



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ &
ΕΠΙΣΤΙΜΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ



Ανάπτυξη και Εφαρμογή Αλγορίθμου Ανάλυσης Θερμογραφικών Εικόνων για τη Μελέτη Σύνθετων Υλικών

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή

Βασίλειου Αθανασίου

Επιβλέπων: Λεωνίδας Ν. Γεργίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήματος
Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ , 2022

Υπεύθυνη Δήλωση

Δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- 2) Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Ο Δηλών



Βασίλειος Αθανασίου

*«Έχω μετατραπεί σε ένα είδος μηχανής που
αλέθει δεδομένα και βγάζει συμπεράσματα..»*

Charles Robert Darwin, 1809-1882

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, στο τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης και Επιστημονικών Υπολογισμών, κατά το έτος 2022.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του καθηγητή και σύμβουλού μου, Αν. Καθηγητή του Τ.Μ.Ε.Υ. , κ. Λεωνίδα Ν. Γεργίδη. Του εκφράζω ένα βαθύ ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, την επιστημονική του καθοδήγηση και όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε .

Χρωστάω, επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αρσένιο Γκούρα (Υποψήφιος Διδάκτορας στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης & Επιστημονικών Υπολογισμών) για την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης αυτής της εργασίας, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος. Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον Άγγελο Νταφλό (υποψήφιο διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Εργαστήριο Μηχανικής Σύνθετων και Ευφών Υλικών (CSML)) για την άμεση υποστήριξη και βοήθειά του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ την οικογένειά μου, που υπήρξε πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα σε κάθε μου προσπάθεια, στην οποία οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι σήμερα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελ.
<i>Περίληψη</i>	1
<i>Abstract</i>	3
<i>Κατάλογος Εικόνων</i>	4
<i>Κατάλογος Μαθηματικών Εξισώσεων</i>	6
<i>Κατάλογος Πινάκων</i>	10
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 2. Υπέρυθρη Θερμογραφία – Infrared Thermography	15
2.1. Η Ιστορία της υπέρυθρης θερμογραφίας	
2.2. Εισαγωγή στην θερμογραφία υπέρυθρου	17
2.3. Οι Αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας	18
2.4. Θερμογραφία Παλμικής Φάσης – Pulse Phase Thermography	21
2.4.1 Πειραματική Διάταξη	
2.5. Θερμογραφία «κλειδώματος»	24
2.5.1 Η Αρχή της Θερμογραφίας Lock-in	
2.6. Αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος θερμικών κυμάτων	27
2.6.1 Μέθοδος μετασχηματισμών Fourier (FTM)	
2.6.2 Μέθοδος συσχέτισης τεσσάρων σημείων (FPCM)	28
2.6.3 Μέθοδος ψηφιακής συσχέτισης «κλειδώματος» (DLCM)	30
Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία Ψηφιακής Εικόνας (DIP)	32
3.1. Τι είναι μια ψηφιακή εικόνα;	
3.2. Η προέλευση της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας	33
3.3. Θεμελιώδη βήματα της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας	36
3.4. Απλό μοντέλο σχηματισμού μιας ψηφιακής εικόνας	38
3.5. Γειτονικά εικονοστοιχεία (pixel)	40
3.6. Λειτουργίες των πινάκων έναντι των μητρώων	42
3.7. Το χρωματικό μοντέλο RGB	43
Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικά αποτελέσματα και συζήτηση	46
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	53
Παράρτημα	
A. Εγχειρίδιο του προγράμματος <i>Thermansys</i>	54
Βιβλιογραφία	67

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη υπολογιστικού προγράμματος για την ανάλυση θερμικών εικόνων υπέρυθρου (IR). Έγινε επιλογή της υπέρυθρης θερμογραφίας μια και αποτελεί μη καταστροφική τεχνική ελέγχου για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε σύνθετα υλικά ρητίνης ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις θεμελιώδεις έννοιες της υπέρυθρης θερμογραφίας και της ψηφιακής επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας. Στη συνέχεια αναπτύσσονται και εξετάζονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους διάφοροι αλγόριθμοι για την επεξεργασία θερμογραφικών δεδομένων. Εφαρμόστηκαν τέσσερις αλγόριθμοι ανάλυσης θερμογραφικών εικόνων σε δοκίμια με τρεις διαφορετικούς χρόνους θέρμανσης. Μια κάμερα υπέρυθρων κατέγραψε το πεδίο θερμοκρασίας και παρήγαγε μια ακολουθία θερμικών εικόνων η οποία ακολουθία επεξεργάστηκε υπολογιστικά για την εύρεση βλαβών η οποία στέφθηκε με επιτυχία. Η lock-in θερμογραφία αποδείχτηκε ικανή μέθοδος και έδωσε καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενη με τη Pulse για επισκόπηση με θερμογραφία αλλά ταυτόχρονα ήταν και η πιο χρονοβόρα διαδικασία σε υπολογιστικό χρόνο.

Λέξεις κλειδιά: Θερμογραφία, Ανάλυση Εικόνας, Σύνθετα Υλικά, python, Θερμική Εικόνα, Ανάλυση Συχνοτήτων, Ανάπτυξη Προγράμματος .

ABSTRACT

Development and Application of Thermographic Image Analysis for the Study of Composites Materials

Vassilis Athanasiou

Department of Materials Science and Engineering, University of Ioannina, Greece

ABSTRACT

This thesis focused on the development of in-house computer program for the analysis of infrared (IR) thermal images. Infrared thermography was chosen as it is a non-destructive inspection technique for detecting defects in carbon fiber reinforced resin composites. In this thesis, firstly, an introduction to the fundamental concepts of infrared thermography and digital image processing and analysis is made. Various algorithms for processing thermographic data are then developed and tested for their effectiveness and detection capabilities. Four thermographic image analysis algorithms were applied to material samples with three different heating times. An infrared camera recorded the temperature field and produced a sequence of thermal images which in a post processing stage were analyzed to find faults-defects. These defects were successfully detected. Lock-in thermography proved to be an accurate method and gave better results compared to Pulse thermography. It should be stressed out that the numerical computations associated with the IR Lock-in thermography were the most time-consuming in terms of computational time.

Keywords: Thermography, Image Analysis, Composite Materials, python, Thermal Imaging, Frequency Analysis, Thermography, Program Development.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 : Εικονογραφία του Sir William Herschel (1738-1822).

Εικόνα 2.2a : Απεικόνιση χρονοδιαγράμματος από την ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας με συνέχεια την ανακάλυψη του βολόμετρου και διαφόρων τεχνολογιών .

Εικόνα 2.2b : Η συνέχεια του χρονοδιαγράμματος της εικόνας 2.2a.

Εικόνα 2.3 : Πειραματική διάταξη της Παλμικής Θερμογραφία Φάσης.

Εικόνα 2.4 : (a) Τρισδιάστατος πίνακας θερμοκρασίας στο πεδίο του χρόνου και (b) Θερμοκρασιακό προφίλ για ένα μη ελαττωματικό εικονοστοιχείο στις συντεταγμένες (i, j).

Εικόνα 2.5 : Τρισδιάστατοι πίνακες (a) πλάτους και (b) φάσης και τα αντίστοιχα προφίλ τους στο φάσμα συχνοτήτων για ένα μη ελαττωματικό εικονοστοιχείο στις συντεταγμένες (i, j).

Εικόνα 2.6 : Η Αρχή της IR-Θερμογραφίας Lock-in.

Εικόνα 2.7 : Το πλάτος και η γωνία φάσης ενός ημιτονοειδούς κύματος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα.

Εικόνα 2.8 : Η Αρχή της συσχέτισης των τεσσάρων σημείων στη θερμογραφία κλειδώματος.

Εικόνα 2.9 : Η Αρχή της μεθόδου τεσσάρων σημείων στη θερμογραφία κλειδώματος.

Εικόνα 2.10 : Η Αρχή της ψηφιακής συσχέτισης lock-in στη θερμογραφία lock-in.

Εικόνα 3.1 : Μια ψηφιακή εικόνα είναι μια διάταξη 2D pixel. Κάθε εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες του (x, y) και την τιμή του. Οι ψηφιακές εικόνες χαρακτηρίζονται από μέγεθος μήτρας, βάθος pixel και ανάλυση.

Εικόνα 3.2 : Μια ψηφιακή εικόνα που παράχθηκε το 1921 από κωδικοποιημένη ταινία από τηλεγραφικού εκτυπωτή με όψεις ειδικού τύπου.

Εικόνα 3.3 : Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διατασσόμενο σύμφωνα με την τιμή του μήκους κύματος και της συχνότητας.

Εικόνα 3.4 : Τα θεμελιώδη στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Εικόνα 3.5 : Ένα παράδειγμα της διαδικασίας λήψης μίας ψηφιακής εικόνας. (a) Πηγή ενέργειας ("φωτισμός"). (b) Στοιχείο σκηνης. (c) Σύστημα απεικόνισης. (d) Προβολή της σκηνης στο σχέδιο εικόνας. (e) Ψηφιοποιημένη εικόνα.

Εικόνα 3.7 : (a) Τα οριζόντια και κάθετα γειτονικά εικονοστοιχεία (pixels) του p. (b) Τα διαγώνια γειτονικά pixels του p.

Εικόνα 3.8 : (a) $N_4(p)$: Τα 4 γειτονικά σημεία του p . (b) $N_8(p)$: Τα 8 γειτονικά στοιχεία του p .

Εικόνα 3.9 : Σχηματική απεικόνιση του μοναδιαίου κύβου RGB.

Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση του 24-bit χρωματικού κύβου RGB.

Κατάλογος Μαθηματικών Εξισώσεων

Εξίσωση 1:
$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

$E_{\lambda b}$: η ένταση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος.

C_1, C_2 : η πρώτη και η δεύτερη σταθερά ακτινοβολίας αντίστοιχα.

λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

T : η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος.

Εξίσωση 2:
$$\lambda_{\max} = 2898 / T$$

λ_{\max} : το (μέγιστο) μήκος κύματος ακτινοβολίας.

T : η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος.

Εξίσωση 3:
$$E_b = \sigma T^4$$

E_b : η συνολική ένταση της ημισφαιρικής ακτινοβολίας.

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann.

Εξίσωση 4:
$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda b}}$$

ε_{λ} : συντελεστής φασματικής εκπομπής.

E_{λ} : ένα μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μαύρο σώμα στην ίδια θερμοκρασία και στο ίδιο μήκος κύματος.

Εξίσωση 5:
$$E = \varepsilon \frac{A}{e^{\frac{B}{T}} - C}$$

E : η πραγματική ποσότητα της ανιχνευόμενης ενέργειας.

ε : συντελεστής εκπομπής.

T : η θερμοκρασία της επιφάνειας του αντικειμένου.

A, B, C : σταθερές βαθμονόμησης .

Εξίσωση 6: $A(x, y) = \sqrt{S^{0^\circ}(x, y)^2 + S^{-90^\circ}(x, y)^2}$

$S^{0^\circ}(x, y)$: η εικόνα του συμφασικού σήματος.

$S^{-90^\circ}(x, y)$: η εικόνα του εκτός φάσης (ή τετραγωνικού) σήματος.

$A(x, y)$: η εικόνα του ανεξάρτητου (από τη φάση) πλάτους.

Εξίσωση 7: $\Phi(x, y) = \arctan\left(\frac{-S^{-90^\circ}(x, y)}{S^{0^\circ}(x, y)}\right)$

$\Phi(x, y)$: η εικόνα φάσης της διαμόρφωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας.

Εξίσωση 8: $F_K(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[F_n(x, y) \cdot e^{-j \frac{2\pi K n}{N}} \right] = \sum_{n=0}^N \left[F_n(x, y) \cdot W_n^{(n-1)(K-1)} \right], W_N = e^{-j \frac{2\pi}{N}}$

$F_K(x, y)$: οι μετασχηματισμοί Fourier της διαδοχικής θερμικής εικόνας.

$F_n(x, y)$: η διαδοχική θερμική εικόνα.

N : ο αριθμός των δειγμάτων ανά περίοδο κλειδώματος.

K : είναι η ψηφιακή συχνότητα.

Εξίσωση 9: $K = N \frac{f_e}{f_s} + 1$

K : είναι η ψηφιακή συχνότητα.

N : ο αριθμός των δειγμάτων ανά περίοδο κλειδώματος.

f_e : ρυθμιζόμενη συχνότητα ή συχνότητα κλειδώματος.

f_s : είναι ο ρυθμός καρέ.

Εξίσωση 10: $A_s = \sqrt{[\text{Re}(F_K(x, y))]^2 + [\text{Im}(F_K(x, y))]^2}$

A_s : το πλάτος του σήματος θερμικού κύματος.

Re, Im : το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της $F_K(x, y)$ αντίστοιχα.

Εξίσωση 11: $\Phi = a \tan \left(\frac{\text{Im}(F_K(x, y))}{\text{Re}(F_K(x, y))} \right)$

Φ : η γωνία φάσης του σήματος θερμικού κύματος.

Εξίσωση 12: $\Phi = \arctan \frac{S_3(X_1) - S_1(X_1)}{S_4(X_1) - S_2(X_1)}$

$S_1(X_1), S_2(X_1), S_3(X_1), S_4(X_1)$: τέσσερα ισαπέχοντα σημεία δεδομένων επιφανειακής θερμοκρασίας (θερμικού κύματος).

Φ : η φάση του σήματος θερμικού κύματος.

Εξίσωση 13: $A_s = \sqrt{(S_3(X_1) - S_1(X_1))^2 + (S_4(X_1) - S_2(X_1))^2}$

A_s : το πλάτος του σήματος θερμικού κύματος.

Εξίσωση 14: $K_j^{0^\circ} = 2 \sin \left(\frac{2\pi(j-1)}{n} \right), j = 1, 2, \dots, n$

$c(n)^{0^\circ}$: η συνάρτηση αναφοράς του ημιτόνου.

n: ο αριθμός των (θερμικών) εικόνων.

Εξίσωση 15: $K_j^{-90^\circ} = -2 \cos \left(\frac{2\pi(j-1)}{n} \right), j = 1, 2, \dots, n$

$c(n)^{-90^\circ}$: η συνάρτηση αναφοράς του συνημιτόνου.

n: ο αριθμός των (θερμικών) εικόνων.

Εξίσωση 16:
$$S^{0^\circ} = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n 2 \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \cdot F_{i,j}$$

S^{0° : η συνιστώσα του θερμικού σήματος με τη συνάρτηση του ημιτόνου.

$F_{i,j}(x, y)$: η εικόνα του θερμικού κύματος για δεδομένη περίοδο.

Εξίσωση 17:
$$S^{-90^\circ} = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n -2 \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \cdot F_{i,j}$$

S^{-90° : η κατά 90° μετατοπισμένη φάση στο S^{0° .

Εξίσωση 18:
$$A_s = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{-90^\circ})^2}$$

A_s : Το πλάτος του σήματος του θερμικού κύματος.

Εξίσωση 19:
$$\Phi = a \tan\left(\frac{S^{-90^\circ}}{S^{0^\circ}}\right)$$

Φ : η φάση του σήματος θερμικού κύματος.

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας I : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 10s.
- Πίνακας II : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Standard Deviation για τις μεθόδους IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 10s
- Πίνακας III : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Standard Deviation για τις μεθόδους IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 20s.
- Πίνακας IV : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 20s.
- Πίνακας V : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 40s.
- Πίνακας VI : Αποτελέσματα Standard Deviation των μεθόδων IR Lock-in 4 point , IR Lock-in periods (N=3) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 40s.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Με τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα και την ουσιαστική μείωση των τιμών των θερμοκαμερών, τα τελευταία χρόνια η θερμογραφία εξελίχθηκε από μια σπάνια χρησιμοποιούμενη τεχνική σε μια ολοένα και πιο δημοφιλή μέθοδο έρευνας. Ο μη καταστροφικός έλεγχος (NDT) είναι μια εξαιρετική μέθοδος για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας υλικών ή εξαρτημάτων, χωρίς να παρεμβαίνει στη λειτουργικότητά τους [1]. Διάφορες τεχνικές NDT έχουν μελετηθεί και υιοθετηθεί, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών υπερήχων, η δοκιμή ακτίνων X και η θερμογραφία υπερύθρων [2-4]. Η θερμογραφία υπερύθρων (IR) έχει γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική NDT [5] για την ανίχνευση κρυφών ατελειών στο υπέδαφος σε πληθώρα δομικών στοιχείων και μηχανικών συστημάτων [6,7], όπως εξαρτήματα αεροσκαφών [8,9], κτίρια [10], αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς [11], ηλεκτρονικά εξαρτήματα [12], ακόμη και το ανθρώπινο σώμα [13]. Σε αντίθεση με άλλες μη καταστροφικές μεθόδους, η θερμογραφία είναι μια γρήγορη μέθοδος άνευ επαφής, κατάλληλη για τον έλεγχο μεγάλων περιοχών με πολύπλοκη γεωμετρία και ικανή να εντοπίζει πολλαπλές βλάβες [8,14]. Εφαρμόζεται επίσης σε ένα ευρύ φάσμα υλικών [15,16], συμπεριλαμβανομένων σύνθετων υλικών από γυαλί και ίνες άνθρακα [17-19], φυσικές ίνες [20], κεραμικά [21] και μεταλλικά υλικά [22,23]. Η ευρεία χρήση των σύνθετων υλικών αύξησε την ανάγκη για NDT προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία τους πριν και κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Η μέθοδος θέρμανσης και οι μαθηματικές μέθοδοι επεξεργασίας παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της θερμογραφίας. Ιδιαίτερα σε πολυστρωματικά σύνθετα υλικά, η θερμογραφία επιτρέπει την ανίχνευση διαφόρων τύπων ατελειών/βλαβών (ρωγμές, αποκολλήσεις, αποκόλληση ινών και βλάβες μικτού τρόπου). Στο **2^ο Κεφάλαιο** γίνεται αναφορά των μεθόδων θερμογραφίας που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Είναι γεγονός ότι, υπάρχει ένας αριθμός τεχνικών αξιολόγησης της χρονικής εξάρτησης των κατανομών θερμοκρασίας. Ενώ η θερμογραφία σταθερής κατάστασης ονομάζεται συχνά "παθητική θερμογραφία", οι τεχνικές που αξιολογούν τις δυναμικές μεταβολές της θερμοκρασίας ονομάζονται επίσης "ενεργητική θερμογραφία", δεδομένου ότι εδώ η θερμοκρασία του δείγματος επηρεάζεται ενεργά από ορισμένα μέσα. Τα πιο γνωστά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας μη σταθερής κατάστασης ή δυναμικής θερμογραφίας είναι η παλμική θερμογραφία (Pulse

thermography) και η θερμογραφία lock-in (lock-in thermography) . Η παλμική θερμογραφία είχε αναπτυχθεί για τους σκοπούς του μη καταστροφικού ελέγχου (NDT) υλικών και εξαρτημάτων, άρα για την "εξέταση κάτω από την επιφάνεια" στερεών σωμάτων [24]. Σημειώνεται ότι μια από τις βασικές ιδιότητες της θερμότητας είναι η ικανότητά της να διεισδύει σε όλα τα σώματα περισσότερο ή λιγότερο άμεσα, ανάλογα με τη θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αντίσταση του υλικού. Στην παλμική θερμογραφία, δημιουργείται παλμική ροή θερμότητας στην επιφάνεια, συνήθως με την παλμική ακτινοβολία φωτός (π.χ. από μια λάμπα λάμψης), και παρακολουθείται η χρονική αξιολόγηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Όταν κάτω από την επιφάνεια του δοκιμαζόμενου αντικειμένου βρίσκεται μια ανομοιογένεια, όπως μια ρωγμή, μια οπή ή ένα θαμμένο σώμα με διαφορετικές θερμικές παραμέτρους, η ανομοιογένεια αυτή επηρεάζει τη δυναμική τοπική ροή θερμότητας μέσω του δείγματος που διασχίζει την ανομοιογένεια αυτή. Η χρονική αξιολόγηση της επιφανειακής θερμοκρασίας αντικατοπτρίζει αυτή την ανομοιογένεια και η κατάλληλη απεικόνιση των αποτελεσμάτων επιτρέπει να "κοιτάξει κανείς κάτω από την επιφάνεια".

Η θερμογραφία υπέρυθρων (IR) δεν είναι ασφαλώς ο μόνος τρόπος μέτρησης της κατανομής της επιφανειακής θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά, είναι ίσως ο πλέον ενδεδειγμένος, δεδομένου ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε τραχιές επιφάνειες και μπορεί να απεικονίσει το δείγμα από ορισμένη απόσταση χωρίς να έρθει καθόλου σε επαφή με την επιφάνεια. Το σημαντικότερο είναι ότι, με τη διαθεσιμότητα σύγχρονων καμερών υπέρυθρης ακτινοβολίας εστιακού πεδίου που συνδυάζουν υψηλή ευαισθησία με υψηλούς ρυθμούς καρέ, τα συστήματα Διαμορφωμένης Θερμογραφίας (Lock-in) με κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν αποδείξει ότι παρέχουν σήμερα τις καλύτερες δυνατές επιδόσεις όσον αφορά την ευαισθησία ανίχνευσης.

