



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Πειραματική διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν
την τιμή της εκπεμπτικότητας κατά τη μέτρηση
θερμοκρασίας μέσω κάμερας υπέρυθρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Θ. Χωματά

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Πειραματική διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν
την τιμή της εκπεμπτικότητας κατά τη μέτρηση
θερμοκρασίας μέσω κάμερας υπερύθρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Θ. Χωματά

Επιβλέπων : Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....
Αικατερίνη Θ. Χωματά

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αικατερίνη Θ. Χωματά, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μετρήσεις του συντελεστή εκπομπής ή εκπεμπτικότητας παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον τόσο σε θεωρητικές μελέτες όσο και σε τεχνολογικές εφαρμογές. Η εκπεμπτικότητα είναι μια ιδιότητα που ορίζει πόση ακτινοβολία εκπέμπει μια πραγματική επιφάνεια σε σχέση με την επιφάνεια του μέλανος σώματος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της εκπεμπτικότητας των υλικών καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή της, κατά τη μέτρηση θερμοκρασίας μέσω κάμερας υπέρυθρων. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και τους νόμους που τη διέπουν, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της υπέρυθρης θερμογραφίας και οι εφαρμογές της. Στη συνέχεια, αναλύεται διεξοδικά η έννοια της εκπεμπτικότητας και των παραμέτρων που έχουν επίδραση στην τιμή της.

Τα επόμενα κεφάλαια αφορούν την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, τις μετρήσεις που διεξάχθηκαν στο εργαστήριο και την επεξεργασία τους. Ο εξοπλισμός αποτελείται από μια θερμοκάμερα, μια θερμαντική πηγή, ένα καταγραφικό μέσο που συνδέεται με αισθητήρα θερμοκρασίας και ένα θερμόμετρο. Οι παράγοντες που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία, το υλικό και το χρώμα αυτού, καθώς και η γωνία παρατήρησης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Εκπεμπτικότητα, υπέρυθρη θερμογραφία, θερμοκάμερα, μέτρηση θερμοκρασίας, μέλαν σώμα, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γωνία παρατήρησης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη, Λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη του κατά την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Παρασκευά Λεραντζή για τη συνεργασία και την ουσιαστική βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

ABSTRACT

Emissivity measurements are of great interest for both theoretical studies and technological applications. Emissivity is a property that defines how much radiation is emitted by a real surface in relation to the surface of the black body.

The scope of this thesis is the study of emissivity and the factors affecting its value, when measuring temperature through infrared camera. The first chapter is a brief reference to electromagnetic radiation and the laws that govern it, the basic principles of infrared thermography and its applications. Then, the concept of emissivity and the parameters that affect its value are analyzed in detail.

The next chapters concern the experimental setup used, the measurements conducted in the laboratory and their evaluation. The equipment consists of a thermal camera, a heating source, a recording device connected to a temperature sensor and a thermometer. The factors examined were the temperature, the material and its color, as well as the angle of view.

KEY WORDS

Emissivity, infrared thermography, thermal camera, temperature measurement, blackbody, electromagnetic radiation, angle of view.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1	Εισαγωγή.....	9
1.1	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία.....	9
1.2	Βασικοί νόμοι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	11
1.2.1	Νόμος του Planck.....	12
1.2.2	Νόμος των Stefan-Boltzmann.....	13
1.2.3	Νόμος μετατόπισης του Wien.....	13
1.2.4	Νόμος Lambert.....	14
1.3	Υπέρυθρη Ακτινοβολία.....	15
1.4	Υπέρυθρη Θερμογραφία.....	16
1.4.1	Εισαγωγή στην υπέρυθη θερμογραφία.....	16
1.4.2	Δυνατότητες και Περιορισμοί.....	18
1.4.3	Παθητική και ενεργητική θερμογραφία.....	19
1.4.4	Εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας.....	22
1.5	Εκπεμπτικότητα υλικών.....	26
1.5.1	Ορισμός.....	26
1.5.2	Φάσμα εκπεμπτικότητας υλικών.....	28
1.5.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της εκπεμπτικότητας.....	29
1.5.3.1	Υλικό.....	29
1.5.3.2	Δομή επιφάνειας.....	29
1.5.3.3	Θερμοκρασία.....	31
1.5.3.4	Γωνία παρατήρησης.....	34
1.5.3.5	Μήκος κύματος.....	38
1.5.3.6	Γεωμετρία υλικού.....	40
1.5.4	Η επίδραση της εκπεμπτικότητας στη θερμογραφία.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2	Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων.....	43
2.1	Πειραματική διάταξη μέτρησης της εκπεμπτικότητας.....	43
2.2	Διαδικασία των μετρήσεων.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3	Αποτελέσματα των μετρήσεων.....	47
---	---------------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4	Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Σχόλια - Συμπεράσματα.....	55
4.1	Επεξεργασία μετρήσεων.....	55
4.2	Σχολιασμός των μετρήσεων - Συμπεράσματα.....	70

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	73
------------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	79
------------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	81
------------------	----

Βιβλιογραφία.....	83
-------------------	----

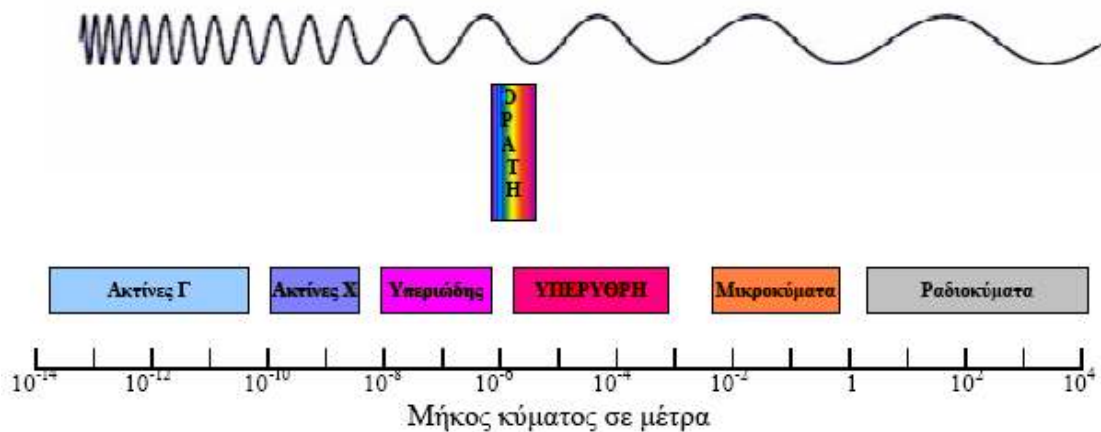
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. Εισαγωγή

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ονομάζεται η μετάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αλλά και η ενέργεια που ακτινοβολείται έτσι, λέγεται πολλές φορές ακτινοβολία. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος λ ή τη συχνότητα f , όπου η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τη σχέση $\lambda \cdot \nu = c$, όπου c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο. Για το κενό ισχύει $c_0 = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.








Στο σχήμα 1.1-1 που ακολουθεί φαίνεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα το οποίο παρουσιάζει την κατανομή των ακτινοβολιών και τα ονόματα που έχουν δοθεί σε κάθε ακτινοβολία στις διάφορες περιοχές του.



Σχήμα 1.1-1: Απεικόνιση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Τα χαρακτηριστικά κάθε ακτινοβολίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1.1-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ακτινοβολιών ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Είδος Ακτινοβολίας	Μήκος Κύματος (m)	Συχνότητα (Hz)	Ενέργεια (J)
Ραδιοκύματα 	$10^4 - 0,3$	$10^3 - 3 \cdot 10^{11}$	$10^{-30} - 10^{-25}$
Μικροκύματα 	$0,3 - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{11} - 10^{10}$	$10^{-25} - 10^{-23}$
Υπέρυθρη Ακτινοβολία 	$10^{-3} - 0,75 \cdot 10^{-6}$	$10^{10} - 10^{14}$	$10^{-23} - 10^{-19}$
Ορατό Φως 	$0,4 \cdot 10^{-6} - 0,75 \cdot 10^{-6}$	10^{14}	10^{-19}
Υπεριώδης Ακτινοβολία 	$0,4 \cdot 10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{-19} - 10^{-17}$
Ακτίνες X 	$10^{-8} - 10^{-10}$	$10^{16} - 10^{19}$	$10^{-17} - 10^{-14}$
Ακτίνες Γ 	$10^{-10} - 10^{-14}$	$10^{19} - 10^{24}$	$10^{-14} - 10^{-10}$

Η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος 10^{-7} έως 10^{-3} m ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία** διότι όταν προσπίπτει πάνω σε ένα σώμα το θερμαίνει. Και αντιστρόφως, θερμική ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ένα σώμα εκπέμπει σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας του. Διαφοροποιείται από άλλα είδη ακτινοβολίας, όπως οι ακτίνες X, τα ραδιοκύματα κλπ. που δεν εκπέμπονται ως αποτέλεσμα της θερμοκρασίας.

Ο ήλιος εκπέμπει θερμική ακτινοβολία (θερμοκρασίας περίπου 5487 °C) από την επιφάνειά του. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ακτινοβολίας βρίσκεται στην περιοχή μήκους κύματος 10^{-7} έως $3 \cdot 10^{-6}$ m και ονομάζεται **ηλιακή ακτινοβολία**. Το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που κυμαίνεται μεταξύ των μηκών κύματος $0,4 \cdot 10^{-6}$ m και $0,75 \cdot 10^{-6}$ m είναι ορατό με το μάτι και γι' αυτό ονομάζεται **ορατή ακτινοβολία**. Όλα τα

σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία και επομένως χάνουν ενέργεια. Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα τόσο περισσότερη θερμική ακτινοβολία εκπέμπει.

Απορρόφηση, ανάκλαση και διάδοση ακτινοβολίας

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σε ένα σώμα, (στερεό, υγρό ή αέριο), ένα μέρος της απορροφάται, ένα άλλο ανακλάται, και το υπόλοιπο διαπερνά το σώμα. Έτσι προκύπτει :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.1-1)$$

όπου

α : συντελεστής απορρόφησης,

ρ : συντελεστής ανάκλασης

τ : συντελεστής διάδοσης

Οι παραπάνω συντελεστές είναι γενικά συναρτήσεις τριών παραμέτρων: του μήκους κύματος λ , της γωνίας πρόσπτωσης ϕ και της θερμοκρασίας T . Γι' αυτό και πολλές φορές χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι μονοχρωματικοί συντελεστές, που αφορούν συγκεκριμένο μήκος κύματος κάθε φορά.

Τα σώματα διακρίνονται σε ημιδιαπερατά και αδιαφανή ως προς τη μετάδοση της ακτινοβολίας. Ημιδιαπερατά είναι τα σώματα, που η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία προέρχεται από όλη τη μάζα τους, δηλαδή το εσωτερικό τους και την επιφάνειά τους, όπως είναι το γυαλί σε υψηλές θερμοκρασίες, τα αέρια, οι ατμοί κλπ. Τα σώματα των οποίων η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία προέρχεται μόνο από την επιφάνειά τους, πάχους περίπου 1 μm , λέγονται αδιαφανή. Για τα υλικά αυτά ισχύουν:

$$\tau=0 \quad \text{και} \quad \alpha + \rho = 1 \quad (1.1-2)$$

1.2 Βασικοί νόμοι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Για την κατανόηση της θερμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η έννοια του μέλανος σώματος. Ως **μέλαν σώμα** ορίζεται το σώμα που σε συγκεκριμένη θερμοκρασία απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία ανεξαρτήτως μήκους κύματος. Για οποιοδήποτε μήκος κύματος, εκπέμπει περισσότερη ενέργεια από οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια ίδιας θερμοκρασίας. Στην πράξη δεν υπάρχει μέλαν σώμα, είναι ιδεατό και χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη σύγκριση της εκπεμπόμενης θερμικής ενέργειας από τα πραγματικά σώματα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς ενός υλικού, με αυτήν του μέλανος σώματος σε παρόμοιες περιπτώσεις.

1.2.1 Ο νόμος του Planck

Ο νόμος του Planck περιγράφει την ισχύ ακτινοβολίας (ενέργεια) που εκπέμπεται από ένα σώμα συγκεκριμένης θερμοκρασίας και μήκους κύματος ανά μονάδα επιφάνειας και δίνεται από τον τύπο :

$$W_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda k \cdot T}} - 1} \cdot 10^{-6} \quad (1.2-1)$$

όπου W_{λ} : η ακτινοβολία μέλανος σώματος για μήκος κύματος λ (W/m^2)

c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2.998 \cdot 10^8$ m/s)

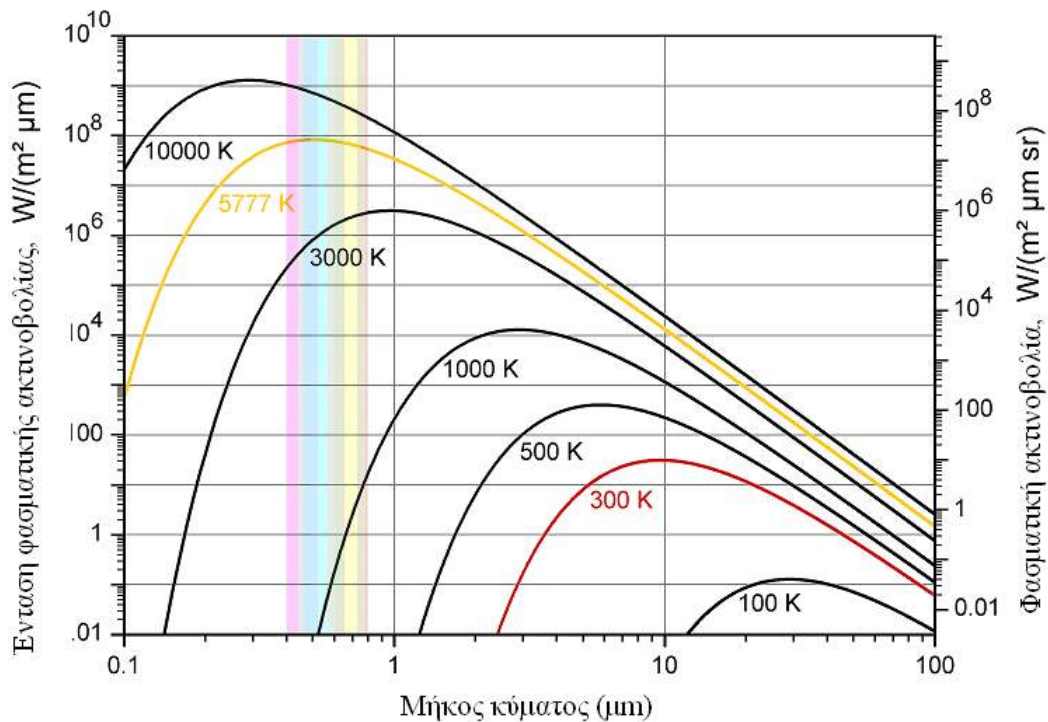
h : η σταθερά Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J*s)

k : η σταθερά Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/°K)

T : η απόλυτη θερμοκρασία μέλανος σώματος (°K)

λ : το μήκος κύματος (m)

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η κατανομή του Planck για διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.2-1: Κατανομή στο φάσμα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος – Νόμος του Planck

Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας W , ενώ στον οριζόντιο άξονα το μήκος κύματος λ . Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η καμπύλη ροής ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος έχει γενικά την ίδια μορφή για όλες τις θερμοκρασίες, με τη διαφορά ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνει το ύψος της καμπύλης και το μέγιστο μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος.

1.2.2 Ο Νόμος των Stefan-Boltzmann

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann δίνει την ολική ισχύ που ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα σε μια απόλυτη θερμοκρασία T , και προκύπτει από την ολοκλήρωση του νόμου του Planck σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (1.2-2)$$

όπου $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ (} W \cdot m^{-2} \cdot (^\circ K)^{-4} \text{)}$ η σταθερά Stefan-Boltzmann.

Στην περίπτωση ενός πραγματικού σώματος η ισχύς που ακτινοβολείται από την επιφάνειά του σε μια απόλυτη θερμοκρασία T είναι πάντα μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος, και δίνεται από τη σχέση :

$$Q = \varepsilon \cdot E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.2-3)$$

όπου το ε ονομάζεται συντελεστής εκπομπής ή εκπεμπτικότητα (emissivity), είναι αδιάστατο μέγεθος και κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας.

1.2.3 Ο νόμος μετατόπισης του Wien

Ο νόμος μετατόπισης του Wien συσχετίζει τη θερμοκρασία του σώματος (σε $^\circ K$) με το μέγιστο μήκος κύματος λ_{\max} , στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη ισχύς. Ο νόμος αυτός προκύπτει από παραγωγή της εξίσωσης του Planck ως προς λ με σταθερή θερμοκρασία και στη συνέχεια εξίσωση του αποτελέσματος με το μηδέν. Ο νόμος μετατόπισης του Wien είναι :

$$\lambda_{\max} \cdot T = b \quad (1.2-4)$$

όπου b είναι η σταθερά μετατόπισης Wien και ισούται με $2.897 \mu m / ^\circ K$.

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόλυτη θερμοκρασία.

Στον πίνακα 1.2-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μήκη κύματος μέγιστης εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας από επιφάνειες διαφόρων θερμοκρασιών.

Πίνακας 1.2-1: Νόμος του Wien και συνακόλουθα μήκη κύματος μέγιστης εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας από επιφάνειες διαφόρων θερμοκρασιών.

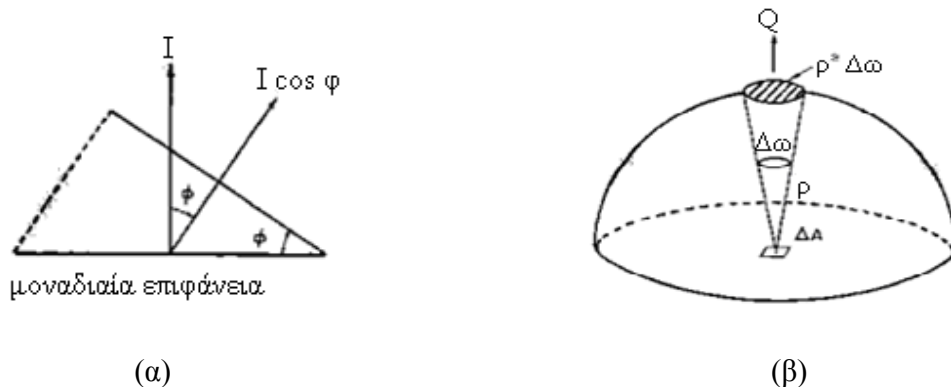
$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$		
Αντικείμενο	Θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)	Μέγιστο μήκος κύματος (μm)
Παγωμένο φαγητό	-18	11,4
Δέρμα	32	9,4
Νερό που βράζει	100	7,8
Σίδηρο που κοκκινίζει	600	3,3
Σίδηρο που λαμπιρίζει	1200	2

1.2.4 Ο Νόμος Lambert

Εκτός από τη συνολική ποσότητα ακτινοβολίας (σε kW / m^2), που εκπέμπεται από μια επιφάνεια σε όλο το χώρο υπεράνω αυτής, είναι απαραίτητο να γνωρίζει κανείς τη λεγόμενη ένταση ακτινοβολίας I (σε $kw / m^2 \text{sterad}$) που εκπέμπεται μέσα από δεδομένη στερεά γωνία. Αποδεικνύεται ότι η ένταση ακτινοβολίας κάθετα στην επιφάνεια, συνδέεται με την ικανότητα εκπομπής του μέλανος σώματος. Η εξίσωση αυτή προσδιορίζει την ένταση ακτινοβολίας από μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού, κάθετη στη διεύθυνση εκπομπής. Όταν η διεύθυνση εκπομπής είναι σε γωνία φ με την κάθετη στην επιφάνεια (βλέπε σχ. 1.2-2α), η προβολή της επιφάνειας στην κατεύθυνση εκπομπής έχει εμβαδόν $\cos\varphi$, συνεπώς η ένταση ακτινοβολίας θα είναι:

$$I = E_b \cos(\varphi) / \pi \quad (1.2-5)$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει το Νόμο συνημιτόνου του Lambert, και οι επιφάνειες που συμπεριφέρονται με τον τρόπο αυτό λέγονται επιφάνειες Lambert και παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2-2. Μια μαύρη επιφάνεια είναι επιφάνεια Lambert.



Σχήμα 1.2-2: Επιφάνεια Lambert

1.3 Υπέρυθρη Ακτινοβολία

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ανακαλύφθηκε το 1800 από τον αστρονόμο William Herschel (1738-1822), ο οποίος γνώριζε ότι το ηλιακό φως εκπέμπει θερμότητα και ότι αποτελείται από τα χρώματα του ορατού φάσματος. Ο Herschel ήθελε να μάθει το ποσό της θερμότητας, που εκπέμπει κάθε διαφορετικό χρώμα του ορατού φάσματος και γι' αυτό επινόησε και πραγματοποίησε ένα πείραμα, όπου μέτρησε την θερμοκρασία του κάθε χρώματος που προερχόταν από την ανάλυση του ηλιακού φωτός από ένα πρίσμα. Παρατήρησε ότι η θερμοκρασία αυξανόταν καθώς μετατόπιζε το θερμομέτρο από το ιώδες στο κόκκινο χρώμα. Επίσης, η θερμοκρασία είχε την υψηλότερη τιμή πέρα από το κόκκινο χρώμα, σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει ορατό φως. Με αυτό τον τρόπο ανακάλυψε την ύπαρξη ακτινοβολίας έξω από την περιοχή του ορατού φάσματος (πέρα από το ερυθρό χρώμα), η οποία ανιχνεύτηκε από το θερμικό αποτέλεσμα. Ο Herschel ονόμασε αυτή τη μη ορατή ακτινοβολία «θερμαντικές ακτίνες» ('calorific rays'). Πρόκειται για την ακτινοβολία η οποία ονομάζεται σήμερα **υπέρυθρη ακτινοβολία (infra-red radiation)**.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία, λοιπόν, βρίσκεται αμέσως μετά το ερυθρό χρώμα της ορατής ακτινοβολίας, στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, στην περιοχή μηκών κύματος από $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ έως 10^{-3} m . Χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές ανάλογα με την απόστασή της από την περιοχή του ερυθρού χρώματος της ορατής ακτινοβολίας ως εξής :

- **Κοντινή (SW)** με μικρό μήκος κύματος, από $0,75 \cdot 10^{-6}$ έως $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- **Μέση (MW)** με μεσαίο μήκος κύματος, από $2 \cdot 10^{-6}$ έως $7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- **Μακρινή (LW)** με μεγαλύτερο μήκος κύματος, από $7 \cdot 10^{-6}$ έως 10^{-3} m

Η πρωταρχική πηγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα ή θερμική ακτινοβολία. Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπει. Η υπέρυθρη ακτινοβολία (θερμική ακτινοβολία) όλων των μηκών

κύματος (κοντινή, μέση, μακρινή) δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι. Η μέση και η μακρινή υπέρυθρη ακτινοβολία γίνεται γενικά αντιληπτή στο ανθρώπινο δέρμα ως θερμότητα. Καθημερινά παραδείγματα μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα, που αισθάνεται κανείς από την ηλιακή ακτινοβολία, από μια φωτιά, από μια θερμάστρα ή ένα θερμοπομπό κ.λ.π. Μια εφαρμογή είναι οι ειδικές λάμπες εκπομπής υπέρυθρου φωτός, που χρησιμοποιούνται για να ζεσταίνουν τα φαγητά σε εστιατόρια και καταστήματα γρήγορου φαγητού (fast food). Αυτό το υπέρυθρο φως είναι μακρινή υπέρυθρη ακτινοβολία, που γίνεται αισθητή σαν ζέστη σε κοντινή απόσταση από τις λάμπες αυτές.

Μερικές εφαρμογές κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι διάφορες συσκευές, που έχουν σαν αρχή λειτουργίας τους, την εκπομπή κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν μπορεί να γίνει αισθητή από το δέρμα ούτε ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Τέτοιες συσκευές είναι τα τηλεκοντρόλ των τηλεοράσεων, οι Η/Υ, που μέσω ειδικών θυρών υπέρυθρων στέλνουν σήματα σε διάφορες περιφερειακές συσκευές, οι ανιχνευτές των συστημάτων συναγερμού κτιρίων κ.λ.π.

1.4 Υπέρυθρη Θερμογραφία

1.4.1 Εισαγωγή στην Υπέρυθρη Θερμογραφία

Υπέρυθρη θερμογραφία, είναι η μέθοδος που ανιχνεύει τη θερμότητα (υπέρυθρη ακτινοβολία) που εκπέμπει ένα σώμα (αντικείμενο) και απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος. Οι μετρήσεις γίνονται με ειδικές κάμερες, που λέγονται κάμερες υπέρυθρων (infra-red cameras), οι οποίες ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο (non-contact type technique). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εστίαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, από τον οπτικό φακό. Μέσω αυτού, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνάει στον ανιχνευτή υπέρυθρων, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα στους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, όπου γίνεται η μετατροπή των δεδομένων αυτών σε έγχρωμη εικόνα. Με αυτή τη διαδικασία, η ένταση της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό σε έγχρωμη θερμική εικόνα, που εμφανίζεται σε ειδική οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).

Η εικόνα αυτή λέγεται **θερμογράφημα (thermogram)**, στην οποία τα θερμότερα σημεία παρουσιάζονται με εντονότερα χρώματα. Από ένα θερμογράφημα μπορεί κανείς όχι μόνο να δει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός σώματος, αλλά και να προσδιορίσει ή να εκτιμήσει τη σοβαρότητα πιθανών προβλημάτων υπερθέρμανσης. Επίσης, από το θερμογράφημα, επεξεργαζόμενο με το κατάλληλο λογισμικό Η/Υ, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα, καθώς και γραφικές απεικονίσεις (τα οποία θα εξεταστούν στη συνέχεια).

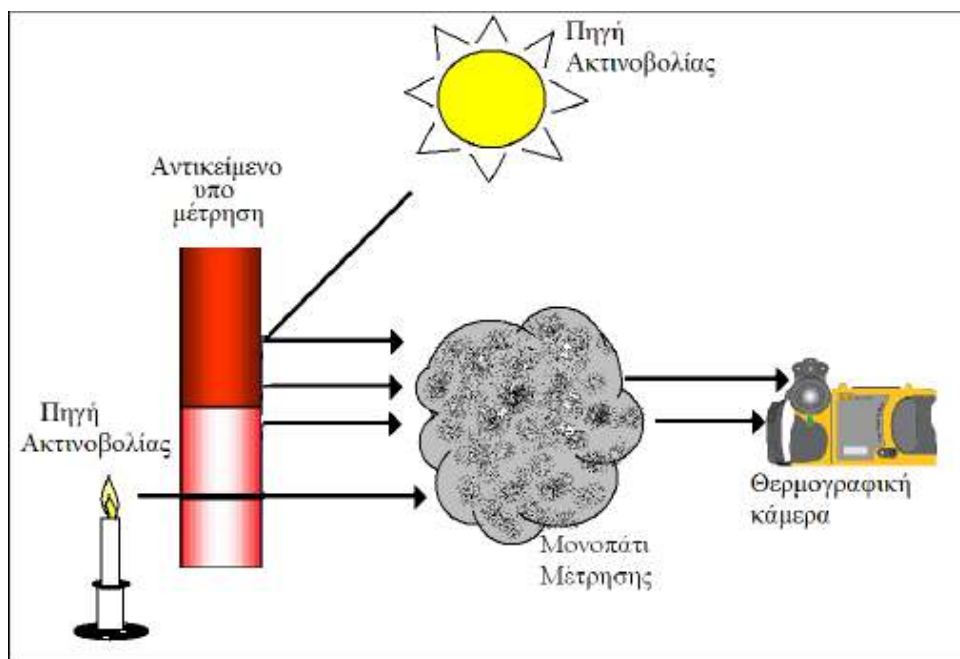
Για να είναι ένα θερμογράφημα αξιόπιστο, πρέπει κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων να λαμβάνονται υπόψη και οι συνθήκες του περιβάλλοντος (σκόνη, υγρασία, εκπομπή αερίων, ατμοί, ταχύτητα ανέμων για εξωτερικούς χώρους κ.λ.π.), με

κατάλληλες ρυθμίσεις ή και με την τοποθέτηση κατάλληλων φίλτρων στην κάμερα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν τις μετρήσεις, είναι οι ιδιότητες της επιφάνειας του μετρούμενου σώματος και ο συντελεστής εκπομπής.

