θερμική κάμερα καθώς και οι αποκολλήσεις υλικού που δημιουργήθηκαν. Το δοκίμιο αστόχησε σύμφωνα με τον αναμενόμενο τρόπο.



Εικόνα 60: Δοκίμιο μετά τη θραύση του

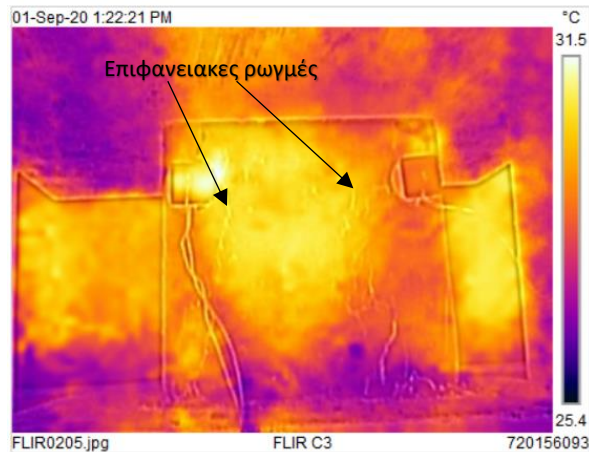
Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη γραφική παράσταση που δείχνει τη δύναμη(εξωτερική φόρτιση), σε αναλογία με το χρόνο που δέχεται το δοκίμιο σκυροδέματος μέχρι και τη στιγμή της θραύσης του. Η μεταλλική πλάκα έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο στα 25s και συνεχίζεται η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης μέχρι και τα 145s όπου και πραγματοποιείται η θραύση του με το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο να είναι 1119 KN.



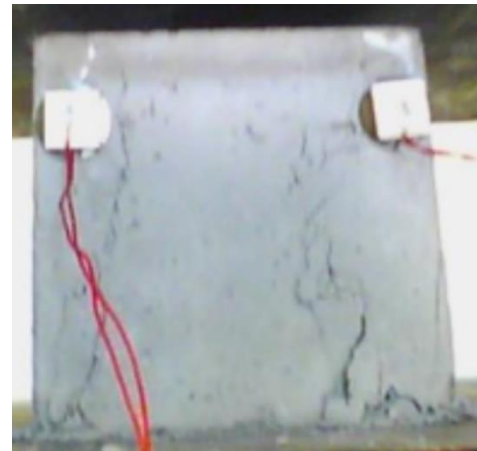
Εικόνα 61: Γραφική απεικόνιση δοκιμής θλίψης

Στη θέση του υγιούς δοκιμίου πλέον δημιουργήθηκε ένα δοκίμιο με εμφανείς ρωγμές και αποκολλήσεις το οποίο ξεκίνησε να θερμαίνεται με τη βοήθεια των πιεζοηλεκτρικών. Η διαδικασία θέρμανσης του δοκιμίου μέσω της παραγωγής μηχανικής ενέργειας σε αυτό διήρκεσε συνολικά δύο ώρες και τριάντα λεπτά και κατά τη διάρκεια αυτών διενεργήθηκαν οι φωτογραφικές απεικονίσεις με τη βοήθεια της θερμικής κάμερας υπερύθρων.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θερμικές εικόνες του δοκιμίου μετά την επεξεργασία τους στο λογισμικό FlirTools.

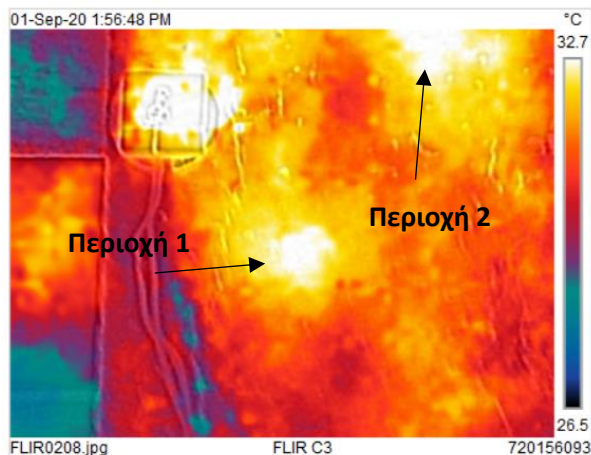


Εικόνα 62: Πρώτη θερμική εικόνα



Εικόνα 63: Περιοχή πρώτης θερμικής εικόνας

Η παραπάνω εικόνα δείχνει το δοκίμιο του σκυροδέματος λίγα λεπτά αφότου έχει ξεκινήσει η παραγωγή μηχανικής ενέργειας με τη βοήθεια των πιεζοηλεκτρικών. Αυτό που παρατηρείται στη συγκεκριμένη θερμική εικόνα είναι το γεγονός ότι οι επιφανειακές ρωγμές οι οποίες και φαίνονται και δια γυμνού οφθαλμού έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τις γύρω από αυτές περιοχές, καθώς ακριβώς πάνω στις ρωγμές έχουμε συγκέντρωση θερμοκρασίας λόγω τριβής. Άλλο ένα στοιχείο το οποίο διακρίνεται στην παραπάνω εικόνα είναι η περιοχή ακριβώς δίπλα από το τοποθετημένο αριστερά πιεζοηλεκτρικό, όπου διακρίνεται μία μεγαλύτερη συγκέντρωση θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη περιοχή απαιτεί επανέλεγχο καθώς ενδεχομένως υπάρχει μεγάλη ρωγμή, η οποία χρίζει επιδιόρθωσης.