Στην εργασία αυτή σημειώνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή όπου αναφέρει στον αναγνώστη τον απαρχητή της θερμογραφίας, όπου δεν είναι άλλος πέρα από την ανακάλυψη του υπέρυθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην **Ενότητα 2.2** , παρουσιάζονται συνοπτικά οι θεμελιώδεις αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας ενώ στις **Ενότητες 2.4 και 2.5** παραθέτει τις μεθόδους της Θερμογραφίας Παλμικής Φάσης (Pulse Phase Thermography) και την αρχή της Θερμογραφίας Κλειδώματος (Lock-in) αντίστοιχα. Επιπλέον περιγράφει τους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος θερμικών κυμάτων (Βλέπε **Ενότητα 2.6**).

Από την άλλη πλευρά, η υποβάθμιση ενός υλικού συνοδεύεται από αλλαγές στη δομή, τη μορφολογία και τη σύνθεση της επιφάνειας. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να καταγραφούν από μια ποικιλία συσκευών λήψης εικόνων που εξάγουν ψηφιακές εικόνες σε κλίμακα του γκρι ή σε πραγματικό χρώμα σε έναν ανιχνευτή. Πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και την έκταση της διάβρωσης μπορούν να εξαχθούν με μεθόδους επεξεργασίας εικόνας. Το ενδιαφέρον για τις μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας πηγάζει από δύο κύριους τομείς εφαρμογής: τη βελτίωση της εικονογραφικής πληροφορίας για την ερμηνεία από τον άνθρωπο και την επεξεργασία δεδομένων εικόνας για αποθήκευση, μετάδοση και αναπαράσταση για αυτόνομη αντίληψη από μηχανές. Το **Κεφάλαιο 3** έχει διάφορους στόχους:

1. να εισαγάγει τις βασικές έννοιες της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας .
2. να δώσει μια ιστορική προοπτική των απαρχών αυτού του τομέα (Βλέπε **Ενότητα 3.2**).
3. να σας δώσει μια ιδέα για τα θεμελιώδη βήματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας .
4. να συζητήσει εν συντομία τις κύριες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.
5. να δώσει μια επισκόπηση σε βασικές έννοιες όπως αυτή των *Γειτονικών Pixel* (Βλέπε **Ενότητα 3.5**), τις *Λειτουργίες των πινάκων έναντι των μητρών* (Βλέπε **Ενότητα 3.6**). και *Το χρωματικό μοντέλο RGB* (Βλέπε **Ενότητα 3.7**).

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να παρουσιάσει το υπολογιστικό πρόγραμμα ‘*Thermansys*’, τις λειτουργίες του και τους μαθηματικούς αλγορίθμους που βασίστηκε (εμφανίζει τις γραμμές κώδικα του προγράμματος (Βλέπε **Παράρτημα Β**)). Το πρόγραμμα ‘*Thermansys*’ αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την επιστήμη των σύνθετων και προηγμένων υλικών (και όχι μόνο) καθώς μπορεί εύκολα να εισάγει κανείς τα δεδομένα θερμικών εικόνων και να εξάγει άμεσα αξιόπιστα αποτελέσματα. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την δομή του προγράμματος και των αλγορίθμων είναι η Python, γλώσσα υψηλού επιπέδου, διερμηνευμένη και γενικού σκοπού. Συχνά περιγράφεται ως μια γλώσσα που περιλαμβάνει "μπαταρίες" λόγω της περιεκτικής τυποποιημένης βιβλιοθήκης της. Χρησιμοποιήθηκε, επίσης, η OpenCV (Open Source Computer Vision Library) είναι μια βιβλιοθήκη προγραμματιστικών λειτουργιών που στοχεύει κυρίως στην υπολογιστική οπτική σε πραγματικό χρόνο [25]. Η βιβλιοθήκη είναι cross-platform και διατίθεται ελεύθερα προς χρήση υπό την άδεια Apache 2 License ανοιχτού κώδικα. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το Tkinter, για την ολοκλήρωση του γραφικού περιβάλλοντος του χρήστη, όπου

είναι μια σύνδεση της Python με την εργαλειοθήκη γραφικών διεπαφών Tk. Το όνομα Tkinter προέρχεται από το Tk interface [26].

Κεφάλαιο 2: Υπέρυθρη Θερμογραφία - Infrared Thermography

2.1 Η ιστορία της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Πριν από το έτος 1800, η ύπαρξη του υπέρυθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δεν είχε καν υποψιαστεί. Η αρχική σημασία του υπέρυθρου φάσματος (ή απλώς "υπέρυθρου", όπως συχνά αποκαλείται) ως μορφή θερμικής ακτινοβολίας είναι ίσως λιγότερο προφανής σήμερα απ' ό,τι ήταν τη στιγμή της ανακάλυψής του το 1800 από τον Sir William Herschel κατά τη διάρκεια της αναζήτησής του για ένα νέο οπτικό υλικό [27].

Ο Sir William Herschel (1738-1822), βασιλικός αστρονόμος του βασιλιά Γεωργίου Γ' της Αγγλίας - και ήδη διάσημος για την ανακάλυψη του πλανήτη Ουρανού - αναζητούσε ένα υλικό οπτικού φίλτρου για τη μείωση της φωτεινότητας της εικόνας του Ήλιου στα τηλεσκόπια κατά τη διάρκεια των ηλιακών παρατηρήσεων. Ενώ δοκίμαζε διάφορα δείγματα χρωματιστού γυαλιού που έδιναν παρόμοιες μειώσεις στη φωτεινότητα, διαπίστωσε με ενδιαφέρον ότι ορισμένα από τα δείγματα περνούσαν πολύ λίγο από τη θερμότητα του Ήλιου, ενώ άλλα περνούσαν τόση θερμότητα που κινδύνευε να πάθει βλάβη στα μάτια μετά από παρατήρηση λίγων δευτερολέπτων.



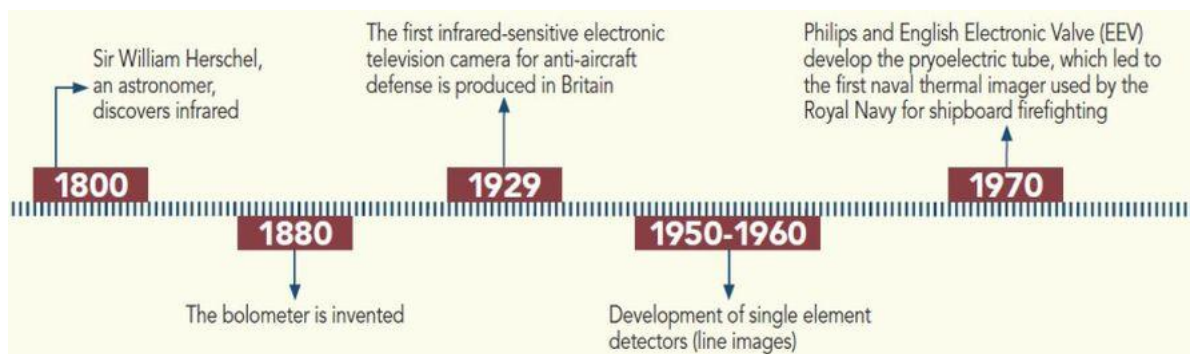
Εικόνα 2.1. Εικονογραφία του Sir William Herschel (1738-1822).

Σύντομα ο Herschel πείστηκε για την αναγκαιότητα ενός συστηματικού πειράματος με στόχο την εύρεση ενός υλικού που θα έδινε την επιθυμητή μείωση της φωτεινότητας, καθώς και τη μέγιστη μείωση της θερμότητας. Ξεκίνησε το πείραμα επαναλαμβάνοντας ουσιαστικά το πείραμα του πρίσματος του Νεύτωνα, αλλά αναζητώντας το αποτέλεσμα της θέρμανσης και όχι την οπτική κατανομή της έντασης στο φάσμα. Αρχικά μαύρισε με μελάνι τον βολβό ενός ευαίσθητου θερμομέτρου υδραργύρου σε γυαλί και με αυτόν ως ανιχνευτή ακτινοβολίας, προχώρησε στη δοκιμή της θερμαντικής επίδρασης των διαφόρων χρωμάτων του φάσματος που σχηματίζονται στην κορυφή ενός τραπεζιού με τη διέλευση του ηλιακού φωτός μέσα από ένα γυάλινο

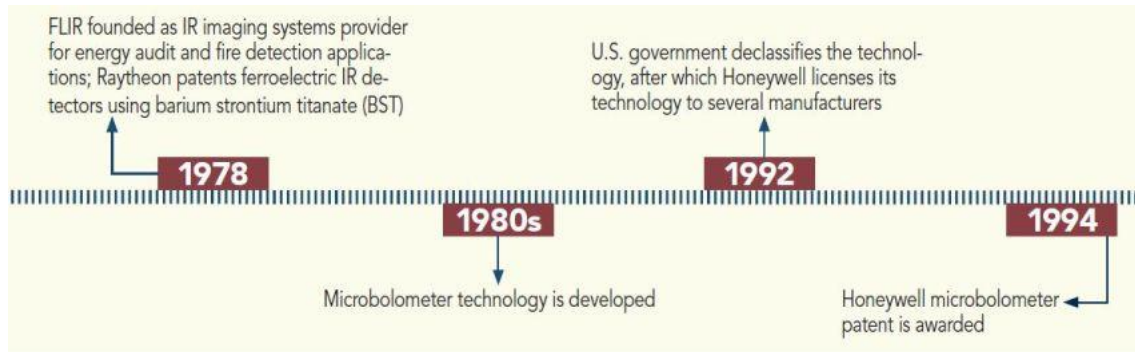
πρίσμα. Άλλα θερμόμετρα τοποθετήθηκαν έξω από τις ακτίνες του ήλιου και χρησίμευσαν ως όργανα ελέγχου. Καθώς το μαυρισμένο θερμόμετρο μετακινούνταν αργά κατά μήκος των χρωμάτων του φάσματος, οι ενδείξεις της θερμοκρασίας έδειχναν μια σταθερή αύξηση από το ιώδες προς το κόκκινο άκρο. Αυτό δεν ήταν εντελώς απροσδόκητο, αφού ο Ιταλός ερευνητής Landriani, σε ένα παρόμοιο πείραμα το 1777, είχε παρατηρήσει σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα. Ήταν ο Herschel, ωστόσο, ο πρώτος που αναγνώρισε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σημείο όπου το φαινόμενο της θέρμανσης φτάνει στο μέγιστο και ότι οι μετρήσεις που περιορίζονταν στο ορατό τμήμα του φάσματος απέτυχαν να εντοπίσουν αυτό το σημείο.

Μετακινώντας το θερμόμετρο στη σκοτεινή περιοχή πέρα από το κόκκινο άκρο του φάσματος, ο Χέρσελ επιβεβαίωσε ότι η θερμότητα συνέχισε να αυξάνεται. Όταν τελικά βρήκε το μέγιστο σημείο, ανακάλυψε ότι βρισκόταν πολύ πέρα από το κόκκινο άκρο, σε αυτό που σήμερα είναι γνωστό ως "υπέρυθρο μήκος κύματος". Όταν ο Χέρσελ αποκάλυψε την ανακάλυψή του, αναφέρθηκε σε αυτό το νέο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως "θερμομετρικό φάσμα". Την ίδια την ακτινοβολία αναφερόταν μερικές φορές ως "σκοτεινή θερμότητα" ή απλώς ως "αόρατες ακτίνες".

Ωστόσο, δεν ήταν ο Χέρσελ αυτός που δημιούργησε τον όρο "υπέρυθρη ακτινοβολία". Η λέξη άρχισε να εμφανίζεται στον Τύπο μόνο περίπου 75 χρόνια αργότερα, και δεν είναι ακόμη σαφές ποιος την προκάλεσε.



Εικόνα 2.2α. Απεικόνιση χρονοδιαγράμματος από την ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας με συνέχεια την ανακάλυψη του βολόμετρου και διαφόρων τεχνολογιών [27].



Εικόνα 2.2b. Η συνέχεια του χρονοδιαγράμματος της εικόνας 2.2a [27].

2.2 Εισαγωγή στην Θερμογραφία υπέρυθρου.

Η θερμογραφία είναι μια μη καταστροφική τεχνική αξιολόγησης (NDT&E) που μετρά τις μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας ως απόκριση στην επαγόμενη ενέργεια. Η ενέργεια δημιουργεί μια αντίθεση θερμοκρασίας στις ασυνέχειες του υλικού που μπορεί να ανιχνευθεί από μια υπέρυθρη κάμερα [28]. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, η υπέρυθρη θερμογραφία (IRT) χρησιμοποιείται με επιτυχία ως τεχνική NDT&E σε πολλές εφαρμογές. Η θερμογραφία κερδίζει όλο και μεγαλύτερη αποδοχή ως μια γρήγορη τεχνική αξιολόγησης και οπτικοποίησης, χωρίς επαφή, μεγάλης έκτασης κυρίως λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στα συστήματα απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων [29].

Επί του παρόντος, δύο τύποι ενεργών θερμικών μη καταστρεπτικών τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως: η παλμική θερμογραφία (PT) και η διαμορφωμένη θερμογραφία κλειδώματος (Lock-in Thermography). Στην παλμική θερμογραφία, το δοκίμιο θερμαίνεται με έναν παλμό ενέργειας μικρής διάρκειας, π.χ., λάμπα λάμψης (flash), δέσμη λέιζερ και θέρμανση με υπερήχους κ.λπ. Μια υπέρυθρη κάμερα χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης της επιφανειακής θερμοκρασίας. Οι κλίσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας στο δοκίμιο είναι χρήσιμες για τον εντοπισμό της υποεπιφανειακής ατέλειας σε αυτό το υλικό. Ωστόσο, οι κλίσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας εξαρτώνται όχι μόνο από τις ατέλειες στο υπόστρωμα, αλλά και από τις τοπικές μεταβολές του συντελεστή εκπομπής, καθώς και από τη μη ομοιόμορφη θέρμανση [30]. Η παλμική θερμογραφία φάσης (Pulsed Phase Thermography) συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της παλμικής θερμογραφίας (PT) και της διαμορφωμένης θερμογραφίας κλειδώματος ταυτόχρονα

χωρίς να μοιράζεται τα παραδοσιακά μειονεκτήματά τους [31]. Η θερμογραφία κλειδώματος (LT) εφαρμόζεται με επιτυχία στη μη καταστροφική δοκιμή και αξιολόγηση εδώ και πολλά χρόνια.

Η LT χρησιμοποιεί περιοδική αρμονική θερμότητα για να διεγείρει την επιφάνεια του δείγματος σε χαμηλή μέγιστη ισχύ, γεγονός που μας επιτρέπει να αντλήσουμε το πλάτος (Amplitude) και τη γωνία φάσης (Phase) από το θερμικό κύμα ανάκλασης [32]. Επίσης, η γωνία φάσης έχει το πλεονέκτημα ότι είναι λιγότερο ευαίσθητη στις τοπικές μεταβολές του φωτισμού ή του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας. Η αρχή Lock-in είναι η τεχνική επιλογής, εάν το σήμα πρέπει να εξαχθεί από στατιστικό θόρυβο [33]. Η εικόνα του πλάτους ή της φάσης χρησιμοποιείται επακόλουθα για τη μη καταστροφική ανίχνευση ατελειών στο εσωτερικό των στερεών υλικών [34].

2.3 Οι Αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Η προέλευση της υπέρυθρης θερμογραφίας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προέρχεται από τις αρχές του 1800, όταν ο Άγγλος φυσικός William Herschel ανακάλυψε τη θερμική ακτινοβολία εκτός του βαθύ κόκκινου του ορατού φάσματος, το αόρατο φως που αργότερα ονομάστηκε υπέρυθρο. Από αυτή την παρατήρηση και χάρη στις μελέτες πολλών άλλων επιστημόνων (μεταξύ των οποίων οι Macedonio Melloni, Gustav Kirchhoff, James Clerk Maxwell, Joseph Stefan, Ludwig Boltzmann, Max Planck) σε διαδοχικά χρόνια, η υπέρυθρη θερμογραφία έχει γίνει μια χρήσιμη τεχνική καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας.

Η υπέρυθρη θερμογραφία περιλαμβάνει βασικά μια κάμερα, εξοπλισμένη με μια σειρά μεταβλητών φακών, και έναν υπολογιστή. Ο πυρήνας της κάμερας είναι ο ανιχνευτής υπέρυθρων, ο οποίος απορροφά την υπέρυθρη ενέργεια που εκπέμπεται από το αντικείμενο (του οποίου η επιφανειακή θερμοκρασία πρόκειται να μετρηθεί) και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική τάση ή ρεύμα. Οποιοδήποτε αντικείμενο εκπέμπει ενέργεια ανάλογη με τη θερμοκρασία της επιφάνειάς του [35]. Ωστόσο, η ενέργεια που πραγματικά ανιχνεύεται (από τον ανιχνευτή υπέρυθρων) εξαρτάται από τον συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας που μετράται.

Ο νόμος που περιγράφει τη φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος προέκυψε από τον Planck,

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

όπου $E_{\lambda b}$ είναι η ένταση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, C_1 και C_2 είναι η πρώτη και η δεύτερη σταθερά ακτινοβολίας αντίστοιχα, λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και T η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται κατά προσέγγιση σε ένα αριθμό περιοχών μήκους κύματος που ονομάζονται ζώνες [35]. Το υπέρυθρο υποδιαιρείται γενικά σε τέσσερις μικρότερες ζώνες (με αυθαίρετα επιλεγμένα όρια): εγγύς υπέρυθρο (0,75- 3 μm), μεσαίο υπέρυθρο (3-6 μm), μακρινό υπέρυθρο (6-15 μm) και ακραίο υπέρυθρο (15-1000 μm). Με τη διαφοροποίηση του Planck ως προς το λ και αναζητώντας τη μέγιστη ακτινοβολία έντασης της ακτινοβολίας προκύπτει ο νόμος μετατόπισης του Wien,

$$\lambda_{\max} = 2898 / T \quad (2)$$

η οποία εκφράζει μαθηματικά την κοινή παρατήρηση ότι τα χρώματα μεταβάλλονται από το κόκκινο στο πορτοκαλί στο κίτρινο, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ενός θερμικού ακτινοβολητή. Έτσι, ο ήλιος (περίπου 6000 K) εκπέμπει κίτρινο φως με αιχμή περίπου στα 0,5 μm στο φάσμα του ορατού φωτός. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (300 K) η κορυφή της ακτινοβολίας βρίσκεται στο μακρινό υπέρυθρο στα 10 μm περίπου, ενώ στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου (77 K) το μέγιστο της σχεδόν ασήμαντης έντασης της ακτινοβολίας εμφανίζεται στα 38 μm στο ακραίο υπέρυθρο μήκος κύματος. Με ολοκλήρωση του νόμου του Planck σε ολόκληρο το φάσμα ($\lambda = 0-\infty$), προκύπτει η συνολική ένταση της ημισφαιρικής ακτινοβολίας,

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η εξίσωση (1) περιγράφει την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα, η οποία είναι η μέγιστη τιμή που εκπέμπει ένα σώμα σε δεδομένη θερμοκρασία. Τα πραγματικά αντικείμενα σχεδόν ποτέ δεν υπακούουν σε αυτόν τον νόμο, αν και μπορεί να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά ενός μελανού σώματος σε ορισμένα φασματικά διαστήματα. Ένα πραγματικό αντικείμενο εκπέμπει γενικά μόνο ένα μέρος E_λ της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μαύρο σώμα στην ίδια θερμοκρασία και στο ίδιο μήκος κύματος. Με την εισαγωγή της ποσότητας

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda b}} \quad (4)$$

ο οποίος ονομάζεται συντελεστής φασματικής εκπομπής, η εξίσωση (1) μπορεί να ξαναγραφεί για πραγματικά σώματα πολλαπλασιάζοντας απλά τον δεύτερο όρο με ε_λ .