Για τη μέτρηση θερμοκρασιών από μεγάλη απόσταση με τη χρήση κάμερας υπέρυθρων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ατμοσφαιρική απορρόφηση, η οποία όμως συμβαίνει σε συγκεκριμένες περιοχές μήκους κύματος. Τα τρία «παράθυρα» που μας αφήνει η ατμόσφαιρα να «δούμε» χωρίς σημαντική απορρόφηση (atmospheric windows) είναι τα εξής:

- I Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος
- II Ακτινοβολία σχετικά μικρού μήκους κύματος (3-5 μm)
- III Ακτινοβολία μεγάλου κύματος (8-14 μm)

Η αρχή λειτουργίας της υπέρυθρης θερμογραφίας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4-1:



Σχήμα 1.4-1: Αρχή λειτουργίας της υπέρυθρης θερμογραφίας

Σήμερα, η υπέρυθρη θερμογραφία αναδεικνύεται σε μια αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων, εναλλακτική των υφισταμένων παραδοσιακών μεθόδων, καθώς επίσης και σε βασικό εργαλείο εκτέλεσης προληπτικής συντήρησης στη βιομηχανία με μη καταστροφικό τρόπο. Σε έναν έλεγχο προληπτικής συντήρησης, όταν μια πιθανή “αστοχία” συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση ή μείωση

της επιφανειακής θερμοκρασίας ή από τοπική συγκέντρωση θερμότητας, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί μια εξαιρετική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου (Non Destructive Testing -NDT). Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών ενώ μπορεί να είναι αποτελεσματική στον εντοπισμό τόσο μηχανολογικών όσο και ηλεκτρολογικών αστοχιών, επιτρέποντας την ανίχνευση τους με ταχύτητα που κυμαίνεται από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου έως και μερικά λεπτά, ανάλογα με το προς έλεγχο αντικείμενο, όχι όμως σε μεγάλο βάθος.

1.4.2 Δυνατότητες και Περιορισμοί

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας:

Πλεονεκτήματα

- Ταχύς ρυθμός ελέγχου
- Δεν απαιτείται καμία επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο → έλεγχος από απόσταση
- Δεν εμπλέκονται επιβλαβείς για το ανθρώπινο σώμα ακτινοβολίες → ασφάλεια μεθόδου
- Έγκαιρος εντοπισμός προβλήματος → πρόγνωση
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών
- Ευκολία στη 'μετάφραση' των αποτελεσμάτων
- Λογισμικό για την επεξεργασία και ανάλυση εικόνας

Μειονεκτήματα

- Κόστος εξοπλισμού
- Επίδραση θερμικών απωλειών
- Δυσκολία στην εφαρμογή κατάλληλης θερμικής διέγερσης πάνω σε μεγάλες επιφάνειες
- Δυνατότητα ανίχνευσης μόνο των ελαττωμάτων εκείνων που επιφέρουν μια μετρήσιμη αλλαγή στις θερμικές ιδιότητες
- Έλεγχος μέχρι μόνο ένα μικρό βάθος από την επιφάνεια του αντικειμένου
- Προβλήματα ικανότητας εκπομπής

1.4.3 Παθητική και Ενεργητική Θερμογραφία

Η υπέρυθη θερμογραφία, μπορεί να εφαρμοστεί με δύο προσεγγίσεις: i) την παθητική προσέγγιση (passive thermography), και ii) την ενεργητική προσέγγιση (active thermography).

Κατά την **παθητική θερμογραφία**, το εξεταζόμενο αντικείμενο θερμογραφείται ως έχει, δηλαδή στη φυσική του θέση και λειτουργία, χωρίς την επιβολή εξωτερικής πηγής διέγερσης (θερμότητας). Με άλλα λόγια, η παθητική θερμογραφία εξετάζει υλικά και δομές, τα οποία βρίσκονται είτε κατά τη λειτουργία τους, είτε εν γένει, σε διαφορετική (συντά υψηλότερη) θερμοκρασία από την περιβάλλουσα. Μερικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας είναι στην προληπτική συντήρηση, στην ανάλυση ροής θερμότητας σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό και ποιότητας ψύξεως σε υποσυστήματα και εγκαταστάσεις.

Η μετρούμενη θερμοκρασία του σώματος που εξετάζεται μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση πέντε παραμέτρων:

$$T = f(\varepsilon, T_{am}, T_o, \omega, d) \quad (1.4-1)$$

όπου ε είναι η εκπεμπτικότητα της εξεταζόμενης επιφάνειας, T_{am} (°K) η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, T_o (°K) η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ω η σχετική υγρασία, και d (m) η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου.

Παρά τα πλεονεκτήματα της παθητικής θερμογραφίας, τα καλύτερα αποτελέσματα στη μη καταστροφική αξιολόγηση (Non Destructive Evaluation – NDE) επιτυγχάνονται μέσω της **ενεργητικής θερμογραφίας**. Η προσέγγιση αυτή έχει ευρεία εφαρμογή στο μη καταστροφικό έλεγχο για αξιολόγηση ελαττωμάτων στο εσωτερικό των αντικειμένων. Στην ενεργητική θερμογραφία είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας για να διαπιστωθούν ή όχι ασυνέχειες στη κατανομή της θερμοκρασίας και, συνεπώς, στη δομή του υπό εξέταση αντικειμένου. Η παρουσία ελαττώματος στο εσωτερικό κάποιου υλικού μπορεί να ανιχνευτεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία θερμικών κυμάτων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, όταν ένα ημιάπειρο δείγμα υπόκειται σε περιοδική θερμική διέγερση, η θερμοκρασία σε βάθος z (m) και σε χρόνο t (s), μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$T(z, t) = T_o e^{-z/\mu} \cos\left(\Omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (1.4-2)$$

όπου T_o (°K) είναι η θερμοκρασία για $z=0$ (δηλαδή στην επιφάνεια του δείγματος), $\Omega=2\pi f$ ($rad \cdot s^{-1}$) η γωνιακή ταχύτητα της περιοδικής θερμικής διέγερσης, και $\lambda=2\pi\mu$ (m) το μήκος του θερμικού κύματος. Το μ συμβολίζει το μήκος της θερμικής διάχυσης και ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\Omega}} \quad (\text{m}) \quad (1.4-3)$$

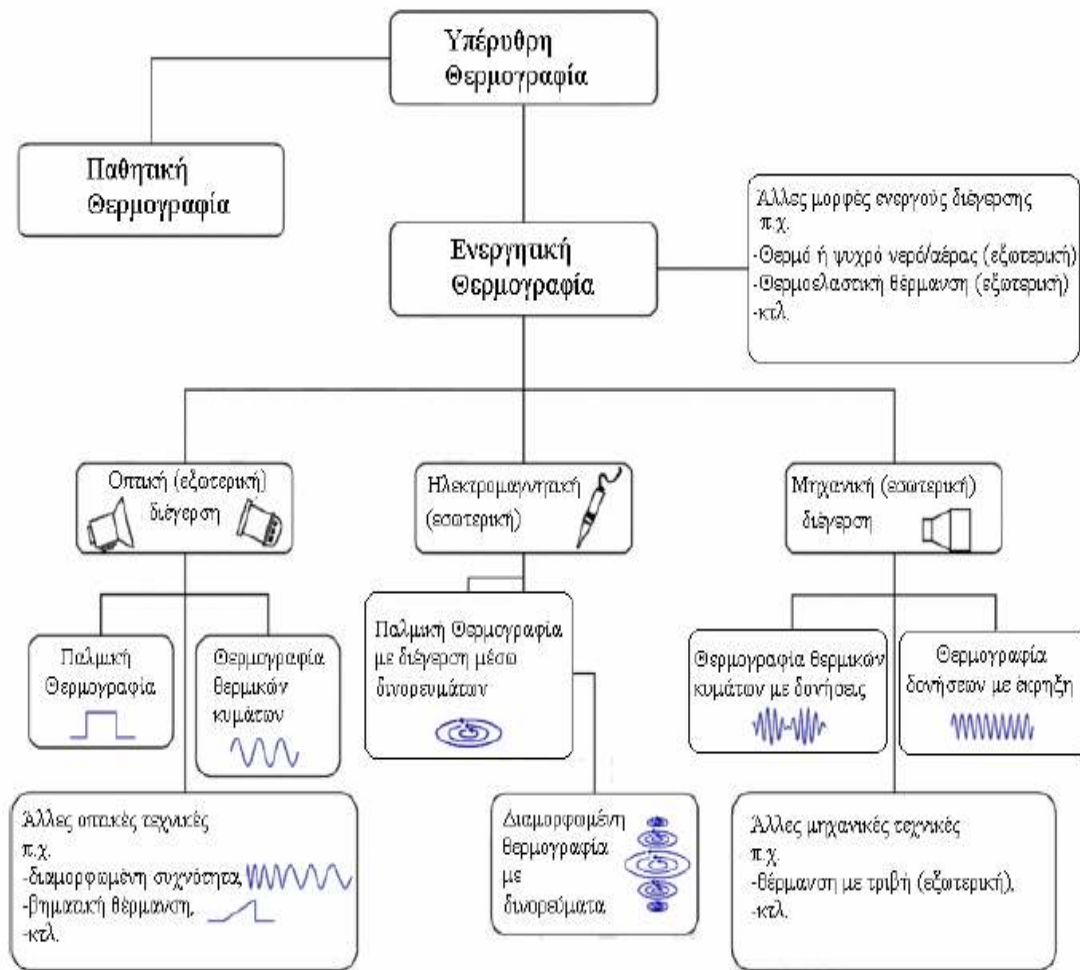
όπου $\alpha = k / (\rho C_p)$ ($m^2 s^{-1}$) είναι ο συντελεστής διάχυσης του υλικού, k (Wm^{-1}) η θερμική αγωγιμότητα, ρ (kgm^{-3}) η πυκνότητα, και C_p ($Jkg^{-1}C^{-1}$) η ειδική θερμότητα.

Ανάλογα με το είδος της εξωτερικής πηγής θερμότητας, η ενεργητική θερμογραφία διαιρείται στις εξής κατηγορίες:

- *Παλμική θερμογραφία (pulse thermography)*, κατά την οποία το ερέθισμα είναι ένας παλμός, συνήθως προερχόμενος από παλμική ακτινοβολία φωτός (π.χ. λάμπες φλας). Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση περιοχών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια στερεών σωμάτων. Η ροή θερμότητας μέσω του δείγματος επηρεάζεται από την ανομοιογένεια του υλικού που μπορεί να οφείλεται σε ρωγμές, τρύπες ή και στην ύπαρξη ξένου σώματος διαφορετικών θερμικών παραμέτρων κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Πλεονέκτημα αυτού του είδους θερμογραφίας είναι ότι οι πληροφορίες για διαφορετικά βάθη του υλικού αντλούνται από ένα αριθμό θερμογραφημάτων, τα οποία λαμβάνονται μέσα σε δευτερόλεπτα από την εφαρμογή του παλμού. Το μειονέκτημα είναι ότι οι προκαλούμενες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας πρέπει να ξεπερνούν το επίπεδο θορύβου της θερμοκάμερας. Συνεπώς, η παλμική θερμογραφία δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση αδύνατων θερμικών σημάτων.
- *Lock-in θερμογραφία (lock-in thermography)*, η οποία είναι γνωστή και ως θερμογραφία θερμικών κυμάτων, καθώς μπορεί να περιγραφεί από τη θεωρία ταλαντευόμενων θερμικών κυμάτων. Εδώ η διάχυση της θερμότητας συμβαίνει περιοδικά με μια συγκεκριμένη συχνότητα «lock-in», και η θερμοκρασιακή διαμόρφωση της επιφάνειας εκτιμάται και υπολογίζεται μετά από έναν αριθμό περιόδων «lock-in». Έτσι, η τεχνική αυτή έχει παρόμοια φυσική σημασία με την παλμική θερμογραφία. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος για το οποίο αντλούμε πληροφορίες. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους θερμογραφίας είναι ότι, χάρις στο ότι βασίζεται στον υπολογισμό μέσων τιμών, η ευαισθησία της μπορεί να είναι βελτιωμένη σε σύγκριση με την ονομαστική ευαισθησία της κάμερας που χρησιμοποιείται. Το μειονέκτημα της σε σχέση με την θερμογραφία παλμών, είναι ότι χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο μετρήσεων, καθώς συνυπολογίζει έναν αριθμό περιόδων «lock-in». Επιπλέον, για την απόκτηση πληροφορίας σε διαφορετικά βάθη, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ενός αριθμού θερμογραφήσεων με διαφορετική συχνότητα κάθε φορά. Έτσι, η θερμογραφία θερμικών κυμάτων χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο από τη θερμογραφία θερμικών παλμών.
- *Θερμογραφία με δονήσεις (vibrothermography)*, κατά την οποία χρησιμοποιούνται υπερηχητικά κύματα (διαμορφωμένου πλάτους ή παλμοί) για να διεγείρουν τα εσωτερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στερεών σωμάτων. Η τεχνική αυτή είναι για την ανίχνευση ρωγμών και ελαττωμάτων σε υλικά, κυρίως μεταλλικά. Οι ρωγμές γίνονται ορατές μέσω της θερμότητας λόγω τριβής που προκαλείται από υπερήχους υψηλής συχνότητας. Σε αυτό το είδος θερμογραφίας

η θερμότητα παράγεται από την έκλυση μηχανικής ενέργειας στην επιφάνεια της ρωγμής λόγω δονήσεων.

Μια προσέγγιση των παραπάνω μεθόδων δίνεται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.4-2: Μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας

1.4.4 Εφαρμογές Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Από την εμφάνισή της μέχρι σήμερα η υπέρυθη θερμογραφία απαντάται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως:

➤ Στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας είναι απαραίτητες, για την αξιοπιστία τους, την ασφάλεια και την αποφυγή αιφνιδίων βλαβών (brakedowns). Στις περιπτώσεις, όπου δεν είναι εφικτό το αισθητήριο του μετρητικού οργάνου να έλθει σε επαφή με το επιθυμητό σημείο, στο οποίο πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις, τότε υπάρχει η λύση της υπέρυθρης θερμογραφίας. Συνήθως η υπέρυθη θερμογραφία εφαρμόζεται για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε τμήματα του εξοπλισμού που :

- Βρίσκονται υπό τάση.
- Κινούνται, περιστρέφονται ή δονούνται (άξονες, έδρανα, κινητήρες κ.λ.π.).
- Η θερμοκρασία παρουσιάζει ανομοιόμορφη κατανομή και απότομες αλλαγές (καυστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, τύμπανα ξήρανσης κ.λ.π.).
- Υπάρχουν στερεά, υγρά και αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες (λέβητες, φλογοθάλαμοι, καπνοδόχοι, δίκτυο ατμού, δεξαμενές, αεραγωγοί κ.λ.π.).
- Βρίσκονται σε σημεία, που δεν είναι δυνατή η προσέγγιση (κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή σε μεγάλο ύψος, όπως υπόγεια δίκτυα, μεγάλες δεξαμενές, μονώσεις σωληνώσεων και δεξαμενών κ.λ.π.).

Η θερμογραφία υπέρυθρων εξελίσσεται στο πλέον αξιόπιστο διαγνωστικό εργαλείο, που χρησιμοποιείται στην προβλεπτική συντήρηση (predictive maintenance) του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα και αποτελεσματικά, εξοπλισμός εσωτερικού χώρου (όπως μετασχηματιστές, χειριστήρια μηχανών, πίνακες, διακόπτες, ασφαλειοδιακόπτες, ρελέ, ακροδέκτες, πηνία, κινητήρες κ.λ.π.), αλλά και εξωτερικού χώρου (όπως υποσταθμοί, μετασχηματιστές, εναέρια δίκτυα κ.λ.π.).

Κάθε τμήμα του εξοπλισμού, που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, πριν υποστεί βλάβη, παρουσιάζει συνήθως αυξημένη θερμοκρασία, που δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Μέσω της θερμογραφίας υπέρυθρων γίνεται ανίχνευση των σημείων του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί βλάβη, και μέσω κατάλληλου προγραμματισμού των εργασιών ελέγχου είναι δυνατό να γίνουν έγκαιρα διορθωτικές ενέργειες πριν το τελικό στάδιο της βλάβης και την ολοκληρωτική καταστροφή του εξοπλισμού.

Μια βλάβη σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό μπορεί να έχει τα παρακάτω ανεπιθύμητα αποτελέσματα :

- Αιφνίδια διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας.
- Κίνδυνος πιθανής πρόκλησης ατυχήματος σε εργαζόμενους.

- Κίνδυνος πιθανής πρόκλησης βραχυκυκλώματος.
- Αντικατάσταση τμήματος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σημαντικό πλεονέκτημα της θερμογραφίας υπερύθρων, είναι ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ενώ ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι υπό τάση (πλήρη λειτουργία), χωρίς το διαγνωστικό όργανο (κάμερα υπερύθρων) να έλθει σε επαφή με τον εξοπλισμό. Μπορεί κανείς λοιπόν, εύκολα και άμεσα, να ελέγξει τμηματικά όλο τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υπό τάση, από ασφαλή απόσταση και με ασφαλή τρόπο να κάνει την διάγνωση μέσω του θερμογραφήματος. Από τον έλεγχο αυτό θα προκύψει ότι πρέπει να επισκευαστούν μόνο αυτά τα σημεία του εξοπλισμού στα οποία υπάρχει πιθανότητα μελλοντικής βλάβης.

Η χρήση της θερμογραφίας υπερύθρων σαν διαγνωστικό εργαλείο της προβλεπτικής συντήρησης του ηλεκτρικού εξοπλισμού, αντικαθιστά τους παραδοσιακούς τρόπους συντήρησής του, με σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης, αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας του και το κυριότερο αποφυγή κινδύνου πρόκλησης ατυχήματος σε ανθρώπινο δυναμικό καθώς και σε εξοπλισμό. Για παράδειγμα, η συστηματική σύσφιξη όλων των ακροδεκτών μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, αφ' ενός απαιτεί μεγάλο αριθμό εργατοωρών, αφ' ετέρου μπορεί να καταλήξει σε καταστροφή των ακροδεκτών (λόγω της υπερβολικής ροπής σύσφιξης). Αποτέλεσμα αυτού είναι το πολύ μεγάλο κόστος συντήρησης για τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί αύξηση της αξιοπιστίας του.

Επειδή η αύξηση του βαθμού επικινδυνότητας σχετίζεται με τις ανιχνευθείσες ανόδους της θερμοκρασίας, με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρων είναι δυνατή η διαβάθμιση του κινδύνου βλάβης σε συγκεκριμένα σημεία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού καθώς και ο προγραμματισμός του χρονικού περιθωρίου επέμβασης για επίλυση των προβλημάτων, πριν από τη δημιουργία απωλειών του εξοπλισμού και διακοπή της λειτουργίας του.

Τα προβλήματα, που παρατηρούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό τα οποία μπορούν να εξελιχθούν σε βλάβη είναι τα παρακάτω :

α) **Χαλαρές συνδέσεις** (σε ακροδέκτες, ασφάλειες κ.λπ.), που οφείλονται σε μικρότερη ροπή σύσφιξης από αυτή που απαιτείται. Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται το εμβαδόν επιφανείας στο οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαρρεύσει και παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής. Αυτό προκύπτει και από τη σχέση :

$$R = \rho \cdot (l / S) \quad (\text{σε } \Omega) \quad (1.4-4)$$

όπου: R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω), ρ η ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$), l το μήκος του αγωγού (m) και S η διατομή του αγωγού (mm^2).

Όταν αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση, αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα από ένα σώμα και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία. Αυτό προκύπτει και από τη σχέση :

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{σε cal}) \quad (1.4-5)$$

όπου : Q η παραγόμενη θερμότητα (cal), R η ηλεκτρική αντίσταση (Ω), I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (A), T ο χρόνος (σε sec).

Αν μια χαλαρή σύνδεση παραμείνει, τότε θα παρατηρηθεί σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, με καταστροφή της σύνδεσης και του εξοπλισμού, που βρίσκεται κοντά στη σύνδεση.

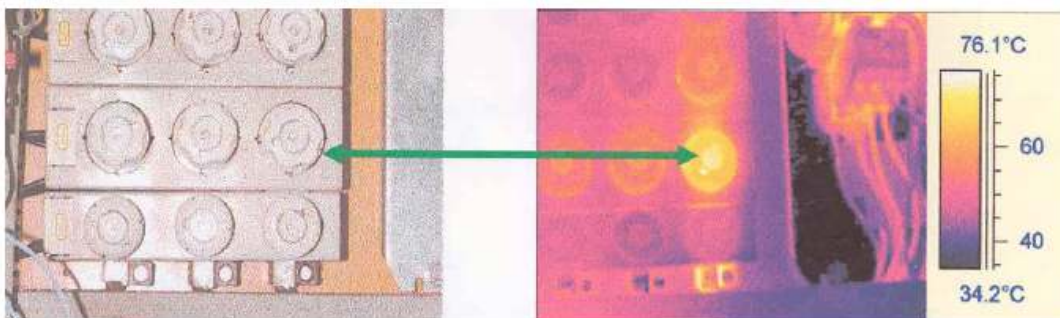
β) **Οξείδωση που δημιουργείται στο σημείο σύνδεσης.** Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης, ανάλογα με το μέγεθος της οξείδωσης. Αν η οξείδωση συνεχιστεί, θα παρατηρηθεί υπερβολική αύξηση και της θερμοκρασίας, με τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

γ) **Υπερφορτωμένο κύκλωμα,** που δημιουργείται όταν έχει τοποθετηθεί αγωγός μικρότερης διαμέτρου από αυτόν που έχει σχεδιαστεί, ή όταν κάποια συσκευή του κυκλώματος (π.χ. ηλεκτροκινητήρας) παρουσιάζει υπερφόρτωση. Στην περίπτωση ενός υπερφορτωμένου κυκλώματος, λόγω της αυξημένης ροής ηλεκτρικού ρεύματος προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας.

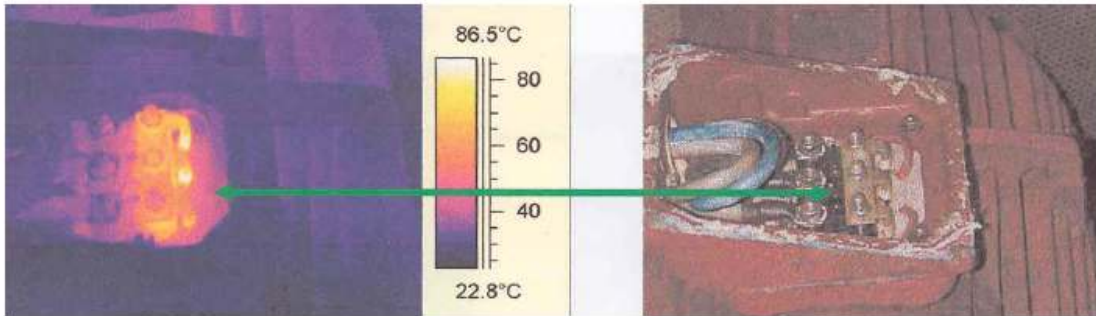
δ) **Κακή ποιότητα – γήρανση υλικών κατασκευής και μόνωσης των στοιχείων του εξοπλισμού** (διακοπών, ρελέ, θερμικών, πηνίων κ.λ.π.) που προκαλούν σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με τα γνωστά αποτελέσματα.

ε) **Μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς του μονωτικού υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές και τους κινητήρες.** Συνέπεια αυτού του φαινομένου, η υπερθέρμανση των στοιχείων αυτών. Με τη θερμογραφία υπερύθρων είναι δυνατή η εύκολη και έγκαιρη ανίχνευση του προβλήματος.

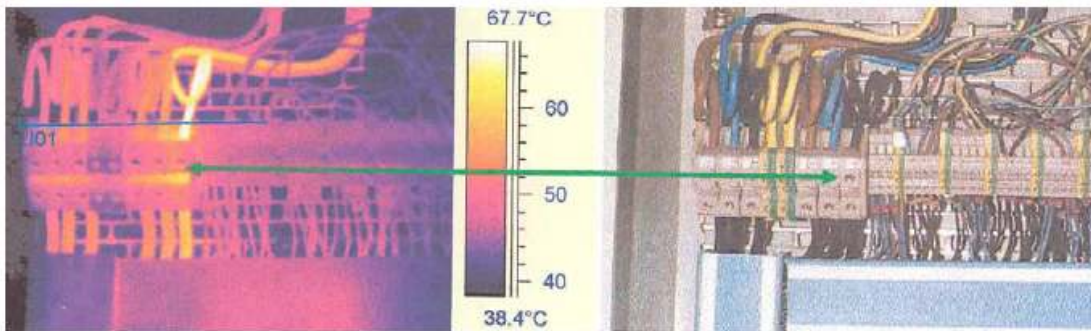
Στη συνέχεια, παρατίθενται σε φωτογραφία (όπως είναι ορατή με το ανθρώπινο μάτι) και σε θερμογράφημα, τμήματα ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που έχουν εμφανίσει κάποιο πρόβλημα.



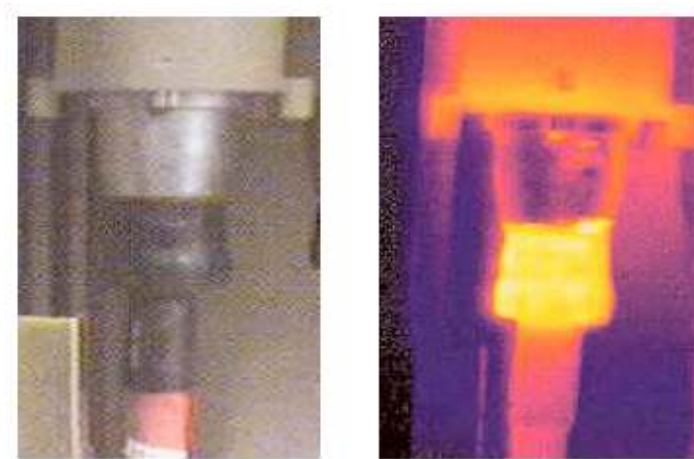
Εικόνα 1.4-1: Πρόβλημα στην ένωση (επαφή) ανάμεσα σε μια ασφάλεια και στη βάση της (ασφαλειοθήκη).



Εικόνα 1.4-2: Όχι σωστή διάταξη στα τυλίγματα ενός μοτέρ.



Εικόνα 1.4-3: Πρόβλημα σύσφιξης σε ακροδέκτη.



Εικόνα 1.4-4: Πρόβλημα στη σύνδεση αγωγού με το φως.