Εικόνα 64: Δεύτερη θερμική εικόνα



Εικόνα 65: Περιοχή δεύτερης θερμικής εικόνας

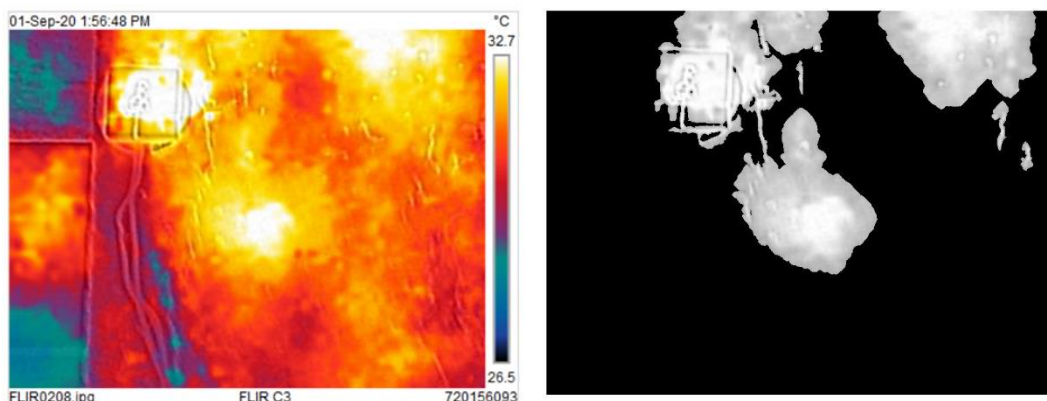
Η αμέσως επόμενη θερμική εικόνα δημιουργήθηκε μισή ώρα περίπου αργότερα από την προηγούμενη και αφορά το πρώτο μισό του δοκιμίου. Σε αυτή διακρίνονται στοιχεία τα οποία δεν είχαν φανεί προηγουμένως και αποδεικνύουν το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρικά έχουν θερμάνει με σωστό τρόπο το δοκίμιο. Η περιοχή μελέτης αφορούσε την επιφάνεια δίπλα από το αριστερά τοποθετημένο πιεζοηλεκτρικό, όπου στην προηγούμενη θερμική εικόνα είχε φανεί ότι υπήρχε έντονη ρωγμή.

Πράγματι λοιπόν, διακρίνεται ακόμα μεγαλύτερη συγκέντρωση θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο σημείο. Το πιο ενδιαφέρον στοιχείο της παραπάνω εικόνας, είναι οι περιοχές 1 και 2 όπου παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας¹ σε σημεία τα οποία όπως φαίνεται από την εικόνα 64 δεν υπάρχει κάποια εμφανής ασυνέχεια ή ρωγμή. Η συγκεκριμένη απότομη αύξηση της θερμοκρασίας υποδηλώνει ότι ακριβώς σε αυτά τα σημεία υπάρχει κάποια υποεπιφανειακή ασυνέχεια-ρωγμή η οποία εν καιρό ενδέχεται να οδηγήσει τη δομή σε αστοχία. Σε περίπτωση που μία τέτοια θερμική εικόνα είχε εξεταστεί για κάποια υφιστάμενη κατασκευή θα οδηγούσε το μελετητή στο συμπέρασμα ότι στις συγκεκριμένες περιοχές απαιτείται άμεση επιδιόρθωση και επισκευή.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος μέσω της Matlab ο οποίος μπορεί να κάνει αναγνώριση των περιοχών αστοχίας(ο αλγόριθμος βρίσκεται στο Παράρτημα). Η συνεισφορά της Matlab είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς πλέον πέρα από τη βλάβη που προσδιορίζεται μέσω της διαδικασίας της υπέρυθρης θερμογραφίας στη συνέχεια μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου μπορεί να υπολογιστεί και αριθμητικά το ποσοστό της επιφάνειας μίας περιοχής που έχει αστοχία, σε σχέση με το σύνολο της . Το στοιχείο αυτό είναι πολύ σημαντικό για τον μη καταστροφικό έλεγχο των κατασκευών και ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις που απαιτούνται ενισχύσεις-επισκευές.

¹ Σύμφωνα με τη χρωματική μπάρα στα δεξιά της θερμικής εικόνας, οι περιοχές με την υψηλότερη θερμοκρασία, είναι οι περιοχές που εμφανίζουν το άσπρο χρώμα, όπως οι περιοχές 1,2 και η περιοχή όπου βρίσκεται το πιεζοηλεκτρικό

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στη συνέχεια και αφορούν τη θερμική εικόνα 63.



Εικόνα 66: Θερμική εικόνα 64 και παρουσίαση των περιοχών αστοχίας στη Matlab

Αφού πραγματοποιήθηκε φιλτράρισμα των χρωμάτων σε αποχρώσεις του γκρι στη συνέχεια μέσω του αλγορίθμου της Matlab πραγματοποιήθηκε απομόνωση των χρωμάτων που αφορούσαν τις υψηλότερες θερμοκρασίες της θερμικής εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται η παραπάνω εικόνα όπου διακρίνονται μόνο οι περιοχές των αστοχιών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μετατροπή των παραπάνω περιοχών αστοχίας σε άσπρο και μαύρο χρώμα ώστε να τις επεξεργαστεί η Matlab σε 0 και 1 bit. Η νέα εικόνα που προκύπτει παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 67: Παρουσίαση των περιοχών αστοχίας στη Matlab σε άσπρο και μαύρο χρώμα

Αφού απομονώθηκαν οι περιοχές όπου παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες(δηλ. οι περιοχές αστοχιών) στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που

προέκυψαν από τον αλγόριθμο, τα οποία και δείχνουν το εμβαδόν και την περίμετρο των περιοχών που βρίσκονται οι αστοχίες.

Πίνακας 9: Περιοχές αστοχίας

Περιοχές	Εμβαδόν(pixel)	Περίμετρος(pixel)
Περιοχή 1	31085	796,746
Περιοχή 2	379	122.373
Περιοχή 3	75910	2464,377
Περιοχή 4	1055	208,029
Περιοχή 5	590	131,546

Τα παραπάνω μεγέθη του πίνακα 9 αντικατοπτρίζουν τα pixels που καταλαμβάνει η κάθε περιοχή αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, στη στήλη του πίνακα που αναγράφεται το εμβαδόν, στην ουσία αναφέρονται τα pixels που περιέχονται μέσα στην περιοχή, επομένως αρκεί να γνωρίζεις πόσα cm^2 είναι το κάθε pixel ώστε να βρεθεί η επιφάνεια που υπάρχει η αστοχία. Αντιστοίχως στη στήλη που αναγράφεται η περίμετρος, αναφέρονται τα pixels που είναι στην κάθε περιοχή, επομένως αρκεί να γνωρίζεις πόσα cm είναι το ένα pixel ώστε να υπολογίσεις το συνολικό μήκος της περιμέτρου.