Τα όργανα υπέρυθρης ακτινοβολίας κατατάσσονται συχνά ως όργανα ολικής ακτινοβολίας και πιστεύεται ότι βασίζονται στη θεωρία Stefan-Boltzmann ακόμη και αν οι ανιχνευτές τους ανιχνεύουν ακτινοβολία σε περιορισμένο εύρος ζώνης του φάσματος IR. Οι μετρήσεις είναι γενικά σε δύο διαφορετικά παράθυρα: βραχέων κυμάτων (SW) και μακρών κυμάτων (LW). Επομένως, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται με υπέρυθρα ραδιόμετρα πρέπει γενικά να βασίζονται στο νόμο του Planck. Η ενέργεια που πραγματικά ανιχνεύεται εξαρτάται όχι μόνο από το συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας που μετράται, αλλά και επίσης από το περιβάλλον. Στην πραγματικότητα, ένα τμήμα μπορεί είτε να απορροφηθεί από την ατμόσφαιρα μεταξύ του αντικειμένου και της κάμερας, είτε να προστεθεί ως ανακλώμενο από την επιφάνεια από τον περίγυρο. Για να ληφθούν υπόψη αυτοί οι παράγοντες, πρέπει να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση του συστήματος με προσομοίωση πραγματικών συνθηκών λειτουργίας. Η συνάρτηση βαθμονόμησης,

$$E = \varepsilon \frac{A}{\frac{B}{e^T} - C} \quad (5)$$

η οποία θυμίζει το νόμο του Planck και συσχετίζει την πραγματική ποσότητα της ανιχνευόμενης ενέργειας E με το συντελεστή εκπομπής ε και τη θερμοκρασία της επιφάνειας T του αντικειμένου μέσω των σταθερών βαθμονόμησης A , B και C , οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη σταθερά του Planck καθώς και τις ανεπιθύμητες ποσότητες ενέργειας από ή προς το περιβάλλον.

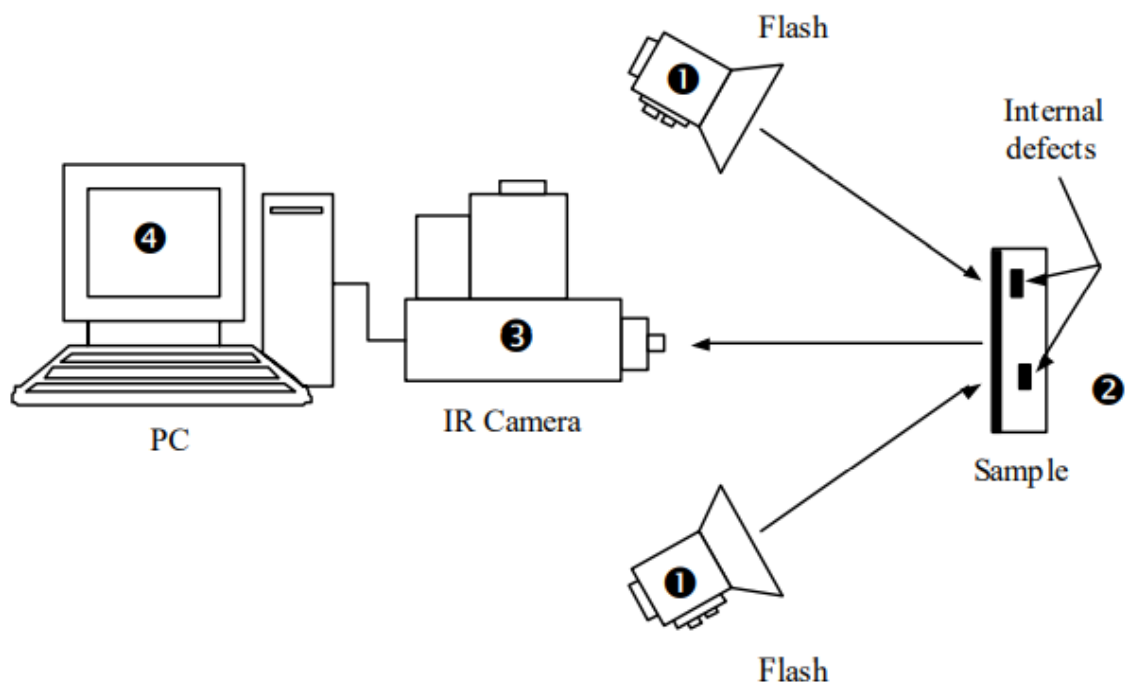
2.4 Θερμογραφία Παλμικής Φάσης - Pulse Phase Thermography

Η Θερμογραφία παλμικής φάσης (PPT) έχει εξελιχθεί σημαντικά από τότε που αναπτύχθηκε αρχικά το 1996 [36]. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εργασίες για την εφαρμογή ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης. Ένα από τα χαρακτηριστικά που μετατρέπουν τη PPT σε μια τόσο ενδιαφέρουσα τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου και αξιολόγησης (NDT&E) έγκειται στη διαθεσιμότητα εικόνων καθυστέρησης φάσης (όπως στη θερμογραφία Lock-In) μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier σε θερμικά δεδομένα. Όπως είναι γνωστό [37], η ανομοιόμορφη θέρμανση και οι μεταβολές του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας έχουν αμελητέο αντίκτυπο στη φάση. Αυτά τα χαρακτηριστικά της PPT συμπληρώνονται από την ταχύτητα ανάπτυξής της (όπως και στην παλμική θερμογραφία), επιτρέποντας τη μεγάλη χαλάρωση των πειραματικών περιορισμών χωρίς να χάνονται κρίσιμες πληροφορίες. Επιπλέον, η φάση είναι πιθανότερο να ανταποκρίνεται στις διαφορές των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού παρά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά [38], γεγονός που καθιστά τη PPT ένα ελκυστικό εργαλείο για την επιθεώρηση δειγμάτων πολύπλοκου σχήματος (δηλαδή μη επίπεδες μορφές ή προσανατολισμένες επιφάνειες).

2.4.1 Πειραματική διάταξη

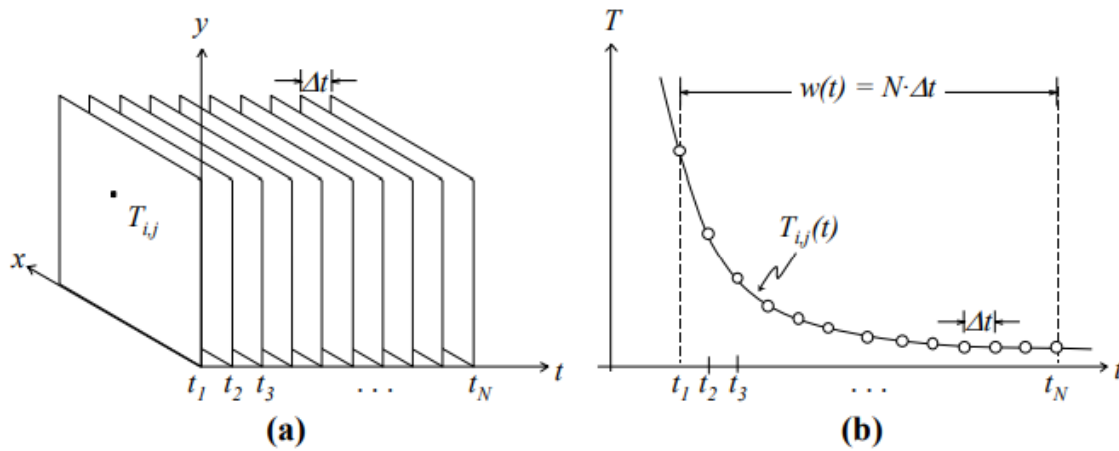
Η διαδικασία για την εκτέλεση μιας δοκιμής PPT μπορεί να χωριστεί στα 4 βήματα που απεικονίζονται στην **Εικόνα 2.3**. Η επιφάνεια του δείγματος διεγείρεται με θερμικό παλμό, π.χ. με φωτογραφικά φλας (1), ο οποίος κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου ανάλογα με τις θερμικές ιδιότητες του υλικού που εξετάζεται. Μόλις ο παλμός φτάσει στο δείγμα (2), το θερμικό μέτωπο ταξιδεύει μέσα στο υλικό, ενώ η διαδικασία ψύξης αρχίζει στην επιφάνεια. Η αρχή της ανίχνευσης ελαττωμάτων βασίζεται στο γεγονός ότι, στην

επιφάνεια, οι ελαττωματικές περιοχές θα βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες σε σχέση με τις μη ελαττωματικές ζώνες, υψηλότερες ή χαμηλότερες ανάλογα με τις θερμικές ιδιότητες τόσο του υλικού όσο και του ελαττώματος [39].



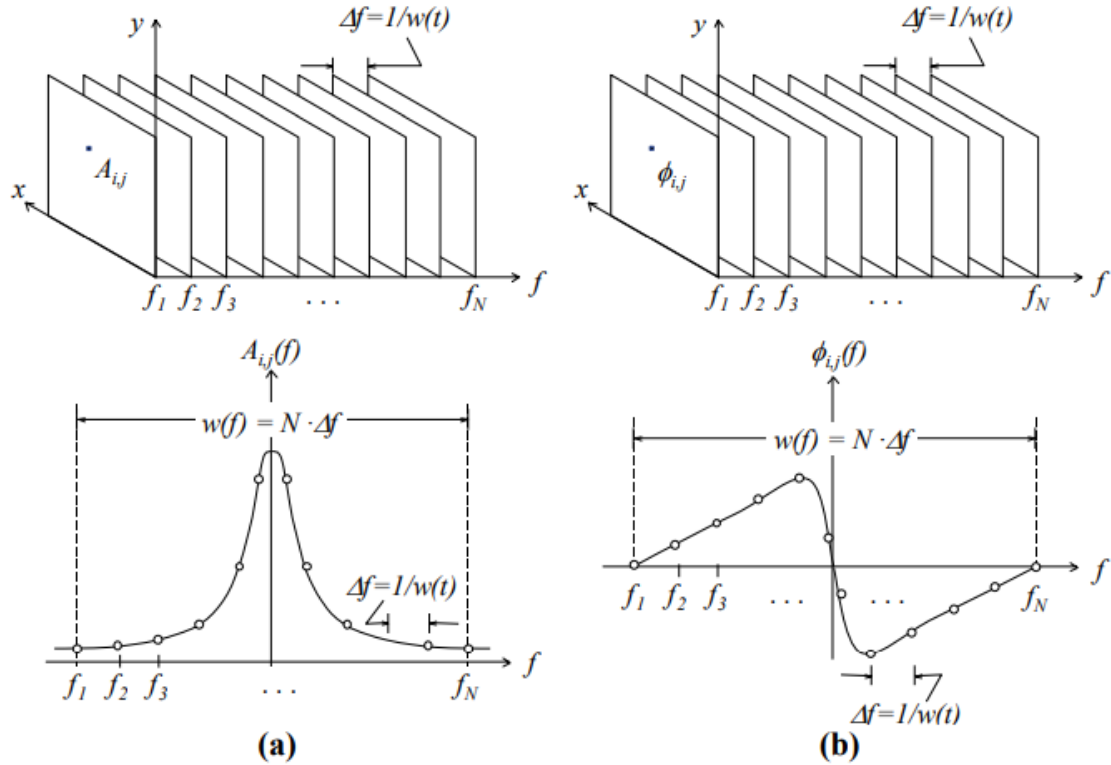
Εικόνα 2.3. Πειραματική διάταξη της Παλμικής Θερμογραφία Φάσης [39].

Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στην επιφάνεια παρακολουθείται με κάμερα υπερύθρων (3). Καταγράφεται θερμικός χάρτης της επιφάνειας ή θερμογράφημα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Σχηματίζεται ένας τρισδιάστατος πίνακας (βλέπε **Εικόνα 2.4α**) όπου οι συντεταγμένες x και y είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη θέση των εικονοστοιχείων αντίστοιχα και η συντεταγμένη z αντιστοιχεί στη χρονική εξέλιξη, κατά την οποία τα θερμογραφήματα απέχουν Δt s μεταξύ τους.



Εικόνα 2.4 (α) Τρισδιάστατος πίνακας θερμοκρασίας στο πεδίο του χρόνου και (β) Θερμοκρασιακό προφίλ για ένα μη ελαττωματικό εικονοστοιχείο στις συντεταγμένες (i,j) [39].

Στη συνέχεια, η ακολουθία θερμογραφημάτων επεξεργάζεται (4) με τη χρήση ενός αλγορίθμου μετασχηματισμού (π.χ. μετασχηματισμός Fourier) κατά τέτοιον τρόπο ώστε να είναι προσβάσιμοι οι πίνακες του πλάτους και της φάσης (βλέπε **Εικόνα 2.5**). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λήψης, το συνεχές σήμα θερμοκρασίας $T(t)$, δειγματοληπτείται σε χρονικά διαστήματα Δt και περικόπτεται με ένα ορθογώνιο «παράθυρο» $w(t)$. Η κατάλληλη επιλογή του Δt , ή της αντίστροφης συχνότητας δειγματοληψίας f_s ($f_s = 1/\Delta t$), εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές ιδιότητες του δείγματος (υλικά υψηλής αγωγιμότητας απαιτούν υψηλότερο f_s για να αποφευχθεί η απώλεια πληροφοριών). Ο συνολικός αριθμός καταγεγραμμένων θερμογραφημάτων N , δίνεται από τη σχέση $N = w(t)/\Delta t$.



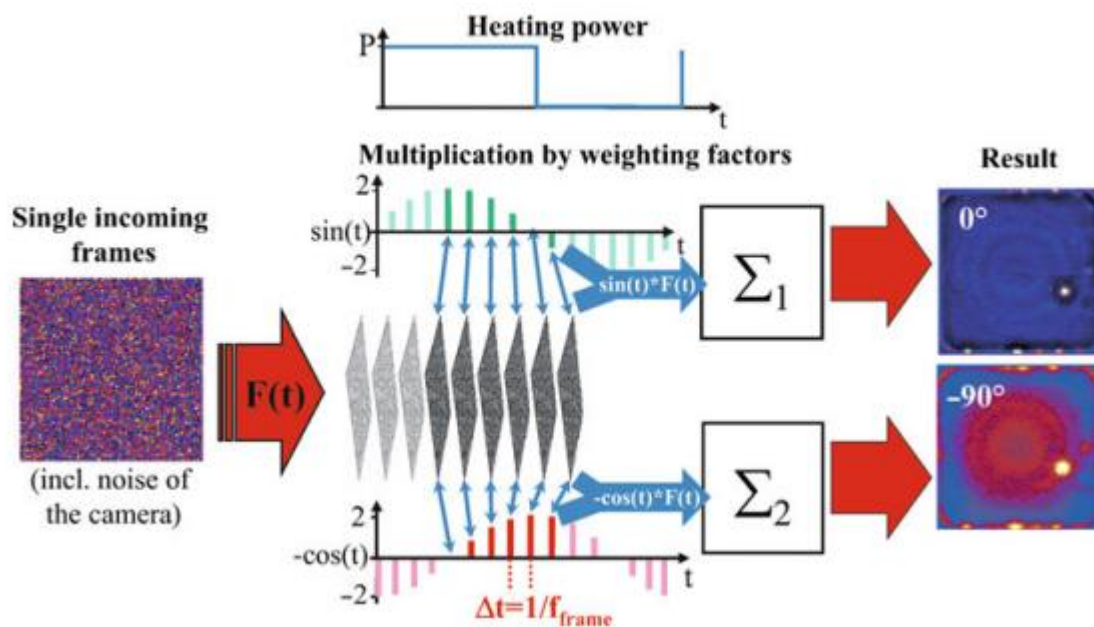
Εικόνα 2.5 Τρισδιάστατοι πίνακες (α) πλάτους και (β) φάσης και τα αντίστοιχα προφίλ τους στο φάσμα συχνοτήτων για ένα μη ελαττωματικό εικονοστοιχείο στις συντεταγμένες (i, j) [39].

2.5 Θερμογραφία «κλειδώματος»: Lock-in Thermography

2.5.1 Η Αρχή της Θερμογραφίας IR Lock-in

Η αρχή της θερμογραφίας lock-in συνίσταται στην εισαγωγή περιοδικά διαμορφωμένης θερμότητας σε ένα αντικείμενο και στην παρακολούθηση μόνο της φάσης της περιοδικής διαμόρφωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας - που αναφέρεται στη διαμορφωμένη παροχή θερμότητας. Ως εκ τούτου, εάν η επιφανειακή θερμοκρασία μετράται μέσω μιας θερμοκάμερας υπέρυθρων (IR), η θερμογραφία lock-in σημαίνει ότι η πληροφορία κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας επεξεργάζεται σαν να τροφοδοτείται σε έναν ενισχυτή lock-in. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.7**, η διαδικασία ψηφιακής συσχέτισης lock-in συνίσταται στον διαδοχικό πολλαπλασιασμό των εισερχόμενων εικόνων IR με ένα σύνολο συντελεστών στάθμισης και στην

άθροιση των αποτελεσμάτων σε ένα αποθηκευτικό πλαίσιο. Οι συντελεστές στάθμισης προσεγγίζουν μια αρμονική συνάρτηση και συγχρονίζονται με την παλμική τάση που εφαρμόζεται στο δείγμα. Δεδομένου ότι το πλάτος και η φάση της μετρούμενης διαμόρφωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας μπορεί να αλλάξει με τη θέση, πρέπει να χρησιμοποιείται συσχέτιση κλειδώματος δύο φάσεων. Έτσι, μια μέτρηση θερμογραφίας lock-in μπορεί να αποδώσει είτε μια εικόνα πλάτους και φάσης, είτε μια εντός φάσης (0°) και μια τετραγωνική (-90°) εικόνα, που αναφέρεται στη φάση της περιοδικής παροχής θερμότητας. Για σκοπούς μη καταστροφικού ελέγχου, η εικόνα φάσης είναι συχνά πιο κατατοπιστική από την εικόνα πλάτους, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπική ικανότητα εκπομπής IR.



Εικόνα 2.6. Η Αρχή της IR-Θερμογραφίας Lock-in [40]

Η θερμογραφία κλειδώματος ανακαλύφθηκε το 1984 [41] και έχει χρησιμοποιείται εκτενώς στον μη καταστροφικό έλεγχο για την "εξέταση κάτω από την επιφάνεια" στερεών αντικειμένων [42]. Η θερμογραφία κλειδώματος σημαίνει ότι η ισχύς που διαχέεται στο αντικείμενο που ερευνάται είναι διαμορφώνεται περιοδικά κατά πλάτος, η προκύπτουσα επιφανειακή διαμόρφωση της θερμοκρασίας απεικονίζεται από μια θερμοκάμερα που λειτουργεί με ορισμένο ρυθμό καρέ ffr ,

και ότι οι παραγόμενες εικόνες υπέρυθρης ακτινοβολίας υποβάλλονται σε ψηφιακή επεξεργασία σύμφωνα με την αρχή του κλειδώματος. Έτσι, το αποτέλεσμα της θερμογραφίας lock-in είναι το ίδιο με το να συνδεόταν κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας IR με έναν διαφασικό ενισχυτή lock-in. Κατά συνέπεια, όπως προαναφέρθηκε, τα δύο κύρια αποτελέσματα της θερμογραφίας lock-in είναι η εικόνα του συμφασικού σήματος $S^{0^\circ}(x, y)$ και του εκτός φάσης (ή τετραγωνικού) σήματος $S^{-90^\circ}(x, y)$ (βλέπε **Εικόνα 2.7**). Στη θερμογραφία lock-in χρησιμοποιείται συχνά το σήμα -90° αντί του σήματος $+90^\circ$, δεδομένου ότι το τελευταίο είναι ουσιαστικά αρνητικό [43]. Από αυτά τα δύο σήματα μπορεί εύκολα να προκύψει η εικόνα του ανεξάρτητου (από τη φάση) πλάτους $A(x, y)$ και η εικόνα φάσης $\Phi(x, y)$ της διαμόρφωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας:

$$A(x, y) = \sqrt{S^{0^\circ}(x, y)^2 + S^{-90^\circ}(x, y)^2} \quad (6)$$

$$\Phi(x, y) = \arctan\left(\frac{-S^{-90^\circ}(x, y)}{S^{0^\circ}(x, y)}\right) \quad (7)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι για το Φ πρέπει να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση \arctan που διορθώνει τα τεταρτημόρια, επομένως αν το $S^{0^\circ}(x, y)$ είναι αρνητικό, πρέπει να αφαιρεθούν 180° από την καθαρή τιμή \arctan . Τόσο η εικόνα 0° όσο και η εικόνα -90° είναι ανάλογες της ισχύος της παλλόμενης πηγής θερμότητας, επομένως και στην εικόνα πλάτους η αντίθεση μιας πηγής θερμότητας είναι ανάλογη της απορριπτόμενης ισχύος της. Η εικόνα φάσης, από την άλλη πλευρά, βασίζεται στο πηλίκο της εικόνας 0° - και της εικόνας -90° , επομένως θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από την ισχύ της πηγής θερμότητας. Στην πραγματικότητα, η εικόνα φάσης είναι ένα μέτρο της χρονικής καθυστέρησης της διαμόρφωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας σε σχέση με τη διαμόρφωση της ισχύος, η οποία είναι πράγματι ανεξάρτητη από το μέγεθος της διαμορφωμένης ισχύος, εφόσον δεν έχουμε υπέρθεση των πεδίων θερμοκρασίας γειτονικών πηγών θερμότητας.