➤ Άλλες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας

- Στην επιθεώρηση κτιρίων για ανίχνευση : α) σημείων των δομικών στοιχείων, όπου υπάρχουν απώλειες θερμότητας και καταστροφή της μόνωσης, β) διαρροών σε σωληνώσεις, που βρίσκονται εντός δαπέδων και τοίχων, γ) σημείων υγρασίας και διαρροών στις στέγες.
- Στη διαστημική τεχνολογία, όπου δορυφόροι καταγράφουν και επεξεργάζονται την εκπεμπόμενη και την ανακλώμενη ακτινοβολία από πλανήτες, γαλαξίες, κομήτες και δίνουν ακριβείς εικόνες από την επιφάνειά τους.
- Στην αεροναυπηγική, για ανίχνευση βλαβών στα διάφορα συστήματα των αεροσκαφών, ανίχνευση υγρασίας και πάγου στα πτερύγια ελέγχου των αεροσκαφών σε εσωτερικά σημεία που δεν είναι ορατά.
- Στις δυνάμεις καταστολής (αστυνομία-στρατός), για ανίχνευση και εντοπισμό τρομοκρατών και εχθρικών στόχων, ιδίως την νύκτα.
- Στην ανεύρεση εγκλωβισμένων ανθρώπων, (σε δάση, σε πυρκαγιές κτιρίων κ.λ.π.).
- Σε περιβαλλοντολογικές εφαρμογές, όπως εντοπισμό και έλεγχο διαρροών λιπαντικών, χημικών ουσιών, πετρελαίου, εντοπισμό και έλεγχο πυρκαγιών από αέρα, παρακολούθηση μετεωρολογικών φαινομένων κ.λπ.
- Στην Ιατρική, για εκτίμηση τραυμάτων, για διάγνωση και εκτίμηση διαφόρων ασθενειών (αρθρίτιδα, καρκίνων μαστού κ.λ.π.), για τον έλεγχο διακύμανσης της θερμοκρασίας στα διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος κ.λ.π.

1.5 Εκπεμπτικότητα υλικών

1.5.1 Ορισμός

Η **εκπεμπτικότητα** ε ή συντελεστής εκπομπής (emissivity) μιας πραγματικής επιφάνειας, ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας (μέσω ακτινοβολίας) σε μια δεδομένη θερμοκρασία ως προς αυτήν που θα εξέπεμπε το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} / \frac{dR_{bb}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (1.5-1)$$

Οι συντελεστές εκπομπής μπορούν να ορίζονται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος λ (μονοχρωματικοί συντελεστές εκπομπής), ενώ για επιφάνειες που δεν υπακούουν στο νόμο του Lambert θα πρέπει να ορίζονται για συγκεκριμένες γωνίες εκπομπής φ .

Στην περίπτωση θερμικής ισορροπίας, ισχύει ο Νόμος του Kirchhoff: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Δηλαδή η εκπεμπτικότητα ενός σώματος σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ακτινοβολίας, είναι ίση με το συντελεστή απορρόφησης στο ίδιο μήκος κύματος.

Ονομάζουμε *φαιό σώμα* εκείνο για το οποίο ο συντελεστής εκπομπής είναι σταθερός για όλα τα μήκη κύματος: $\varepsilon_\lambda = \frac{E}{E_{b\lambda}} = \varepsilon$ (1.5-2)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι έκφρασης της εκπεμπτικότητας μιας επιφάνειας ανάλογα με τον τρόπο παρατήρησης του αντικειμένου και μέτρησης της εκπεμπτικότητας :

- Η φασματική εκπεμπτικότητα κατεύθυνσης (directional-spectral emissivity), που συμβολίζεται με $\varepsilon_{\beta,\lambda}$, είναι η εκπεμπτικότητα που μετράται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Είναι ο συντελεστής εκπομπής που ισχύει κατά την παρατήρηση ενός σώματος σε άλλη κατεύθυνση εκτός από την κάθετη προς την επιφάνεια.
- Η κανονική-φασματική εκπεμπτικότητα (normal-spectral emissivity) $\varepsilon_{n,\lambda}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής που μετράται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και όταν παρατηρείται κάθετα μια επιφάνεια. Είναι μακράν ο πιο συνηθισμένος τύπος εκπεμπτικότητας στη θερμομετρία.
- Η κανονική ολική εκπεμπτικότητα (normal-total emissivity) $\varepsilon_{n,tot}$ είναι το ολοκλήρωμα της εκπεμπτικότητας σε όλα τα μήκη κύματος κατά την παρατήρηση του σώματος στην κάθετη κατεύθυνση.
- Η ημισφαιρική ολική εκπεμπτικότητα (hemispherical-total emissivity) είναι το ολοκλήρωμα της εκπεμπτικότητας σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις γωνίες εκπομπής. Χρησιμοποιείται στην εξίσωση Stefan-Boltzmann για τον υπολογισμό του συνολικού ποσού της ακτινοβολίας που εξέρχεται από μια επιφάνεια.

Παρά το γεγονός ότι όλοι αυτοί οι τύποι για την εκπεμπτικότητα για μια συγκεκριμένη επιφάνεια θα έχουν πάντα τιμή μικρότερη από τη μονάδα, και για τις περισσότερες εφαρμογές, θα είναι αρκετά παρόμοιοι, δεν είναι ίσοι και όλοι είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Είναι σημαντικό να επιλέγεται ο σωστός τύπος ανάλογα με την εφαρμογή. Στην παρούσα εργασία με τον όρο εκπεμπτικότητα θα εννοείται η ολική κανονική εκπεμπτικότητα.

1.5.2 Φάσμα εκπεμπτικότητας υλικών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκπεμπτικότητα μια επιφάνειας είναι της μορφής $\varepsilon(\lambda, \varphi, T)$. Δηλαδή η εκπεμπτικότητα είναι μια συνάρτηση του μήκους κύματος, της κατεύθυνσης της παρατήρησης σε σχέση με την επιφάνεια και της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Γενικά, η εκπεμπτικότητα μεταβάλλεται αργά με το μήκος κύματος στην περίπτωση των στερεών αντικειμένων, αλλά μεταβάλλεται γρήγορα στην περίπτωση των αερίων και των υγρών.

Επιπλέον, η εκπεμπτικότητα μιας επιφάνειας στο ορατό φάσμα συχνά δεν έχει καμία σχέση με την εκπεμπτικότητα στο φάσμα των υπερύθρων. Για παράδειγμα, το χιόνι έχει πολύ χαμηλή εκπεμπτικότητα στο ορατό φάσμα, αλλά είναι άριστο μέλαν σώμα στις υπέρυθρες ακτίνες. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει μια αρκετά αργή επιστροφή στην υγρή κατάσταση, ακόμη και κάτω από την έκθεση στο φως του ήλιου. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας διασκορπίζεται και αντανακλάται, η υψηλότερη εκπεμπτικότητα στην περιοχή των υπερύθρων επιτρέπει την επανεκπομπή της απορροφημένης υπέρυθρης ενέργειας.

Γενικά, τα μέταλλα έχουν μια σχετικά χαμηλή εκπεμπτικότητα που αυξάνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία έως ότου διαμορφωθεί ένα οξειδίο στην επιφάνεια του θερμού μετάλλου. Άλλα υλικά έχουν υψηλές τιμές εκπεμπτικότητας που τείνουν να μειωθούν με τη θερμοκρασία. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από την επιφάνεια του υλικού.

Για ένα δεδομένο υλικό, η εκπεμπτικότητα ανάγεται συχνά υπό κανονικές συνθήκες και ενσωματώνεται σε όλα τα μήκη κύματος:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda \quad (1.5-3)$$

Αυτό αναφέρεται ως *ολική εκπεμπτικότητα* που είναι η αναλογία της ενέργειας που ακτινοβολείται από το υλικό σε μια θερμοκρασία T και της ενέργειας που ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία

1.5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της εκπεμπτικότητας

Η εκπεμπτικότητα των υλικών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως φαίνεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.5-1: Παράμετροι που επηρεάζουν την εκπεμπτικότητα ϵ .

Εγγενείς ιδιότητες αντικειμένου	Διακυμάνσεις οφειλόμενες σε άλλες παραμέτρους
Υλικό (μέταλλο, μονωτής, κλπ.)	Θερμοκρασία
Επιφάνεια (τραχιά / γυαλισμένη)	Κατεύθυνση παρατήρησης (οπτική γωνία)
Γεωμετρία (κοιλότητες, αυλακώσεις, κλπ.)	Μήκος κύματος (LW/MW/SW)

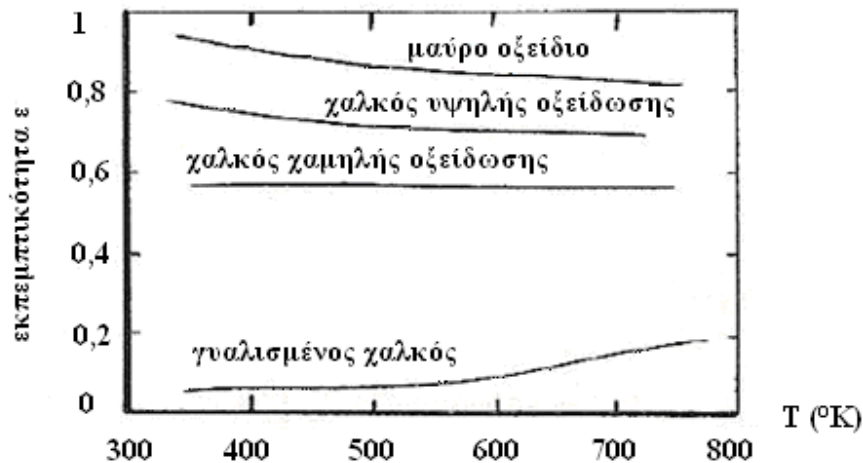
1.5.3.1 Υλικό

Η σημαντικότερη παράμετρος είναι το είδος του υλικού. Ανάλογα με τις τεχνικές μετρήσεων, λαμβάνονται οι μέσοι όροι σε ορισμένες γωνιακές και φασματικές περιοχές, όπως είναι χρήσιμο στη θερμογραφία. Σε μια απλουστευμένη ταξινόμηση, μπορεί κανείς να χωρίσει τα υλικά σε μέταλλα και μη μέταλλα, καθώς τα περισσότερα μη μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές της θερμογραφίας όπως το δέρμα, το χαρτί, η μπογιά, οι πέτρες, το γυαλί και άλλα, έχουν αρκετά υψηλές τιμές εκπεμπτικότητας μεγαλύτερες του 0,8. Αντιθέτως, τα μέταλλα, και ιδίως, τα γυαλισμένα μέταλλα, δημιουργούν προβλήματα εξαιτίας των συχνά χαμηλών συντελεστών εκπομπής τους με τιμές μικρότερες του 0,2.

1.5.3.2 Δομή επιφάνειας

Για κάθε υλικό, η εκπεμπτικότητα μπορεί να ποικίλλει σημαντικά λόγω της δομής της επιφάνειάς του. Αυτό οδηγεί στη δυσμενή κατάσταση κατά την οποία για το ίδιο υλικό μπορούν να βρεθούν διαφορετικές τιμές εκπεμπτικότητας. Αυτή η επίδραση είναι πιο έντονη στα μέταλλα. Ενώ τα γυαλισμένα μέταλλα μπορούν να φτάσουν σε πολύ χαμηλές τιμές εκπεμπτικότητας γύρω στο 0,02, για τραχιές επιφάνειες η εκπεμπτικότητα μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη φτάνοντας ακόμα και στο 0,8. Οι υψηλότερες τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε μεταλλικά εξαρτήματα, είναι σε αυτά που έχουν τροποποιηθεί μέσω οξειδωσης/διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου (σχήμα 1.5-1). Για παράδειγμα, για μια μεταλλική βίδα μιας ηλεκτρικής σύνδεσης που λειτουργεί εδώ και χρόνια, η εκπεμπτικότητα έχει βρεθεί 0,78 για έντονα οξειδωμένο Cu και 0,90 για κάποιες ενώσεις χάλυβα, λόγω αυτών των τροποποιήσεων της επιφάνειας. Αυτός ο παράγοντας είναι ο πιο σημαντικός για κάθε επιθεώρηση σε κοχλίες, περικόχλια, σφιγκτήρες και άλλα εξαρτήματα, καθώς ένα θερμογραφικό σύστημα πρέπει να έχει

κριτήρια για την επιτυχία ή όχι της μέτρησης. Επομένως, η ποσοτική ανάλυση είναι αναγκαία, δηλαδή, πρέπει κανείς να ξέρει την ακριβή διαφορά θερμοκρασίας των στοιχείων αυτών σε σχέση με το γνωστής εκπεμπτικότητας περιβάλλον τους. Και η μετρούμενη θερμοκρασία εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την πραγματική τιμή της εκπεμπτικότητας.

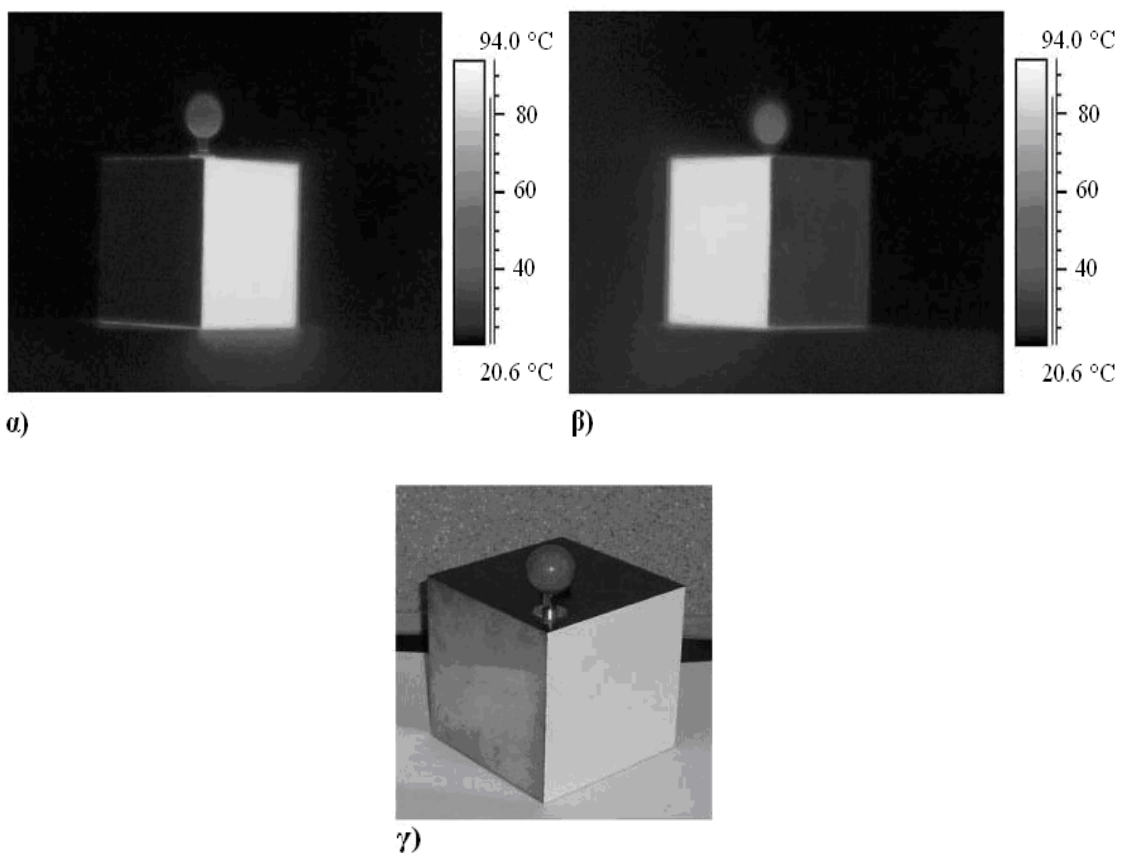


Σχήμα 1.5-1: Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας από την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού.

Για τη μελέτη της επίδρασης τόσο του υλικού όσο και της επιφάνειάς του στο συντελεστή εκπομπής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λεγόμενος 'κύβος Leslie'. Πρόκειται για ένα κοίλο, χάλκινο κύβο (περίπου 10cm μήκος πλευράς), στον οποίο μία πλευρά βάφεται με λευκό χρώμα, μία με μαύρο, μία δε βάφεται αλλά μοιάζει με γυαλισμένο χαλκό, και η τέταρτη αποτελείται από χαλκό τραχιάς επιφάνειας. Ο κύβος τοποθετείται σε φελιζόλ για θερμομόνωση και στη συνέχεια γεμίζεται με ζεστό νερό. Χάρη στην καλή θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου, γρήγορα όλες οι πλευρές του κύβου έχουν την ίδια θερμοκρασία. Η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από κάθε πλευρά μπορεί εύκολα να αναλυθεί με μια υπέρυθη κάμερα.

Η εικόνα 1.5-1 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα. Για $\epsilon=0,96$ και οι δυο βαμμένες πλευρές έδειχναν περίπου τη σωστή θερμοκρασία. Η τραχιά επιφάνεια χαλκού είχε πολύ λιγότερη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας, ενώ η λεία επιφάνεια ακόμα λιγότερη. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό της κάμερας, μπορεί κανείς να προσαρμόσει την τιμή της εκπεμπτικότητας έτσι ώστε και οι επιφάνειες του χαλκού να δείχνουν τη σωστή θερμοκρασία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η εκπεμπτικότητα για την τραχιά επιφάνεια βρίσκεται ίση με 0,11 και για τη λεία περίπου 0,03.

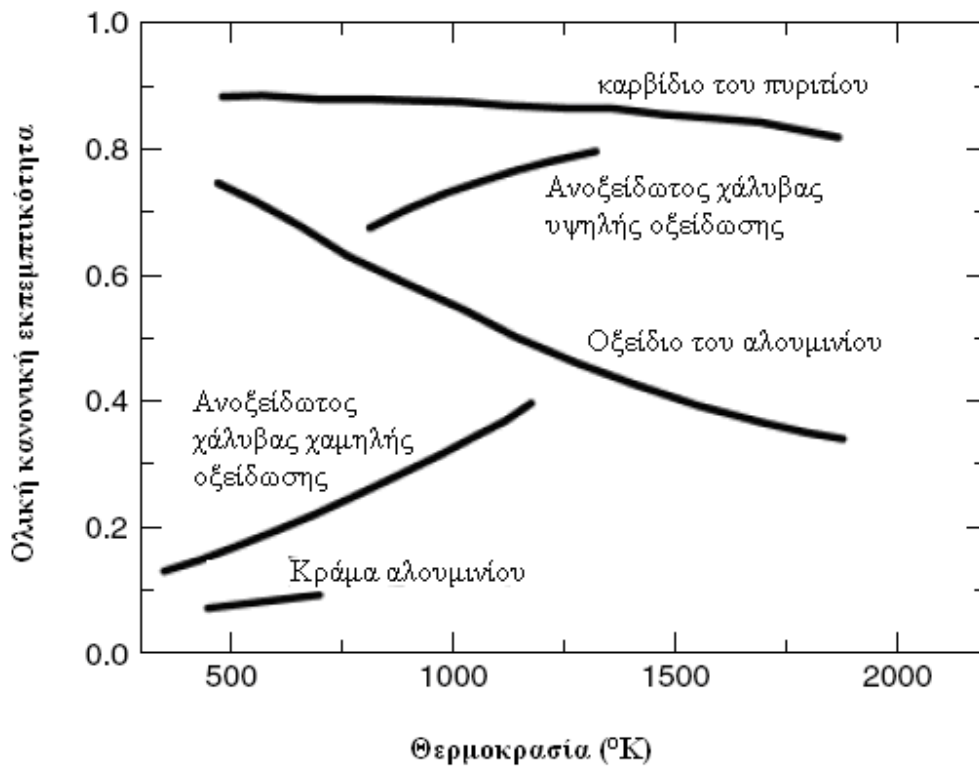
Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν ένα τρόπο υπολογισμού των σωστών τιμών για την εκπεμπτικότητα. Αρχικά γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του αντικειμένου με έναν αισθητήρα επαφής, και στη συνέχεια ρυθμίζεται η εκπεμπτικότητα στην κάμερα μέχρι η κάμερα να δείξει τη σωστή θερμοκρασία (υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι οι υπόλοιπες παράμετροι στην κάμερα είναι σωστά επιλεγμένες).



Εικόνα 1.5-1: Κύβος Leslie (α) χαλκός γυαλισμένης επιφάνειας ($T=22,6^{\circ}\text{C}$), άσπρο χρώμα ($T=84,3^{\circ}\text{C}$) (β) μαύρο χρώμα ($T=83,4^{\circ}\text{C}$), χαλκός τραχιάς επιφάνειας ($T=29,3^{\circ}\text{C}$) (γ) κύβος Leslie

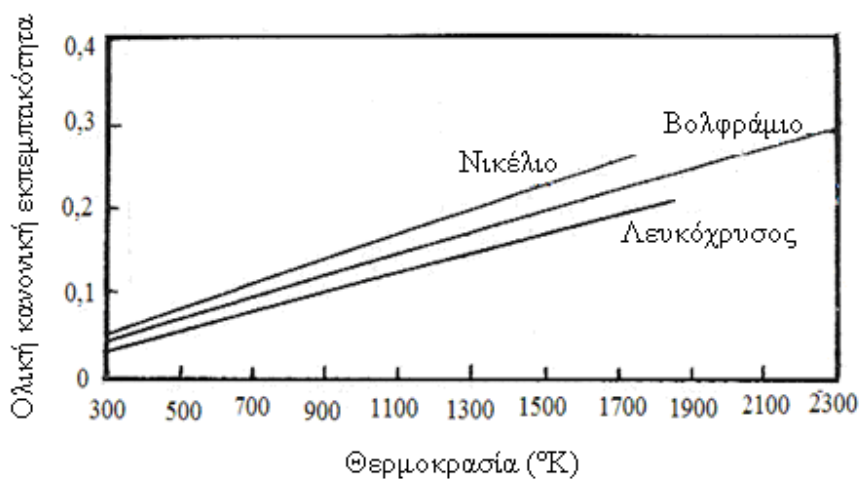
1.5.3.3 Θερμοκρασία

Οι ιδιότητες των υλικών συνήθως μεταβάλλονται με την αλλαγή της θερμοκρασίας και δεν αποτελεί έκπληξη ότι το ίδιο ισχύει και για την εκπεμπτικότητα. Στο σχήμα 1.5-2 φαίνονται μερικά τέτοια παραδείγματα. Κάποια υλικά παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, γι' αυτό μπορεί να είναι απαραίτητο για πρακτικούς λόγους να γνωρίζουμε εάν η θερμοκρασία παραμένει σε ένα ορισμένο διάστημα κατά τη διαδικασία της μέτρησης ώστε η εκπεμπτικότητα για τη μελέτη να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επιπλέον, αν χρησιμοποιηθούν τιμές εκπεμπτικότητας από τη βιβλιογραφία, πρέπει κανείς να γνωρίζει τις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.5-2: Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας από τη θερμοκρασία για διάφορα υλικά.

Η εκπεμπτικότητα των μετάλλων στην περιοχή των υπερύθρων γενικά τείνει να αυξηθεί με τη θερμοκρασία του μετάλλου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.5-3 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.5-3: Ολική κανονική εκπεμπτικότητα μετάλλων.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο συντελεστής ανάκλασης ενός μετάλλου δίνεται από το τύπο:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma\mu c^2}} \quad (1.5-4)$$

όπου $\omega = 2\pi c / \lambda$ είναι η γωνιακή συχνότητα του οπτικού κύματος, το γ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου, το μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και το c είναι η ταχύτητα του φωτός. Η εκπεμπτικότητα ενός μετάλλου δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - R = \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma\mu c^2}} \quad (1.5-5)$$

και αυξάνεται όσο η ηλεκτρική του αγωγιμότητα γ μειώνεται. Μια αύξηση στη θερμοκρασία αντιστοιχεί σε μια μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας λόγω της θερμικής κίνησης του μοριακού πλέγματος, η οποία παράγει μια αύξηση στην εκπεμπτικότητα. Η εκπεμπτικότητα που εξαρτάται από το φάσμα $\varepsilon_i(T)$ καθώς και η συνολική εκπεμπτικότητα $\varepsilon(T)$ δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(T) = & 0,365 \sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)]} \frac{1}{\lambda} - 0,0667 \rho[1 + \alpha(T - 293)] \frac{1}{\lambda} \\ & + 0,006 \sqrt{\left[\rho[1 + \alpha(T - 293)] \frac{1}{\lambda} \right]^3} \end{aligned} \quad (1.5-6)$$

$$\varepsilon(T) = 0,5737 \sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)]} T - 0,1769 \rho[1 + \alpha(T - 293)] T \quad (1.5-7)$$

Ωστόσο, αυτές οι σχέσεις υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Για παράδειγμα, για το βολφράμιο, είναι απαραίτητο να είναι $\lambda > 2 \mu\text{m}$, για το χρυσό και το ασήμι $\lambda > 1.5 \mu\text{m}$ και για το νικέλιο και το σίδηρο $\lambda < 5 \mu\text{m}$. Η κατάσταση της επιφάνειας και η οξειδωση του μετάλλου μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την εκπεμπτικότητα.

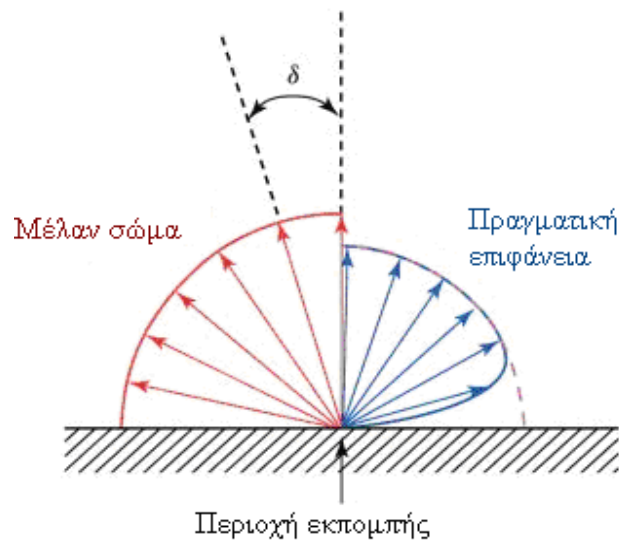
Πίνακας 1.5-2 Τιμές της ολικής εκπεμπτικότητας για διάφορα υλικά.

ΥΛΙΚΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ °C	ΟΛΙΚΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΕΚΠΕΜΠΤΙΚΟΤΗΤΑ
Γυαλισμένο αλουμίνιο	0	0,03
Γυαλισμένο αλουμίνιο	100	0,05
Γυαλισμένος χρυσός	100	0,02
Γυαλισμένος σίδηρος	40	0,21
Οξειδωμένος σίδηρος	100	0,64
Γυαλισμένος χάλυβας	100	0,07
Οξειδωμένος χάλυβας(800 °C)	100	0,79
Ασπρο χαρτί	20	0,93
Ξύλο	20	0,90
Γυαλισμένο γυαλί	20	0,94
Ανθρώπινο δέρμα	32	0,98
Νερό	1	0,92
Χιόνι	0	0,80

1.5.3.4 Γωνία παρατήρησης

Η εκπεμπτικότητα, όπως έχει ήδη ορισθεί, ισούται με το λόγο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς εκείνη που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Σε όρους ραδιομετρίας, ορίζει κανείς την εκπεμπτικότητα ως το λόγο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε δεδομένο μήκος κύματος λ και σε διεύθυνση που ορίζεται από δύο γωνίες δ και φ , προς την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος.

Το μέλαν σώμα συμπεριφέρεται σαν ισότροπα διάχυτος εκπομπός, δηλαδή, για κάθε επιφάνεια η ακτινοβολία που εκπέμπει είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης προς την οποία εκπέμπεται. Ωστόσο, οι πραγματικές επιφάνειες παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή η ακτινοβολία τους έχει διακυμάνσεις ανάλογα με την κατεύθυνση εκπομπής. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.5-4 που ακολουθεί. Εκτός από το γεγονός ότι κάθε πραγματική επιφάνεια εκπέμπει λιγότερη ακτινοβολία από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία, επιπλέον η ακτινοβολία αυτή συνήθως εξαρτάται από τη γωνία εκπομπής.