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το εμβαδόν για την περιοχή 1(εικόνα 66) και ομοίως υπολογίζονται και οι υπόλοιπες περιοχές. Όπως έχει αναφερθεί το δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο εξετάστηκε είχε διαστάσεις $15\text{cm} \times 15\text{cm}$. Η περιοχή μελέτης όμως για τη συγκεκριμένη εικόνα αφορά το μισό δοκίμιο επομένως ως συνολικό μήκος λαμβάνουμε τα $7,5\text{cm}$. Στα $7,5\text{ cm}$ σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ποιότητα της εικόνας αντιστοιχούν 1200 Pixels. Επομένως πραγματοποιώντας τη διαίρεση $\frac{7,5}{1200} = 0,00625\text{cm}$ προκύπτει η μία διάσταση του Pixel. Πραγματοποιώντας στη συνέχεια τον πολλαπλασιασμό $0,00625\text{cm} \times 0,00625\text{cm} = 3,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ βρίσκεται το εμβαδόν του ενός Pixel. Η περιοχή 1 όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 9 έχει ως εμβαδό 31085 Pixels. Επομένως κάνοντας τον πολλαπλασιασμό $31085 \times 3,9 \times 10^{-5} = 1,214 \text{ cm}^2$ βρίσκεται η συνολική επιφάνεια αστοχίας που αντιπροσωπεύει την περιοχή 1.

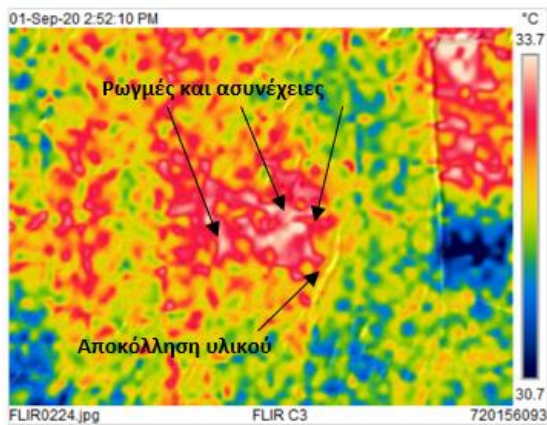
Με όμοιο σκεπτικό στη συνέχεια υπολογίζεται και η περίμετρος της περιοχής 1. Πιο συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε η διάσταση σε cm (προς μία διεύθυνση) του 1 Pixel είναι $0,00625 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τη στήλη του πίνακα 9, όπου αναγράφονται οι περίμετροι των επιφανειών αστοχίας, λαμβάνουμε ως περίμετρο για την περιοχή 1 τα $796,746 \text{ Pixels}$.

Άρα το σύνολο της περιμέτρου της περιοχής 1 σε cm είναι το ακόλουθο.

$$0,00625 * 796,746 = 4,98 \text{ cm}$$

Μετά λοιπόν από τους μετασχηματισμούς που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει το γεγονός, ότι η περιοχή 1, η οποία και είναι μία περιοχή με αυξημένη θερμοκρασία λόγω των αστοχιών-ασυνεχειών που υπάρχουν σε αυτή, έχει $E= 1,214\text{cm}^2$ και $\Pi=4,98\text{cm}$.

Η ίδια διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί, μέσω της Matlab για όλες τις θερμικές εικόνες που περιλαμβάνονται στην διπλωματική εργασία ώστε να προκύψουν και αριθμητικά οι περιοχές αστοχίας.



Εικόνα 68: Τρίτη θερμική εικόνα

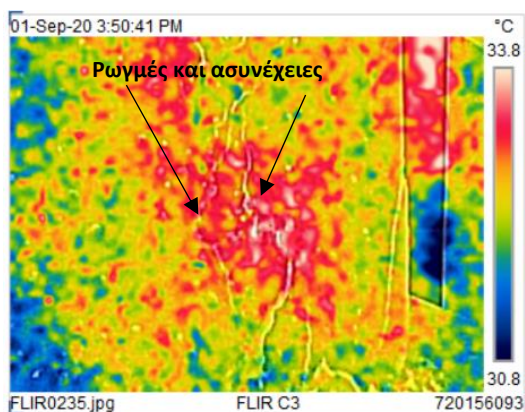


Εικόνα 69: Περιοχή τρίτης θερμικής εικόνας

Μετά τον έλεγχο της επιφάνειας που αφορούσε την περιοχή γύρω από το αριστερά τοποθετημένο πιεζοηλεκτρικό και μέχρι το μέσο του δοκιμίου, στη συνέχεια δημιουργήθηκαν θερμικές εικόνες σχεδόν 1 ώρα αργότερα από τις προηγούμενες και αφορούσαν την κάτω δεξιά επιφάνεια του δοκιμίου, όπου και είχαν δημιουργηθεί ρωγμές και αποκολλήσεις μετά τη δοκιμή θλίψης.

Πράγματι στην θερμική εικόνα 68 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά τόσο η αποκόλληση του υλικού, όσο και περιοχές γύρω από αυτή, όπου εμφανίζονται ασυνέχειες οι οποίες χρήζουν προσοχής. Στις θερμικές εικόνες που έχουν χρησιμοποιηθεί διακρίνεται και το συνολικό εύρος

των υφιστάμενων ασυνεχειών, επομένως στην περίπτωση επιδιόρθωσης, ο μελετητής θα γνωρίζει ακριβώς το που χρειάζεται να επέμβει.



Εικόνα 70: Τέταρτη θερμική εικόνα



Εικόνα 71: Περιοχή τέταρτης θερμικής εικόνας

Η τελευταία θερμική εικόνα δημιουργήθηκε αμέσως μετά την απενεργοποίηση της γεννήτριας συχνοτήτων και αφορούσε την ίδια περιοχή με τη προηγούμενη θερμική εικόνα. Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη εικόνα, έτσι και εδώ παρατηρείται αύξηση θερμοκρασίας στα ακριβώς ίδια σημεία. Η θερμοκρασία σε αυτές τις περιοχές είναι αυξημένη καθώς λόγω των επιφανειακών ρωγμών και των ασυνεχειών υπάρχει αέρας ανάμεσα στα μόρια της δομής του υλικού και ο αέρας θερμαίνεται πιο γρήγορα από το ίδιο το υλικό.