2.6 Αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος θερμικών κυμάτων

2.6.1 Μέθοδος μετασχηματισμών Fourier (FTM)

Η μέθοδος μετασχηματισμού Fourier είναι ένα ισχυρό/δημοφιλές εργαλείο για τον υπολογισμό του πλάτους και της γωνίας φάσης των αρμονικών συνιστωσών του σήματος θερμικού κύματος [44]. Αυτή η μέθοδος είναι διαθέσιμη πριν από τον υπολογισμό του πλάτους και της φάσης του σήματος θερμικού κύματος [45]. Ο μετασχηματισμός Fourier της ακολουθίας θερμικών εικόνων δίνεται στην εξίσωση (8) στη ρυθμιζόμενη συχνότητα f_e η οποία ονομάζεται συχνότητα κλειδώματος:

$$F_K(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[F_n(x, y) \cdot e^{-j \frac{2\pi K n}{N}} \right] = \sum_{n=0}^N \left[F_n(x, y) \cdot W_n^{(n-1)(K-1)} \right] , \quad W_N = e^{-j \frac{2\pi}{N}}$$

(8)

όπου $F_K(x, y)$ είναι οι μετασχηματισμοί Fourier της διαδοχικής θερμικής εικόνας, $F_n(x, y)$ είναι η διαδοχική θερμική εικόνα, N είναι ο αριθμός των δειγμάτων ανά περίοδο κλειδώματος και K είναι η ψηφιακή συχνότητα.

Προκειμένου να εξαχθεί το θερμικό κύμα στη συχνότητα κλειδώματος, η ψηφιακή συχνότητα K δίνεται στην ακόλουθη εξίσωση [45]:

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1$$

(9)

όπου f_s είναι ο ρυθμός καρέ.

Το πλάτος και η γωνία φάσης του θερμικού κύματος λαμβάνονται από,

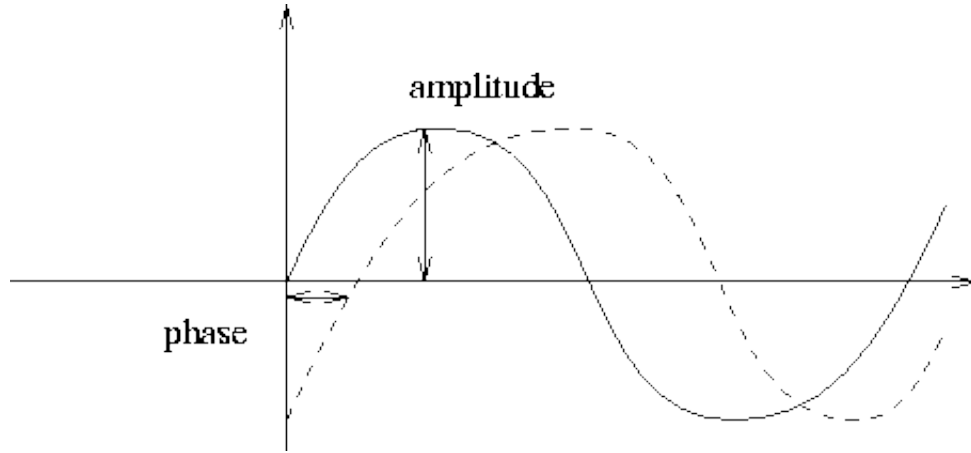
$$A_s = \sqrt{\left[\operatorname{Re}(F_K(x, y)) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(F_K(x, y)) \right]^2}$$

(10)

$$\Phi = a \tan \left(\frac{\operatorname{Im}(F_K(x, y))}{\operatorname{Re}(F_K(x, y))} \right)$$

(11)

όπου A_s είναι το πλάτος του σήματος θερμικού κύματος, Φ είναι η γωνία φάσης του σήματος θερμικού κύματος.



Εικόνα 2.7. Το πλάτος και η γωνία φάσης ενός ημιτονοειδούς κύματος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα [46].

2.6.2. Μέθοδος συσχέτισης τεσσάρων σημείων (Four point correlation method-FPCM)

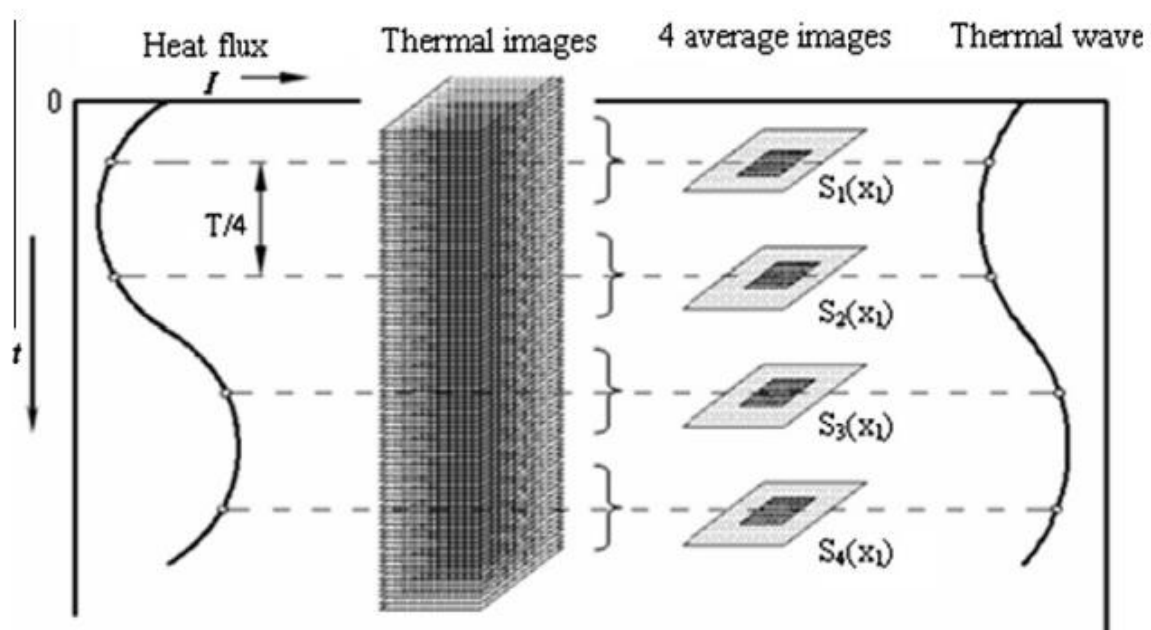
Η μέθοδος συσχέτισης τεσσάρων σημείων προτάθηκε για πρώτη φορά από τους G. Busse, D. Wu, W. Karpen,[47] το 1992. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τέσσερα ισαπέχοντα σημεία (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.9**) δεδομένων επιφανειακής θερμοκρασίας (θερμικού κύματος) S1-S4, το πλάτος και η φάση του σήματος του θερμικού κύματος δίνονται από [45] :

$$\Phi = \arctan \frac{S_3(X_1) - S_1(X_1)}{S_4(X_1) - S_2(X_1)} \quad (12)$$

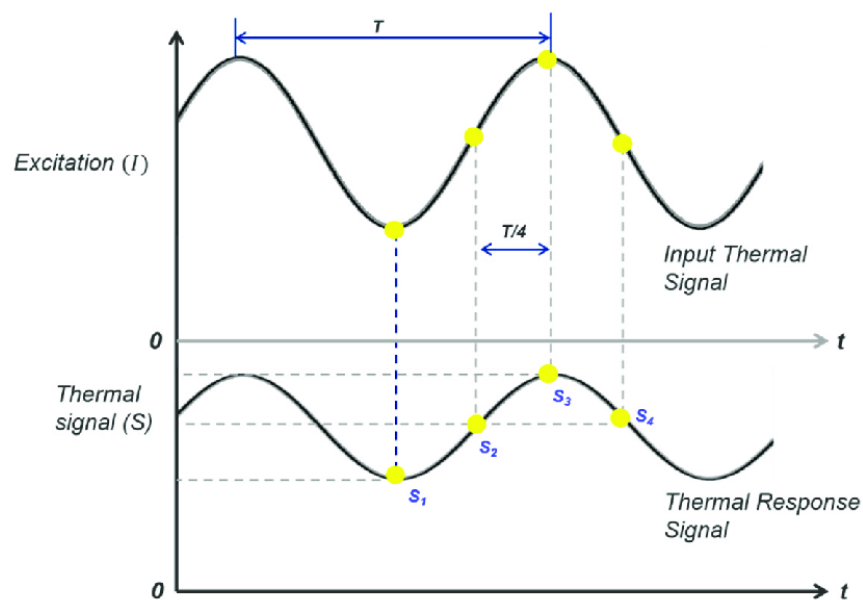
$$A_s = \sqrt{(S_3(X_1) - S_1(X_1))^2 + (S_4(X_1) - S_2(X_1))^2} \quad (13)$$

Η αρχή της συσχέτισης τεσσάρων σημείων παρέχει μια μέθοδο για τον γρήγορο υπολογισμό του πλάτους και της γωνίας φάσης στη θερμογραφία lock-in, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.8**.

Αν και η μέθοδος των τεσσάρων σημείων είναι γρήγορη και έγκυρη για ημιτονοειδείς διεγέρσεις, επηρεάζεται από τον 'θόρυβο'. Παρ' όλα αυτά ο αυξημένος αριθμός κύκλων έχει ως αποτέλεσμα την αποθρομβοποίηση του σήματος [48].



Εικόνα 2.8. Η Αρχή της συσχέτισης των τεσσάρων σημείων στη θερμογραφία κλειδώματος [45]



Εικόνα 2.9. Η Αρχή της μεθόδου τεσσάρων σημείων στη θερμογραφία κλειδώματος [48]

2.6.3. Μέθοδος ψηφιακής συσχέτισης «κλειδώματος» (Digital Locking Correlation Method -DLCM)

Η μέθοδος ψηφιακής συσχέτισης lock-in εκτιμά μόνο τη βασική αρμονική συνάρτηση του σήματος του θερμικού κύματος, η οποία συνήθως φέρει την κυρίαρχη πληροφορία, ενώ οι υψηλότερες αρμονικές καταστέλλονται. Η μέθοδος ψηφιακής συσχέτισης lock-in μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση μιας σύγχρονης συσχέτισης μεταξύ του σήματος του θερμικού κύματος και μιας αρμονικής συνάρτησης αναφοράς. Η συσχέτιση ημιτόνου/συνημιτόνου έχει το καθοριστικό πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την ακριβή εξέταση της φάσης του σήματος του θερμικού κύματος μετά τη μέτρηση. Χρησιμοποιείται η συσχέτιση δύο καναλιών που περιλαμβάνει δύο συναρτήσεις αναφοράς ημιτόνου/συνημιτόνου αντίστοιχα. Το πρώτο κανάλι υπολογίζει τη συνιστώσα του σήματος του θερμικού κύματος με τη συνάρτηση ημιτόνου και το άλλο κανάλι υπολογίζει τη συνιστώσα με τη συνάρτηση συνεμιτόνου.

$$K_j^{0^\circ} = 2 \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$K_j^{-90^\circ} = -2 \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$S^{0^\circ} = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n 2 \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \cdot F_{i,j} \quad (16)$$

$$S^{-90^\circ} = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n -2 \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \cdot F_{i,j} \quad (17)$$

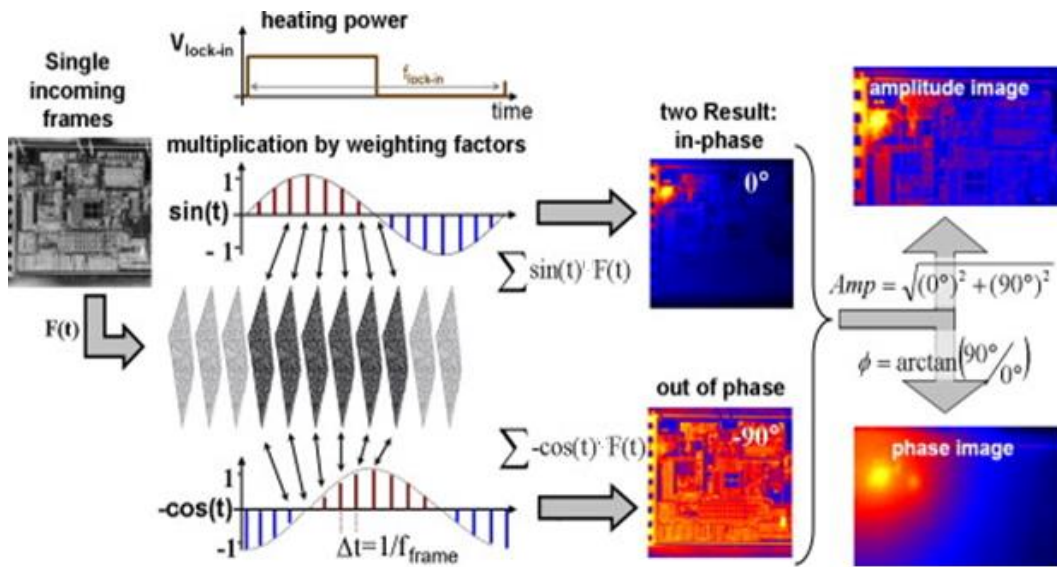
όπου $K_j^{0^\circ}$ είναι η συνάρτηση αναφοράς του ημιτόνου, $K_j^{-90^\circ}$ είναι η συνάρτηση αναφοράς του συνεμιτόνου, S^{0° είναι η συνιστώσα του θερμικού σήματος με τη συνάρτηση του ημιτόνου και

S^{-90° είναι η κατά 90° μετατοπισμένη φάση στο S^{0° , $F_{i,j}(x, y)$ είναι η εικόνα του θερμικού κύματος για δεδομένη περίοδο.

Το πλάτος και η γωνία φάσης του σήματος του θερμικού κύματος μπορούν να ληφθούν από τις ακόλουθες εξισώσεις (18) και (19) [45]. Στην **Εικόνα 2.10** απεικονίζεται η Αρχή της ψηφιακής συσχέτισης lock-in στη θερμογραφία lock-in.

$$A_s = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{-90^\circ})^2} \quad (18)$$

$$\Phi = a \tan \left(\frac{S^{-90^\circ}}{S^{0^\circ}} \right) \quad (19)$$

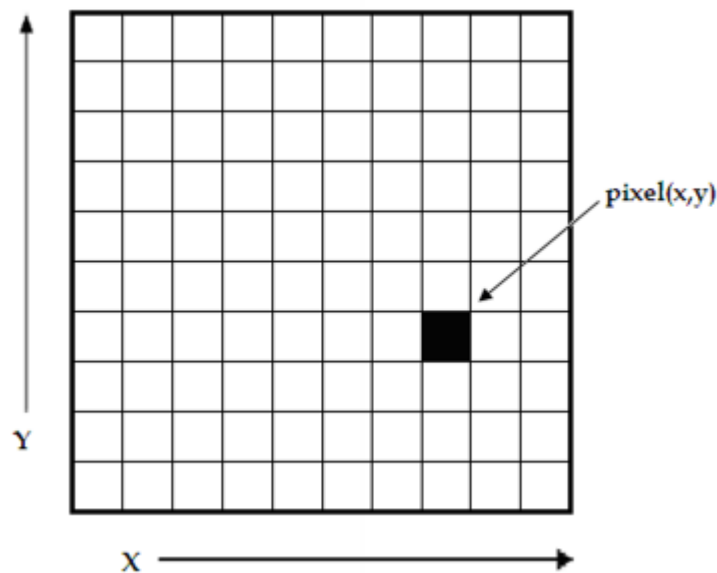


Εικόνα 2.10. η Αρχή της ψηφιακής συσχέτισης lock-in στη θερμογραφία lock-in [45].

Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία Ψηφιακής Εικόνας - Digital Image Processing

3.1 Τι είναι μια ψηφιακή εικόνα;

Μια εικόνα μπορεί να οριστεί ως μια δισδιάστατη συνάρτηση $f(x, y)$, όπου x και y είναι χωρικές (επίπεδες) συντεταγμένες. Το πλάτος της f σε οποιοδήποτε ζεύγος συντεταγμένων (x, y) ονομάζεται ένταση ή επίπεδο γκριζου (gray scale) της εικόνας σε αυτό το σημείο. Όταν τα x, y και οι τιμές της έντασης της f είναι όλες πεπερασμένες/διακριτές ποσότητες σε μια εικόνα, αυτή ονομάζεται ψηφιακή εικόνα [49]. Ο τομέας της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας αναφέρεται στην επεξεργασία ψηφιακών εικόνων μέσω ψηφιακού υπολογιστή. Μια ψηφιακή εικόνα αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων, καθένα από τα οποία έχει μια συγκεκριμένη θέση και τιμή. Αυτά τα στοιχεία ονομάζονται στοιχεία εικόνας, εικονοστοιχεία, pels και pixel. Το Pixel είναι ο όρος που χρησιμοποιείται ευρύτερα για να δηλώσει τα στοιχεία μιας ψηφιακής εικόνας.



Εικόνα 3.1. Μια ψηφιακή εικόνα είναι μια διάταξη 2D pixel. Κάθε εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες του (x, y) και την τιμή του. Οι ψηφιακές εικόνες χαρακτηρίζονται από μέγεθος μήτρας, βάθος pixel και ανάλυση [52]

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η όραση του ανθρώπου είναι η πιο προηγμένη από τις αισθήσεις, επομένως δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι οι εικόνες παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη αντίληψη. Ωστόσο, σε αντίθεση με τους ανθρώπους, οι οποίοι περιορίζονται στην ορατή ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜ), οι μηχανές απεικόνισης καλύπτουν σχεδόν ολόκληρο το ΗΜ φάσμα, που κυμαίνεται από γάμμα έως ραδιοκύματα. Μπορούν να λειτουργήσουν σε εικόνες που δημιουργούνται από πηγές που οι άνθρωποι δεν έχουν συνηθίσει να συσχετίζουν με εικόνες. Αυτές περιλαμβάνουν υπέρηχο, ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και εικόνες που δημιουργούνται από υπολογιστή. Έτσι, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας περιλαμβάνει ένα ευρύ και ποικίλο πεδίο εφαρμογών.

3.2 Η προέλευση της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Μία από τις πρώτες εφαρμογές των ψηφιακών εικόνων ήταν στη βιομηχανία των εφημερίδων, όταν οι εικόνες στάλθηκαν για πρώτη φορά με υποβρύχιο καλώδιο μεταξύ Λονδίνου και Νέας Υόρκης. Η εισαγωγή του συστήματος καλωδιακής μετάδοσης εικόνας Bartlane στις αρχές της δεκαετίας του 1920 μείωσε τον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά μιας εικόνας στον Ατλαντικό από περισσότερο από μια εβδομάδα σε λιγότερο από τρεις ώρες. Ο εξειδικευμένος εξοπλισμός εκτύπωσης κωδικοποίησε τις εικόνες για καλωδιακή μετάδοση και στη συνέχεια τις ανακατασκεύασε στο άκρο λήψης. Η **Εικόνα 3.2** μεταδόθηκε με αυτόν τον τρόπο και αναπαρήχθη σε έναν τηλεγραφικό εκτυπωτή εξοπλισμένο με γραμματοσειρές που προσομοιώνουν ένα μοτίβο ημίτονο.



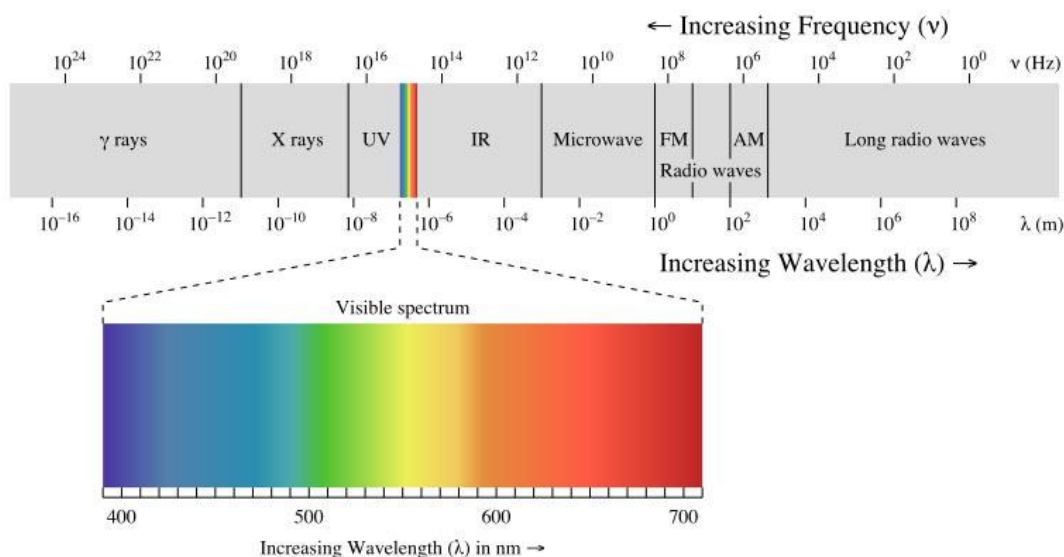
Εικόνα 3.2 Μια ψηφιακή εικόνα που παράχθηκε το 1921 από κωδικοποιημένη ταινία από τηλεγραφικού εκτυπωτή με όψεις ειδικού τύπου.[50]

Παραδείγματα εφαρμογών.