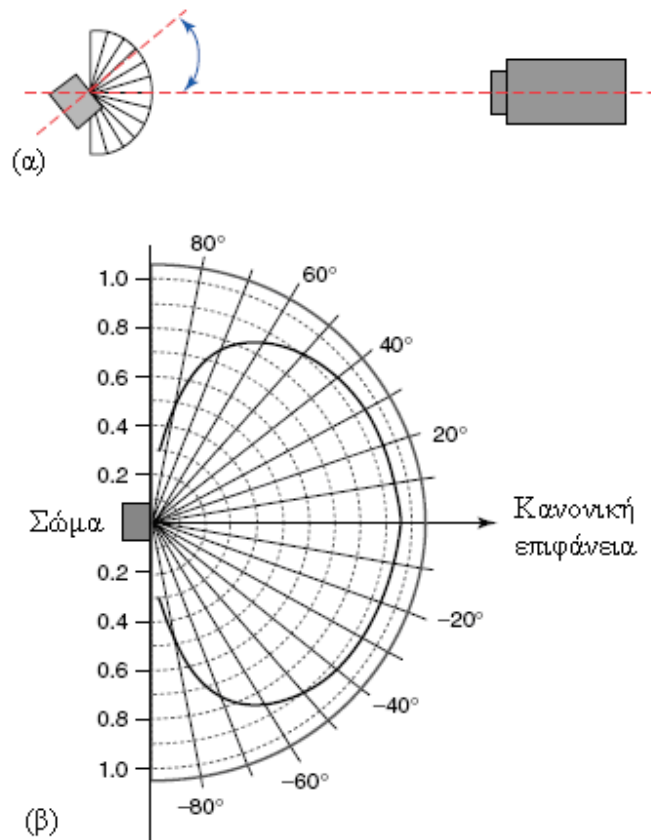


Σχήμα 1.5-4: Απεικόνιση της ανεξάρτητης-από-τη-γωνία-εκπομπής ακτινοβολίας για το μέλαν σώμα (αριστερά) και της εξαρτώμενης-από-τη-γωνία-εκπομπής ακτινοβολίας για κάθε πραγματική επιφάνεια (δεξιά).

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να επηρεάσει έντονα οποιαδήποτε μέτρηση θερμοκρασίας χωρίς επαφή με χρήση κάμερας υπερύθρων, καθώς ένα αντικείμενο που παρατηρείται από την κανονική κατεύθυνση προς την επιφάνειά του ($\delta=0^\circ$) θα εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από ό,τι όταν παρατηρείται υπό κλίση. Αυτό σημαίνει ότι η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης σε σχέση με την κανονική επιφάνεια.

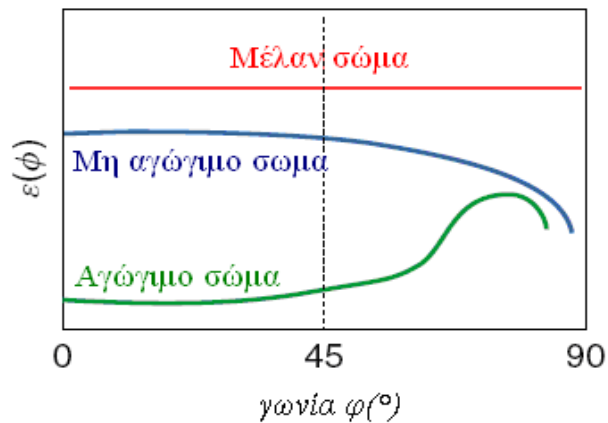
Μια τυπική διάταξη για τη μελέτη αυτής της εξάρτησης φαίνεται στο σχήμα 1.5-5(α). Μια γωνιακή κλίμακα από 0° έως 180° τοποθετείται σε ένα τραπέζι με τις 90° να δείχνουν στην κάμερα υπερύθρων. Το (ζεστό ή καυτό) αντικείμενο που είναι να μελετηθεί τοποθετείται στην κορυφή της κλίμακας, με την επιφάνειά του να βλέπει τις 90° , δηλαδή την κάμερα. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι μετρήσεις της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας, κατά την περιστροφή του αντικειμένου.

Στο Σχήμα 1.5.5(β), παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την πλευρά λευκού χρώματος του κύβου Leslie, η οποία ήταν γεμάτη με ζεστό νερό. Η πραγματική θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί με ένα θερμόμετρο επαφής, το οποίο δίνει τη σωστή τιμή της θερμοκρασίας στην κανονική κατεύθυνση. Οι τιμές που εξαρτώνται από τη γωνία βρίσκονται αλλάζοντας την τιμή της εκπεμπτικότητας στη θερμοκάμερα μέχρι να εμφανιστεί η πραγματική θερμοκρασία.

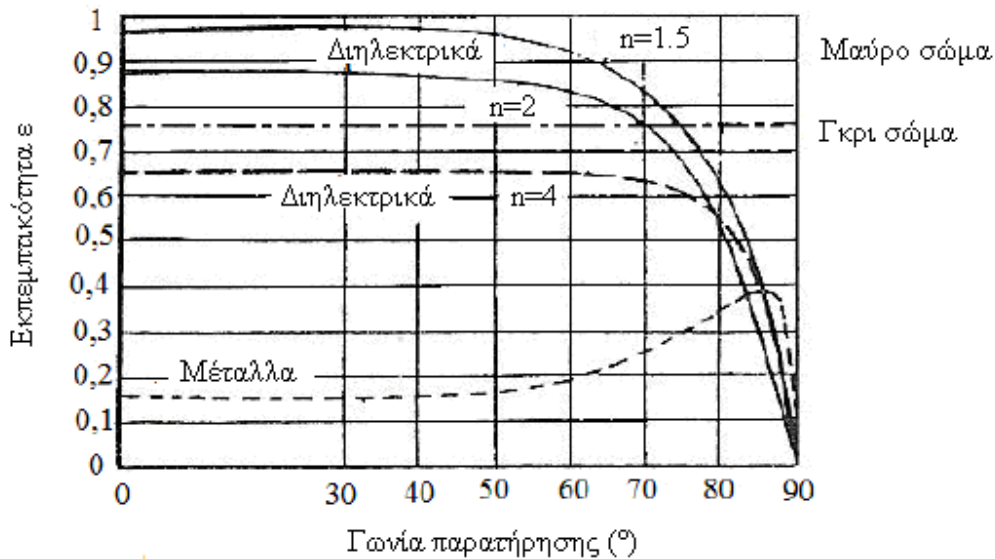


Σχήμα 1.5-5: Κύβος Leslie για τη μέτρηση της εκπεμπτικότητας συναρτήσει της οπτικής γωνίας. (α) περιστροφή του κύβου με σημείο αναφοράς την κάμερα, (β) η εκπεμπτικότητα συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης (0° - 85°).

Το σχήμα 1.5-5(β) δείχνει ένα αποτέλεσμα που ισχύει για όλες σχεδόν τις επιφάνειες που είναι σημαντικές σε πρακτικές εφαρμογές: η εκπεμπτικότητα είναι σχεδόν σταθερή από 0° μέχρι 40° ή 45° . Η συμπεριφορά για μεγαλύτερες των 45° γωνίες διαφέρει για μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα 1.5-6 και 1.5-7. Για μη αγώγιμα υλικά, παρατηρεί κανείς μια χαρακτηριστική πτώση της εκπεμπτικότητας για μεγαλύτερες γωνίες, ενώ για τις μεταλλικές επιφάνειες η εκπεμπτικότητα συνήθως δείχνει αρχικά μια αύξηση για μεγαλύτερες γωνίες, πριν αρχίσει να μειώνεται και πάλι.

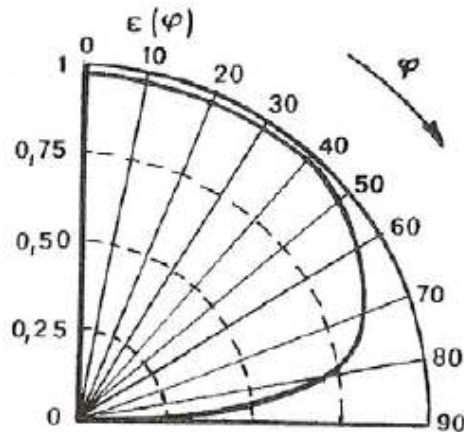


Σχήμα 1.5-6: Εξάρτηση του ϵ από την οπτική γωνία για αγώγιμα και μη αγώγιμα σώματα σε σχέση με το μέλαν σώμα.



Σχήμα 1.5-7: Μεταβολή της εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη γωνία παρατήρησης.

Το νερό είναι σχεδόν τέλειο μέλαν σώμα σε ένα μήκος κύματος $10\mu\text{m}$ σε κανονικές συνθήκες, και γίνεται ένας καθρέφτης ($\epsilon = 0$) σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η μεταβολή της εκπεμπτικότητας μιας επιφάνειας με τη γωνία παρατήρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5-8, συνεπάγεται ότι οι επιφάνειες που δεν είναι επίπεδες έχουν τοπικά διαφορετική εκπεμπτικότητα, ακόμη και στην περίπτωση ενός υλικού σταθερής εκπεμπτικότητας.



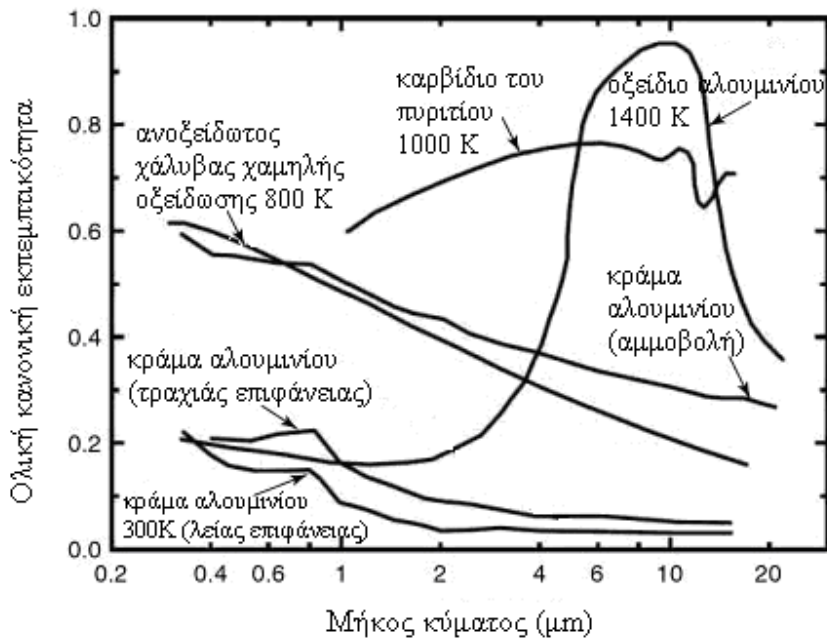
Σχήμα 1.5-8: Πολικό διάγραμμα της εκπεμπτικότητας για το νερό ($\lambda=10\mu\text{m}$)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή του συντελεστή εκπομπής συναρτήσει της γωνίας παρατήρησης είναι άγνωστη. Ο συντελεστής εκπομπής είναι γνωστός μόνο όταν η οπτική γωνία ισούται με μηδέν. Μια μεγάλη γωνία παρατήρησης μπορεί να κάνει τις μετρήσεις της θερμοκρασίας ανακριβείς ή και αδύνατες, δεδομένου ότι η θερμοκάμερα πρέπει να είναι στη βέλτιστη θέση σε σχέση με το παρατηρούμενο αντικείμενο.

1.5.3.5 Μήκος κύματος

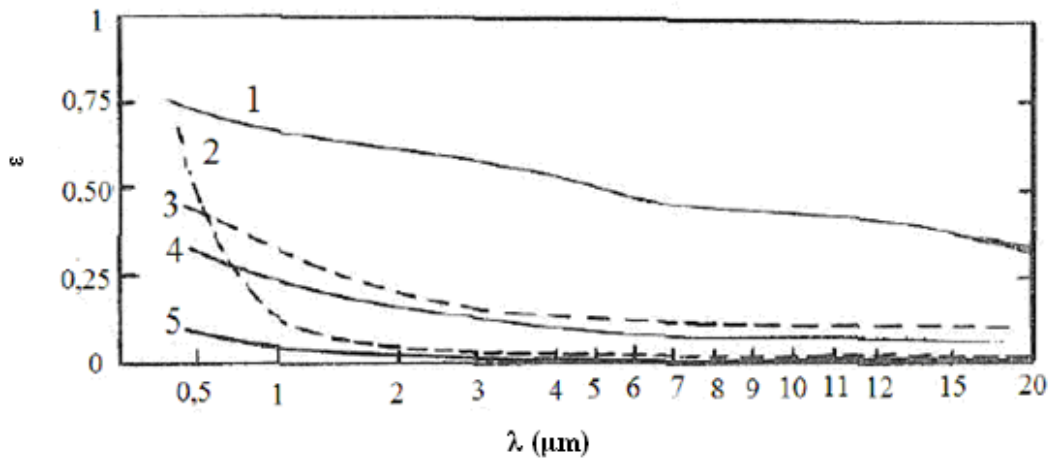
Όπως είναι γνωστό από την οπτική, οι ιδιότητες των υλικών συνήθως εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Έστω για παράδειγμα ο συντελεστής ανάκλασης των ευγενών μετάλλων: χρυσού, αργύρου και χαλκού. Ο χρυσός και ο χαλκός έχουν εσωτερικές μεταβάσεις (μετάβαση μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας- ηλεκτρόνια και οπές) στο ορατό φάσμα, σύμφωνα με τις οποίες συγκεκριμένο ποσό φωτεινής ενέργειας (χρώμα) απορροφάται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εξαρτώμενο από το μήκος κύματος συντελεστή ανάκλασης, αποδίδοντας το ιδιαίτερο χρώμα αυτών των μετάλλων. Ο συντελεστής ανάκλασης συνδέεται στενά με την εκπεμπτικότητα των μετάλλων, έτσι κάθε εξάρτηση από το μήκος κύματος στο συντελεστή ανάκλασης θα εμφανίζεται και στην εκπεμπτικότητα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5-9, η εκπεμπτικότητα των μετάλλων συνήθως μειώνεται με το μήκος κύματος (το αντίθετο συμβαίνει με το συντελεστή ανάκλασης), ενώ στην περίπτωση των οξειδίων μπορεί να παρουσιάσει και αύξηση. Η περίπτωση των κραμάτων αλουμινίου δείχνει ότι η αυξανόμενη τραχύτητα στην επιφάνεια, από λείες επιφάνειας μέχρι αυτές που έχουν υποστεί αμμοβολή, οδηγεί σε δραστηκή αύξηση της εκπεμπτικότητας.



Σχήμα 1.5-9: Εξάρτηση της εκπεμπτικότητας από το μήκος κύματος.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρείται η μείωση της τιμής της εκπεμπτικότητας κατά την αύξηση του μήκους κύματος, για το γραφίτη και κάποια μέταλλα.

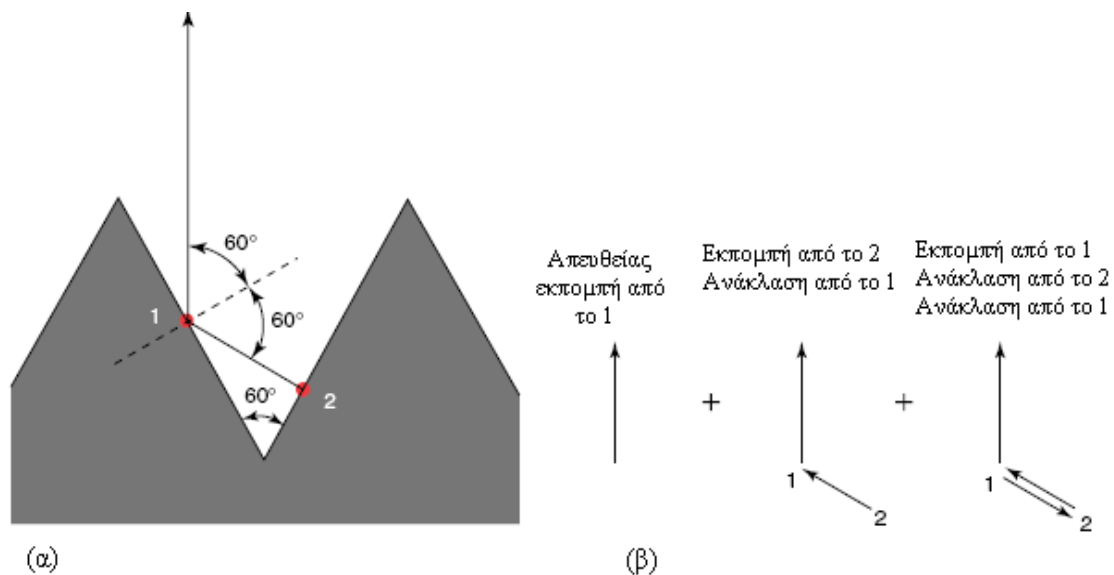


Σχήμα 1.5-10: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με το φάσμα της ακτινοβολίας των μετάλλων και του γραφίτη: 1-γραφίτης, 2-χαλκός, 3-σίδηρος, 4-αλουμίνιο, 5-ασήμι.

1.5.3.6 Γεωμετρία υλικού

Η γεωμετρία μιας επιφάνειας σχετίζεται με την επιφανειακή της δομή. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν όμως σαφώς καθορισμένες δομές, όπως αυλακώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν συστηματικά την εκπεμπτικότητα. Έστω για παράδειγμα μία λεία μεταλλική επιφάνεια (π.χ. με $\varepsilon_{normal} = 0,04$) με μια καλά καθορισμένη δομή επιφάνειας σε μορφή αυλακώσεων δεδομένης γωνίας κλίσης (σχήμα 1.5-11α, με γωνία κορυφής 60°). Οι αυλακώσεις ενισχύουν την εκπεμπτικότητα σε διεύθυνση κάθετη προς την μακροσκοπική επιφάνεια όπως μπορεί να γίνει κατανοητό από το σχήμα 1.5-11β. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 σε μια κατεύθυνση κανονική προς τη μακροσκοπική επιφάνεια της αυλάκωσης, αποτελείται από τη συμβολή τριών ακτινοβολιών:

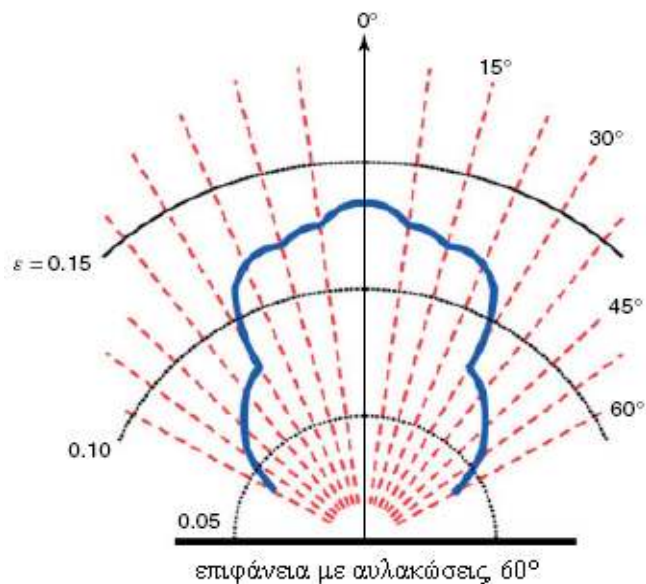
- 1) Την άμεση ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 η οποία χαρακτηρίζεται από την $\varepsilon(60^\circ)$ σε σχέση με την πραγματική επιφάνεια της αυλάκωσης.
- 2) Την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 2, η οποία στη συνέχεια αντανακλάται από το σημείο 1 στην κανονική κατεύθυνση. Η συμβολή των ακτινοβολιών αυτών χαρακτηρίζεται από $\varepsilon(0^\circ) \cdot R(60^\circ) = \varepsilon(0^\circ) \cdot [1 - \varepsilon(60^\circ)]$ όσον αφορά την επιφάνεια της αυλάκωσης.
- 3) Την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σημείο 1 προς την κατεύθυνση του σημείου 2, αντανακλάται πίσω από το σημείο 2 στο σημείο 1, και στη συνέχεια αντανακλάται προς την κανονική κατεύθυνση. Αυτή η συμβολή ακτινοβολιών χαρακτηρίζεται από $\varepsilon(0^\circ) \cdot R(0^\circ) \cdot R(60^\circ) = \varepsilon(60^\circ) \cdot [1 - \varepsilon(0^\circ)] \cdot [1 - \varepsilon(60^\circ)]$ όσον αφορά την επιφάνεια της αυλάκωσης.



Σχήμα 1.5-11: Μοντέλο αυλάκωσης σχήματος V, λείας μεταλλικής επιφάνειας με χαμηλό συντελεστή εκπομπής (α). Η μακροσκοπική επιφάνεια είναι οριζόντια. Η συμβολή από 3 ακτινοβολίες δημιουργεί τη συνολική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης (β).

Προσθέτοντας αυτές τις ακτινοβολίες και διαιρώντας με την ακτινοβολία μέλανος σώματος, μπορεί εύκολα να δει κανείς ότι η κανονική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης έχει αυξηθεί. Για μια αριθμητική εκτίμηση, μπορεί να υποθεθεί ότι η εκπεμπτικότητα λείας επιφάνειας είναι $\varepsilon(0^\circ) = 0.04$ και $\varepsilon(60^\circ) = 0.05$. Στην περίπτωση αυτή, η συνολική κανονική εκπεμπτικότητα της επιφάνειας της αυλάκωσης είναι $\varepsilon_{total, normal} = 0,04 + 0,04 \cdot (1 - 0,05) + 0,04 \cdot (1 - 0,04) \cdot (1 - 0,05) = 0.1145$, δηλαδή, η εκπεμπτικότητα έχει σχεδόν τριπλασιαστεί λόγω αυτής της δομής επιφάνειας. Η αύξηση αυτή εξηγεί το γεγονός ότι οποιαδήποτε ανώμαλη επιφάνεια έχει μεγαλύτερη εκπομπή από λείες επίπεδες επιφάνειες.

Οι συνήθεις δομές επιφανειών συχνά οδηγούν σε μη ομοιόμορφη κατανομή εκπεμπτικότητας συναρτήσει της γωνίας. Επαναλαμβάνοντας τον παραπάνω υπολογισμό για διάφορες γωνίες εκπομπής σε σχέση με τη μακροσκοπική επιφάνεια της αυλάκωσης (σχήμα 1.5-12) παρατηρεί κανείς έντονες διακυμάνσεις της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τις γωνίες παρατήρησης.



Σχήμα 1.5-12: Πολικό διάγραμμα για την αναμενόμενη εξάρτηση της ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας παρατήρησης για μοντέλο αυλάκωσης- V 60° λείας μεταλλικής επιφάνειας με $\varepsilon=0,04$ επίπεδης επιφάνειας.

1.5.4 Η επίδραση της εκπεμπτικότητας στη θερμογραφία

Η θερμογραφία χρησιμοποιεί κάμερες υπερύθρων για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκπομπή ενός αντικειμένου με εκπεμπτικότητα ε , σε θερμοκρασία T δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \frac{dR_{cn}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (1.5-8)$$

Ο παράγοντας $\varepsilon(\lambda)$ μπορεί να μεταβάλλεται στο διάστημα 0 έως 1, ανάλογα με το αντικείμενο, και έχει εξαιρετικά ισχυρή επίδραση στην ακτινοβολία από το αντικείμενο. Η θερμογραφία θεωρείται ακριβής μέθοδος για την ανίχνευση αυτής της ακτινοβολίας. Είναι σαφές ότι τα σχεδόν-μέλανα σώματα θα δώσουν ένα άριστο αποτέλεσμα επειδή η μετρούμενη ακτινοβολία προκύπτει πρακτικά στο σύνολο της από αυτο-εκπομπή. Ο νόμος του Planck επιτρέπει στην περίπτωση αυτή τον υπολογισμό της αντίστοιχης θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα είναι πολύ χειρότερα όταν η εκπεμπτικότητα του υλικού είναι χαμηλή.

Δύο παράγοντες επηρεάζουν τέτοιες μετρήσεις. Ο πρώτος παράγοντας είναι το γεγονός ότι σε ίσες θερμοκρασίες, η ενέργεια που ακτινοβολείται από ένα αντικείμενο χαμηλής εκπεμπτικότητας είναι λιγότερη από αυτή ενός μέλανος σώματος. Αυτό το φαινόμενο δεν επιδρά σημαντικά επειδή η γνώση της ικανότητας ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την καλή ευαισθησία ανίχνευσης, επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αντικειμένου.

Ο δεύτερος παράγοντας ο οποίος επιδρά σημαντικά στη μέτρηση, είναι η ανάκλαση του υλικού η οποία είναι υψηλή όταν η εκπεμπτικότητα είναι χαμηλή, προσθέτοντας έτσι την παρασιτική ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Είναι επομένως πολύ δύσκολο να διακρίνουμε μεταξύ ακτινοβολίας λόγω της αυτό-εκπομπής και ακτινοβολίας λόγω της αντανάκλασης. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να επιτευχθούν έγκυρα αποτελέσματα όταν η θερμοκρασία του υπό μέτρηση αντικειμένου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η παρασιτική ενέργεια είναι τότε χαμηλή, ακόμη και για ένα αντικείμενο με μέσο συντελεστή ανάκλασης. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι καμία μέτρηση δεν είναι δυνατή για υλικά υψηλής ανάκλασης των οποίων η αυτο-εκπομπή είναι ουσιαστικά μηδέν.

Συνοψίζοντας, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται όποτε είναι δυνατόν επάνω σε «μαύρες» επιφάνειες ή επιφάνειες που έχουν γίνει μαύρες τεχνητά από χρώμα ή επεξεργασία ώστε να έχουν υψηλή εκπεμπτικότητα. Ωστόσο, όταν αυτό δεν είναι δυνατό, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται υπό ευνοϊκές συνθήκες κάτω από τις οποίες τα αντικείμενα να μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι «γκρι», π.χ., πολυφασματικές μετρήσεις που μπορούν να συνδυαστούν με σχετικά σύνθετη επεξεργασία σήματος.

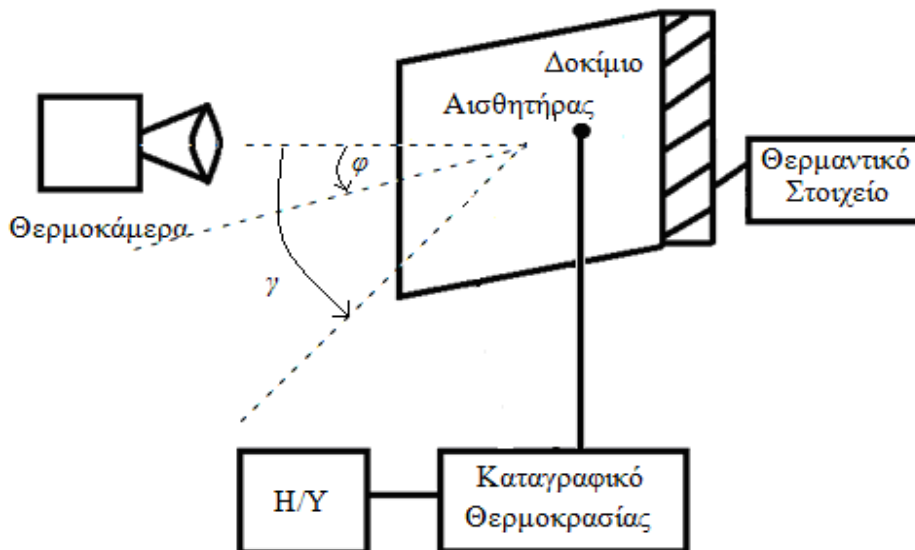
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

2. Η διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η πειραματική διάταξη η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ορισμένων παραγόντων οι οποίοι πιθανώς να επηρεάζουν την τιμή της εκπεμπτικότητας και στη συνέχεια δίδεται η διαδικασία η οποία θα ακολουθηθεί για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

2.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης της εκπεμπτικότητας.

Στο σχήμα 2.1-1 που ακολουθεί δίνεται η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο για τη μέτρηση της εκπεμπτικότητας υλικών και τη μελέτη των παραμέτρων που την επηρεάζουν.