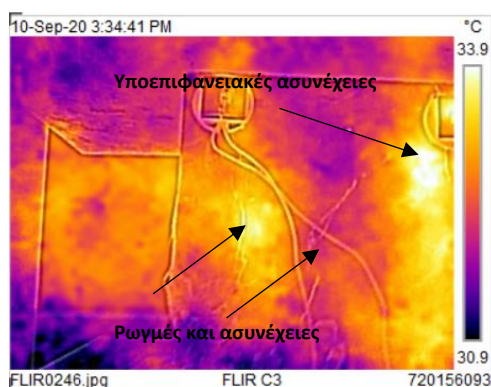
Μετά τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία και τα οποία απέδειξαν το γεγονός ότι τα συγκεκριμένου τύπου πιεζοηλεκτρικά θέρμαναν την επιφάνεια του δοκιμίου και στη συνέχεια η θερμική κάμερα ανίχνευσε τόσο τις επιφανειακές ασυνέχειες, όσο και τις υποεπιφανειακές, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία για ένα νέο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος, το οποίο είχε ίδιες διαστάσεις και χαρακτηριστικά.

Το κυβικό δοκίμιο τοποθετήθηκε στη μηχανή θραύσης ώστε να πραγματοποιηθεί η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του και να δημιουργηθούν επιφανειακές και υποεπιφανειακές ασυνέχειες και ρωγμές. Στο δοκίμιο είχαν προσκολληθεί πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες τύπου PIC251, στις αντίστοιχες με προηγουμένως θέσεις και αφού ενεργοποιήθηκε η γεννήτρια συχνοτήτων και ο παλμογράφος αυτοί ξεκίνησαν να πάλλονται και να δημιουργούν μηχανική ενέργεια και κατά συνέπεια και θερμότητα.



Εικόνα 72: Δοκίμιο μετά τη θραύση του

Κατά τη διάρκεια θέρμανσης του δοκιμίου, η οποία ήταν περίπου μία ώρα και τριάντα λεπτά και με τη βοήθεια της θερμικής κάμερας υπέρυθρων διενεργήθηκε φωτογραφική απεικόνιση του δοκιμίου ώστε μετά από επεξεργασία να εξαχθούν οι παρακάτω θερμικές εικόνες.



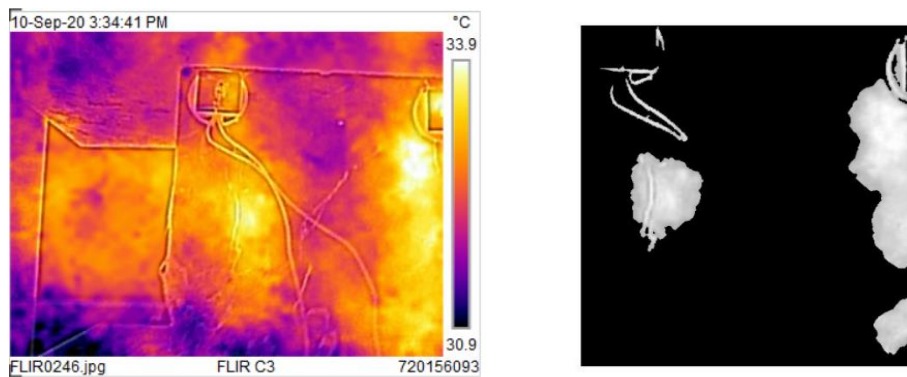
Εικόνα 73: Πρώτη θερμική εικόνα



Εικόνα 74: Περιοχή πρώτης θερμικής εικόνας

Στην πρώτη θερμική εικόνα που παρουσιάζεται παραπάνω φανερώνεται αυξημένη θερμοκρασία πάνω στις επιφανειακές ρωγμές που φαίνονται και στην εικόνα 73 ενώ φανερώνεται και επίσης μία περιοχή κάτω από το πιεζοηλεκτρικό, που έχει τοποθετηθεί στα δεξιά του δοκιμίου στην οποία αν και δεν φαίνεται κάποια ρωγμή στην οπτική εικόνα, στη θερμική εικόνα παρουσιάζεται μεγάλη συγκέντρωση της θερμοκρασίας.

Η θερμική εικόνα 73 επεξεργάστηκε στη συνέχεια στον αλγόριθμο της Matlab, που δημιουργήθηκε με σκοπό την απομόνωση των περιοχών αυξημένης θερμοκρασίας-περιοχών αστοχίας. Οι περιοχές αστοχίας βάσει των υψηλότερων θερμοκρασιών που προκύπτουν παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 75: Θερμική εικόνα 73 και παρουσίαση των περιοχών αστοχίας στη Matlab

Μετά το φιλτράρισμα των χρωμάτων σε αποχρώσεις του γκρι και την απομόνωση των περιοχών όπου υπάρχουν αστοχίες στη συνέχεια παρουσιάζεται η απεικόνιση των παραπάνω περιοχών σε άσπρο και μαύρο χρώμα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία στη Matlab σε 0 και 1 bit.



Εικόνα 76: Παρουσίαση των περιοχών αστοχίας στη Matlab σε άσπρο και μαύρο χρώμα

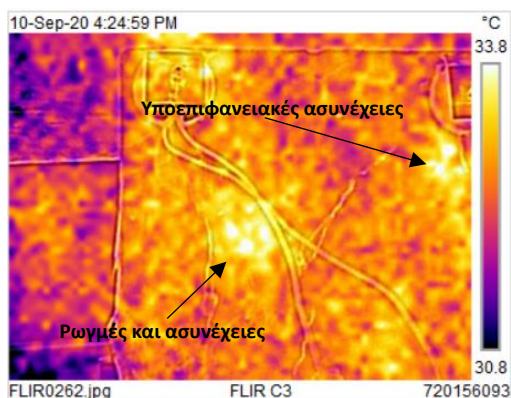
Αφού λοιπόν απομονώθηκαν οι περιοχές όπου βρίσκονται οι αστοχίες στη συνέχεια μέσω του αλγορίθμου, προέκυψαν αριθμητικά το εμβαδόν των επιφανειών αυτών καθώς και η περίμετρος τους. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 10.