Οι τομείς εφαρμογής της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας είναι τόσο ποικίλοι όπου είναι επιθυμητή κάποια μορφή οργάνωσης στην προσπάθεια να συλλάβει κανείς το εύρος αυτού του πεδίου. Ένας από τους απλούστερους τρόπους για να αναπτύξει κανείς μια βασική κατανόηση της έκτασης των εφαρμογών επεξεργασίας εικόνας είναι να κατηγοριοποιήσει τις εικόνες ανάλογα με την πηγή τους (π.χ. οπτικές, ακτίνες X κ.λπ.). Η κύρια πηγή ενέργειας για τις εικόνες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Άλλες σημαντικές πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ακουστική, την υπερηχητική και την ηλεκτρονική (με τη μορφή δέσμης ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική μικροσκοπία). Οι συνθετικές εικόνες, που χρησιμοποιούνται για μοντελοποίηση και οπτικοποίηση, δημιουργούνται από υπολογιστή.

Από το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, μπορούμε να δούμε μόνο το ορατό φάσμα. Το ορατό φάσμα περιλαμβάνει κυρίως επτά διαφορετικά χρώματα που συνήθως ονομάζονται (VIBGOYR). Το VIBGOYR σημαίνει βιολετί, λουλακί (σκούρο μπλε), μπλε, πράσινο, πορτοκαλί, κίτρινο και κόκκινο. Η ύπαρξη των χρωμάτων στο ορατό φάσμα δεν ακυρώνει την ύπαρξη άλλων. Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να δει μόνο το ορατό τμήμα, ενώ μια κάμερα μπορεί να δει σε μήκη κύματος πέρα από αυτά του ορατού. Για παράδειγμα: ακτίνες X, ακτίνες Γάμμα, κ.λπ. Μερικά από τα κύρια πεδία εφαρμογών στα οποία χρησιμοποιείται ευρέως η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας (DIP) αναφέρονται παρακάτω.

Οι εικόνες που βασίζονται στην ακτινοβολία από το ΗΜ φάσμα είναι οι πιο οικείες, ειδικά οι εικόνες στις ακτίνες Χ και τις οπτικές ζώνες του φάσματος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να θεωρηθούν ως διαδιδόμενα ημιτονοειδή κύματα διαφορετικών μηκών κύματος ή μπορούν να θεωρηθούν ως ένα ρεύμα σωματιδίων χωρίς μάζα, το καθένα ταξιδεύει με κυματοειδές μοτίβο και κινείται με την ταχύτητα του φωτός. Κάθε σωματίδιο μικρότερης μάζας περιέχει μια ορισμένη ποσότητα (ή δέσμη) ενέργειας. Κάθε δέσμη ενέργειας ονομάζεται φωτόνιο. Εάν οι φασματικές ζώνες ομαδοποιηθούν σύμφωνα με την ενέργεια ανά φωτόνιο, λαμβάνουμε το φάσμα που φαίνεται στο **Εικόνα. 3.3**, που κυμαίνεται από ακτίνες γάμμα (υψηλότερη ενέργεια) στο ένα άκρο έως ραδιοκύματα (χαμηλότερη ενέργεια) στο άλλο.



Εικόνα 3.3. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διατασσόμενο σύμφωνα με την τιμή του μήκους κύματος και της συχνότητας.

Η κατηγοριοποίηση των εφαρμογών της επεξεργασίας ψηφιακής ανάλογα με την πηγή της προέλευσής έχει ως εξής [50] :

- **Gamma-ray Imaging:** Οι κύριες χρήσεις της απεικόνισης με βάση τις ακτίνες γάμμα περιλαμβάνουν την πυρηνική ιατρική και τις αστρονομικές παρατηρήσεις.

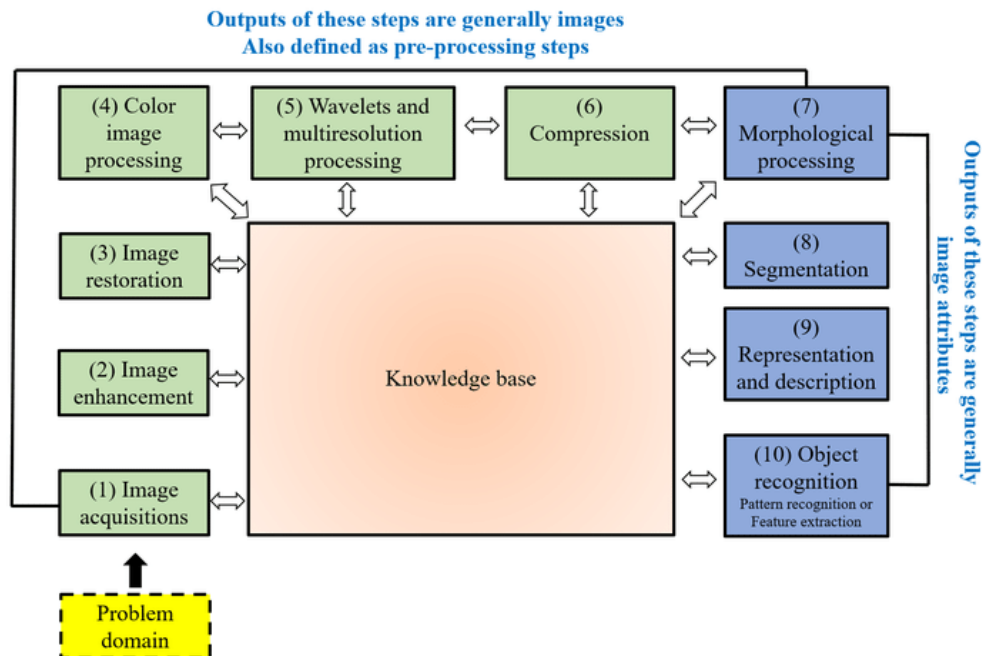
- **X-ray Imaging:** Οι ακτίνες X είναι από τις παλαιότερες πηγές ΗΜ ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση ευρύτερα. Η πιο γνωστή χρήση των ακτίνων X είναι η ιατρική διαγνωστική, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στη βιομηχανία και σε άλλους τομείς.
- **Imaging in the Ultraviolet Band:** Οι εφαρμογές του υπεριώδους «φωτός» ποικίλλουν. Περιλαμβάνουν λιθογραφία, βιομηχανική επιθεώρηση, μικροσκοπία, λέιζερ, βιολογική απεικόνιση και αστρονομικές παρατηρήσεις
- **Imaging in the Vision and Infrared Bands:** Λαμβάνοντας υπόψη ότι η οπτική ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι η πιο οικεία σε όλες τις δραστηριότητές μας, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι η απεικόνιση σε αυτή τη ζώνη ζυγίζει κατά πολύ όλες τις άλλες όσον αφορά το εύρος εφαρμογής. Η ζώνη υπέρυθρων χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με την οπτική απεικόνιση
- **Imaging in the Microwave Band:** Η κύρια εφαρμογή της απεικόνισης στη ζώνη των μικροκυμάτων είναι η χρήση του ραντάρ. Το μοναδικό χαρακτηριστικό της απεικόνισης μέσω ραντάρ είναι η ικανότητά του να συλλέγει δεδομένα σε σχεδόν οποιαδήποτε περιοχή ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες ή τις συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος.
- **Imaging in the Radio Band:** Όπως και στην περίπτωση της απεικόνισης στο άλλο άκρο του φάσματος (ακτίνες γάμμα), οι κύριες εφαρμογές της απεικόνισης στη ραδιοφωνική ζώνη είναι στην ιατρική και την αστρονομία.

3.3 Θεμελιώδη βήματα της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας

Είναι χρήσιμο να διαιρεθούν τα θεμελιώδη βήματα της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας σε δύο κατηγορίες (όπως συνοψίζεται στην **Εικόνα 3.4**):

1. Οι μέθοδοι των οποίων η είσοδος και η έξοδος είναι εικόνες (πράσινο χρώμα)
2. Οι μέθοδοι των οποίων οι είσοδοι μπορεί να είναι εικόνες αλλά οι έξοδοι είναι χαρακτηριστικά που εξάγονται από αυτές τις εικόνες (μπλε χρώμα).

Το διάγραμμα δεν υπονοεί ότι κάθε διαδικασία εφαρμόζεται σε μια εικόνα. Αντίθετα, η πρόθεση είναι να μεταφερθεί μια ιδέα για όλες τις μεθοδολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε εικόνες για διαφορετικούς σκοπούς και πιθανώς με διαφορετικούς στόχους.



Εικόνα 3.4. Τα θεμελιώδη στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. [53]

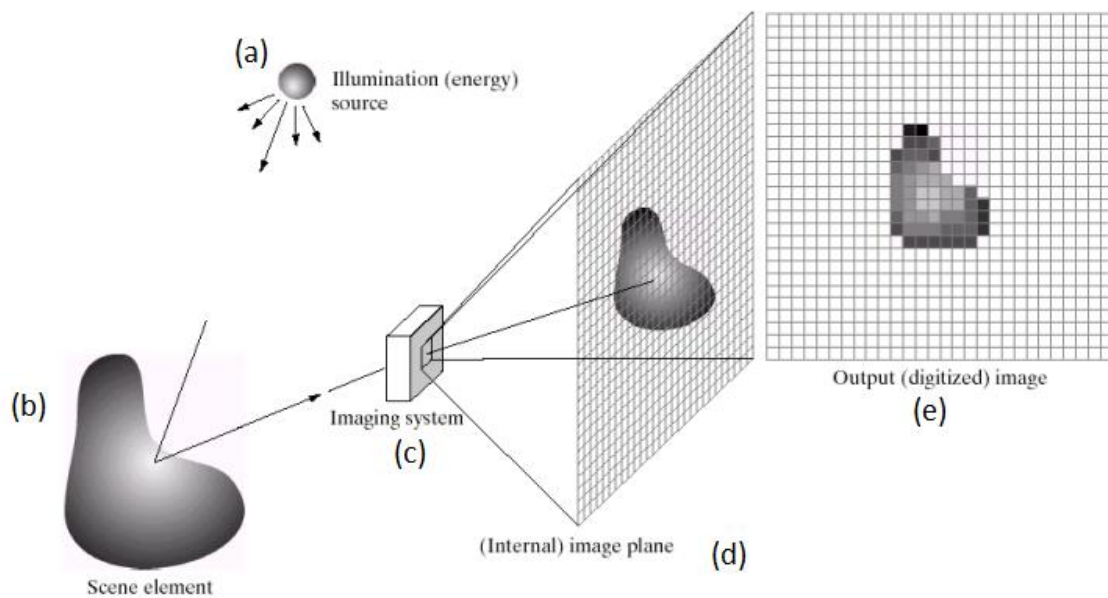
1. **Απόκτηση της εικόνας:** Γενικά το στάδιο απόκτησης της εικόνας περιλαμβάνει προεπεξεργασία, όπως η κλιμάκωση. Η απόκτηση θα μπορούσε να είναι τόσο απλή όσο να δίνεται μια εικόνα που είναι ήδη σε ψηφιακή μορφή.
2. **Βελτιστοποίηση εικόνας:** Η βελτίωση εικόνας είναι η διαδικασία χειρισμού μιας εικόνας έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο κατάλληλο από το πρωτότυπο για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι τεχνικές βελτίωσης ποικίλουν και διαφέρουν από πρόβλημα σε πρόβλημα.
3. **Αποκατάσταση εικόνας:** Το στάδιο «αποκατάστασης της εικόνας» ασχολείται επίσης με τη βελτίωση της εμφάνισης μιας εικόνας. Ωστόσο, σε αντίθεση με το στάδιο της βελτίωσης, η οποία είναι υποκειμενική, η αποκατάσταση εικόνας είναι αντικειμενική, με την έννοια ότι οι τεχνικές αποκατάστασης τείνουν να βασίζονται σε μαθηματικά ή

πιθανολογικά μοντέλα υποβάθμισης της εικόνας. Η ενίσχυση της εικόνας, από την άλλη πλευρά, βασίζεται σε ανθρώπινες υποκειμενικές προτιμήσεις.

4. **Επεξεργασία έγχρωμης εικόνας:** Η επεξεργασία έγχρωμων εικόνων είναι ένας τομέας μεγάλης σημασία λόγω της ογκώδους χρήσης ψηφιακών εικόνων μέσω του Διαδικτύου. Επίσης το χρώμα χρησιμοποιείται, πολλές φορές, ως βάση για την εξαγωγή «χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος» μιας εικόνας.
5. **Κυματίδια:** Τα κυματίδια είναι το θεμέλιο για την αναπαράσταση εικόνων σε διάφορους βαθμούς ανάλυσης. Χρησιμοποιείται για συμπίεση δεδομένων όπου οι εικόνες υποδιαιρούνται σε μικρότερες περιοχές
6. **Συμπίεση:** Η συμπίεση, όπως μαρτυρά και το όνομα, ασχολείται με τεχνικές για τη μείωση του χώρου αποθήκευσης που απαιτείται για την αποθήκευση μιας εικόνας ή του εύρους ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοσή της.
7. **Μορφολογική επεξεργασία:** Η μορφολογική επεξεργασία ασχολείται με εργαλεία που εξάγουν στοιχεία από μία εικόνα και είναι χρήσιμα για την αναπαράσταση και την περιγραφή σχήματος.
8. **Κατάτμηση:** Οι διαδικασίες τμηματοποίησης χωρίζουν μια εικόνα στα συστατικά μέρη ή αντικείμενα της. Γενικά, η αυτόνομη τμηματοποίηση είναι μια από τις πιο δύσκολες εργασίες στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Όσο πιο ακριβής είναι η κατάτμηση, τόσο πιο πιθανό είναι να πετύχει η αναγνώριση.
9. **Αναπαράσταση και περιγραφή:** Το στάδιο της αναπαράστασης και περιγραφής σχεδόν πάντα ακολουθείται την έξοδο ενός σταδίου τμηματοποίησης, που συνήθως είναι ακατέργαστα δεδομένα pixel, που αποτελούν είτε το όριο μιας περιοχής (δηλαδή το σύνολο των pixel που διαχωρίζουν μια περιοχή εικόνας από μια άλλη) είτε όλα τα σημεία στην ίδια την περιοχή. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητη η μετατροπή των δεδομένων σε ένα έντυπο κατάλληλο για υπολογιστική επεξεργασία.
10. **Αναγνώριση:** Η αναγνώριση είναι η διαδικασία που εκχωρεί μια ετικέτα (π.χ. "ανθρώπινο πρόσωπο") σε ένα αντικείμενο με βάση τους «περιγραφείς» του.

3.4 Απλό μοντέλο σχηματισμού μίας ψηφιακής εικόνας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι εικόνες δηλώνονται ως δισδιάστατες συναρτήσεις της μορφής $f(x, y)$. Η τιμή ή το πλάτος του f στις χωρικές συντεταγμένες (x, y) είναι ένα θετικό βαθμωτό μέγεθος του οποίου η φυσική σημασία καθορίζεται από την πηγή της εικόνας. Όταν μια εικόνα παράγεται από μια φυσική διαδικασία, οι τιμές της έντασής της είναι ανάλογες με την ενέργεια που εκπέμπεται από μια φυσική πηγή (π.χ. ηλεκτρομαγνητικά κύματα). Κατά συνέπεια, το $f(x, y)$ πρέπει να είναι μη μηδενικό και πεπερασμένο, δηλαδή :



Εικόνα 3.5 : Ένα παράδειγμα της διαδικασίας λήψης μίας ψηφιακής εικόνας. (α) Πηγή ενέργειας ("φωτισμός"). (β) Στοιχείο σκηνής. (γ) Σύστημα απεικόνισης. (δ) Προβολή της σκηνής στο σχέδιο εικόνας. (ε) Ψηφιοποιημένη εικόνα. [50]

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (3.4.1)$$

Η συνάρτηση $f(x, y)$ μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο συνιστώσες:

- i. την ποσότητα του φωτισμού της πηγής που προσπίπτει στη σκηνή που προβάλλεται και
- ii. την ποσότητα του φωτισμού που ανακλάται από τα αντικείμενα στη σκηνή.

Κατάλληλα, αυτά ονομάζονται στοιχεία φωτισμού και ανάκλασης και συμβολίζονται με $i(x, y)$ και $r(x, y)$ αντίστοιχα. Οι δύο συναρτήσεις συνδυάζονται ως γινόμενο για να σχηματίσουν την $f(x, y)$:

$$f(x, y) = i(x, y) * r(x, y) \quad (3.4.2)$$

όπου,

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (3.4.3)$$

επίσης,

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (3.4.4)$$

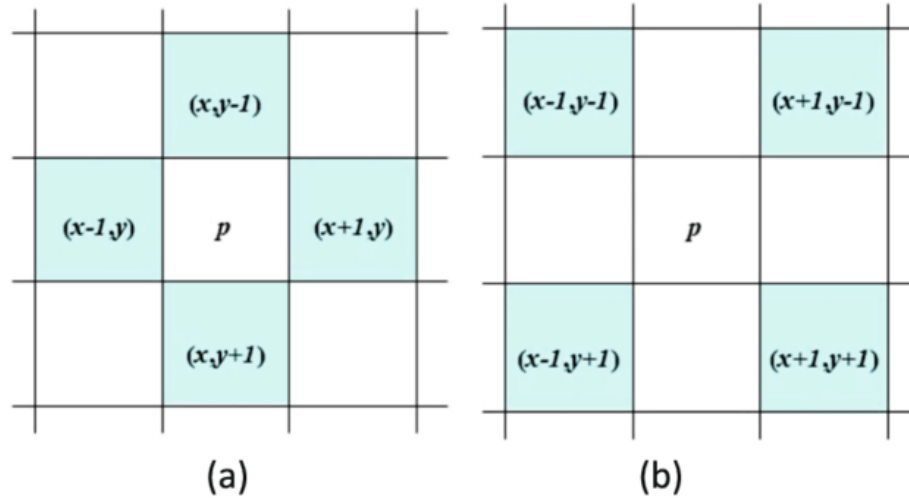
Η εξίσωση (3.4.4) δείχνει ότι η ανάκλαση περιορίζεται από το 0 (ολική απορρόφηση) και την τιμή του 1 (ολική ανάκλαση). Η φύση του $i(x, y)$ καθορίζεται από την πηγή φωτισμού, το $r(x, y)$ καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που απεικονίζονται [50]. Σημειώνεται ότι αυτές οι εκφράσεις ισχύουν επίσης για εικόνες που σχηματίζονται μέσω μετάδοσης του φωτισμού μέσω ενός μέσου, όπως μια ακτινογραφία θώρακος.

3.5 Γειτονικά εικονοστοιχεία (pixel)

Ένα pixel p στις συντεταγμένες (x, y) έχει τέσσερις οριζόντιους και κάθετους γείτονες (**Εικόνα 3.7**) των οποίων οι συντεταγμένες δίνονται από

$$((x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1)) \quad (3.5.1)$$

Αυτό το σύνολο των εικονοστοιχείων (pixel), που ονομάζεται οι 4-γείτονες του p , συμβολίζεται με $N_4(p)$. Κάθε εικονοστοιχείο είναι μια μονάδα απόστασης από το (x, y) και ορισμένες από τις γειτονικές θέσεις του p βρίσκονται έξω από την ψηφιακή εικόνα εάν το (x, y) βρίσκεται στο όριο της εικόνας.