Εικόνα 2.1-1: Πειραματική διάταξη

Η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Fluke, μοντέλο Ti45 η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση της τιμής της εκπεμπτικότητας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες για το χειρισμό και τις δυνατότητες της

θερμοκάμερας παρουσιάζονται στο παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας εργασίας. Ο αισθητήρας είναι τύπου PT-100 και βρίσκεται σε απευθείας επαφή με το υπό εξέταση δοκίμιο. Ο αισθητήρας, επίσης, συνδέεται με ψηφιακό καταγραφικό μηχάνημα Paperless Recorder VR-18, το εγχειρίδιο του οποίου παρουσιάζεται στο παράρτημα Β στο τέλος της παρούσας εργασίας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε θερμόμετρο της εταιρείας Fluke μοντέλο 971 Temperature Humidity Meter.

Ως δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν 8 διαφορετικοί τύποι χρωμάτων του εμπορίου τοποθετημένοι σε κατάλληλο υπόστρωμα. Στον πίνακα 2.1-1 που ακολουθεί δίνονται επιμέρους στοιχεία για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 2.1-1: Δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
No 1	Άσπρη απλή μπογιά
No 2	Άσπρη μονωτική μπογιά
No 3	Κίτρινη ανοιχτή μπογιά
No 4	Κίτρινη ανοιχτή μονωτική μπογιά
No 5	Κίτρινη απλή μπογιά
No 6	Κίτρινη μονωτική μπογιά
No 7	Ροζ απλή μπογιά
No 8	Ροζ μονωτική μπογιά

2.2 Διαδικασία των μετρήσεων

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί για τη διεξαγωγή των μετρήσεων συνίσταται από τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Ρύθμιση της απόστασης μεταξύ κάμερας υπερύθρων και δοκιμίου στα 90cm και τοποθέτηση του αισθητήρα PT-100 επάνω στο δοκίμιο.

Βήμα 2: Θέρμανση του δοκιμίου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη κατά 50°C τουλάχιστον από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Βήμα 3: Απομάκρυνση της θερμαντικής πηγής και καταγραφή της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά τη μείωσή της, από το καταγραφικό μηχάνημα μέσω του αισθητήρα και από την κάμερα υπερύθρων.

Βήμα 4: Ρύθμιση της τιμής της εκπεμπτικότητας στην κάμερα υπερύθρων κατά την παρατήρηση διαφοροποίησης στις τιμές θερμοκρασίας των δύο οργάνων, ώστε να επιτευχθεί ταύτιση των δύο θερμοκρασιών. Καταγραφή της τιμής της εκπεμπτικότητας στη θερμοκρασία αυτή.

Βήμα 5: Επανάληψη του βήματος 4 μέχρι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δοκιμίου και περιβάλλοντος να είναι μικρή οπότε οποιαδήποτε προσαρμογή στην εκπεμπτικότητα να μην επηρεάζει πλέον τη θερμοκρασία.

Βήμα 6: Επανάληψη των βημάτων 1 και 2. Τοποθέτηση του δοκιμίου στην επιθυμητή γωνία παρατήρησης (20°, 40°, 60° στον οριζόντιο άξονα και 20°, 40°, 60° στον κατακόρυφο άξονα), διατηρώντας το φακό της κάμερας να στοχεύει στο ίδιο σημείο με πριν.

Βήμα 7: Επανάληψη των βημάτων 3, 4 και 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Αποτελέσματα των μετρήσεων

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.1-1 και ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 2.2 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στους πίνακες 3-1 έως 3-8 που ακολουθούν:

Πίνακας 3-1: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 1 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	0,98	0,98	0,98	0,96	0,98	0,97	0,95
42	0,97	0,97	0,97	0,95	0,97	0,96	0,95
44	0,96	0,96	0,95	0,93	0,96	0,96	0,93
46	0,95	0,95	0,94	0,93	0,96	0,94	0,93
48	0,95	0,95	0,94	0,92	0,95	0,93	0,92
50	0,94	0,95	0,93	0,91	0,94	0,93	0,91
52	0,94	0,94	0,92	0,91	0,93	0,92	0,9
54	0,93	0,93	0,91	0,9	0,92	0,91	0,9
56	0,93	0,92	0,9	0,9	0,93	0,91	0,9
58	0,92	0,92	0,9	0,89	0,92	0,91	0,89
60	0,92	0,91	0,89	0,88	0,91	0,9	0,89
62	0,91	0,9	0,88	0,88	0,91	0,89	0,88
64	0,91	0,9	0,88	0,87	0,9	0,88	0,87
66	0,9	0,9	0,88	0,86	0,89	0,88	0,87
68	0,89	0,89	0,87	0,86	0,88	0,88	0,86
70	0,89	0,89	0,87	0,86	0,88	0,87	0,86
72	0,88	0,88	0,86	0,86	0,87	0,86	0,85
74	0,88	0,88	0,86	0,85	0,87	0,86	0,85
76	0,88	0,88	0,86	0,85	0,87	0,86	0,84
78	0,87	0,86	0,85	0,84	0,88	0,85	0,84
80	0,87	0,87	0,85	0,85	0,87	0,86	0,85

Πίνακας 3-2: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 2 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 24,9°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	1	1	0,98	0,97	1	0,98	0,96
42	0,99	0,99	0,97	0,96	0,99	0,98	0,96
44	0,98	0,98	0,96	0,95	0,98	0,96	0,95
46	0,97	0,97	0,95	0,93	0,97	0,95	0,93
48	0,96	0,95	0,94	0,92	0,96	0,95	0,92
50	0,95	0,95	0,93	0,92	0,95	0,94	0,92
52	0,95	0,94	0,93	0,91	0,95	0,93	0,91
54	0,94	0,93	0,92	0,91	0,93	0,93	0,91
56	0,93	0,93	0,92	0,91	0,93	0,92	0,9
58	0,93	0,93	0,91	0,9	0,93	0,92	0,9
60	0,92	0,92	0,91	0,9	0,92	0,91	0,9
62	0,92	0,92	0,91	0,9	0,92	0,91	0,89
64	0,92	0,92	0,9	0,89	0,92	0,9	0,89
66	0,91	0,91	0,9	0,89	0,92	0,9	0,88
68	0,91	0,91	0,9	0,88	0,91	0,89	0,88
70	0,91	0,9	0,89	0,88	0,91	0,89	0,87
72	0,9	0,9	0,89	0,87	0,9	0,88	0,87
74	0,9	0,89	0,88	0,87	0,9	0,88	0,86
76	0,89	0,89	0,88	0,86	0,89	0,87	0,85
78	0,89	0,88	0,87	0,85	0,88	0,88	0,86
80	0,89	0,89	0,88	0,86	0,89	0,88	0,87

Πίνακας 3-3: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 3 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 24,8°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	0,97	0,97	0,95	0,94	0,97	0,95	0,94
42	0,95	0,95	0,94	0,92	0,95	0,93	0,93
44	0,94	0,94	0,92	0,91	0,94	0,92	0,92
46	0,94	0,93	0,91	0,9	0,93	0,91	0,91
48	0,93	0,93	0,91	0,89	0,93	0,91	0,9
50	0,93	0,92	0,9	0,88	0,93	0,91	0,89
52	0,92	0,92	0,9	0,88	0,92	0,9	0,89
54	0,92	0,91	0,9	0,87	0,92	0,9	0,88
56	0,92	0,91	0,89	0,87	0,92	0,9	0,88
58	0,92	0,9	0,89	0,87	0,91	0,9	0,87
60	0,9	0,9	0,87	0,86	0,91	0,89	0,87
62	0,9	0,9	0,88	0,86	0,9	0,89	0,87
64	0,89	0,89	0,87	0,85	0,9	0,88	0,86
66	0,89	0,89	0,87	0,85	0,89	0,87	0,85
68	0,89	0,88	0,86	0,85	0,89	0,87	0,86
70	0,88	0,88	0,86	0,84	0,88	0,86	0,85
72	0,88	0,87	0,85	0,85	0,87	0,86	0,85
74	0,87	0,87	0,85	0,85	0,87	0,85	0,85
76	0,87	0,87	0,84	0,84	0,88	0,86	0,85
78	0,88	0,88	0,85	0,84	0,88	0,86	0,85
80	0,88	0,88	0,85	0,85	0,88	0,86	0,85

Πίνακας 3-4: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 4 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25,2°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	0,98	0,97	0,97	0,95	0,97	0,95	0,97
42	0,96	0,96	0,95	0,94	0,95	0,95	0,96
44	0,95	0,95	0,94	0,92	0,94	0,94	0,94
46	0,94	0,93	0,93	0,91	0,93	0,94	0,93
48	0,94	0,93	0,93	0,91	0,93	0,93	0,93
50	0,94	0,93	0,92	0,9	0,93	0,93	0,92
52	0,93	0,92	0,91	0,9	0,92	0,93	0,91
54	0,93	0,92	0,91	0,89	0,92	0,91	0,91
56	0,93	0,91	0,91	0,89	0,92	0,91	0,9
58	0,92	0,91	0,9	0,88	0,91	0,91	0,89
60	0,91	0,91	0,9	0,88	0,91	0,9	0,9
62	0,91	0,9	0,89	0,87	0,91	0,9	0,88
64	0,91	0,9	0,89	0,87	0,9	0,9	0,88
66	0,9	0,9	0,88	0,87	0,9	0,9	0,87
68	0,9	0,9	0,88	0,87	0,9	0,89	0,87
70	0,9	0,89	0,88	0,86	0,89	0,89	0,86
72	0,89	0,89	0,87	0,85	0,89	0,88	0,86
74	0,9	0,88	0,87	0,86	0,9	0,89	0,86
76	0,89	0,88	0,87	0,85	0,9	0,88	0,85
78	0,89	0,89	0,86	0,85	0,9	0,88	0,86
80	0,9	0,89	0,87	0,86	0,9	0,88	0,86

Πίνακας 3-5: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 5 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 24,7°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
38	0,98	0,98	0,96	0,96	0,98	0,97	0,96
40	0,97	0,97	0,95	0,95	0,97	0,95	0,95
42	0,96	0,97	0,94	0,94	0,97	0,95	0,93
44	0,96	0,96	0,94	0,93	0,96	0,94	0,92
46	0,95	0,95	0,93	0,92	0,95	0,94	0,92
48	0,94	0,94	0,93	0,91	0,94	0,93	0,91
50	0,94	0,94	0,92	0,91	0,94	0,93	0,91
52	0,94	0,93	0,92	0,9	0,93	0,93	0,9
54	0,93	0,93	0,92	0,9	0,94	0,92	0,9
56	0,93	0,92	0,91	0,9	0,93	0,92	0,89
58	0,92	0,92	0,91	0,89	0,92	0,91	0,88
60	0,92	0,92	0,91	0,89	0,92	0,91	0,89
62	0,92	0,92	0,9	0,88	0,92	0,91	0,88
64	0,92	0,91	0,9	0,88	0,91	0,9	0,88
66	0,91	0,91	0,9	0,87	0,91	0,9	0,87
68	0,91	0,91	0,89	0,87	0,9	0,89	0,87
70	0,9	0,9	0,89	0,87	0,9	0,89	0,87
72	0,9	0,9	0,88	0,86	0,9	0,88	0,86
74	0,9	0,89	0,88	0,86	0,89	0,87	0,86
76	0,89	0,89	0,88	0,85	0,89	0,87	0,86
78	0,88	0,89	0,87	0,85	0,88	0,86	0,85
80	0,88	0,88	0,87	0,85	0,88	0,86	0,85

Πίνακας 3-6: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 6 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
38	1	1	1	-	1	1	-
40	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97	0,95
42	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,94
44	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,94
46	0,96	0,95	0,95	0,94	0,96	0,95	0,93
48	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,92
50	0,95	0,94	0,94	0,93	0,95	0,94	0,92
52	0,94	0,94	0,93	0,92	0,95	0,93	0,92
54	0,94	0,94	0,93	0,92	0,94	0,93	0,91
56	0,93	0,93	0,92	0,91	0,94	0,92	0,91
58	0,93	0,93	0,93	0,91	0,93	0,92	0,91
60	0,93	0,93	0,92	0,91	0,93	0,91	0,9
62	0,93	0,93	0,92	0,9	0,93	0,92	0,9
64	0,92	0,93	0,92	0,9	0,92	0,91	0,9
66	0,92	0,92	0,91	0,9	0,92	0,91	0,89
68	0,92	0,92	0,91	0,89	0,92	0,9	0,89
70	0,92	0,92	0,91	0,89	0,91	0,9	0,89
72	0,91	0,91	0,9	0,89	0,91	0,9	0,88
74	0,91	0,91	0,9	0,88	0,9	0,89	0,87
76	0,91	0,9	0,9	0,88	0,9	0,89	0,88
78	0,9	0,9	0,89	0,87	0,91	0,88	0,87
80	0,9	0,9	0,89	0,87	0,9	0,88	0,87

Πίνακας 3-7: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 7 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25,2°C.

Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	1	1	0,99	0,98	1	0,99	0,98
42	0,98	0,98	0,98	0,97	0,99	0,98	0,96
44	0,98	0,98	0,97	0,96	0,98	0,97	0,95
46	0,98	0,97	0,96	0,96	0,97	0,97	0,95
48	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,93
50	0,96	0,96	0,95	0,94	0,95	0,95	0,91
52	0,96	0,95	0,94	0,93	0,94	0,94	0,9
54	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,91
56	0,95	0,95	0,94	0,92	0,93	0,93	0,9
58	0,94	0,94	0,93	0,92	0,93	0,93	0,89
60	0,94	0,94	0,93	0,92	0,93	0,92	0,9
62	0,94	0,94	0,92	0,91	0,93	0,92	0,89
64	0,93	0,93	0,92	0,91	0,92	0,92	0,89
66	0,93	0,93	0,92	0,9	0,92	0,91	0,89
68	0,93	0,93	0,91	0,9	0,91	0,9	0,88
70	0,92	0,92	0,91	0,9	0,92	0,9	0,88
72	0,92	0,92	0,91	0,89	0,92	0,9	0,88
74	0,92	0,92	0,9	0,89	0,92	0,91	0,88
76	0,92	0,91	0,9	0,89	0,92	0,91	0,87
78	0,91	0,91	0,89	0,88	0,91	0,9	0,87
80	0,91	0,91	0,89	0,88	0,91	0,89	0,87

Πίνακας 3-8: Μετρούμενες τιμές της εκπεμπτικότητας για το δοκίμιο Νο 8 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

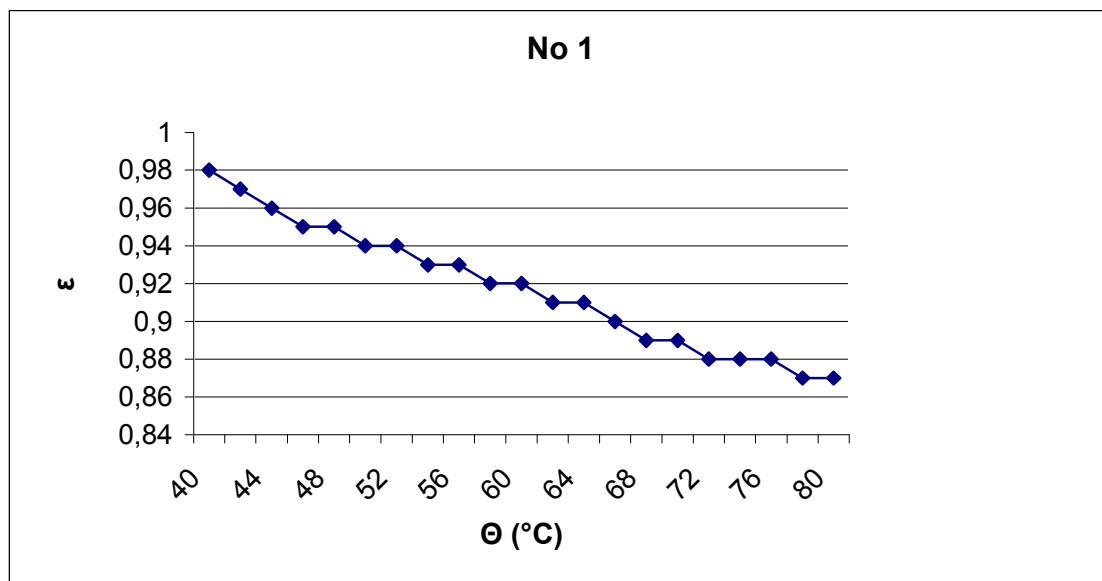
Θερμοκρασία (°C)	Τιμή Εκπεμπτικότητας						
	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=20^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=40^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=60^\circ$ $\varphi=0^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=20^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=40^\circ$	$\gamma=0^\circ$ $\varphi=60^\circ$
40	-	-	-	-	-	-	0,99
42	1	1	0,99	0,99	1	1	0,96
44	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,98	0,96
46	0,99	0,98	0,97	0,95	0,98	0,97	0,94
48	0,98	0,98	0,97	0,96	0,98	0,95	0,94
50	0,97	0,98	0,96	0,95	0,97	0,95	0,93
52	0,97	0,97	0,96	0,95	0,97	0,93	0,93
54	0,97	0,97	0,96	0,94	0,96	0,93	0,92
56	0,96	0,96	0,96	0,94	0,96	0,93	0,91
58	0,96	0,96	0,96	0,93	0,96	0,92	0,91
60	0,96	0,95	0,95	0,94	0,95	0,91	0,9
62	0,96	0,95	0,96	0,93	0,95	0,91	0,89
64	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,9	0,89
66	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,89	0,88
68	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,89	0,89
70	0,94	0,94	0,94	0,92	0,93	0,89	0,89
72	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,88	0,88
74	0,93	0,93	0,93	0,91	0,92	0,88	0,88
76	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,87	0,88
78	0,92	0,92	0,92	0,9	0,92	0,88	0,87
80	0,92	0,92	0,92	0,9	0,92	0,88	0,87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

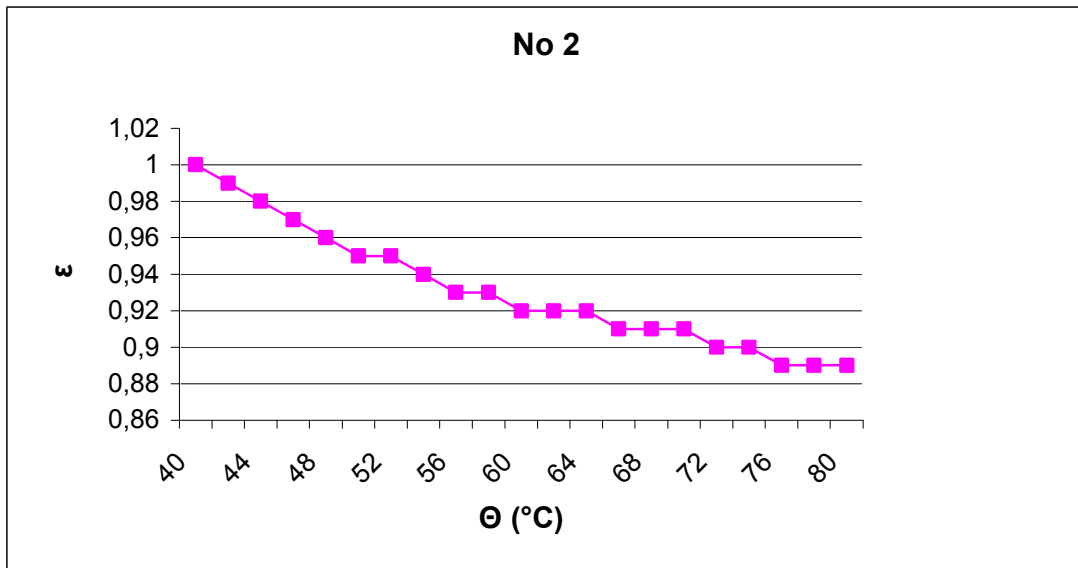
4. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων – Σχόλια – Συμπεράσματα

4.1 Επεξεργασία μετρήσεων

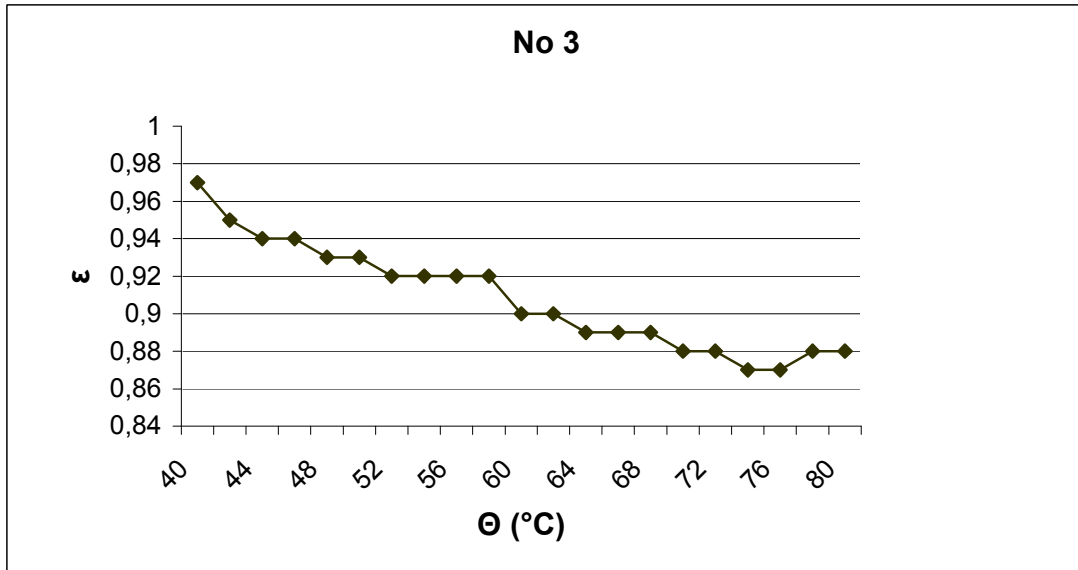
Για τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας του υλικού στην τιμή της εκπεμπτικότητας αυτού και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 3-1 έως 3-8, χαράσσονται οι καμπύλες εκπεμπτικότητας-θερμοκρασίας για γωνίες παρατήρησης $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$. Στα σχήματα 4.1-1 έως 4.1-8 δίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες για τα δοκίμια Νο1 έως Νο8.



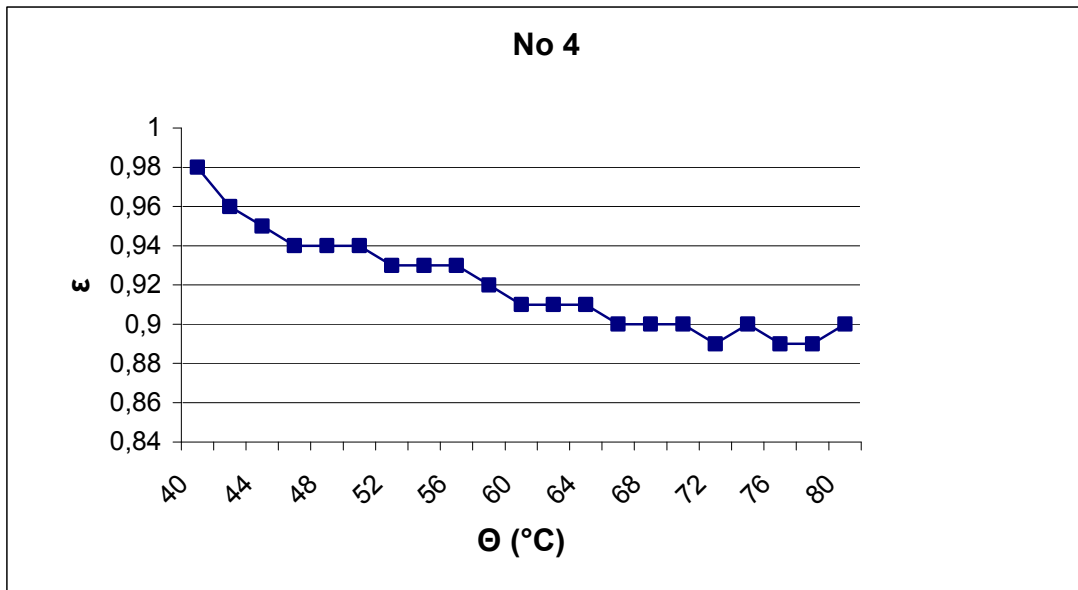
Γράφημα 4.1-1: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο1 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



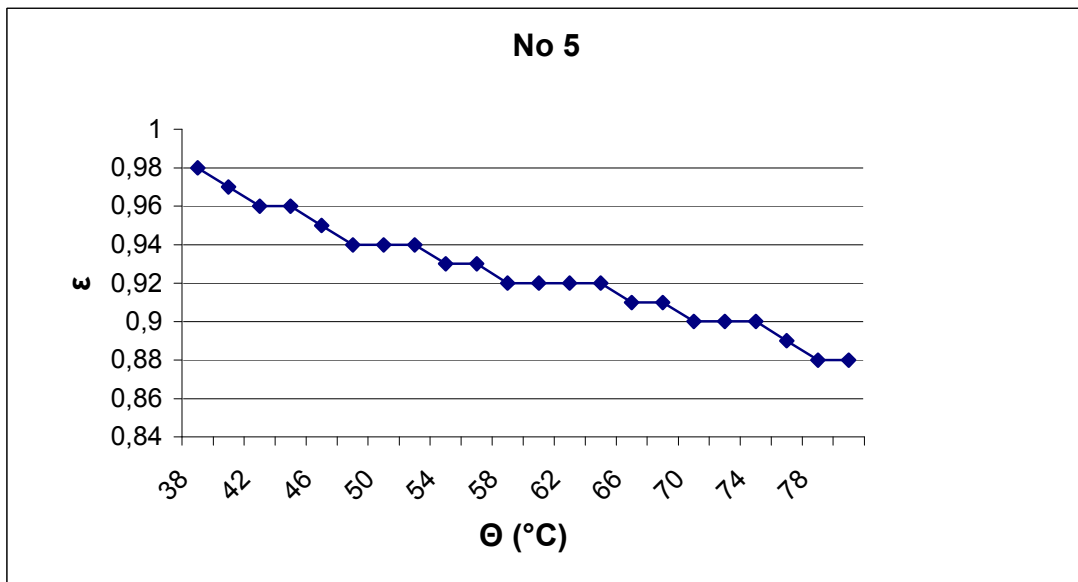
Γράφημα 4.1-2: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο2 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



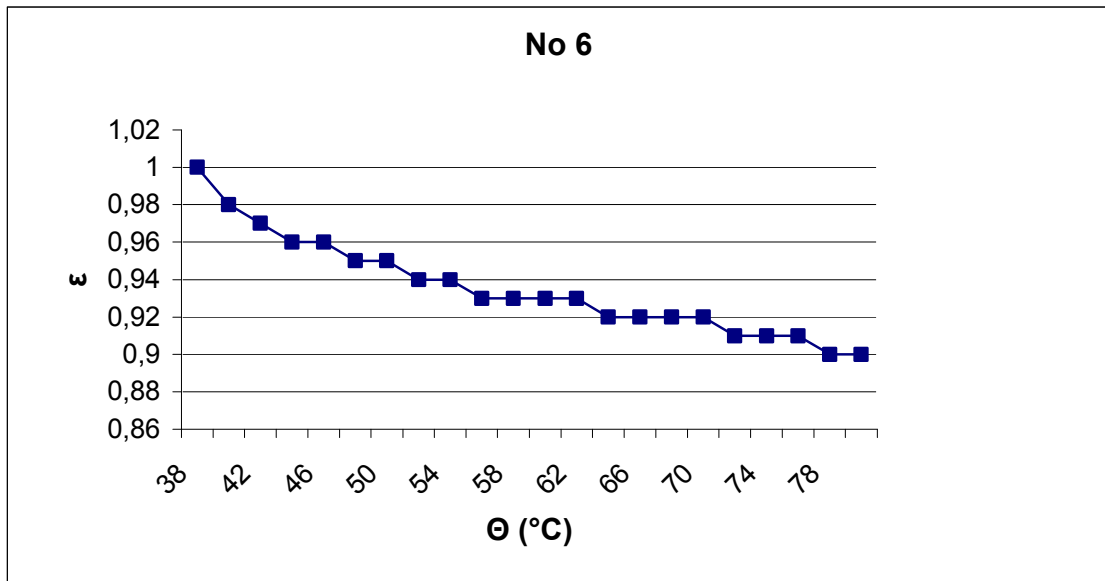
Γράφημα 4.1-3: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο3 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