Πίνακας 10: Περιοχές αστοχίας

Περιοχές	Εμβαδόν(pixel)	Περίμετρος(pixel)
Περιοχή 1	10884	504,675
Περιοχή 2	1596	605,467
Περιοχή 3	709	218,29
Περιοχή 4	245	106,155
Περιοχή 5	24261	1071,684
Περιοχή 6	4059	258,644
Περιοχή 7	641	120,619

Σε αντιστοιχία με το προηγούμενο δοκίμιο θα υπολογιστεί και σε αυτό το εμβαδόν και η περίμετρος της περιοχής 1. Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

$$E_{pix} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{cm}^2, \text{ άρα } E_{\pi 1} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{cm}^2 \cdot 10884 \text{pixels} = 0,425 \text{ cm}^2 \quad \text{και} \quad \Pi = 0.00625 \text{cm} \cdot 504,675 \text{pixels} = 3,15 \text{ cm}$$



Εικόνα 77: Δεύτερη θερμική εικόνα



Εικόνα 78: Περιοχή δεύτερης θερμικής εικόνας

Η επόμενη θερμική εικόνα δημιουργήθηκε 50 λεπτά αργότερα από την προηγούμενη και ενώ το σύστημα των πιεζοηλεκτρικών συνέχιζε να δημιουργεί μηχανική ταλάντωση στο δοκίμιο. Η περιοχή μελέτης παρέμεινε η ίδια καθώς από την προηγούμενη θερμική εικόνα είχε φανερωθεί μία περιοχή η οποία έχριζε ανάγκης για επανέλεγχο.

Όπως διακρίνεται στην θερμική εικόνα 77 η αυξημένη θερμοκρασία παραμένει στις ακριβώς ίδιες θέσεις με πριν επομένως σε περίπτωση που η συγκεκριμένη τεχνική είχε εφαρμοστεί σε

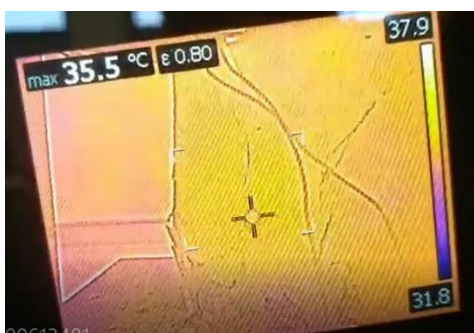
κάποιο δομικό μέλος μίας υφιστάμενης κατασκευής θα απαιτούνταν επιδιόρθωση-επισκευή των περιοχών αυτών.

Μετά τη δημιουργία και την επεξήγηση των θερμικών εικόνων για το δεύτερο δοκίμιο σκυροδέματος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε μία δυνατότητα που προσφέρει η θερμική κάμερα Flir C3 και η οποία είναι ιδιαίτερος χρήσιμη για τον μη καταστροφικό έλεγχο δομικών κατασκευών.

Πιο συγκεκριμένα , η θερμική κάμερα παρέχει τη δυνατότητα Hotspot, σύμφωνα με την οποία, επιλέγεται η επιφάνεια του δοκιμίου και στη συνέχεια δημιουργείται ένας “στόχος-κέσορας” ο οποίος ακολουθεί τις περιοχές με την υψηλότερη θερμοκρασία. Η εν λόγω δυνατότητα μπορεί να βοηθήσει ιδιαίτερα σε έλεγχο κάποιας μεγάλης επιφάνειας στο πεδίο, καθώς βοηθάει το μελετητή να καταλάβει με γρήγορο και άμεσο τρόπο ποιες περιοχές αναπτύσσουν μεγαλύτερη θερμοκρασία.

Αφού λοιπόν θα έχει πραγματοποιηθεί η αρχική σάρωση κάποιας επιφάνειας με τη δυνατότητα του Hotspot στη συνέχεια ο μελετητής θα απομονώσει αυτές τις περιοχές, όπου ο κέσορας-στόχος επιδεικνύει αυξημένη θερμοκρασία και θα πραγματοποιήσει έναν πιο λεπτομερή έλεγχο με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και παραπάνω.

Η συγκεκριμένη διαδικασία αποθανατίστηκε με video και στη συνέχεια παρατίθενται κάποια στιγμιότυπα του.





Εικόνες 79-84: Hotspot στην επιφάνεια του δοκιμίου

Κατά τη λειτουργία της δυνατότητας του Hotspot, ο κέσορας-στόχος ο οποίος διακρίνεται στις εικόνες 79-84 ακολουθούσε όλη τη διαδρομή των επιφανειακών ρωγμών επιβεβαιώνοντας τόσο τη θεωρία της υπέρυθρης θερμογραφίας, όσο και την ορθότητα της πειραματικής διαδικασίας.

5.6 Συμπεράσματα διαδικασίας πειραμάτων με χρήση πιεζοηλεκτρικών

Στο κεφάλαιο 5 αναπτυσσόταν ο βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας, που ήταν η χρήση των πιεζοηλεκτρικών για τη θέρμανση των δοκιμών σκυροδέματος που είχαν δημιουργηθεί στο εργαστήριο για τις ανάγκες της διπλωματικής. Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών έδωσε ιδιαίτερος ενθαρρυντικά αποτελέσματα και με την κατάλληλη βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας της θερμογραφίας με δονήσεις, δύναται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τον μη καταστροφικό έλεγχο δομών σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις 2 σειρές πειραμάτων είναι τα εξής:

- Τόσο το πιεζοηλεκτρικό τύπου PIC151, που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη σειρά πειραμάτων, όσο και το πιεζοηλεκτρικό τύπου PIC251, που χρησιμοποιήθηκε στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, αποδείχτηκε ότι μπορούν να θερμάνουν το σκυρόδεμα.
- Τα πιεζοηλεκτρικά τύπου PIC251 τα οποία και είναι μεγαλύτερα σε σχέση με τα PIC151 θέρμαναν σε μεγαλύτερο βαθμό τα δοκίμια και συνίσταται να χρησιμοποιούνται σε ανάλογες περιπτώσεις.
- Τα πιεζοηλεκτρικά τύπου PIC251 εμφάνισαν στις θερμικές εικόνες και υποεπιφανειακές ασυνέχειες, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τον μη καταστροφικό έλεγχο κατασκευών.
- Σε όλες τις θερμικές εικόνες της δεύτερης σειράς πειραμάτων παρατηρήθηκε η αναμενόμενη συγκέντρωση θερμοκρασίας ακριβώς στις περιοχές των επιφανειακών ρωγμών, λόγω της ταχύτερης θέρμανσης του αέρα σε σχέση με το υλικό.
- Η λειτουργία Hotspot που παρείχε η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διατριβής, είναι ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο και μπορεί να απλουστεύσει και να επιταχύνει τη διαδικασία .
- Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μετέπειτα επεξεργασία των θερμικών εικόνων σε κατάλληλο λογισμικό, καθώς θερμικές εικόνες οι οποίες δεν επιδείκνυαν κάποια ασυνέχεια σε πρώτο έλεγχο, μετά από επεξεργασία φανέρωσαν τις περιοχές που υπήρχε δομικό πρόβλημα.
- Σε περιπτώσεις που μετά από έλεγχο με τη βοήθεια της υπέρυθρης θερμογραφίας, δημιουργήθηκε ανάγκης επισκευής- επιδιόρθωσης κάποιας επιφάνειας είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η διαδικασία ώστε να φανεί η επιτυχία ή όχι της επισκευής.
- Παρατηρήθηκε τόσο στις δοκιμές της κλασικής τεχνικής της θερμογραφίας παλμού, όσο και στις δοκιμές με τη θερμογραφία με δονήσεις το γεγονός ότι ακόμα και στα πρώτα λεπτά θέρμανσης οι επιφανειακές ρωγμές και ασυνέχειες ήταν εφικτό να αναγνωρισθούν. Η περαιτέρω θέρμανση των δοκιμίων διευκόλυνε την αναγνώριση μόνο των υποεπιφανειακών ασυνεχειών.

- Η δημιουργία του αλγορίθμου μέσω της Matlab, διευκολύνει ακόμη περισσότερο τη χρήση της συγκεκριμένης μεθολογίας και παράλληλα της προσθέτει και μεγαλύτερη αξιοπιστία, καθώς πλέον υπάρχει και αριθμητική προσέγγιση των περιοχών όπου υπάρχουν αστοχίες.
- Οι δοκιμές με τα πιεζοηλεκτρικά και ιδιαιτέρως η δοκιμή με τα πιεζοηλεκτρικά τύπου PIC251 έδωσαν πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στο κεφάλαιο 4, όπου ως εξωτερική πηγή θέρμανσης είχε χρησιμοποιηθεί το αερόθερμο. Το στοιχείο αυτό ήταν και το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας καθώς ο νέος τρόπος που προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε φαίνεται ότι ακόμα και στο τόσο πρώιμο στάδιο του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του μη καταστροφικού ελέγχου υφιστάμενων κατασκευών.

Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

6.1 Γενικά Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πρόταση ενός νέου τρόπου λειτουργίας της υπέρυθρης θερμογραφίας με δονήσεις, ο οποίος μετά από απαραίτητες βελτιώσεις μπορεί να δημιουργήσει ένα σύστημα μη καταστροφικού ελέγχου πιο πρακτικό, πιο οικονομικό και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερης κλίμακας υφιστάμενες κατασκευές σκυροδέματος του 20^{ου} αιώνα.

Η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας, βασίζεται στο γεγονός ότι ο αέρας θερμαίνεται πιο γρήγορα από το υλικό, επομένως στις περιοχές του ίδιου υλικού, όπου παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασία ενδέχεται να υπάρχουν επιφανειακές ρωγμές και ασυνέχειες τις οποίες δύναται να εντοπίσει μετά από κατάλληλη επεξεργασία η θερμική κάμερα.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων στα εργαστήρια του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η κλασική μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας και η διαδικασία αφορούσε τη θέρμανση τριών δοκιμίων, με γνωστές ρωγμές και ασυνέχειες, με τη τεχνική της θερμογραφίας παλμού, όπου η θερμική κάμερα και η πηγή θερμότητας τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του αντικειμένου, με την κάμερα να ανιχνεύει τη μετάδοση της θερμότητας δια μέσω του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια θέρμανσης των δοκιμίων διενεργήθηκαν θερμικές απεικονίσεις μέσω της θερμικής κάμερας Flir C3 ώστε μετά από την κατάλληλη επεξεργασία των θερμικών εικόνων να αποδειχτεί το γεγονός ότι οι σαθρές περιοχές της επιφάνειας αναπτύσσουν μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τις υγιείς. Τα αποτελέσματα από αυτή την πειραματική διαδικασία απέδειξαν τη θεωρία της υπέρυθρης θερμογραφίας, αλλά δημιούργησαν και ορισμένους προβληματισμούς σχετικά με τη ταχύτητα επιθεώρησης και την αξιοπιστία της μεθόδου όταν απαιτείται να ελεγχθούν μεγάλες επιφάνειες δομών σκυροδέματος.

Μετά την επιβεβαίωση της θεωρίας της υπέρυθρης θερμογραφίας ακολούθησε η δεύτερη σειρά πειραματικών δοκιμών, κατά την οποία ως εξωτερική πηγή θέρμανσης χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες. Η εν λόγω μεθοδολογία η οποία και κατατάσσεται στις τεχνικές της θερμογραφίας με δονήσεις(vibrothermography), αποτελούσε το βασικό θέμα της εργασίας.