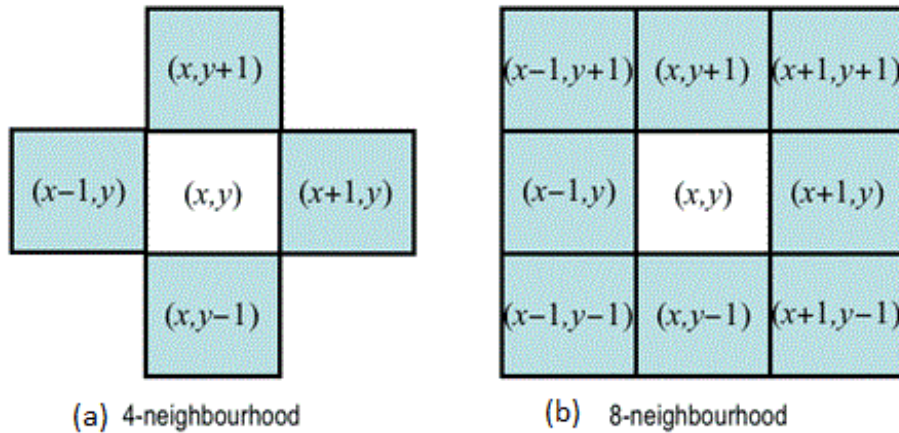


Εικόνα 3.7 : (a) Τα οριζόντια και κάθετα γειτονικά εικονοστοιχεία (pixels) του p . (b) Τα διαγώνια γειτονικά pixels του p . [54]

Επακόλουθα, οι τέσσερις διαγώνιοι γείτονες (**Εικόνα 3.7**) του p έχουν συντεταγμένες:

$$((x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1)) \quad (3.5.2)$$

και συμβολίζονται με $N_D(p)$. Αυτά τα σημεία, μαζί με τους 4-γείτονες, ονομάζονται 8-γείτονες του p , που συμβολίζονται με $N_8(p)$ [50]. Όπως και πριν, ορισμένες από τις γειτονικές τοποθεσίες στα $N_D(p)$ και $N_8(p)$ βρίσκονται εκτός της εικόνας εάν το (x, y) βρίσκεται στο όριο της εικόνας.



Εικόνα 3.8: (a) $N4(p)$: Τα 4 γειτονικά σημεία του p . (b) $N8(p)$: Τα 8 γειτονικά στοιχεία του p . [54]

3.6 Λειτουργίες των πινάκων έναντι των μητρών

Μια δυνατότητα των ψηφιακών εικόνων είναι ότι μπορούν να προβληθούν ισοδύναμα ως πίνακες. Μια λειτουργία συστοιχίας που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες εικόνες πραγματοποιείται ανά εικονοστοιχείο (pixel). Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλές καταστάσεις στις οποίες οι πράξεις μεταξύ των ψηφιακών εικόνων εκτελούνται χρησιμοποιώντας τη θεωρία των πινάκων. Αυτός είναι ο λόγος που πρέπει να γίνει σαφής διάκριση μεταξύ των λειτουργιών του πίνακα και της μήτρας. Για παράδειγμα, έστω οι ακόλουθες εικόνες με διαστάσεις 2×2 :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$$

Αφενός το γινόμενο των πινάκων των δύο εικόνων είναι:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{12}b_{12} \\ a_{21}b_{21} & a_{22}b_{22} \end{bmatrix}$$

Αφετέρου το γινόμενο δύο μητρών των δύο εικόνων δίνεται:

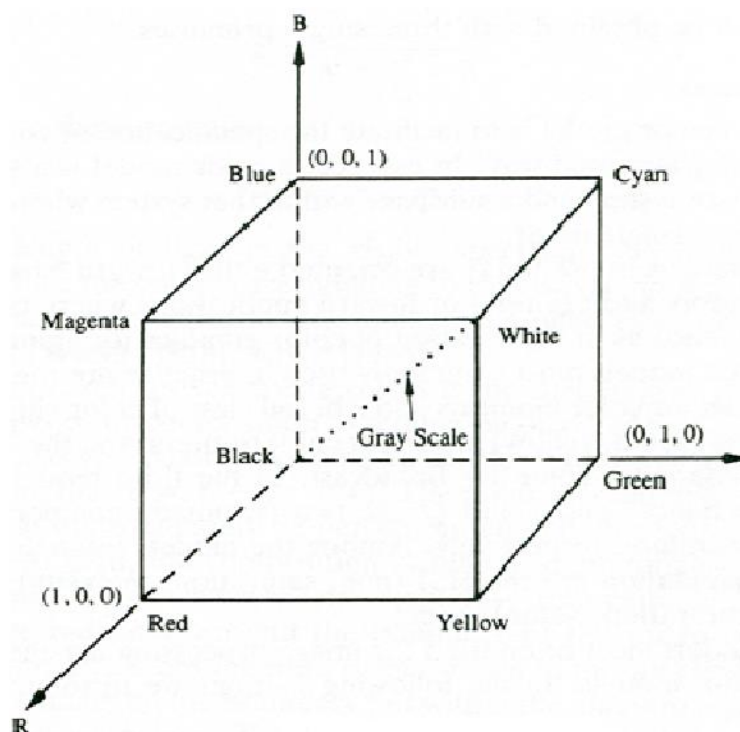
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{bmatrix}$$

Στη συγκεκριμένη εργασία οι μαθηματικές πράξεις μεταξύ των εικόνων έγιναν με βάση της λειτουργίας των πινάκων. Για παράδειγμα, στην αύξηση μιας εικόνας σε μια εκθετική δύναμη, εννοούμε ότι κάθε μεμονωμένο pixel αυξάνεται σε αυτήν την δύναμη, στη διαίρεση μιας εικόνας με μια άλλη, εννοείται ότι η διαίρεση γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων ζευγών εικονοστοιχείων κ.ο.κ.

3.7 Το χρωματικό μοντέλο **RGB**

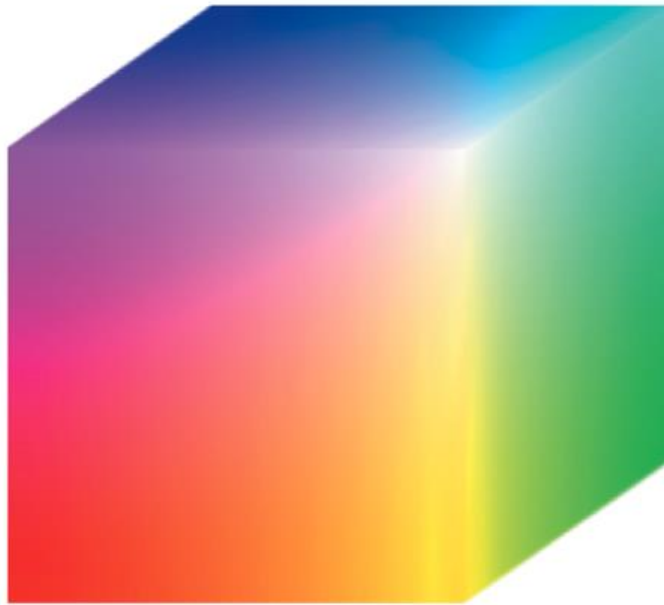
Στο μοντέλο RGB (Red Green Blue) [50], κάθε χρώμα εμφανίζεται στα κύρια φασματικά του στοιχεία κόκκινο, πράσινο και μπλε. Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ο χρωματικός υποχώρος ενδιαφέροντος είναι ο κύβος που φαίνεται στην Εικόνα 3.1, στον οποίο οι πρωτεύουσες τιμές RGB βρίσκονται σε τρεις γωνίες. Τα δευτερεύοντα χρώματα κυανό, ματζέντα (κόκκινο-μωβ) και κίτρινο βρίσκονται σε τρεις άλλες γωνίες. Το μαύρο είναι στην αρχή και το λευκό είναι στη απέναντι διαγώνιο γωνία από την αρχή. Σε αυτό το μοντέλο, η κλίμακα του γκρι (σημεία ίσων τιμών RGB) εκτείνεται από το μαύρο στο λευκό κατά μήκος της γραμμής που ενώνει αυτά τα δύο σημεία. Τα διαφορετικά χρώματα σε αυτό το μοντέλο είναι σημεία πάνω ή μέσα στον κύβο και καθορίζονται από διανύσματα που εκτείνονται από την αρχή. Για ευκολία, θεωρείται ότι όλες οι τιμές χρώματος έχουν κανονικοποιηθεί έτσι ώστε ο κύβος που

φαίνεται στην **Εικόνα 3.9** να είναι ο μοναδιαίος κύβος. Δηλαδή, όλες οι τιμές των R, G και B θεωρούνται στην περιοχή (0, 1].



Εικόνα 3.9 : Σχηματική απεικόνιση του μοναδιαίου κύβου RGB [50]

Οι εικόνες που αντιπροσωπεύονται στο χρωματικό μοντέλο RGB αποτελούνται από τρεις στοιχειώδεις εικόνες, μία για κάθε κύριο χρώμα. Όταν τροφοδοτούνται σε μια οθόνη RGB, αυτές οι τρεις εικόνες συνδυάζονται στην οθόνη για να παράγουν μια σύνθετη έγχρωμη εικόνα. Ο αριθμός των bit που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση κάθε εικονοστοιχείου στο χώρο RGB ονομάζεται «βάθος χρώματος». Έστω ότι, μια εικόνα RGB στην οποία κάθε μια από τις κόκκινες, πράσινες και μπλε εικόνες είναι μια εικόνα 8 bit. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, κάθε έγχρωμο εικονοστοιχείο RGB [δηλαδή, μια τριάδα τιμών (R, G, B)] λέγεται ότι έχει βάθος 24 bit (3 επίπεδα εικόνας επί τον αριθμό των bit ανά επίπεδο). Ο όρος full-color-image χρησιμοποιείται συχνά για να υποδηλώσει μια έγχρωμη εικόνα RGB 24 bit. Ο συνολικός αριθμός χρωμάτων σε μια εικόνα RGB 24 bit είναι $(2^8)^3 = 16.777.216$. Η εικόνα 3.2 δείχνει τον κύβο χρώματος RGB 24 bit.

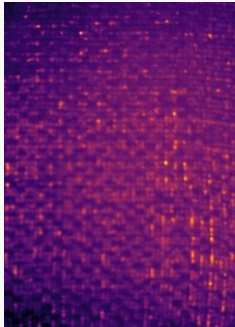
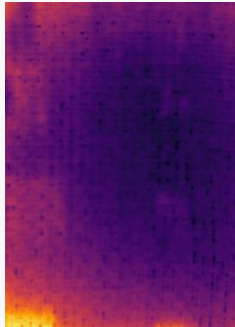
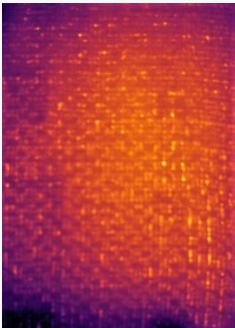
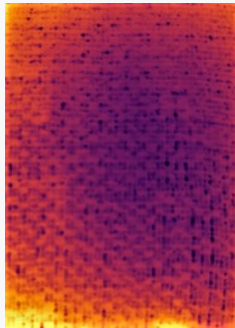


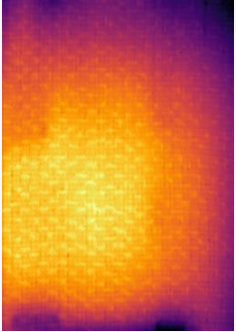
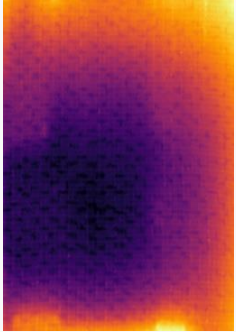
Εικόνα 3.10 : Σχηματική απεικόνιση του 24-bit χρωματικού κύβου RGB.[50]

Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικά αποτελέσματα και Συζήτηση

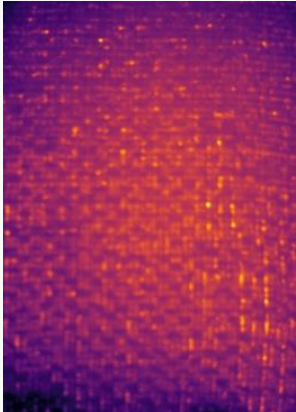
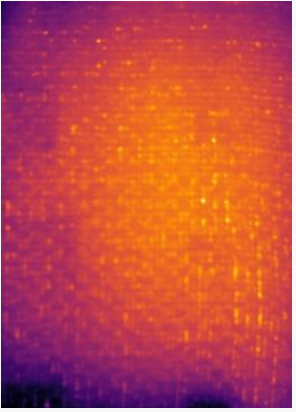
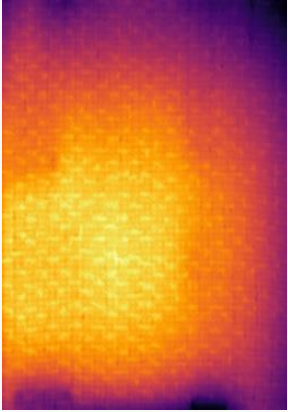
Τα παρακάτω δείγματα υλικών, στα οποία βασίστηκαν η ανάλυση θερμογραφικής εικόνας υπερύθρου και οι συναφείς υπολογισμοί, κατασκευάστηκαν με έγχυση ρητίνης υπό κενό CFRPs με ρητίνη Araldite LY5052 (Hunzman) και σκληρυντή Aradur 5052 σε αναλογία 100:38 και ίνες άνθρακα 300g/m² της FIBERMAX GR, με διάρκεια πολυμερισμού 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Στις στρώσεις της πλάκας (που θερμάνθηκε στα t=10s και 20s) ενσωματώθηκαν δυο είδη ελαττωμάτων, κομμάτια χαλκού πάχους 0.05 mm, μεταξύ της 2^{ης} και 3^{ης} στρώσης και τις 5^{ης} και 6^{ης} στρώσης. Στην πλάκα που θερμάνθηκε για 40s ενσωματώθηκαν τρία κομμάτια χαλκού πάχους 0.05 mm μεταξύ της 2^{ης} και 3^{ης} στρώσης, τις 4^{ης} και 5^{ης} στρώσης και τις 6^{ης} και 7^{ης} στρώσης. Τα δύο είδη ελαττωμάτων είχαν διαστάσεις 10*10 mm και 20 *20 mm αριστερά και δεξιά των πλακών αντίστοιχα.

Πίνακας I. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 10s.

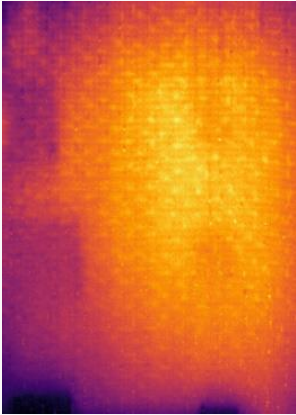
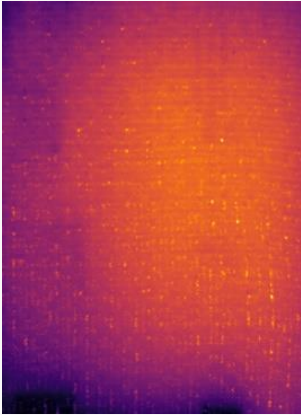
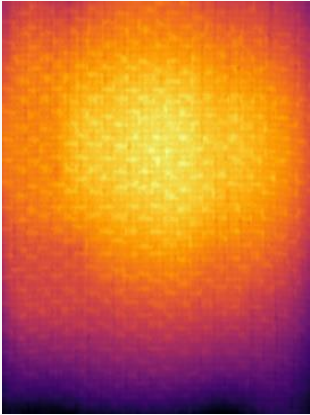
0.1 Hz Frequency	Amplitude	Phase
FPCM (t=10s)		
DLCM (3 periods) (t=10s/per)		

<p>Pulse Phase-DFT (t=10s)</p>		
---	---	---

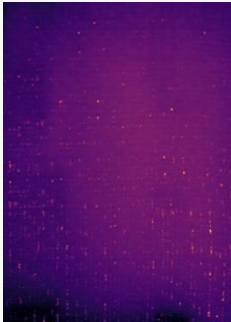
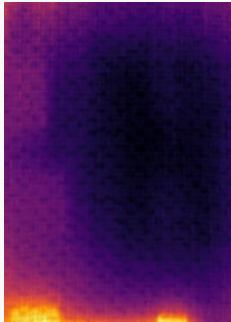
Πίνακας II. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Standard Deviation για τις μεθόδους IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 10s.

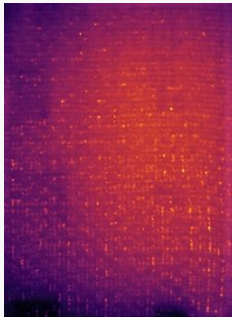
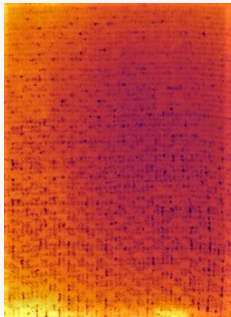
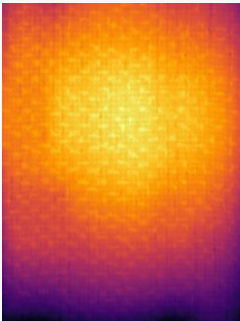
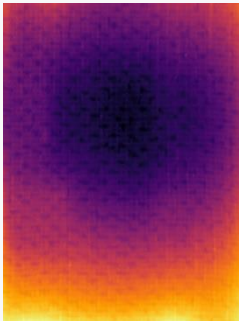
Standard Deviation Results			0.1Hz (t=10s/per)
Heating Protocol of IR Lock-in (4 points)	Heating Protocol of IR Lock-in (3 periods)	Heating Protocol of Pulse Phase	
			

Πίνακας III. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Standard Deviation για τις μεθόδους IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 20s.

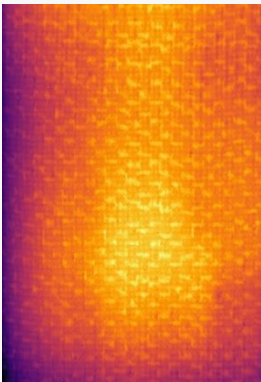
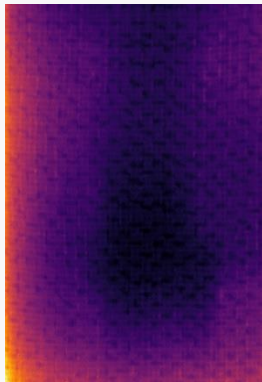
Standard Deviation Results			0.05Hz (t=20s/per)
Heating Protocol of IR Lock-in (4 points)	Heating Protocol of IR Lock-in (3 periods)	Heating Protocol of Pulse Phase	
			

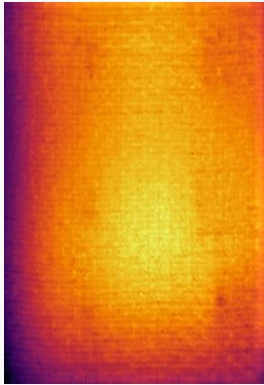
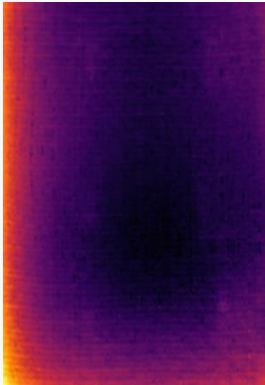
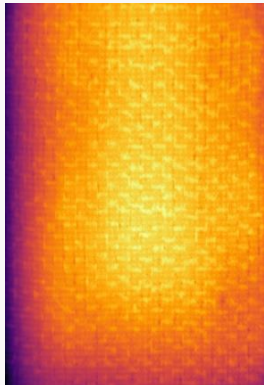
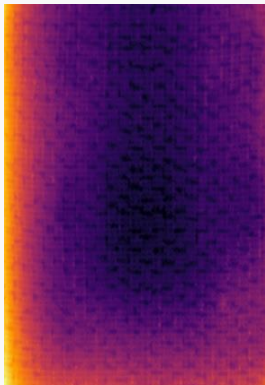
Πίνακας IV. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 20s.

0.05 Hz Frequency	Amplitude	Phase
FPCM (t=20s)		

DLCM (3 periods) (t=20s/per)		
Pulse Phase-DFT (t=20s)		

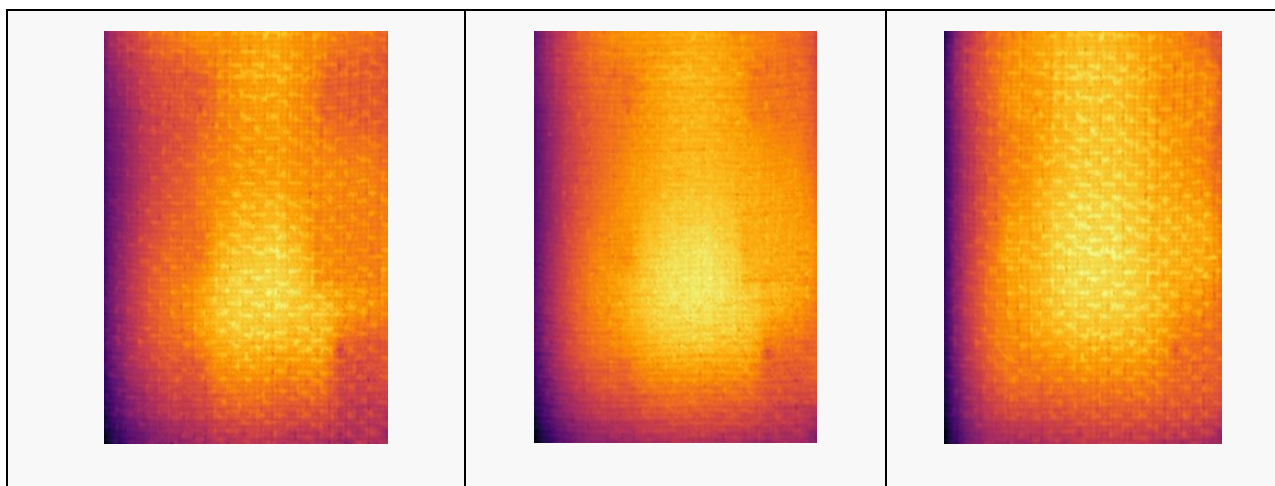
Πίνακας V. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων Amplitude και Phase των μεθόδων IR Lock-in 4 points, IR Lock-in periods (3 periods) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 40s.