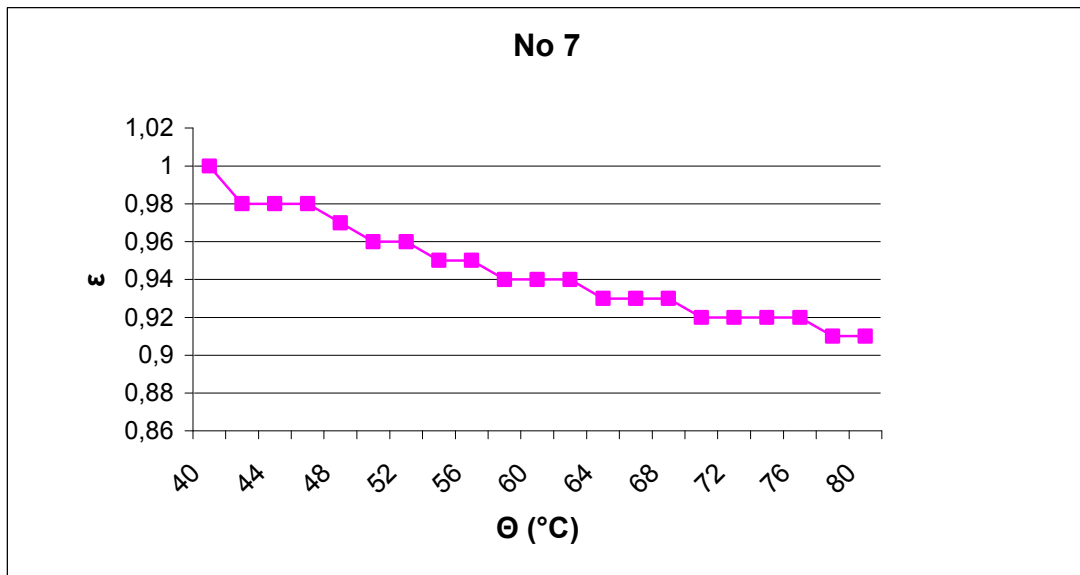
Γράφημα 4.1-4: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο4 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



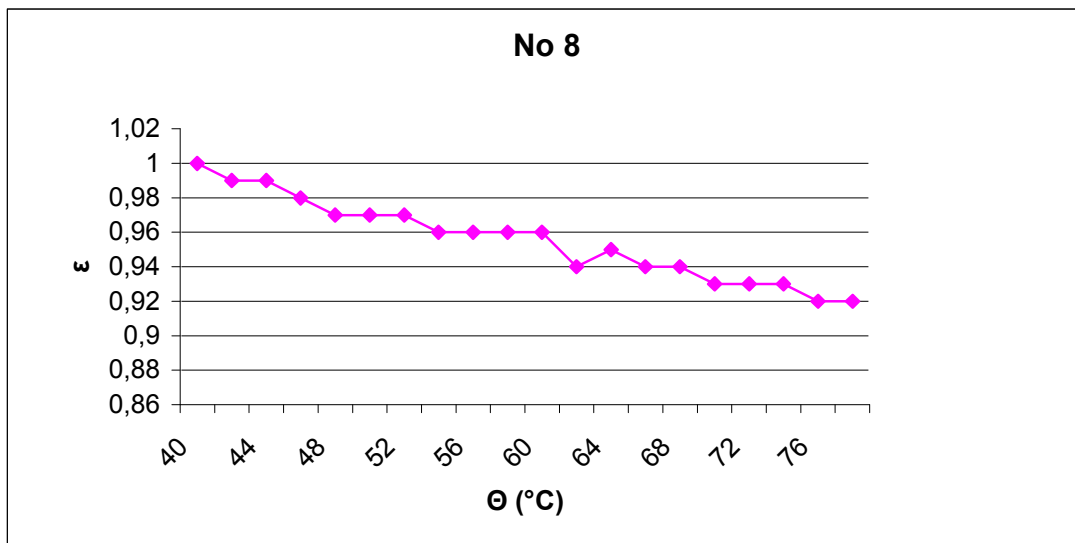
Γράφημα 4.1-5: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο5 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



Γράφημα 4.1-6: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο6 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.

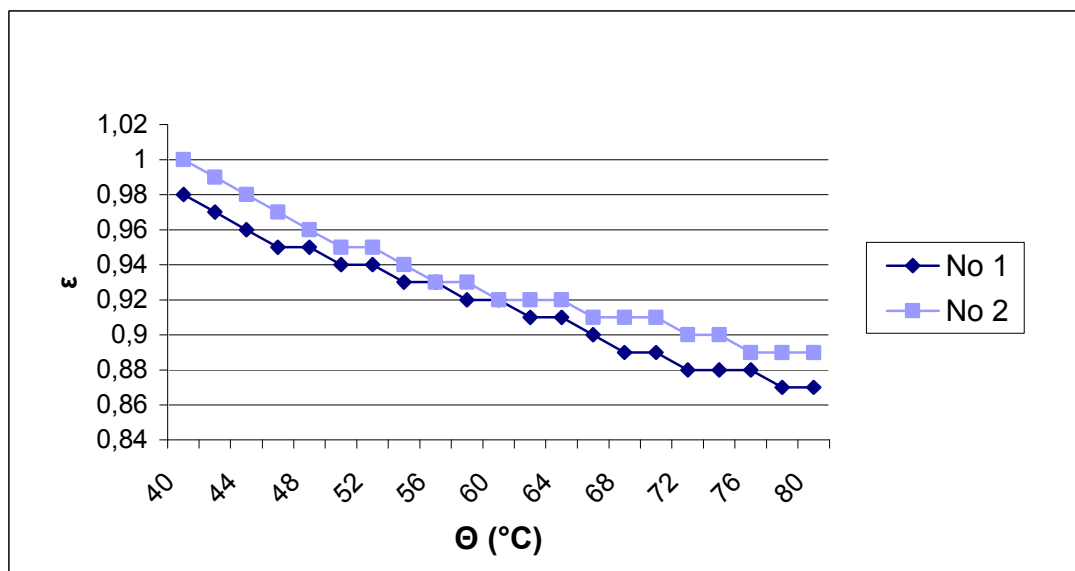


Γράφημα 4.1-7: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο7 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.

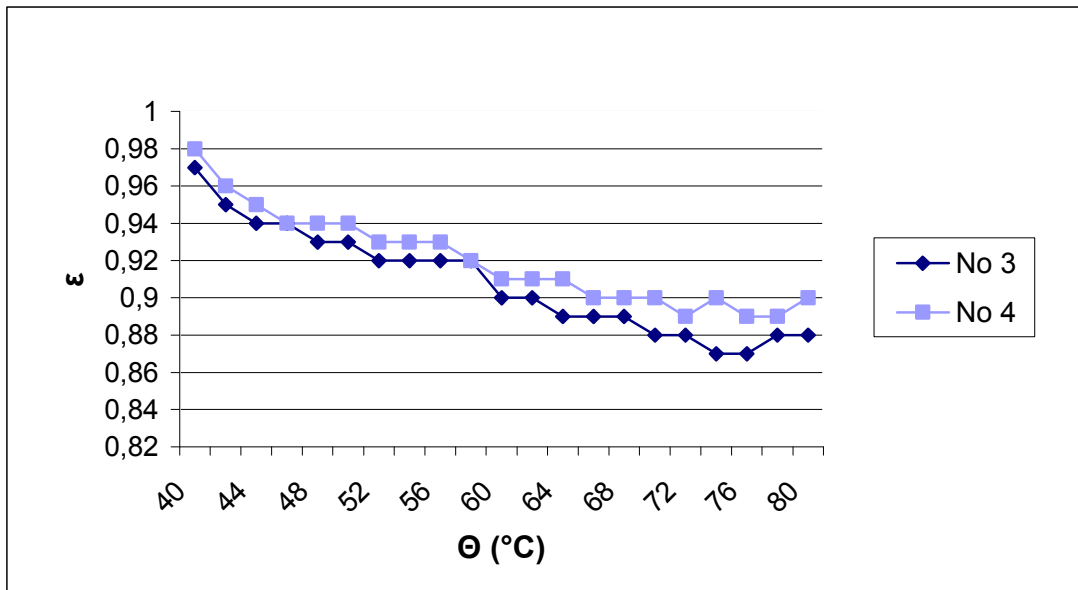


Γράφημα 4.1-8: Γραφική παράσταση της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No8 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.

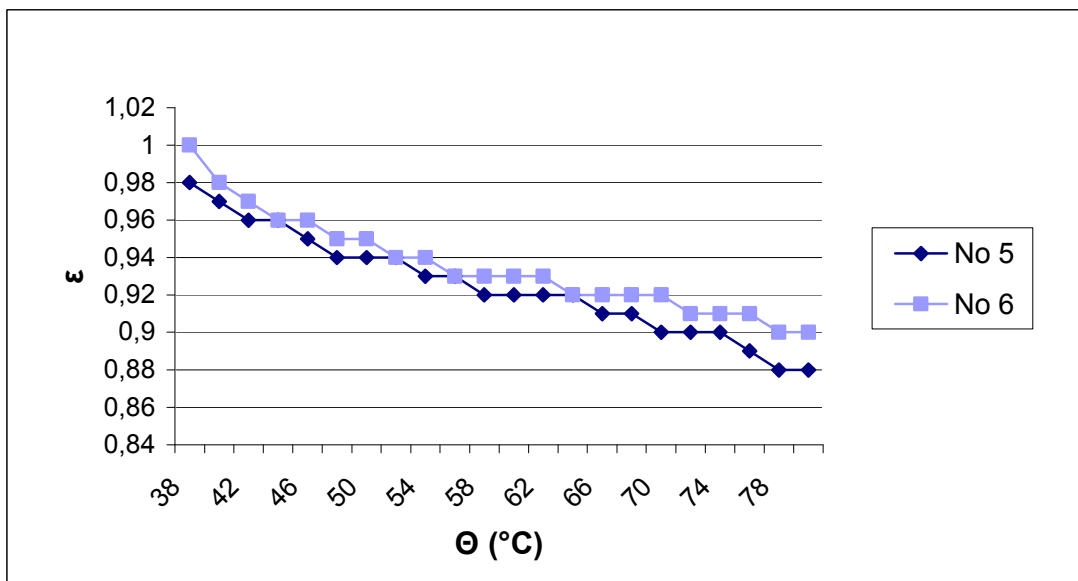
Για τη μελέτη της πιθανής επίδρασης του υλικού στην τιμή της εκπεμπτικότητας αυτού και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 3-1 έως 3-8, χαράσσονται οι καμπύλες εκπεμπτικότητας-θερμοκρασίας για τα δοκίμια ίδιου χρώματος αλλά διαφορετικού υλικού για γωνίες παρατήρησης $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



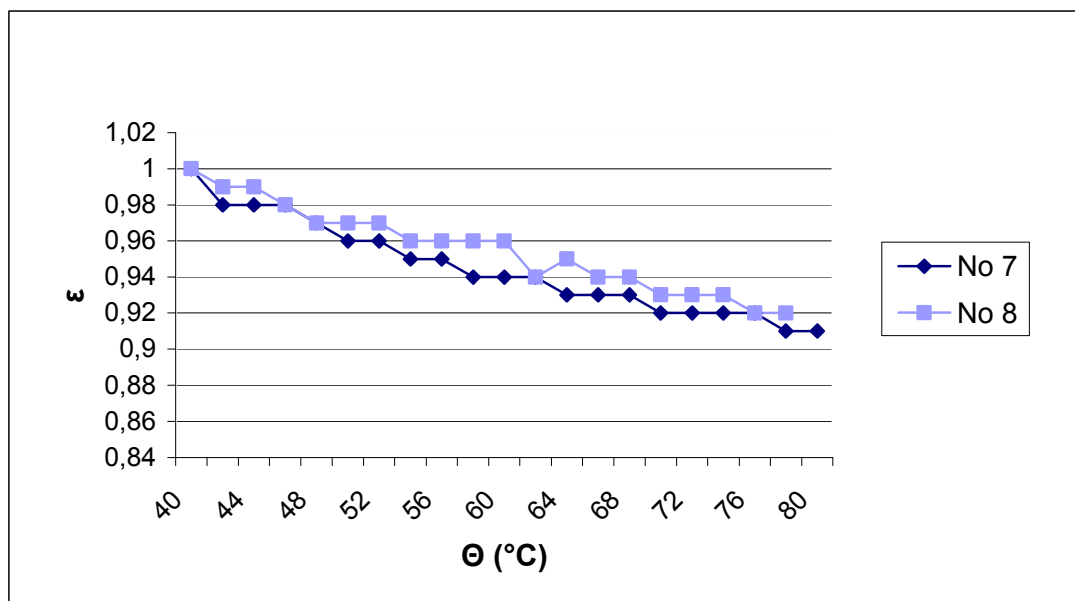
Γράφημα 4.1-9: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας των δοκιμίων No1 και No2 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$.



Γράφημα 4.1-10: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας των δοκιμίων Νο3 και Νο4 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$.

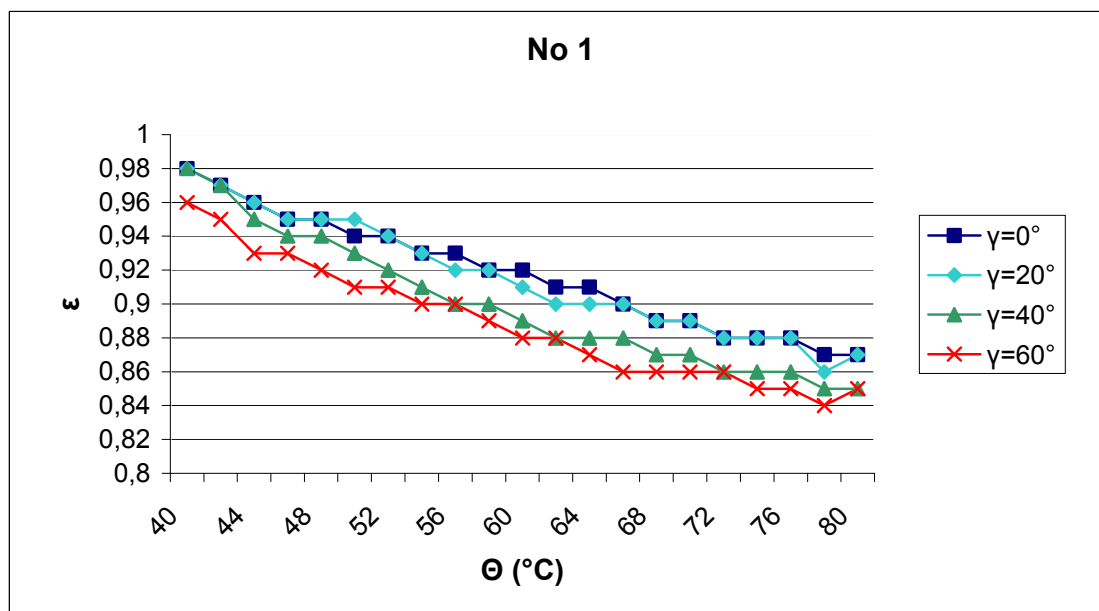


Γράφημα 4.1-11: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας των δοκιμίων Νο5 και Νο6 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$.

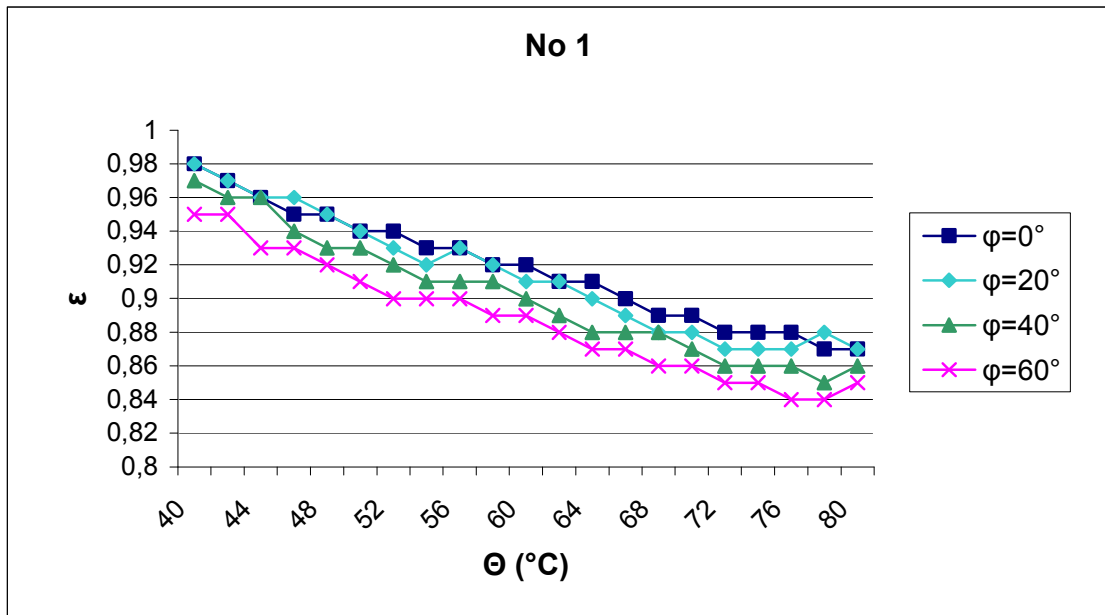


Γράφημα 4.1-12: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας των δοκιμίων No7 και No8 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$.

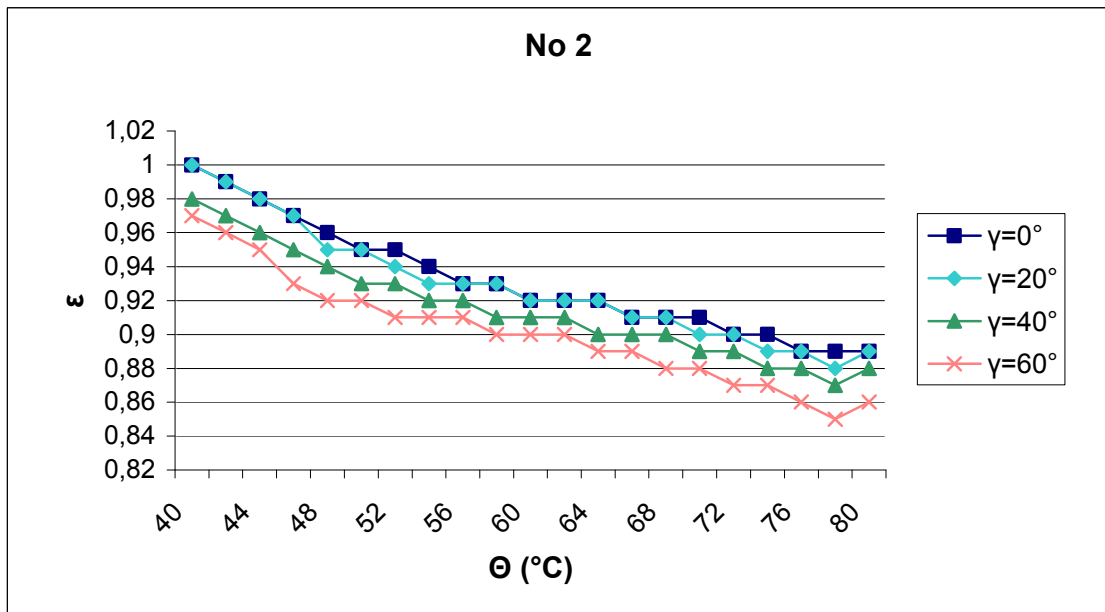
Για τη μελέτη της πιθανής επίδρασης της γωνίας παρατήρησης στην τιμή της εκπεμπτικότητας του υλικού και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 3-1 έως 3-8, χαράσσονται οι καμπύλες εκπεμπτικότητας-θερμοκρασίας για κάθε δοκίμιο και για γωνίες παρατήρησης γ : 0° , 20° , 40° , 60° ως προς τον κατακόρυφο άξονα και φ : 0° , 20° , 40° , 60° ως προς τον οριζόντιο άξονα.



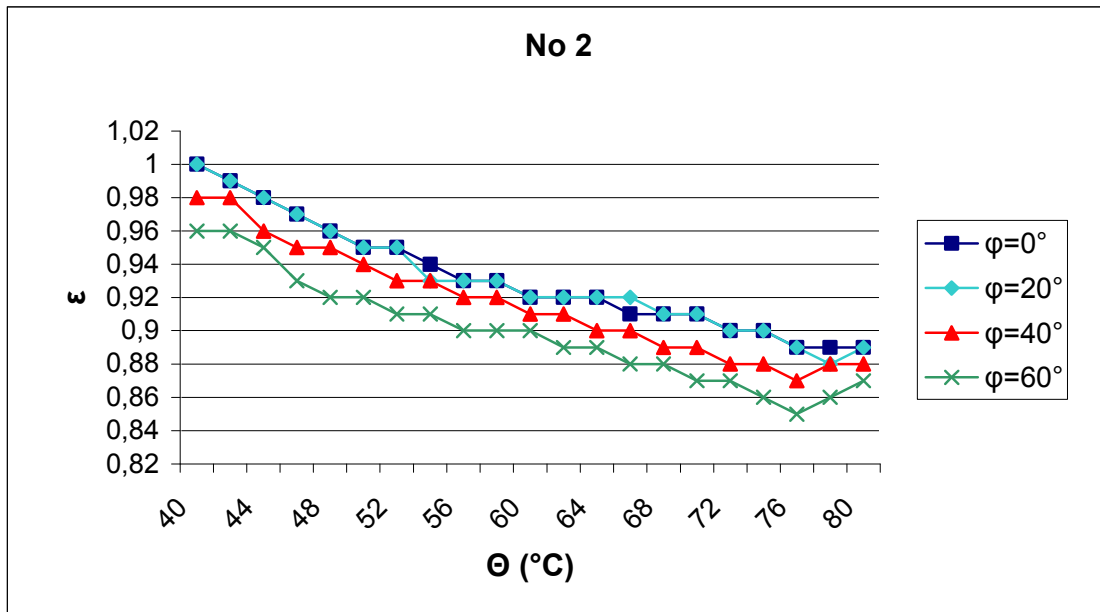
Γράφημα 4.1-13: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No1 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ$, 20° , 40° , 60° .



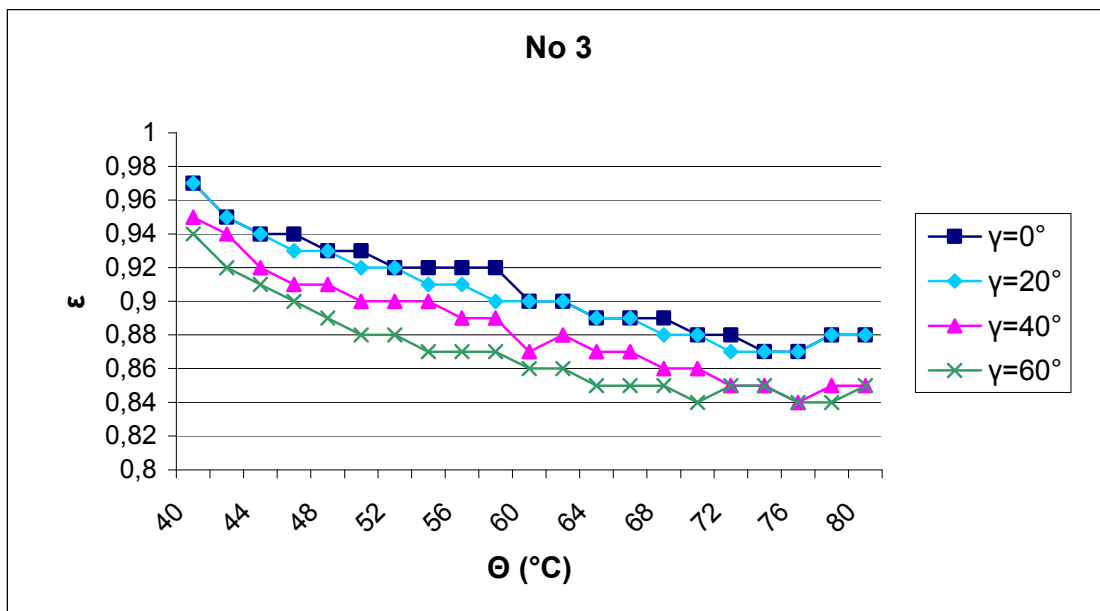
Γράφημα 4.1-14: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No1 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



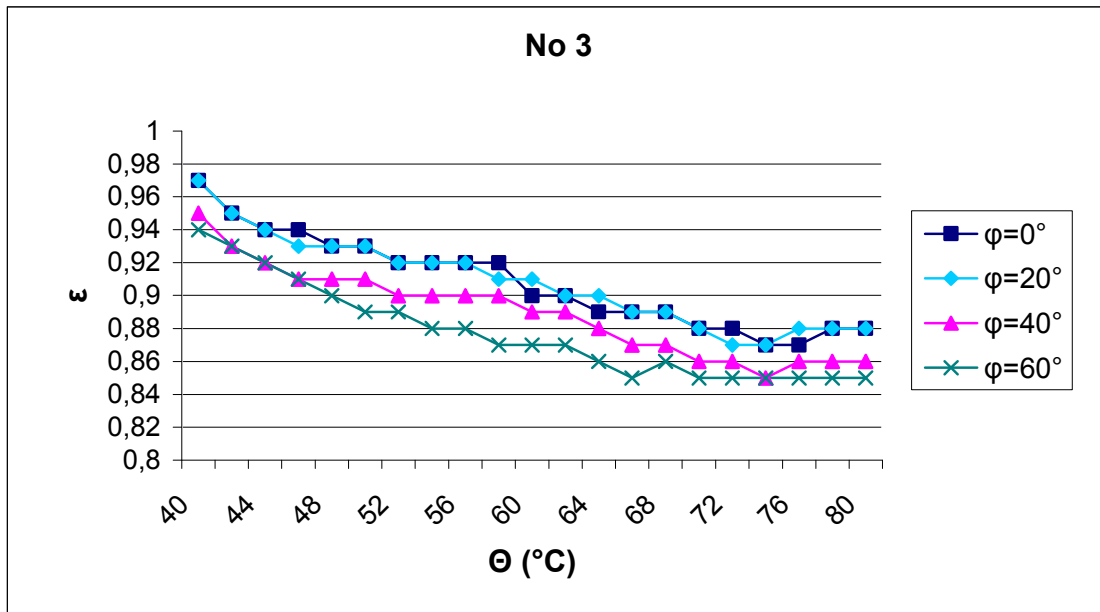
Γράφημα 4.1-15: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No2 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