Η βασική σκέψη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ήταν το γεγονός ότι η μηχανική ενέργεια λόγω των εξωτερικών δονήσεων που προκύπτουν από τα πιεζοηλεκτρικά θα δημιουργήσει κίνηση των μορίων στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί τριβή στις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται ατέλειες, όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων και να απελευθερωθεί θερμότητα. Τη παραγόμενη θερμότητα στη συνέχεια θα την ανιχνεύσει η υπέρυθρη θερμική κάμερα με αποτέλεσμα να υποδείξει τις θέσεις στις οποίες εμφανίζονται οι ασυνέχειες. Αφού λοιπόν αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένα υγιές μικρό δοκίμιο σκυροδέματος ώστε να εξακριβωθεί ότι παράγεται θερμότητα από ένα κεραμικό πιεζοηλεκτρικό, τύπου PIC151, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δύο μεγαλύτερα δοκίμια, στα οποία μέσω δοκιμής θλίψης στο εργαστήριο δημιουργήθηκαν ρωγμές και αποκολλήσεις. Αυτά τα δοκίμια στη συνέχεια θερμάνθηκαν μέσω των κεραμικών πιεζοηλεκτρικών PIC251 και δημιουργήθηκαν εκ νέου απεικονίσεις με τη θερμική κάμερα. Μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε αποδείχτηκε τόσο το γεγονός ότι τα πιεζοηλεκτρικά μπορούν να θερμάνουν μία επιφάνεια σκυροδέματος, όσο και το ότι τη σαθρή επιφάνεια μπορεί στη συνέχεια να την εντοπίσει η θερμική κάμερα. Τέλος, η δημιουργία του αλγορίθμου μέσω της Matlab διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη συγκεκριμένη τεχνική καθώς μπορούν πλέον να υπολογιστούν-προσδιοριστούν και αριθμητικά οι περιοχές οι οποίες έχουν αστοχίες.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης διατριβής ήταν η εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών ως μίας καινούριας μεθόδου ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών σκυροδέματος. Τα εξαγόμενα στοιχεία της πειραματικής διαδικασίας και ιδιαίτερα αυτά από τις δοκιμές με τα πιεζοηλεκτρικά PIC251 έδειξαν θετικά συμπεράσματα, καθώς κατέστη δυνατό να αναγνωριστούν τόσο οι επιφανειακές ασυνέχειες όσο και οι υποεπιφανειακές, όμως η έρευνα βρίσκεται σε αρχικό στάδιο και για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί είναι αναγκαία η βελτιστοποίηση της.

Τα ζητήματα, τα οποία χρήζουν επιπλέον θεωρητικής και τεχνικής διερεύνησης και δύναται να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας αφορούν κατά κύριο λόγο το μέγεθος, τον αριθμό

και γενικότερα τον κánaβo πιεζοηλεκτρικών που απαιτούνται για την εξολοκλήρου θέρμανση μίας επιφάνειας.

6.3 Επίλογος – αξιολόγηση της μεθόδου

Εν κατακλείδι διαπιστώθηκε το γεγονός ότι η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική τεχνική στο πεδίο έρευνας των μη καταστροφικών ελέγχων δομικών κατασκευών, καθώς είναι μία μέθοδος η οποία μέσω της σωστής εφαρμογής παρέχει σημαντικά και γρήγορα αποτελέσματα στον έλεγχο επιφανειακών αστοχιών όπως :

- Ρωγμών
- Ασυνεχειών στη δομή του υλικού
- Κενών
- Υγρασιών
- Αποκολλήσεων

Η τεχνική της θερμογραφίας με δονήσεις και πιο συγκεκριμένα η πρόταση χρήσης των πιεζοηλεκτρικών ως μία μέθοδο αναγνώρισης σαθρών περιοχών σε υφιστάμενες δομές σκυροδέματος, αποτελεί μία μεθοδολογία η οποία μπορεί να βελτιώσει και να επιταχύνει τη διαδικασία επιθεώρησης. Η εν λόγω τεχνική δεν έχει ιδιαίτερο κόστος, καθώς από τη μία τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά είναι πλέον σε αρκετά χαμηλές τιμές και από την άλλη οι θερμικές κάμερες υπέρυθρων φθίνουν σε τιμή όσο περνάν τα χρόνια. Επίσης σε σχέση με άλλες τεχνικές επιθεώρησης δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη ούτε η προετοιμασία της διάταξης του εξοπλισμού, ούτε η επεξήγηση των αποτελεσμάτων των θερμικών εικόνων. Όπως φάνηκε και από τα πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο ακόμα και από τα πρώτα λεπτά θέρμανσης είναι δυνατόν η μεθοδολογία να αναγνωρίσει όλες τις επιφανειακές ρωγμές και ασυνέχειες, ενώ σε σύνολο 1-2 ωρών εμφανίζονται οι υποεπιφανειακές ασυνέχειες και οι εσωτερικές ρωγμές. Όταν λοιπόν λυθεί το κρίσιμο στοιχείο του κánaβου των πιεζοηλεκτρικών που απαιτούνται για τη θέρμανση μίας μεγάλης επιφάνειας κάποιας υφιστάμενης κατασκευής η συγκεκριμένη τεχνική θα μπορέσει μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα να αναγνωρίσει τις σαθρές περιοχές αφού τα πιεζοηλεκτρικά θα λειτουργούν ταυτόχρονα δίχως να απαιτείται μεγάλος αριθμός προσωπικού που θα ελέγχει τη διαδικασία. Το στοιχείο αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος είναι πιο πρακτική και πιο οικονομική σε σχέση με αντίστοιχες μη καταστροφικές τεχνικές όπου απαιτείται μεγαλύτερος και πιο ακριβός εξοπλισμός και μεγαλύτερο σε αριθμό προσωπικό.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ματίκας Θ., Αγγελής Δ., Μη καταστροφικοί ελέγχοι, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα 2015

Σωτηρόπουλος. Δ, Επεξεργασία εικόνων θερμοκάμερας για την αποτίμηση σφαλμάτων στις πλατείες Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, Ε.Μ.Π , 2012

Καλλιανιώτης Φ., «24 Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών» Πάτρα, Φεβρουάριος 2009

Τσανάκας Ι., Προηγμένες τεχνολογίες διάγνωσης – πρόγνωσης βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές με χρήση εποπτικών μεθόδων: Περίπτωση υπέρυθρης θερμογραφίας, Δημόκριτο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2013

Μπότσαρης Π., Ι. Τσανάκας, θερμογραφία και εφαρμογές της στην επιστήμη του μηχανικού, Εκπαιδευτικό υλικό σεμιναρίου, στα πλαίσια της δράσης του Τεχνικού Επιμελητηρίου, Αθήνα, 2009

Μεϊμαρίδης Δ., Πάλλης Δ., Μελέτη και υλοποίηση γεννήτριας σήματος, βασισμένη στην πλατφόρμα Arduino, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Σερρών, 2013