0.025 Hz Frequency	Amplitude	Phase
FPCM (t=40s)		

DLCM (3 periods) (t=40s/per)		
Pulse Phase-DFT (t=40s)		

Πίνακας VI. Αποτελέσματα Standard Deviation των μεθόδων IR Lock-in 4 point , IR Lock-in periods (N=3) και Pulse Phase σε χρόνο θέρμανσης 40s.

Standard Deviation Results		25mHz (t=40s/per)
Heating Protocol of IR Lock-in (4 points)	Heating Protocol of IR Lock-in (3 periods)	Heating Protocol of Pulse Phase



Αξίζει να σημειωθεί πως ο χρόνος θέρμανσης, το βάθος και το μέγεθος του ελαττώματος καθώς και η μεθοδολογία παίζει καθοριστικό ρόλο στις αποδόσεις των αλγορίθμων. Με τα βαθύτερα ελαττώματα να είναι πιο εμφανή στην lock- in 40 δευτερολέπτων, με τρεις περιόδους θέρμανσης. Παρατηρώντας κανείς θα σημειώνει ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν με την βιβλιογραφία, η lock- in είναι η καλύτερη μέθοδος για επισκόπηση με θερμογραφία αλλά και η πιο χρονοβόρα διαδικασία τόσο σε υπολογιστικό χρόνο όσο και σε χρόνο θέρμανσης, ενώ η συχνότητα του θερμικού κύματος είναι συνδεδεμένη με το βάθος επισκόπησης.

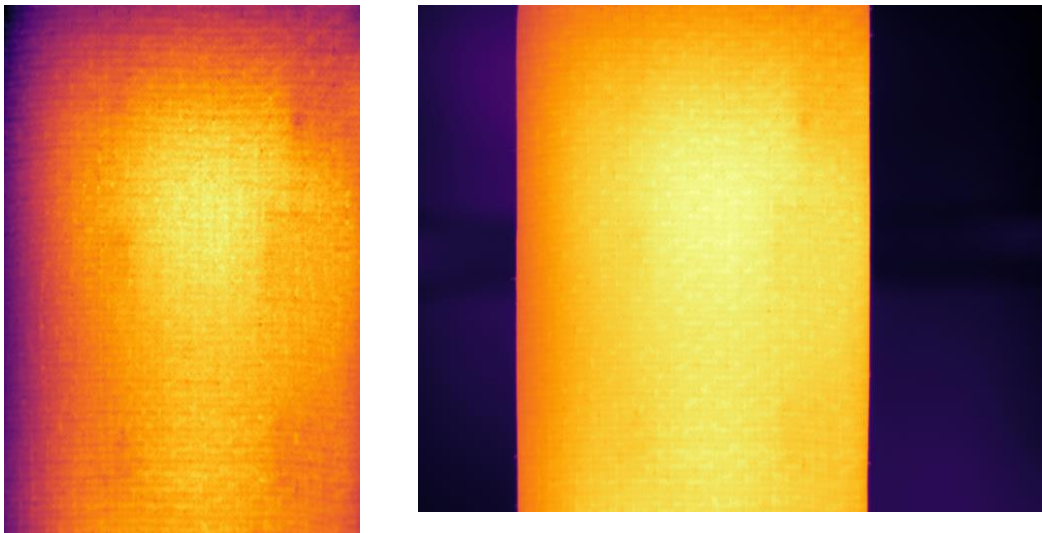
Τα αποτελέσματα της Lock – in σε υψηλότερες θερμάνσεις είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα της μεθόδου standard deviation, με την τελευταία να χρειάζεται το 1/5 της υπολογιστικής ισχύος, καθιστώντας την ιδανική για γρήγορη επισκόπηση της ποιότητας κατασκευής με δυνατότητα διείσδυσης μεγαλύτερη από 2 mm, ενώ απαιτεί λιγότερο εξοπλισμό και εξειδίκευση.

Σε συμφωνία με την βιβλιογραφία, η μέθοδος pulse phase έχει την μικρότερη διακριτική ικανότητα από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν. Δίνοντας τα καλύτερα αποτελέσματα σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους σε μικρότερους χρόνους θέρμανσης. Τέλος η ομοιομορφία του θερμικού κύματος είναι απαραίτητη για την επισκόπηση της πλάκας καθώς περιοχές κοντά στο κέντρο θέρμανσης έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα.

Η παραμετροποίηση της διαδικασίας για βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων είναι ένα ανοιχτό για έρευνα θέμα μαζί με τον καθορισμό της βέλτιστης συχνότητας δειγματοληψίας και χρόνου θέρμανσης για τη μέθοδο standard deviation.

Σύγκριση αποτελεσμάτων με και χωρίς περικοπή φόντου αντίστοιχα

Τα παρακάτω θερμογραφήματα περικόπηκαν στο περίγραμμα του σύνθετου υλικού για την αύξηση της αντίθεσης σε σύγκριση με τα αρχικά κόβοντας το φόντο (**Εικόνα 4.1**). Είναι γεγονός πως στο αποτέλεσμα μετά την περικοπή του φόντου αυξήθηκε η αντίθεση και η διακριτική ικανότητα σε σχέση με το αποτέλεσμα πριν την περικοπή.



Εικόνα 4.1 : Αποτελέσματα Lock-in 25 mhz με και χωρίς περικοπή του φόντου αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε in-house Graphical User Interface (GUI) και τμήμα υπολογιστικής υλοποίησης ώστε να συμπεριλάβει αλγορίθμους που είχαν αναπτυχθεί, αναπτύσσονται στην ερευνητική ομάδα Mu³ST και υπάρχουν στην βιβλιογραφία για την επεξεργασία εικόνας που λαμβάνεται κατά βάση από τη θερμογραφία Lock-in («κλειδώματος» σήματος) αλλά και από τη θερμογραφία Pulse. Η επεξεργασία του σήματος από το θερμικό κύμα μπορεί να εξαχθεί με μετασχηματισμούς Fourier (FTM), τη μέθοδο συσχέτισης τεσσάρων σημείων (FPCM) και την ψηφιακή μέθοδο συσχέτισης κλειδώματος (lock-in) (DLICM), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του πλάτους και της γωνίας φάσης. Η υπολογιστική επεξεργασία των θερμογραφικών εικόνων βοήθησε στην ανίχνευση βλαβών σε δοκίμια συνθέτων υλικών που κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής Σύνθετων και Ευφύων Υλικών (CSML) του Καθηγητή κ. Παϊπέτη. Επίσης σε συνεργασία με το CSML υλοποιήθηκε και ένας επιπλέον αλγόριθμος (standard deviation). Οι προαναφερόμενοι αλγόριθμοι αποδείχτηκαν αποτελεσματικοί για την ανίχνευση ατελειών στο υπόστρωμα ενός συνθέτου στη θερμογραφία lock-in με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το σύστημα θερμογραφίας IR lock-in με βάση την ακολουθία θερμογραφικών εικόνων και την επεξεργασία τους είναι μια αποτελεσματική τεχνική για τον μη καταστροφικό έλεγχο και αξιολόγηση σύνθετων υλικών.

Το υπολογιστικό πρόγραμμα, όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται σε βασικούς μαθηματικούς αλγορίθμους επεξεργασίας θερμικού σήματος. Παρόλα αυτά θα μπορούσαν να προστεθούν μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού της θερμοχωρητικότητας και της θερμοαγωγημότητας ενός σύνθετου υλικού καθιστώντας το ένα άξιο βοηθητικό υπολογιστικό πρόγραμμα για κάθε θερμοσύστημα χρήσης της θερμογραφίας Lock-in και όχι μόνο.

Παράρτημα Α

Εγχειρίδιο του προγράμματος *Thermansys*

**Προειδοποίηση:* Το όνομα των φακέλων όπου έχετε αποθηκεύσει τα δεδομένα σας πρέπει να είναι με λατινικούς χαρακτήρες.

***Προειδοποίηση:* Εάν η μπάρα προόδου κολλήσει, κλείστε το δευτερεύον παράθυρο (π.χ. ., *IR Lock-in periods Calculator*) και ανοίξτε το ξανά.

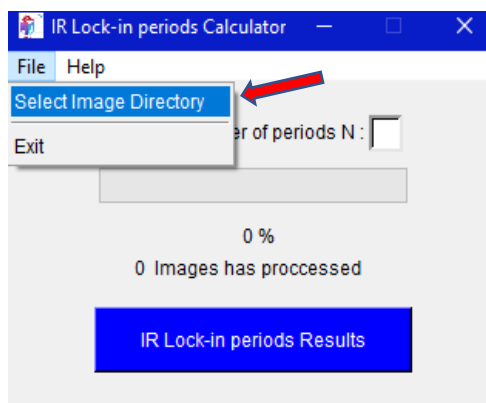
➤ IR Lock-in with periods

1. Κάντε κλικ στο κουμπί "IR Lock-in period" για να ανοίξει το παράθυρο IR Lock-in Calculator.



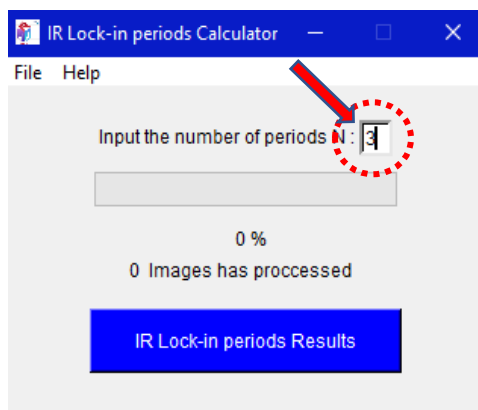
Εικόνα 1: IR Lock-in periods Βήμα 1^ο

2. Πρώτον, επιλέξτε τον κατάλογο δεδομένων/εικόνων σας όπως φαίνεται παρακάτω. (File → Select Image Directory).



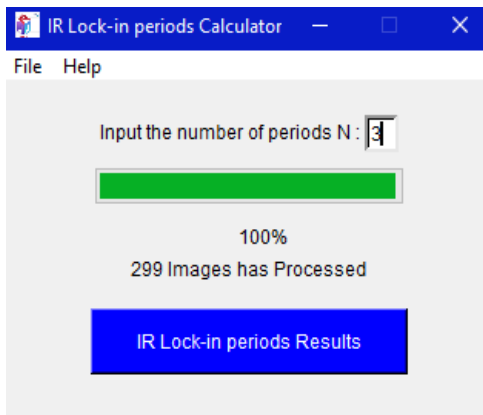
Εικόνα 2: IR Lock-in periods Βήμα 2^ο

3. Στη συνέχεια, πληκτρολογήστε τον αριθμό των περιόδων στο πλαίσιο εισαγωγής. (Παρακαλώ, προσέξτε να μην πληκτρολογήσετε μια συμβολοσειρά ή έναν αρνητικό αριθμό).



Εικόνα 3: IR Lock-in periods Βήμα 3^ο

4. Κάντε κλικ στο κύριο μπλε κουμπί "IR Lock-in periods Results" για να εκτελέσετε τον αλγόριθμο.
5. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μπορείτε να ελέγξετε τα αποτελέσματα στον κατάλογο αποτελεσμάτων (IR Lock-in periods Results) και την αντίστοιχη αναφορά διεργασίας (IR Lock-in periods Report_).



Εικόνα 4: IR Lock-in periods Βήμα 5^ο

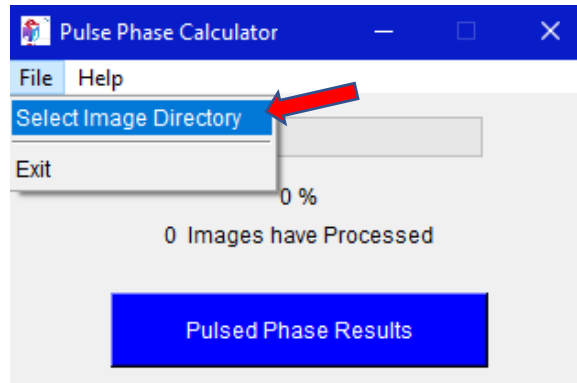
➤ Pulsed Phase

1. Κάντε κλικ στο κουμπί "Pulsed Phase" για να ανοίξει το παράθυρο Pulsed Phase Calculator.



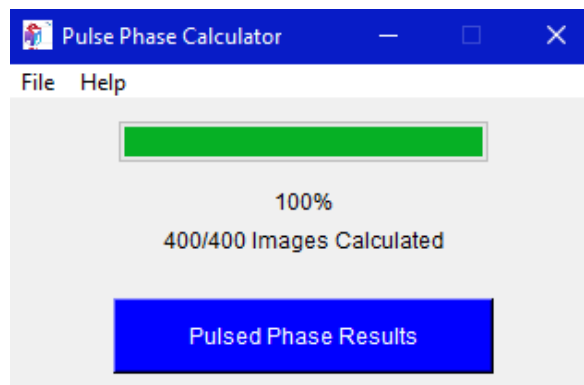
Εικόνα 5: Pulsed Phase Βήμα 1^ο

2. Αρχικά, επιλέξτε τον σκετ δεδομένων/εικόνων σας όπως φαίνεται παρακάτω. (File → Select Image Directory).



Εικόνα 6: Pulsed Phase Βήμα 2^ο

3. Στη συνέχεια, κάντε κλικ στο κύριο μπλε κουμπί " Pulsed Phase Results " για να εκτελέσετε τον αλγόριθμο.
4. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μπορείτε να ελέγξετε τα αποτελέσματα στον κατάλογο αποτελεσμάτων (Pulsed Phase Results) και την αντίστοιχη αναφορά διεργασίας (Pulsed Phase Report_).



Εικόνα 7: Pulsed Phase Βήμα 4^ο

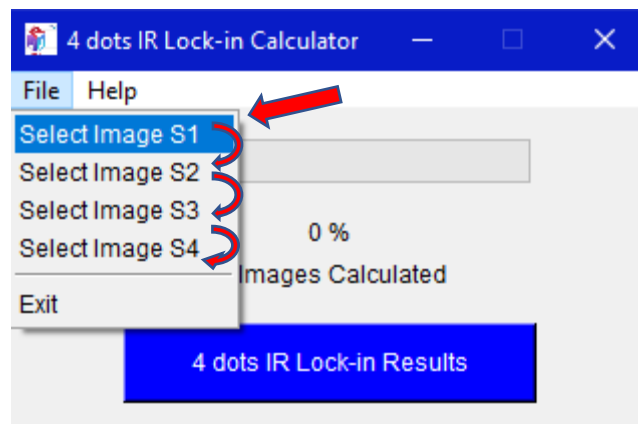
➤ IR Lock-in 4 dots

1. Κάντε κλικ στο κουμπί "4 dots IR Lock-in" για να ανοίξει το παράθυρο 4 dots IR Lock-in Calculator.



Εικόνα 8: IR Lock-in 4 dots Βήμα 1^ο

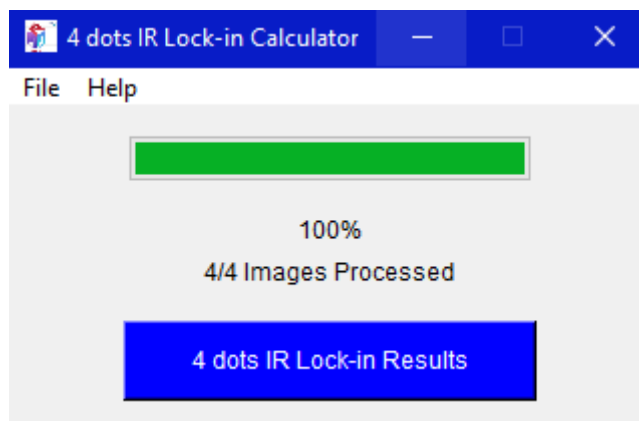
2. Αρχικά, επιλέξτε τις εικόνες S₁, S₂, S₃, S₄ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.
(File → Select Image S₁, Select Image S₂, Select Image S₃, Select Image S₄).



Εικόνα 9: IR Lock-in 4 dots Βήμα 2^ο

3. Στη συνέχεια, κάντε κλικ στο κύριο μπλε κουμπί “4 dots IR Lock-in Results” για να εκτελέσετε τον αλγόριθμο.

4. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μπορείτε να ελέγξετε τα αποτελέσματα στον κατάλογο αποτελεσμάτων (IR Lock-In 4-dots Results) και την αντίστοιχη αναφορά διεργασίας (IR Lock-in 4 dots Report_).



Εικόνα 10: IR Lock-in 4 dots Βήμα 4^ο

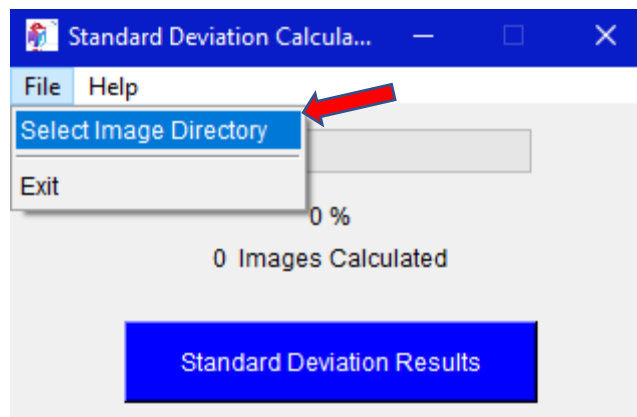
➤ **Standard Deviation**

1. Κάντε κλικ στο κουμπί " Standard Dev " για να ανοίξει το παράθυρο Standard Deviation Calculator.



Εικόνα 11: Standard Deviation Βήμα 1^ο

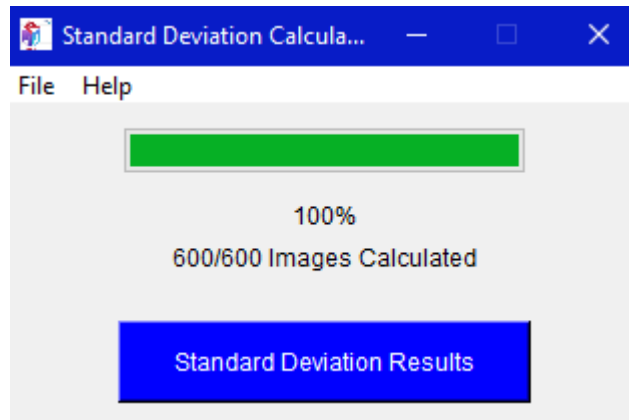
2. Αρχικά, επιλέξτε τον σκετ δεδομένων/εικόνων σας όπως φαίνεται παρακάτω. (File → Select Image Directory).



Εικόνα 12: Standard Deviation Βήμα 2^ο

3. Στη συνέχεια, κάντε κλικ στο κύριο μπλε κουμπί “ Standard Deviation Results ” για να εκτελέσετε τον αλγόριθμο.

4. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μπορείτε να ελέγξετε τα αποτελέσματα στον κατάλογο αποτελεσμάτων (Standard Deviation Results) και την αντίστοιχη αναφορά διεργασίας (Standard Deviation Report _).