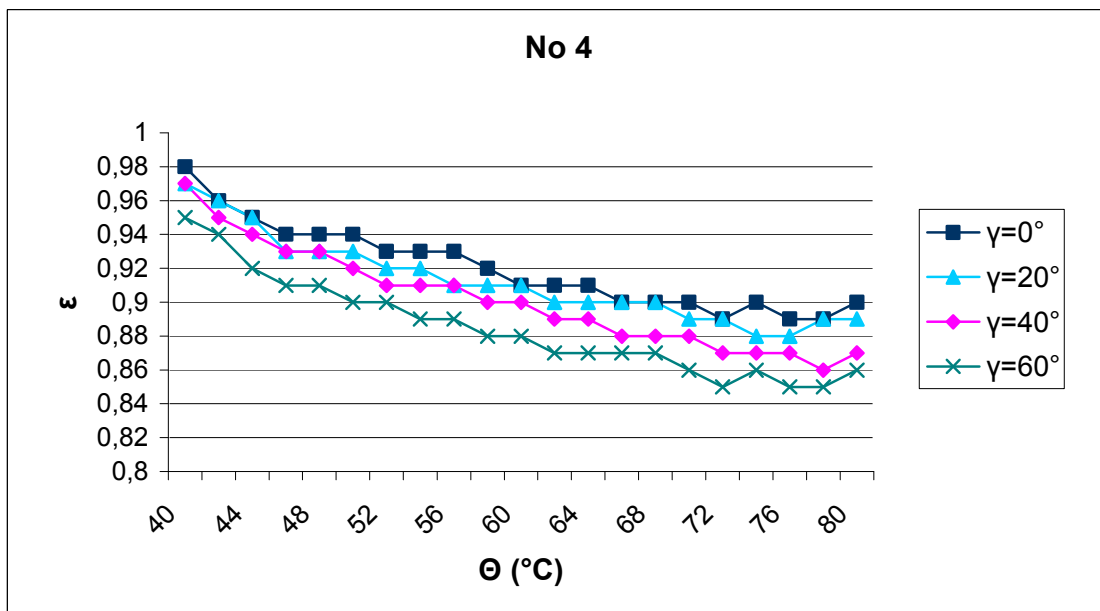
Γράφημα 4.1-16: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No2 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



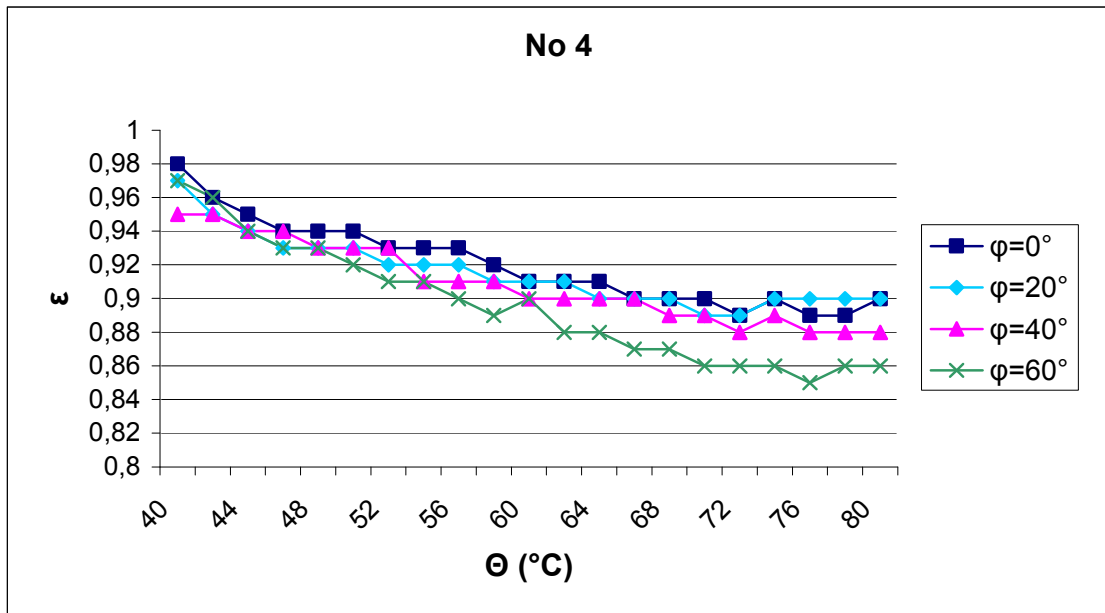
Γράφημα 4.1-17: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No3 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



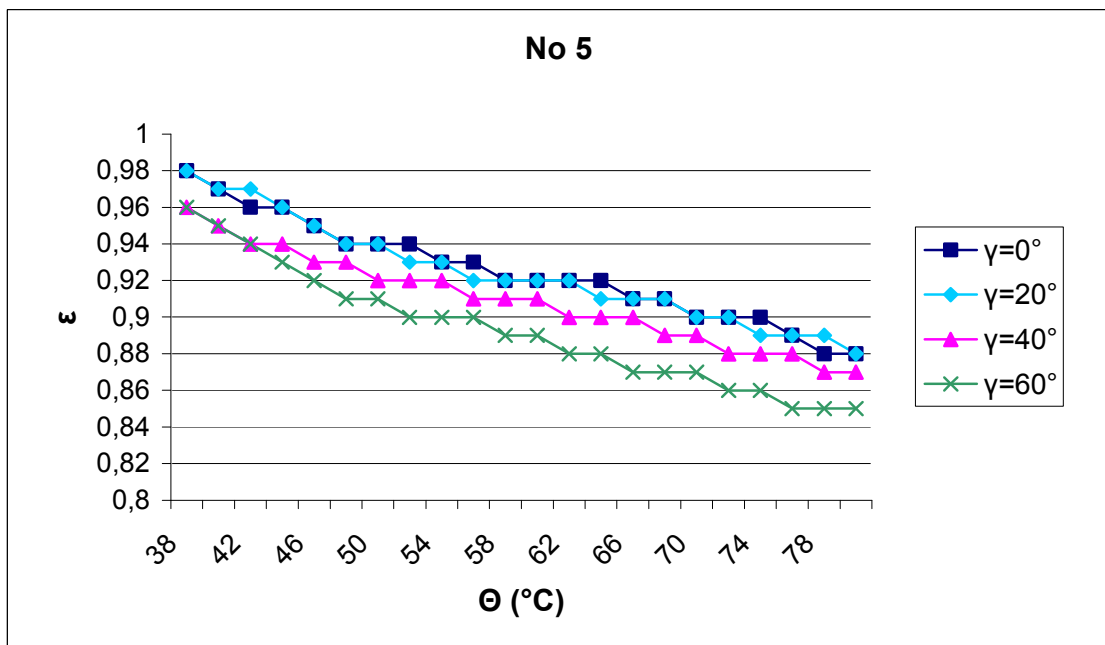
Γράφημα 4.1-18: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο3 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



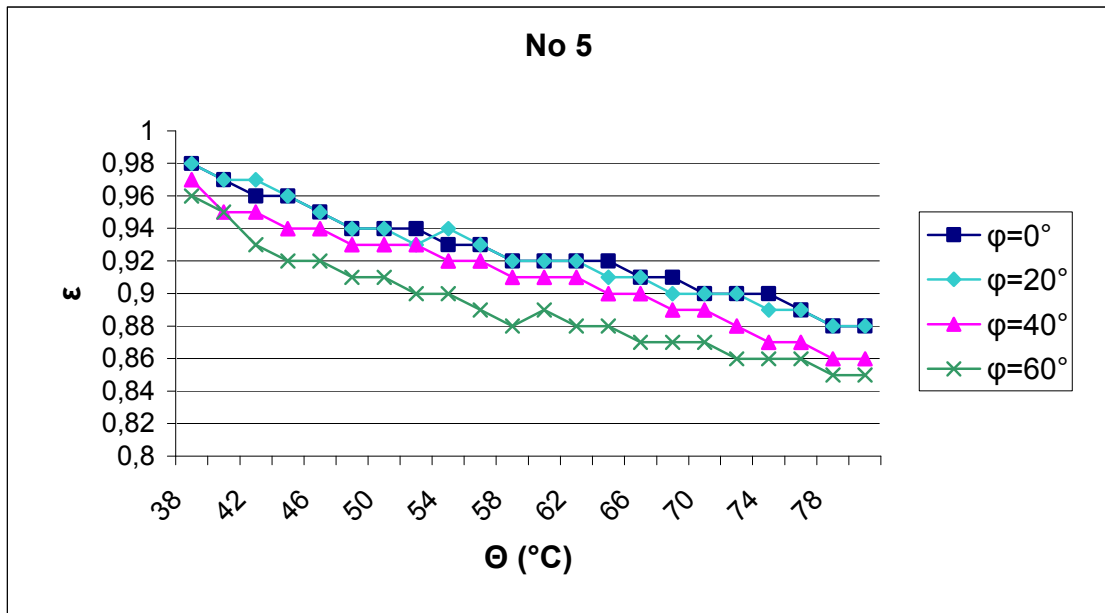
Γράφημα 4.1-19: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο4 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



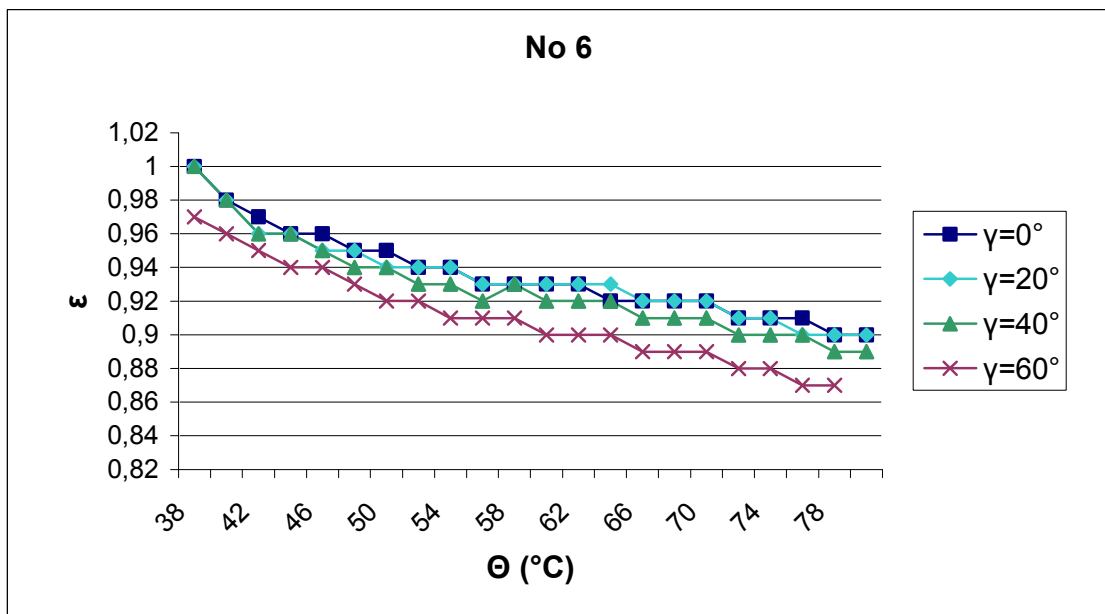
Γράφημα 4.1-20: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No4 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



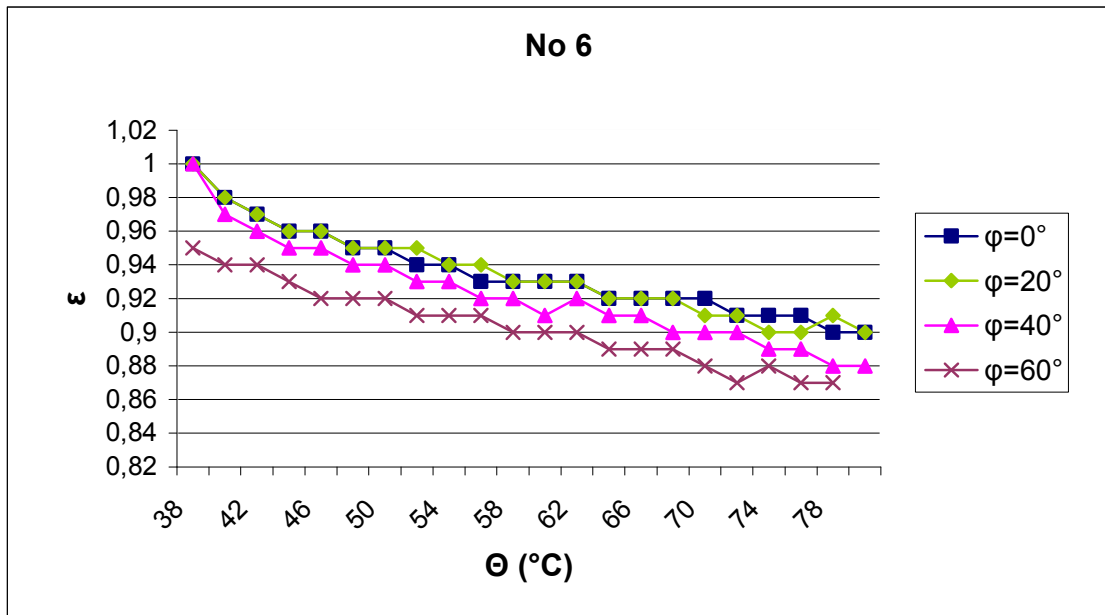
Γράφημα 4.1-21: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου No5 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



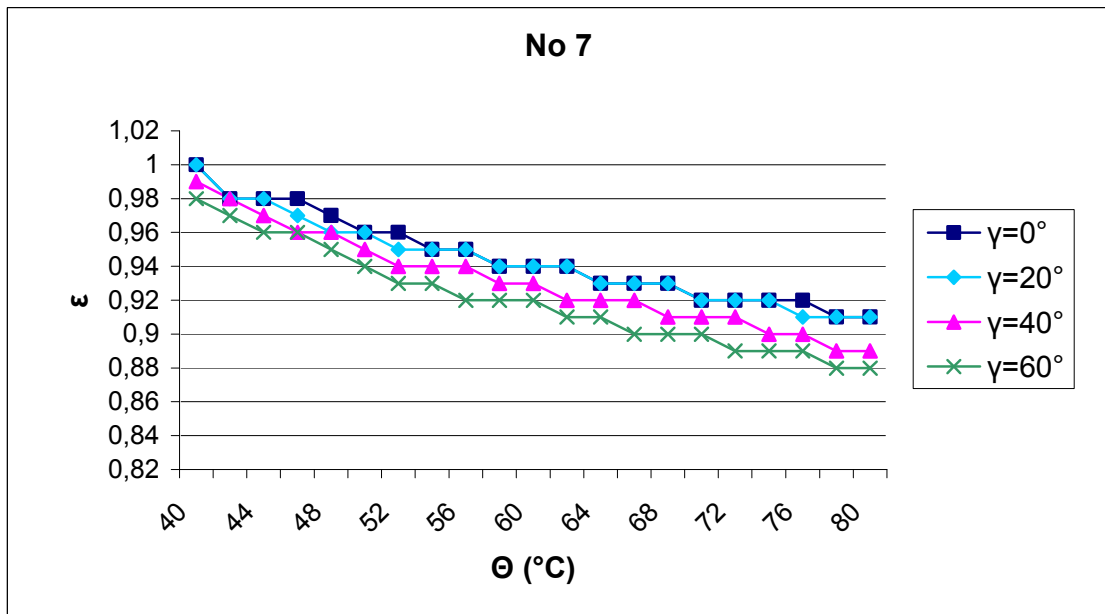
Γράφημα 4.1-22: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο5 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



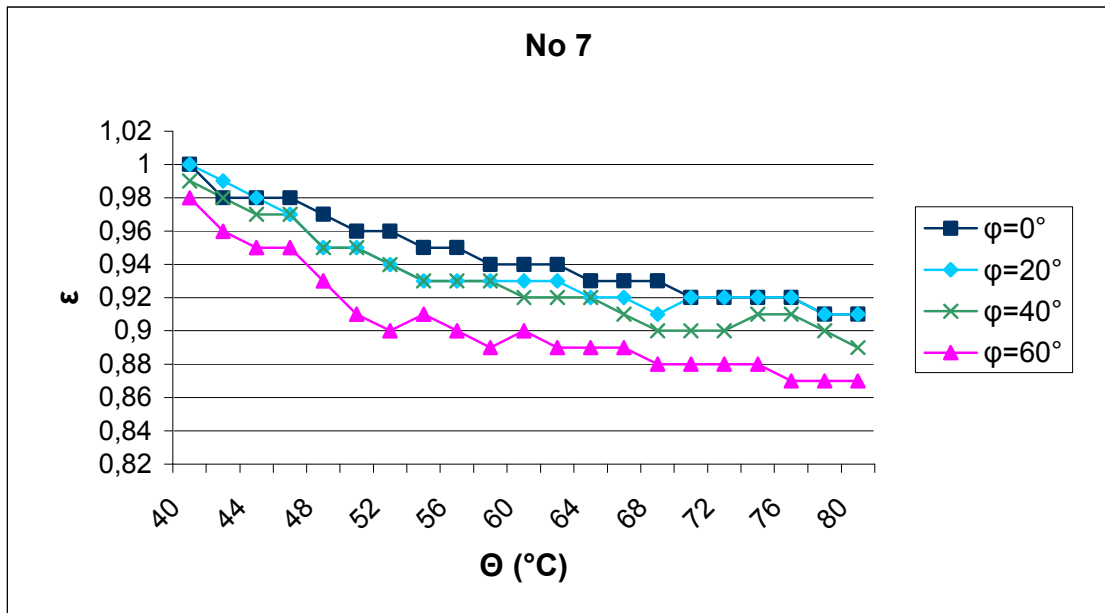
Γράφημα 4.1-23: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο6 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



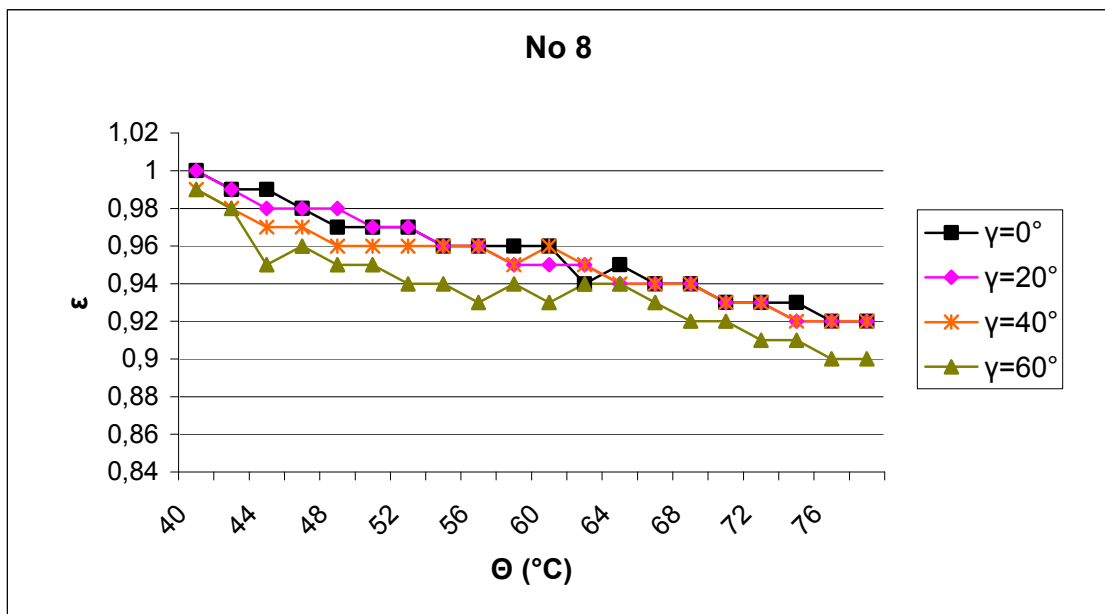
Γράφημα 4.1-24: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο6 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



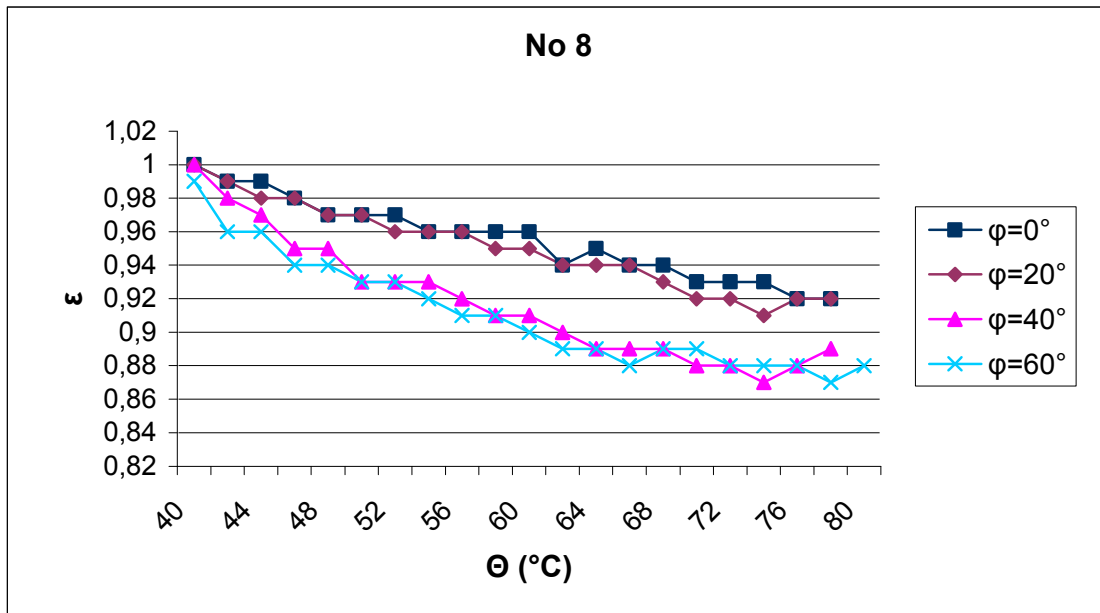
Γράφημα 4.1-25: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο7 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



Γράφημα 4.1-26: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκκεντρικότητας του δοκιμίου No7 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.

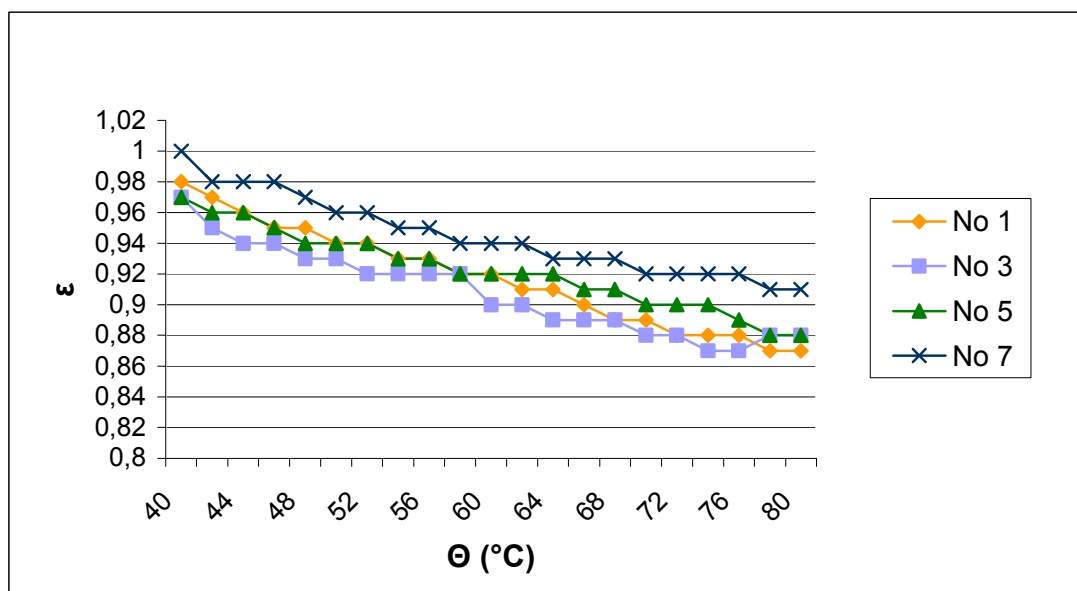


Γράφημα 4.1-27: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκκεντρικότητας του δοκιμίου No8 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.



Γράφημα 4.1-28: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας του δοκιμίου Νο8 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.

Για τη μελέτη της πιθανής επίδρασης του χρώματος στην τιμή της εκπεμπτικότητας του υλικού και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 3-1 έως 3-8 χαράσσονται οι καμπύλες εκπεμπτικότητας-θερμοκρασίας για τα δοκίμια ίδιου υλικού αλλά διαφορετικού χρώματος για γωνίες παρατήρησης $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=0^\circ$.



Γράφημα 4.1-29: Γραφική παράσταση για τη σύγκριση των τιμών της εκπεμπτικότητας των δοκιμίων Νο1, Νο3, Νο5, Νο7 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για γωνίες $\gamma=0^\circ, \varphi=0^\circ$.

4.2 Σχολιασμός των μετρήσεων – Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι για όλα τα δοκίμια η καμπύλη έχει την ίδια ποιοτικά μορφή, δηλαδή καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η τιμή της εκπεμπτικότητας, όπως φαίνεται στα γραφήματα 4.1.1-1 έως 4.1.1-8. Αξίζει να σημειωθεί ότι πιο σωστή μέτρηση θεωρείται εκείνη που έγινε στην υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή στους 80°C. Σε πίνακες της βιβλιογραφίας μπορεί να βρει κανείς ότι για την κοινή μογιά λευκού χρώματος η τιμή της εκπεμπτικότητας κυμαίνεται από 0,84 έως 0,92, ανάλογα με το υλικό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται να επαληθεύουν αυτές τις τιμές.

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι για όλα τα χρώματα υπάρχει απόκλιση μεταξύ της απλής μογιάς και της μονωτικής. Όπως προκύπτει από τα γραφήματα 4.1.2-1 έως 4.1.2-4 το μονωτικό χρώμα τείνει να έχει υψηλότερη τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με το απλό. Η διαφορά κυμαίνεται από 2% ως 3,3%.

Ένας άλλος παράγοντας που εξετάστηκε είναι η γωνία παρατήρησης. Από τα γραφήματα 4.1.3-1 έως 4.1.3-16 φαίνεται ότι για όλα τα χρώματα και υλικά, με την αύξηση της οπτικής γωνίας η εκπεμπτικότητα φαίνεται να μειώνεται, τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις στις 20° η μείωση είναι αμελητέα, ενώ στις 40° και κυρίως στις 60° η απόκλιση είναι σημαντική. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα το σφάλμα φτάνει το 4-5% για τις 60°, όπως για παράδειγμα στα δοκίμια 7 και 8 (γραφήματα 4.1.3-14 και 4.1.3-16). Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμική κάμερα σε κτίρια μπορούν να είναι ακριβείς αν εκτελούνται για γωνία παρατήρησης μικρότερη των 40° είτε ως προς τον κατακόρυφο είτε ως προς τον οριζόντιο άξονα. Για μεγαλύτερες γωνίες οι μετρήσεις θερμοκρασίας πιθανόν να παρουσιάσουν σημαντικό σφάλμα.