Κάνος Α., Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης Κλίμακας στη Μηχανική Συμπεριφορά Σκυροδέματος (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή) και Προσομοίωση των Πειραματικών Δεδομένων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2003-2004

Κυριακόπουλος Β., Σχέση αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη και κάμψη για ασβεστολιθικά αδρανή αττικής, Εθνικό Μετσόβιο Πανεπιστήμιο, 2012

Λιαράκος Ε., Διάγνωση βλαβών σε κατασκευές σκυροδέματος με χρήση "ευφών" πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σαν αδρανή σκυροδέματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015

Καλλιάρης Α., Έλεγχος κατασκευών με παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019

Φιωτάκης Χ., μη καταστροφική αξιολόγηση κατασκευών με την εφαρμογή της δονητικής-ακουστικής μεθόδου, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2018

Ξένη Βιβλιογραφία

"Eddy Current Testing", Handbook on Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM International, 1989

Milovanović B. , Banjad Pećur I., Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, Journal of imaging, April 2016

Grosse C., Ohtsu M., Acoustic Emission Testing , Berlin Heidelberg : Springer – Verlag, 2008

Meola C., infrared thermography in the architectural field, The scientific world journal, November 2013

Osmont D., Dupont M., Gouyon R., Lemistre M., Baalageas D., Damage and Damaging Impact monitoring by PZT Sensors-Based HUMS, Spie Vol 3986, 2001

Deprins E., Digital Radiography in NDT Applications, 2nd MENDT Proceedings, Vol 9 , 2004

G. Baaklin G. i, Meyendof N., Matikas T., Gilmore R., eds, Non Destructive Methods for Materials Characterization , vol 591, Materials Research Society, 2000

Giorleo G., Meola C., “Comparison between Pulsed and Modulated Thermography in Glass-Epoxy Laminates”, NDT&E International, vol. 35, 2002

Sih George C., DiTommaso A. , «Fracture mechanics of concrete: Structural application and numerical calculation», 1985

Hagemmaier, Fundamentals of Eddy Current Testing: ASNT, 1990

Hardy J ., The radiation of heat from the human body, J Clinical Investigation ,1934

Gabriel J., Vardasca R., Ammer K., Thermology International, Austrian Society of Thermology and European Association of Thermology, Volume 22, 2012

Helal J., Mendis M. Sofi, P., Non destructive testing of concrete: A review of methods ,
Special issue: Electronic Journal of structural engineering , 2015

Jang K., Kyu An Y., Multiple crack evaluation on concrete using a line laser
thermography scanning system, Smart Structures and Systems, Vol. 22, No. 2 201-207,
2018

Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., Investigation procedures for the diagnosis of historic
masonries, in Construction and Building Materials, Vol.4, pp. 199-233, 2000; Structural
Engineering Compendium I, Elsevier Civil Engineering Compendium, pp. 321-355,
2002

Burrows L., A Theory of Eddy Current Flaw Detection: University Microfilms, Inc.,
1964

Cantini L., Assesment of historical masonry buldings: Research on appropriate non
destructive diagnostic techniques, Department of architectural projects and department
of structural engineering , 2009-2011

Land Instruments International, "A Basic Guide to Thermography" 2004

Muenker M., Industrial Computed Tomography, YXLON International, 2004

Maldaque X., “Infrared Methodology and Technology”, vol. 7, Nondestructive Testing
Monographs and Tracks, CRC Press, 1994

Gromicho N., CMI, Mckenna J., The history of infrared thermography

Cielo P., Maldague X., Deom A., Lewak R., “Thermographic Nondestructive Evaluation
of Industrial Materials and Structures”, Materials Evaluation, vol. 45(4), 1987

Shull P., Non destructive evaluation , Theory, Techniques and Applications , 2002

Karpur P., Benson D., Matikas T., Kundu T., Nickolaou P., An approach to determine
the experimental Transmitter-Receiver geometry for the reception of leaky lamb waves,
Materials Evaluation, Vol.53, 1995

Botsaris P.N. , Tsanakas J.A., "A Preliminary Study for the Efficiency of the Wear
Debris Analysis and Thermography as Independent or Integrated Fault Diagnosis

Methods in Tool Wear Monitoring", The 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, Scotland (United Kingdom), 2008.

Maldague X., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, 1st edition, Wiley-Interscience, New York, U.S.A., 2001

Kordatos E., Exarchos D. A., Dassios K., Matikas T. E., "Thermo-Electrical Lockin Thermography for Characterization of Subsurface Defects", Proc. of SPIE Smart Structures/NDE Symposium, Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration, vol. 9062, SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 9-13 March 2014.

Chi X. , Di Maio D., Lieven N. AJ, Modal-based vibrothermography using feature extraction with application to composite materials, Structurac health monitoring, 2019

Giurgiutiu V., , Structural Health Monitoring: with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Academic Press Elsevier, Oxford, 2008

PI Ceramics, Piezoelectric Ceramic Products. Fundamentals, Characteristics and Applications. PI Ceramic's Piezoelectric Materials Catalog and Tutorial, 2014

Flir, User's manual FLIR Tools/Tools+, 2017

Flir, User's manual FLIR Cx series, 2017

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αλγόριθμος Matlab

```
function [BW63, maskedImage63] = segmentImage63(im63)
Im63 = rgb2gray(im63);
Mask63 = im63>230;
BW63 = activecontour(im63, mask63, 100, 'Chan-Vese');
maskedImage = im63;
maskedImage(~BW63) = 0;
end
%.....

function [BW_out63, properties63] = filterRegions63(BW_in63)
BW_out = BW_in;
Properties63 = regionprops(BW_out, {'Area', 'Perimeter'});
%.....

function [BW70, maskedImage70] = segmentImage70(im)
im70 = rgb2gray(im70);
Mask70 = im70>230;
BW70 = activecontour(im70, mask70, 100, 'Chan-Vese');
maskedImage = im70;
maskedImage70(~BW70) = 0;
end
%.....

function [BW_out70, properties70] = filterRegions70(BW_in70)
BW_out70 = BW_in70;
Properties70 = regionprops(BW_out70, {'Area', 'Eccentricity',
'EquivDiameter', 'EulerNumber', 'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength',
'Orientation', 'Perimeter'});
```