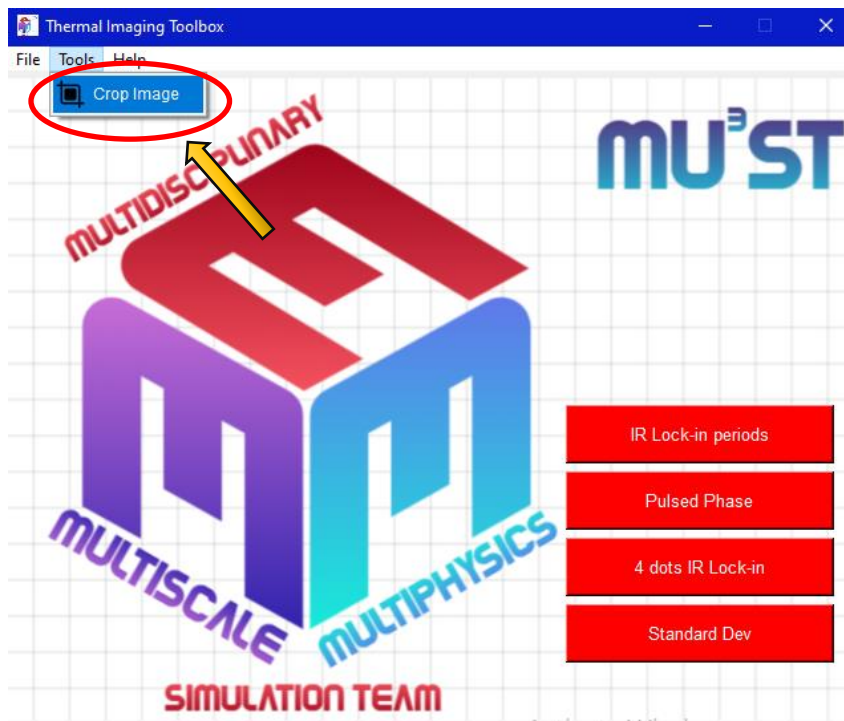


Εικόνα 13: Standard Deviation Βήμα 4^ο

Menu bar

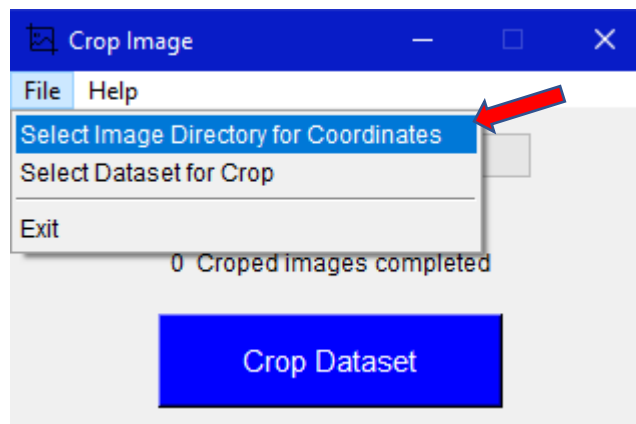
➤ **Tools.**

1. Από τη γραμμή μενού μπορείτε να κάνετε κλικ στο "Tools" και να επιλέξετε "Crop Image". Αυτή η λειτουργία είναι αρκετά χρήσιμη αν θέλετε να κόψετε ένα ολόκληρο σετ δεδομένων σε συγκεκριμένες συντεταγμένες για καλύτερη ανάλυση των τελικών αποτελεσμάτων.



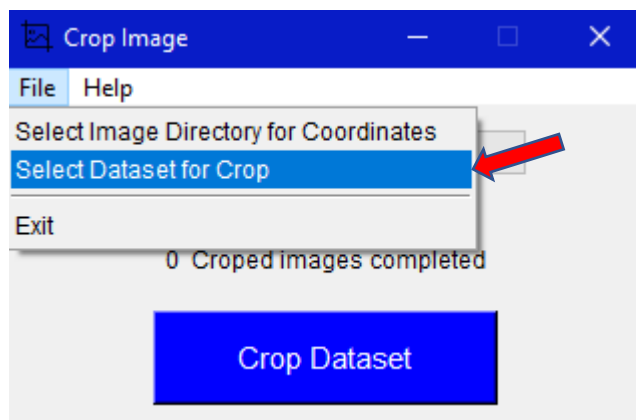
Εικόνα 14: Crop Image Βήμα 1^ο

2. Αρχικά, επιλέξτε μια εικόνα στην οποία θέλετε να επιλέξετε τις συντεταγμένες (File → Select Image Directory for Coordinates). Οι συντεταγμένες-χωρίο που επιλέγετε θα εφαρμοστούν στο σύνολο δεδομένων που θα επιλέξετε στη συνέχεια.



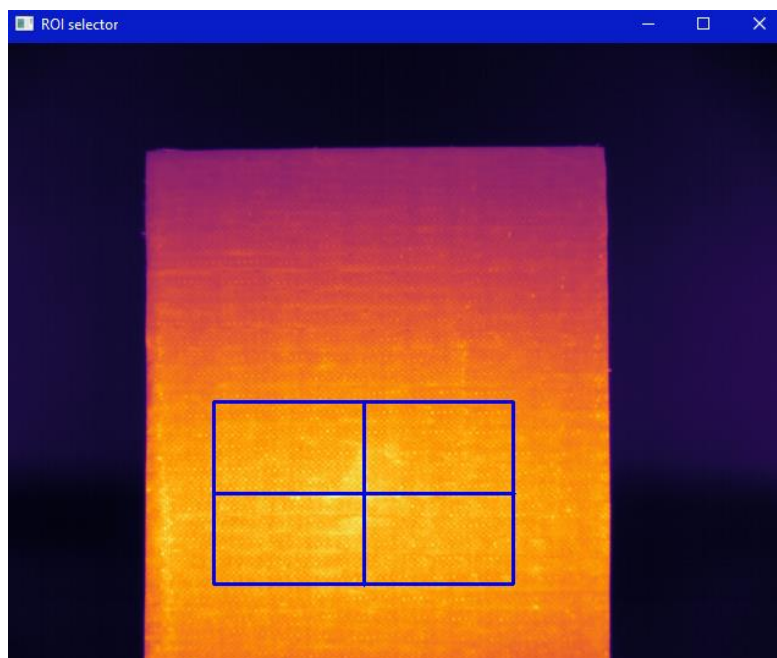
Εικόνα 15: Crop Image Βήμα 2^ο

3. Στη συνέχεια, επιλέξτε το αρχείο δεδομένων στο οποίο θέλετε να εφαρμόσετε τις συντεταγμένες για την περικοπή (File → Select Dataset for Crop).



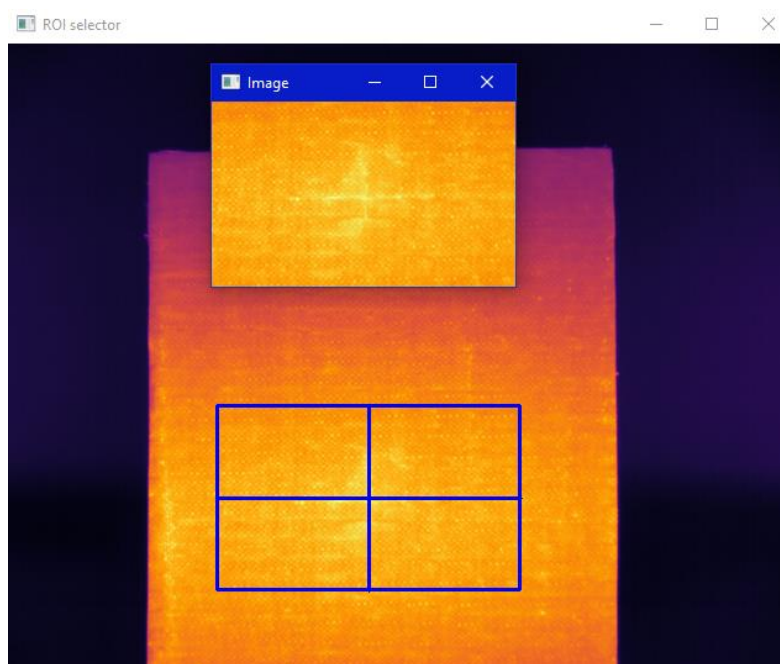
Εικόνα 16: Crop Image Βήμα 3^ο

4. Κάντε κλικ στο κύριο μπλε κουμπί "Crop Dataset" για να εκτελέσετε τον αλγόριθμο. Όταν κάνετε κλικ στο κουμπί, θα εμφανιστεί ένα δεύτερο παράθυρο που θα δείχνει την εικόνα που επιλέξατε.



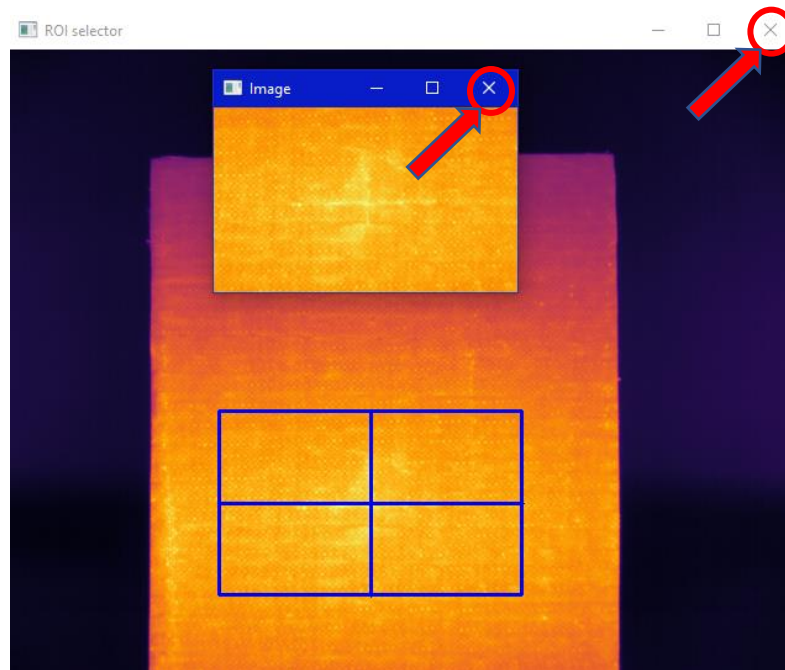
Εικόνα 17: Crop Image Βήμα 4^ο

5. Κάντε παρατεταμένα και σύρετε για να επιλέξετε την περιοχή που σας ενδιαφέρει και πατήστε "Enter". Στη συνέχεια, θα εμφανιστεί ένα παράθυρο που θα εμφανίζει την περιοχή που έχετε επιλέξει.



Εικόνα 18: Crop Image Βήμα 5^ο

6. Κλείστε και τα δύο αυτά παράθυρα ("Image", "ROI selector") κάνοντας κλικ στο επάνω δεξί κόκκινο κουμπί των παραθύρων για να συνεχίσετε τον αλγόριθμο.



Εικόνα 19: Crop Image Βήμα 6^ο

7. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μπορείτε να ελέγξετε το νέο κομμένο αρχείο δεδομένων στον φάκελο αποτελεσμάτων (Cropped Dataset) και την αντίστοιχη αναφορά (Crop-tool Report_).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Chrysafi, A.P., Athanasopoulos, N. and Siakavellas, N.J. (2017) 'Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing', *International Journal of Thermal Sciences*, 116, pp. 242–253. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.017>.
- [2] Garnier C, Pastor M, Eyma F, Lorrain Florent B. The detection of aeronautical defects in-situ on composite structures using nondestructive testing. *Compos Struct* 2011; 93:1328e36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.10.017>.
- [3] Goidescu C, Weleman H, Garnier C, Fazzini M, Brault H, Peronnet E, et al. Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography. *Composites Part B* 2013; 48:95e105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.016>.
- [4] Riegert G, Pfeleiderer K, Gerhard H, Solodov I, Busse G. Modern methods of NDT for inspection of aerospace structures. *Polym Test* 2006;1e11.10.1.1.216.2369.
- [5] Maldague X. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Mater Eval* 2002;60(9):1060e73.
- [6] Murariu A, Bîrdeanu A, Cojocaru R, Safta V, Dehelean D, Botila L, et al. Application of thermography in materials science and engineering. *Infrared Thermogr* 2004;27e52. <http://dx.doi.org/10.5772/1353>.
- [7] Meola C, Carlomagno G. Recent advances in the use of infrared thermography. *Meas Sci Technol* 2004;15: R27e58. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/R01>.
- [8] Grammatikos SA, Kordatos EZ, Barkoula N-M, Matikas TE, Paipetis AS. Innovative non-destructive evaluation and damage characterisation of composite aerostructures using thermography. *Plast Rubber Compos* 2011; 40:342e8. <http://dx.doi.org/10.1179/1743289810Y.0000000013>.
- [9] Ibarra-Castanedo C, Genest M, Servais P, Maldague XPV, Bendada A. Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography. *Non destruct Test Eva* 2007; 22:199e215. <http://dx.doi.org/10.1080/10589750701448548>.
- [10] Sfarra S, Bendada A, Ibarra-Castanedo C, Ambrosini D, Paoletti D, Maldague X. Santa Maria di Collemaggio Church (L'Aquila, Italy): historical reconstruction by non-destructive testing techniques. *Int J Archit Herit* 2015;9(4):367e90.
- [11] Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, Paoletti D, Maldague X. Infrared vision inspection of cultural heritage objects from the city of L'Aquila, Italy and its surroundings. *Mater Eval* 2013;71(5):561e70.

- [12] Andonova A. Comparison of transient thermography methods for defect detecting in electronic components and modules. In: Proceedings of the 2013 international conference on electronics, signal processing and communication systems; 2013. p. 118e22.
- [13] Ng EY-K. A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *Int J Therm Sci* 2009;48(5):849e59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.06.015> .
- [14] Avdelidis NP, Almond DP, Dobbinson A, Hawtin BC, Ibarra-Castanedo C, Maldague X. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT. *Prog Aerosp Sci* 2004; 40:143e62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2004.03.001> .
- [15] Meola C, Carlomagno G, Squillace A, Vitiello A. Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. *Eng Fail Anal* 2006; 13:380e8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.02.007>.
- [16] Lahiri BB, Bagavathiappan S, Reshmi PR, Philip J, Jayakumar T, Raj B. Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. *Infrared Phys Techn* 2012;35(2e3):191e9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2012.01.001>.
- [17] Brown JR, Hamilton HR. Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis. *Constr Build Mater* 2013; 38:1292e302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.016>.
- [18] Athanasopoulos N, Kostopoulos V. Damage detection via Joule effect for multidirectional carbon fiber reinforced composites. *Appl Phys Lett* 2012;101(11). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4751992> . 114109-1e114109-5.
- [19] Duan Y, Servais P, Genest M, Ibarra-Castanedo C, Maldague X. ThermoPoD: a reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials. *J Mech Sci Technol* 2012;26(7):1985e91. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-012-0510-8>.
- [20] Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, Santulli C, Paoletti D, Maldague X. Monitoring of jute/hemp fiber hybrid laminates by non-destructive testing techniques. *Sci Eng Compos Mater* 2016;23(3):283e300. <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2013-0138>.
- [21] Sfarra S, Perilli S, Paoletti D, Ambrosini D. Ceramics and defects. Infrared thermography and numerical simulations - a wide-ranging view for quantitative analysis. *J Therm Anal Calorim* 2016; 123:43e62. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-015-4974-5> .

- [22] Siakavellas NJ, Tsopelas N. Detection of the interface between two metals by eddy current thermography. *Nondestruct Test Eva* 2015;30(3):252e76. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1034716> .
- [23] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. *AIP J Appl Phys* 1996; 79:2694e8.
- [24] Breitenstein, O., Warta, W. and Schubert, M.C. (2018) ‘Introduction’, in Breitenstein, O., Warta, W., and Schubert, M. C., *Lock-in Thermography*. Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Microelectronics), pp. 1–6. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99825-1_1 .
- [25] Pulli, K. et al. (2012) ‘Realtime Computer Vision with OpenCV: Mobile computer-vision technology will soon become as ubiquitous as touch interfaces.’, *Queue*, 10(4), pp. 40–56. Available at: <https://doi.org/10.1145/2181796.2206309> .
- [26] "Tkinter — Python interface to Tcl/Tk — Python v2.6.1 documentation". Retrieved 2022-08-10.]
- [27] The History of Infrared Thermography. (2022, 31 Μαΐου). Ανακτήθηκε από: <https://www.nachi.org/history-ir.htm>
- [28] X.P. Maldague, Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, in: K. Chang (Ed.), *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*, Wiley, New York, 2001, p. 684.
- [29] Clemente Ibara-Castanedo, Marc Genset, et al. Inspection of aerospace materials by pulse thermography, lock-in thermography and virbothermography: a comparative study, in: *Thermosense XXIX, Proc. of SPIE*, vol. 6541(9), 2007, p. 654116-1.
- [30] Ravibabu Mulaveessala, Suneet Tuli, Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection, *Applied Physics Letters* 89 (2006) 191913-3.
- [31] X. Maldague, S. Marinetti, Pulse phase infrared thermography, *Journal of Applied Physics* 79 (5) (1996) 2694–2698.
- [32] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *Journal of Applied Physics* 71 (1992) 3962–3965
- [33] O. Breitenstein, M. Langenkamp, *Lock-in Thermography Basics and Use for Functional Diagnostics of Electronic Components*. Springer Series in Advanced Microelectronics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.

- [34] Junyan, L., Yang, W. and Jingmin, D. (2010) ‘Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT’, *Infrared Physics & Technology*, 53, pp. 348–357.
- [35] Meola, C. and Carlomagno, G.M. (2004) ‘Recent advances in the use of infrared thermography’, *Measurement Science and Technology*, 15(9), pp. R27–R58. doi:[10.1088/0957-0233/15/9/R01](https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/R01).
- [36] Maldague X. P. and Marinetti S. “Pulse Phase Infrared Thermography,” J. Appl. Phys., vol. 79, no. 5, 1996, p. 2694-2698.
- [37] Busse G., Wu D. and Karpen W. “Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography,” J. Appl. Phys., vol. 71, no. 8, 1992, p. 3962-3965.
- [38] Maldague X. and Couturier, J-P. “Review of Pulse Phase Infrared Thermography” in Abbozzo L. R., Carlomagno G. M., Corsi C. (eds.), IV International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, Firenze (Italy), September 15-16, 1997.
- [39] Ibarra-Castanedo, C. and Maldague, X. (2004) ‘Pulsed phase thermography reviewed’, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 1(1), pp. 47–70. doi:[10.3166/qirt.1.47-70](https://doi.org/10.3166/qirt.1.47-70).
- [40] Breitenstein, O., Warta, W. and Schubert, M.C. (2018) *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Microelectronics). doi:[10.1007/978-3-319-99825-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99825-1).
- [41] P.K. Kuo, T. Ahmed, H. Jin, and R.L. Thomas, Phase-Locked Image Acquisition in Thermography, SPIE 1004, 41-45 (1988)
- [42] X.P.V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, Wiley, New York (2001)
- [43] O. Breitenstein and M. Langenkamp, Lock-in Thermography - Basics and Use for Functional Diagnostics of Electronic Components, Springer, Berlin, Heidelberg (2003)
- [44] Guang-Shu Hu, Digital Signal Processing Theory, Algorithms and Realization, Tsing Hua University Publishing, 2003
- [45] Liu, J., Yang, W. and Dai, J. (2010) ‘Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT’, *Infrared Physics & Technology*, 53(5), pp. 348–357. doi:[10.1016/j.infrared.2010.06.002](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.06.002).

- [46] Fourier transform theory. (2022, 7 Ιουνίου). Ανακτήθηκε από:
https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/OWENS/LECT4/node2.html
- [47] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *Journal of Applied Physics* 71 (1992) 3962–3965.
- [48] Chung, Y. *et al.* (2022) ‘Binarization Mechanism Evaluation for Water Ingress Detectability in Honeycomb Sandwich Structure Using Lock-In Thermography’, *Materials*, 15(6), p. 2333. doi:[10.3390/ma15062333](https://doi.org/10.3390/ma15062333).
- [49] Gorai, R (2016). A SURVEY OF DIGITAL IMAGE PROCESSING. *International Journal of Research in Engineering, Technology and Science*, 6, pp.16-24. ISSN: 2454-1915
- [50] Gonzales, R. C. & Richard E. W. (2008). *Digital Image Processing (3rd edition)*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall
- [51] Ravikumar, R. & Dr Arulmozhi, V. (2019). Digital Image Processing-A Quick Review. *International Journal of Intelligent Computing and Technology*, 2, pp.16-24. ISSN:2457-0249 (Online)
- [52] Lyra, M., Ploussi, A. and Georgantzoglou, A. (2011) ‘MATLAB as a Tool in Nuclear Medicine Image Processing’, in Ionescu, C. (ed.) *MATLAB - A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer*. InTech. doi:10.5772/19999.
- [53] Virgílio, A.A., Tech, A.R.B. and Pereira, L.E.T. (2020) *ImageVI's: the software that collects the vegetation indices you need: user manual*. Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. doi:[10.11606/9786587023007](https://doi.org/10.11606/9786587023007).
- [54] Alvarez-Sanchez, T., Alvarez-Cedillo, J.A. and Sandoval-Gutierrez, J. (2019) ‘Many-Core Parallel Algorithm to Correct the Gaussian Noise of an Image’, in Torres, M. et al. (eds) *Supercomputing*. Cham: Springer International Publishing (Communications in Computer and Information Science), pp. 70–86. doi:[10.1007/978-3-030-10448-1_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10448-1_7).