Όπως παρατηρεί κανείς από το γράφημα 4.1-29 το οποίο δίνει τις τιμές της εκπεμπτικότητας για τα τέσσερα διαφορετικά χρώματα, μολονότι πρόκειται για ανοιχτές αποχρώσεις και οι τιμές τους είναι παραπλήσιες, παρατηρείται ότι το ροζ χρώμα που είναι ελαφρά πιο σκούρο από τα άλλα έχει υψηλότερες τιμές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν ήταν πάντα σταθερή κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων (άνοιγμα πόρτας, παραθύρου, θέρμανση κλπ), όπως φαίνεται και στους πίνακες του προηγούμενου κεφαλαίου, γεγονός που πιθανόν να επιφέρει μικρές μεταβολές στα αποτελέσματα καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εκπεμπτικότητα είναι συνάρτηση και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

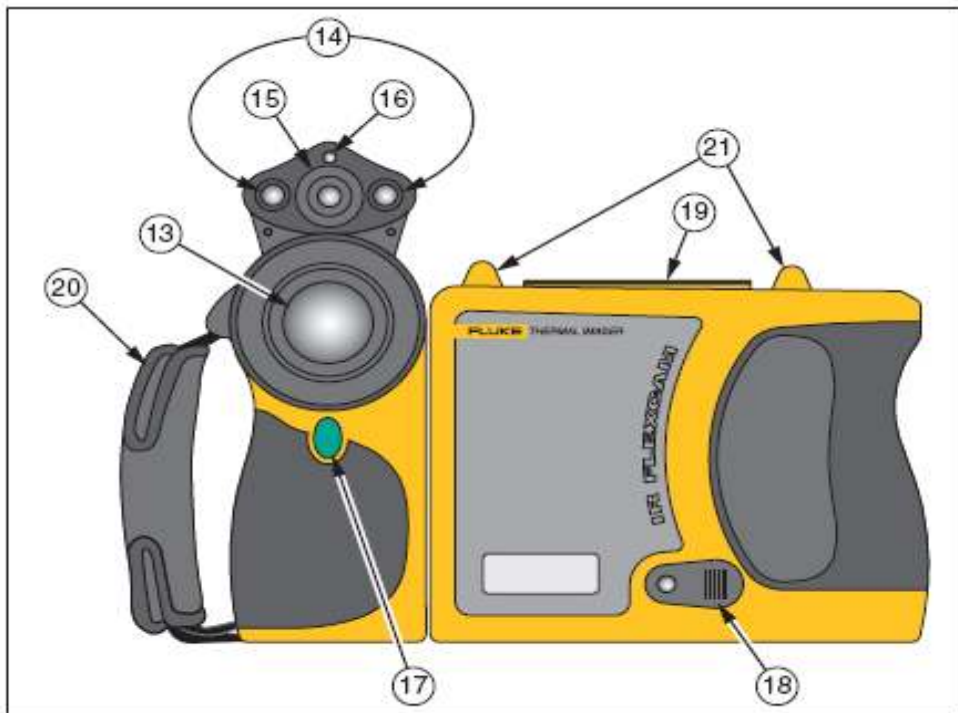
Επίσης, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο παρείχε τη δυνατότητα για τη μεταβολή της γωνίας μόνο στον ένα άξονα κάθε φορά. Ενδιαφέρον θα είχε λεπτομερέστερη μελέτη για την παρατήρηση της μεταβολής της εκπεμπτικότητας όταν η γωνία παρατήρησης μεταβάλλεται ως προς και τους δύο άξονες συγχρόνως. Τέλος, από τις παραμέτρους που επιδρούν στην τιμή της εκπεμπτικότητας, που παρουσιάστηκαν

στην ενότητα 1.5.3, μελετήθηκαν πειραματικά η θερμοκρασία, το υλικό, το χρώμα επιφάνειας και η οπτική γωνία. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε περαιτέρω επιστημονική έρευνα και για άλλους παράγοντες όπως η γεωμετρία επιφανείας του υλικού και το μήκος κύματος.

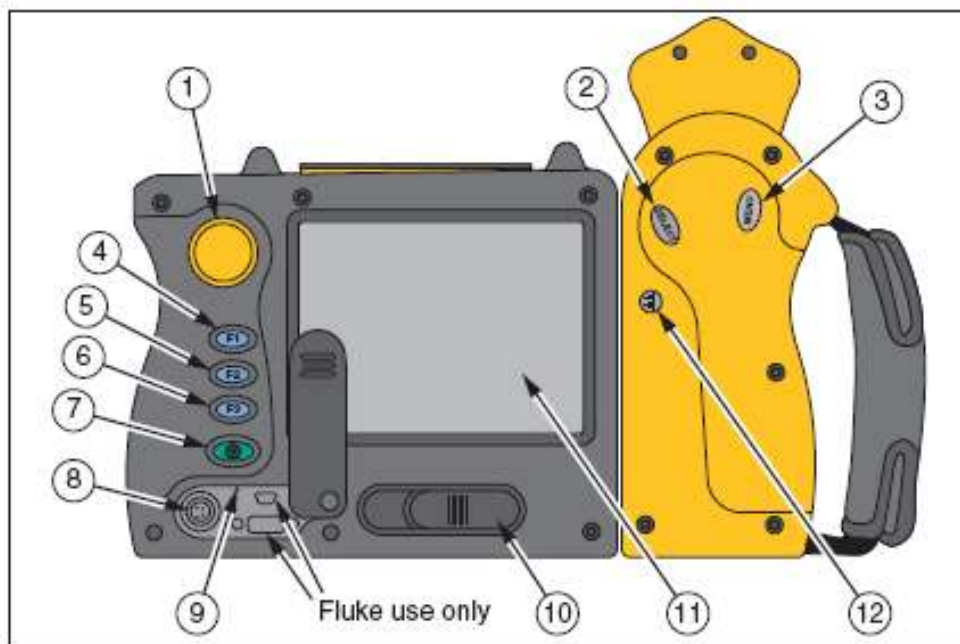
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Η θερμοκάμερα Flexcam Ti45

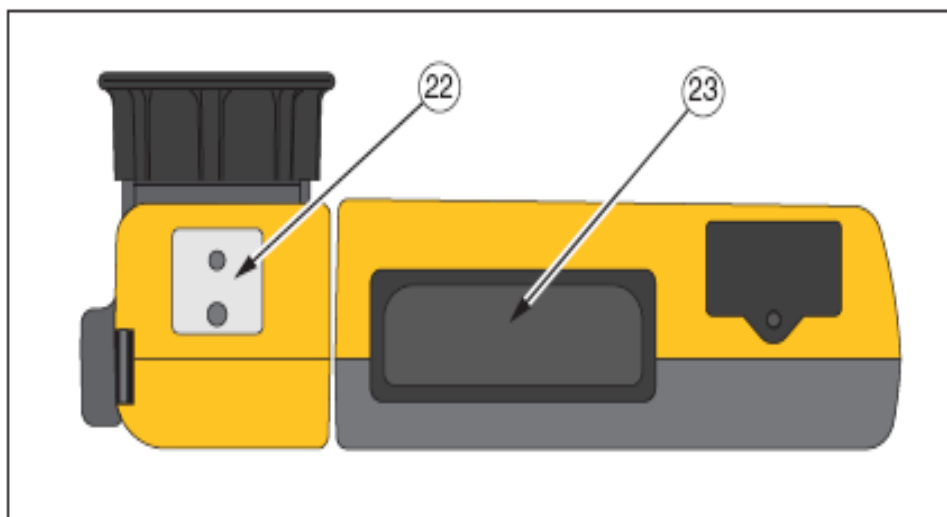
Στο παρόν παράρτημα γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών τμημάτων καθώς και των βασικών ρυθμίσεων της θερμοκάμερας που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται η μπροστινή, η πίσω και η κάτω όψη του οργάνου.











Εικόνα Α-1: Μπροστινή όψη



Εικόνα Α-2: Πίσω όψη



Εικόνα Α-3: Κάτω όψη

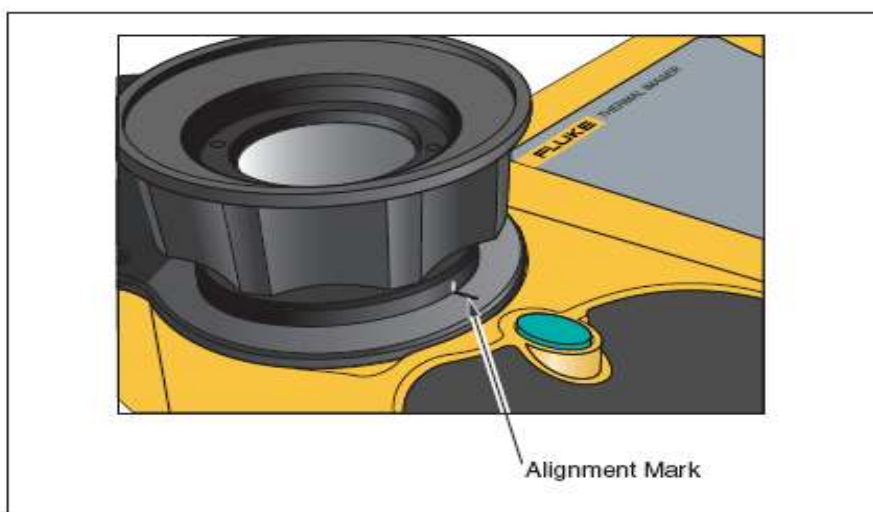
1. Ποντίκι - Χρησιμοποιείται για να ελέγξει τη θέση του δείκτη στις εικόνες και τις επιλογές κειμένων.
2.  - Εκτελεί το κλικ του «ποντικιού», ή τη λειτουργία «εισάγετε», για το δείκτη.
3.  Κουμπί επιλογών- Χρησιμοποιείται για την πρόσβαση των επιλογών οθόνης. Σημείωση: Πιέστε μια φορά και οι επιλογές εμφανίζονται.
- 4,5,6. , ,  Προγραμματιζόμενα κουμπιά- Μπορούν να προγραμματιστούν έτσι ώστε να εκτελούν διάφορες λειτουργίες.
7.  Κουμπί on/off – Χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη θερμοκάμερα, καθώς και να τη θέτει σε λειτουργία χαμηλής ισχύος για τη διατήρηση των μπαταριών. Συνεχές πράσινο: η κάμερα λειτουργεί κανονικά. Αναβοσβήνει πράσινο: εφεδρικός τρόπος λειτουργίας.
8. Θύρα σύνδεσης για τον φορτιστή AC/DC.
9. RESET-Κουμπί για να επαναρυθμίσει τη κάμερα. Μπορεί λόγω της θέσης του να ενεργοποιηθεί με έναν συνδετήρα εγγράφου.
10. Σύρτης μπαταριών - Χρησιμοποιείται για να αφαιρέσετε την μπαταρία.
11. Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) - Για την παρουσίαση των εικόνων και την πρόσβαση των επιλογών της κάμερας.
12.  - Χρησιμοποιείται στην αναμόρφωση της παλέτας χρώματων στις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες στην τρέχουσα εικόνα και για να ρυθμίσει το επίπεδο IR-Fusion®.
13. Υπέρυθρος φακός - Φακός γερμανίου με χειροκίνητη εστίαση.
14. Φακός/Φλας- Όταν λειτουργεί, ο φακός φωτίζει τις σκοτεινότερες περιοχές εργασίας. Η λάμψη φωτίζει το αντικείμενο κατά τη διάρκεια λήψης της εικόνας για καλύτερη ποιότητα στο ορατό φως. Ο φακός και το φλας μπορούν να λειτουργούν συγχρόνως.
15. Φακός ορατού φωτός - Λήψη ορατού φωτός για τον έλεγχο της εικόνας.
16. Λέιζερ- χρησιμοποιείται για να επισημάνει το αντικείμενο προς το οποίο στοχεύει η κάμερα.
17.  - Χρησιμοποιείται για να 'παγώσει' ή να αποθηκεύσει μια εικόνα. Επίσης χρησιμοποιείται για να δεχτεί μια αλλαγή, το κλείσιμο μιας σελίδας επιλογής και για την επιστροφή σε λειτουργία ανίχνευσης στόχων.
18. Θύρα Video - RCA -Χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της κάμερας με τηλεόραση ή οθόνη ελέγχου.
19. Υποδοχή για την κάρτα μνήμης.
20. Λουρί χεριών- Ρυθμιζόμενο λουρί για την προστιθέμενη σταθερότητα κατά τη σύλληψη των εικόνων.
21. Λουρί λαιμού -Θέση για την τοποθέτηση του λουριού λαιμού ή/και ώμου.
22. Τυποποιημένη 1/4-20 διαμπερής τρύπα για την τοποθέτηση της κάμερας στο τρίποδο.
23. Μπαταρία - Μπαταρία λιθίου των 7 volt.

Για την ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας, είναι σημαντική η ρύθμιση της θερμοκάμερας με τις σωστές τιμές εκπεμπτικότητας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η τιμή εκπεμπτικότητας στη θερμοκάμερα και στις εικόνες που αποθηκεύονται είναι ρυθμιζόμενη μεταξύ 0.01 και 1.00 με αυξήσεις της τάξεως του 0.01. Αυτή η τιμή, μαζί με την ακτινοβολία του στόχου και την θερμοκρασία περιβάλλοντος που μετρώνται από τη θερμοκάμερα, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του στόχου.

Είναι επίσης δυνατή η ρύθμιση τις τιμές της εκπεμπτικότητας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με το άνοιγμα των επιλογών εικόνας και πατώντας την επιλογή της εκπεμπτικότητας. Από εδώ, είναι δυνατή η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της λειτουργίας σταθερά ορισμένης εικόνας. Όταν αυτή η λειτουργία ενεργοποιείται, το ελάχιστο και το μέγιστο της παλέτας χρωμάτων προσαρμόζεται καθώς μεταβάλλεται η εκπεμπτικότητα, και η εμφάνιση της εικόνας παραμένει η ίδια. Όταν αυτή η λειτουργία απενεργοποιείται, το ελάχιστο και το μέγιστο της παλέτας χρωμάτων παραμένει σταθερό, καθώς το χρώμα που δίνει στην εικόνα αλλάζει αναλόγως.

Η ευθυγράμμιση εικόνας είναι μια αυτόματη ρύθμιση που εμφανίζεται με την περιστροφή του φακού υπέρυθρων της θερμοκάμερας. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι μόνο διαθέσιμο με το φακό 20 mm. Η εικόνα ορατού φωτός και η υπέρυθη εικόνα παρατάσσονται βασισμένα στην απόσταση εστίασης του υπέρυθρου φακού έτσι ώστε να μπορούν να συνδυαστούν για εξέταση και ανάλυση. Η εικόνα ορατού φωτός και η υπέρυθη εικόνα μπορούν να παρατάσσονται για αποστάσεις μεγαλύτερες από 50 cm..

Η ευθυγράμμιση εικόνας τίθεται εκτός λειτουργίας κατά χρησιμοποίηση των προαιρετικών φακών 10 και 54 mm. Για την εξασφάλιση κατάλληλης ευθυγράμμισης εικόνας με τον τυποποιημένο φακό 20 mm., ο φακός πρέπει να ευθυγραμμιστεί σωστά κατά την εγκατάστασή του στη θερμοκάμερα. Η σωστή ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του φακού έτσι ώστε το άσπρο σημάδι ευθυγράμμισης στο φακό να παραταχθεί με το αντίστοιχο σημάδι στη θερμοκάμερα όπως φαίνεται στην εικόνα A-4.



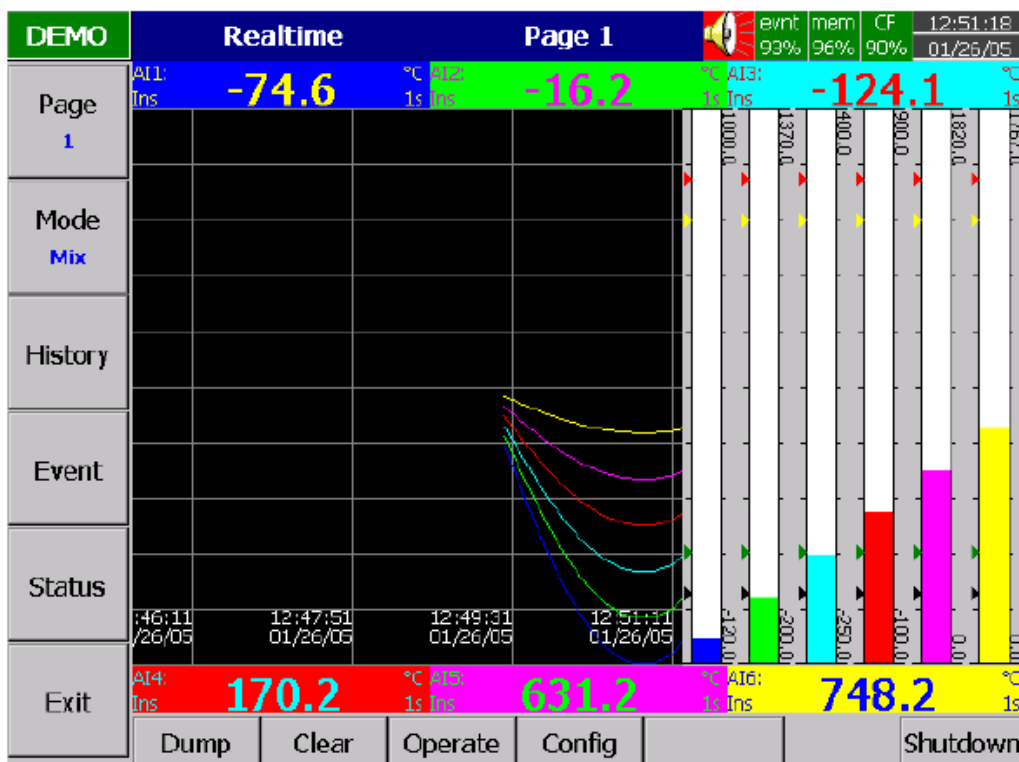
Εικόνα A-4: Ευθυγράμμιση του φακού των 20mm.

Πριν από τη λήψη των εικόνων χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του ορατού φωτός και της υπέρυθρης ακτινοβολίας, είναι σημαντικό να βεβαιωθεί κανείς ότι το αντικείμενο στόχευσης έχει εστιαστεί. Κατά την περιστροφή του φακού υπέρυθρων (IR) για να εστιάσει η θερμοκάμερα, εάν το υπέρυθρο μίγμα είναι λιγότερο από 50%, το επίπεδο μίγματος υπέρυθρης ενέργειας αλλάζει σε 50% υπέρυθρο και 50% ορατό φως (VL). Μόλις το αντικείμενο στόχευσης είναι εστιασμένο και παύει η περιστροφή του υπέρυθρου φακού, το επίπεδο υπέρυθρης ενέργειας επιστρέφει στη ρύθμισή του. Για να εστιάσει κανείς τη θερμοκάμερα, πρέπει να αφαιρέσει το καπάκι του υπέρυθρου φακού, να στοχεύσει με το φακό το στόχο, και χειροκίνητα να περιστρέψει τον υπέρυθρο φακό. Η εστίαση επιτυγχάνεται ευθυγραμμίζοντας τις γωνίες των ορατών και υπέρυθρων εικόνων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Το ψηφιακό καταγραφικό μηχάνημα Paperless Recorder VR-18

Μετά την εγκατάσταση και την καλωδίωση, και αφού ενεργοποιηθεί κανείς το καταγραφικό, στην αριστερή πλευρά της LCD οθόνης θα εμφανιστούν τα εξής 6 πλήκτρα: Page, Mode, History, Event, Status & Exit. Ανοίγοντας το πλαστικό κάλυμμα, στην μπροστινή κάτω πλευρά της συσκευής, βρίσκονται άλλα 6 πλήκτρα: Dump, Clear, Operate, Config και Shutdown. Αυτά τα 11 πλήκτρα χρησιμοποιούνται για την λειτουργία. Στην πάνω δεξιά πλευρά εμφανίζονται τα μικρά εικονίδια: buzzer, evnt, mem, CF and Date/Time. Στην εικόνα Β-1 παρουσιάζεται μια τυπική εικόνα οθόνης σε βασική λειτουργία.



Εικόνα Β-1: Τυπική εικόνα οθόνης σε βασική λειτουργία

Ο καταγραφέας μπορεί να έχει μέχρι 6 σελίδες και κάθε σελίδα μπορεί να εμφανίζει κατ' ανώτατο όριο 6 κανάλια. Αν τα κανάλια καλύπτουν περισσότερες από μία σελίδες, με το πλήκτρο Page, μπορεί να προχωρήσει κανείς από τη σελίδα 1 στη σελίδα 2 κλπ. Πιέζοντας συνεχόμενα το πλήκτρο **Page**, θα εμφανιστεί **Page All** οπότε και θα εμφανιστούν όλα τα ενεργοποιημένα κανάλια.

Με το πλήκτρο Mode μπορεί να επιλέξει κανείς τους διάφορους τρόπους απεικόνισης των δεδομένων που περιλαμβάνουν Mix, Trend, Bar ή Digital mode.

Mix: Η προεπιλεγμένη οθόνη είναι λειτουργία Mix. Πολλές λειτουργίες μπορούν να αναμειχθούν, συμπεριλαμβανομένων των οριζόντια / κάθετη Trend, Bar και Digital mode.


Trend: Πιέζοντας το πλήκτρο Mode, εμφανίζεται η λειτουργία Trend. Αυτή είναι η λειτουργία μέτρησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η ίδια Σελίδα / πίνακας μπορεί να έχει ένα ανώτατο όριο 6 trends σε διάφορα χρώματα. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει κάθε χρώμα.

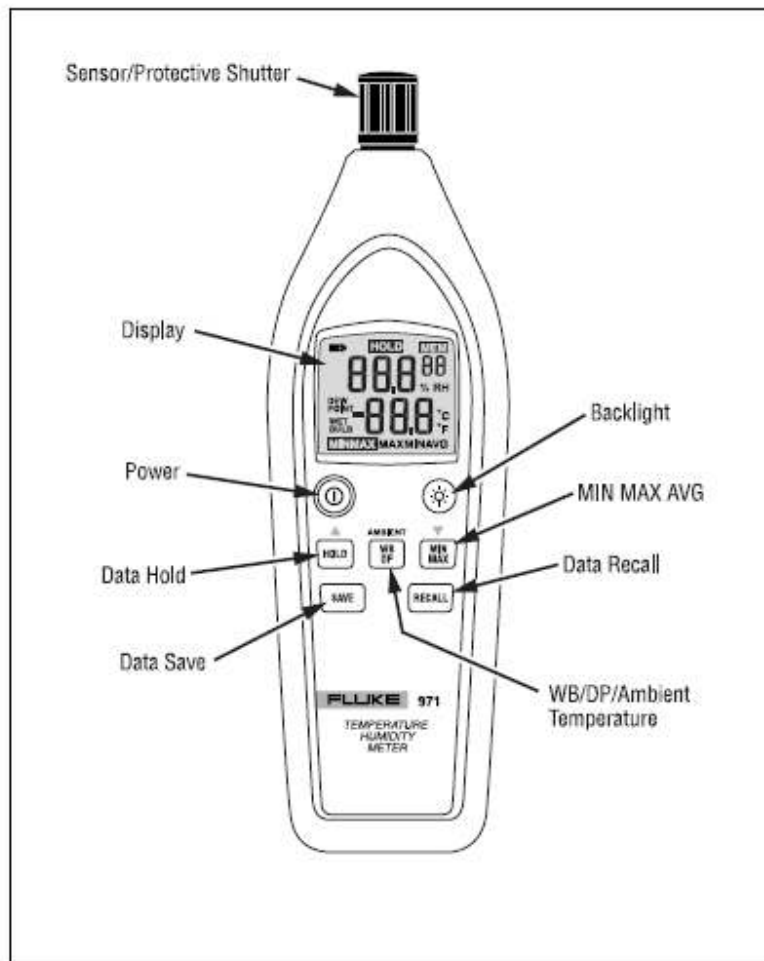
Bar: Πιέζοντας το πλήκτρο Mode ξανά, εμφανίζονται τα δεδομένα σε μορφή στήλης σε διάφορα χρώματα. Η κλίμακα της κάθε γραμμής μπορεί να οριστεί μεμονωμένα.

Digital mode: Πιέζοντας το πλήκτρο Mode ξανά, εμφανίζονται τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή σε διάφορα χρώματα. Πιέζοντας το πλήκτρο Mode ξανά, ο χρήστης μπορεί να επιστρέψει στην αρχική λειτουργία Mix.

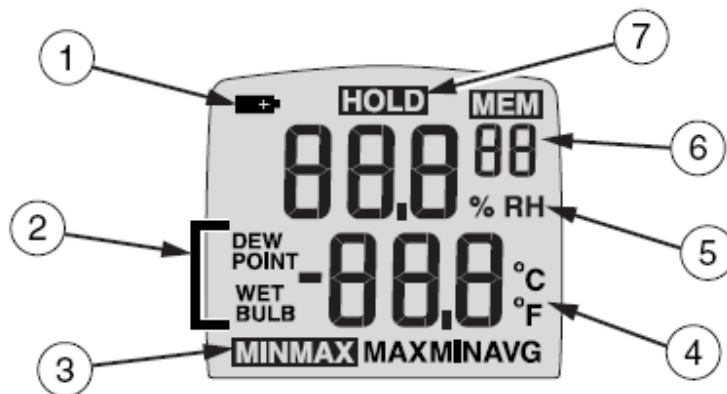
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

971 Temperature Humidity Meter

Μετά το άνοιγμα του προστατευτικού διαφράγματος του αισθητήρα, και πιέζοντας το πλήκτρο , ενεργοποιείται ο μετρητής και ο χρήστης μπορεί να αρχίσει να λαμβάνει μετρήσεις. Οι ενδείξεις θερμοκρασίας εμφανίζονται είτε σε κλίμακα Κελσίου (° C) είτε σε Φαρενάιτ (° F). Για εναλλαγή μεταξύ ° C και ° F, πρέπει να αφαιρέσει κανείς το καπάκι της θήκης της μπαταρίας και να θέσει το διακόπτη κλίμακας θερμοκρασίας στην επιθυμητή κλίμακα.



Εικόνα Γ-1: Τα διάφορα μέρη του οργάνου 971 Temperature Humidity Meter



Εικόνα Γ-2: Τυπική εικόνα οθόνης του οργάνου 971 Temperature Humidity Meter

1. **+** : Χαμηλή μπαταρία.
2. **DEW POINT WET BULB** : Θερμοκρασία υγρού βολβού ή σημείου δρόσου.
3. **MIN MAX** : Ελάχιστη/Μέγιστη εγγραφή ενεργοποιημένη.
MAX, MIN, Μέγιστη, ελάχιστη, ή μέση τιμή
AVG εμφανίζεται.
4. **°F, °C** : Μονάδες μέτρησης θερμοκρασίας.
5. **% RH** : Μονάδα μέτρησης σχετικής υγρασίας.
6. **MEM** : Εμφάνιση ανάγνωσης από τη μνήμη.
88 Αριθμός θέσης μνήμης
7. **HOLD** : Ενεργοποίηση κλειδώματος. Παγώνει την τρέχουσα ανάγνωση.

Βιβλιογραφία

- [1] Ολυμπία Ζώγου, ‘Θερμομετρία –Θερμογραφία’, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας-Πολυτεχνική Σχολή - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος Νοέμβριος 2007.
- [2] Φώτης Τσουκαλής, ‘Η θερμογραφία υπέρυθρων ως διαγνωστικό μέσο για την προβλεπτική συντήρηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού’, Τεχνικά Χρονικά, Μάρτιος-Απρίλιος 2005.
- [3] Π. Ν. Μπότσαρης, ‘Προληπτική συντήρηση και υπέρυθρη θερμογραφία’, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας.
- [4] Βασίλειος Κ. Τσόλκας, Στυλιανός Α. Τυρέκογλου, ‘Μετρήσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας των μετασχηματιστών του δικτύου διανομής’, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2008.
- [5] Νικόλαος Β. Κοντογιάννης, ‘Διατάξεις μέτρησης του δείκτη εκπομπής των υλικών’, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, Μάιος 2011.
- [6] Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik, ‘Infrared Thermography: Errors and Uncertainties’, John Wiley & Sons Ltd, 2009, ISBN 978-0-470-74718-6.
- [7] Otwin Breitenstein, Wilhelm Warta, Martin Langenkamp, ‘Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials’, Springer Series in Advanced Microelectronics, Vol. 10, 2010, ISBN 978-3-642-02416-0.
- [8] A. Saboktakin, C.Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague, P. Bison, E. Grinzato, S. Marinetti, ‘Analysis of ultrasonic elastic waves in vibrothermography using FEM’, 6th Int'l Workshop-NDT Signal Processing, August 25-27, 2009 London, Ontario, Canada, ASPNDE 2009.
- [9] S. Dudzik, ‘A simple method for defect area detection using active thermography’, OPTO-ELECTRONICS REVIEW **17**(4), 338–344 (2009).
- [10] M.Vollmer, K.P.Mollmann, ‘Infrared Thermal Imaging: Fundamental Research and Applications’, Wiley VCH, 2010, ISBN 978-3-527-40717-0.
- [11] Robin E. Bentley, ‘Handbook of Temperature Measurement – Volume 1: Temperature and Humidity Measurement’, Springer, 1998, ISBN 981-4021-09-1.