

Εθνικό Μετσοβίο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών τομέας ηλεκτρικών βιομηχανικών διατάξεων και σύστηματα αποφάσεων

Μελέτη, ανάλυση και μοντελοποίηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά των μονωτήρων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παρασκευά Η. Λεραντζή

ΔΙΠΛ. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Αθήνα, 28/04/2022

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παρασκευά Η. Λεραντζή

ΔΙΠΛ. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τίτλος:

"Μελέτη, ανάλυση και μοντελοποίηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά των μονωτήρων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας"

Επιβλέπων:

Νικόλαος Θεοδώρου

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Νικόλαος Θεοδώρου Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την Πέμπτη 28/04/2022.

Ν. Θεοδώρου

Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Θεοδώρου Ομ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευάγγελος Χριστοφόρου Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος Ομ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Ασκούνης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ελευθερία Πυργιώτη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών

Ιωάννης Γκόνος Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.





Παρασκευάς Η. Λεραντζής

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

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

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 στη 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.

Στη Μητέρα μου

...Να πεθαίνεις κάθε μέρα. Να γεννιέσαι κάθε μέρα. Ν' αρνιέσαι ό, τι έχεις κάθε μέρα. Η ανώτατη αρετή δεν είναι να 'σαι ελεύτερος, παρά να μάχεσαι για ελευτερία. Μην καταδέχεσαι να ρωτάς: «Θα νικήσουμε; Θα νικηθούμε;» Πολέμα! Η επιχείρηση του Σύμπαντου, για μιαν εφήμερη στιγμή, όσο ζεις, να γίνει επιχείρηση δική σου. Τούτος είναι, σύντροφοι, ο καινούριος Δεκάλογός μας!...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της Διατριβής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των πορσελάνινων μονωτήρων των γραμμών μεταφοράς. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για γραμμές Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσεως και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τη μέτρηση των θερμοκρασιακών μεταβολών τους.

Τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών και την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών. Αρχικά, οι μετρήσεις για διαφορετικές τιμές της έντασης του ρεύματος στους αγωγούς που συνδέονται με τους μονωτήρες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού των θερμοκρασιακών μεταβολών με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Επίσης, εφαρμόστηκαν τεχνικές ανέπαφων μετρήσεων (υπέρυθρη ακτινοβολία) με χρήση θερμικής κάμερας για την εκτίμηση και πρόβλεψη των τιμών της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας της θερμοκάμερας. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές των μονωτήρων υπό πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος μετρήθηκαν για διαφορετικά σημεία παρατήρησης από τη θερμική κάμερα και τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού των παραμέτρων (εκπεμπτικότητα) της θερμικής κάμερας που επηρεάζονται.

Επιπλέον, ελέγχθηκε η αξιοπιστία διάφορων μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης της τιμής της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας και με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων τρίτου βαθμού που αναπτύχθηκε βελτιστοποιήθηκε η μοντελοποίηση της σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές.

Τέλος, αναπτύχθηκε λογισμικό υπολογισμού των τιμών της μοντελοποίησης για την παραπάνω παράμετρο με χρήση κατάλληλης υπολογιστικής πλατφόρμας με στόχο να ελαχιστοποιηθεί η υποκειμενικότητα στην επιλογή του καταλληλότερου μονωτή.

<u>ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ</u>

Μονωτήρες, θερμοκρασία, μεταφορά θερμότητας, ροή θερμότητας, θερμοηλεκτρισμός, μέθοδος περασμένων στοιχείων, θερμοκάμερα, υπέρυθρη ακτινοβολία, εκπεμπτικότητα, μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων.

ABSTRACT

This Ph.D. thesis aims at the study of the electric behavior of the transmission line porcelain insulators. For the integrated study of the above subject experiments were carried out for the thermal flow along insulator used in the Hellenic transmission system for the suspension of high and ultra high voltage overhead transmission lines.

The experimental results that have arisen from this thesis were used in the development of calculating methods and the validation of the results of these methods. The measurements for different values of current flow were employed for the development of a method for calculating temperature changes in porcelain insulators, based on Finite Element Method (F.E.M.).

In addition a method based on infrared techniques was proposed for the estimation and the prediction of the values of the emissivity parameter on thermal camera. The temperature changes on insulators under real conditions, for different observation points of the thermal camera, were used to develop a method for calculating the emissivity parameter.

The efficiency of various mathematical models was looked into for predicting the value of the emissivity parameter and using the least squares method developed a model in order to minimize the calculation error between the model-estimated values and experimental values.

Finally a calculation technique was developed for the selection of the optimal least squares method type by Matlab. The main goal of this methodology is to minimize the subjectivity in the selection of the most suitable insulator for each examined case.

<u>KEYWORDS</u>

Insulators, temperature, heat transfer, heat flow, thermoelectricity, finite element method, thermalcamera, infrared emission, emissivity, least squares method.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, κατά τα έτη 2010 έως 2020, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικολάου Ι. Θεοδώρου και ασχολείται με τη μελέτη και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των μονωτήρων υψηλής τάσης στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της μέχρι τώρα επιστημονικής έρευνας επί του συγκεκριμένου αντικειμένου. Στην ανασκόπηση τα άρθρα ομαδοποιούνται ανάλογα με το περιεχόμενό τους σε αυτά που αναφέρονται: α) στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των μονωτήρων, καθώς και μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη λειτουργία τους, β) στις μεθόδους που υπάρχουν για την προσομοίωση, παρατήρηση και μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους, γ) στην υπέρυθρη θερμογραφία, με το συντελεστή εκπομπής (Εκπεμπτικότητα), τους τρόπους ανίχνευσης της και την εφαρμογή της και δ) σε μοντέλα παλινδρόμησης και μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων για πολυώνυμα διάφορων βαθμών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής. Δηλαδή η μελέτη της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς των μονωτήρων υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Διαπιστώνονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η μελέτη αυτών μέσα από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μελέτη και παρατήρηση όμως που έγινε, τόσο με τις κλασικές μεθόδους, όσο και με τη χρήση νέων ανέπαφων μεθόδων. Έτσι, με τη βοήθεια της θερμικής κάμερας και της υπέρυθρης ακτινοβολίας μελετήθηκε η θερμοκρασιακή συμπεριφορά των μονωτήρων καθώς και η μοντελοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζονται από την όλη διαδικασία.

Το τρίο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση της επιλογής του δοκιμίου, καθώς και την παρουσίαση όλων των πειραματικών διατάξεων, μεθόδων μέτρησης, προσομοιώσεων και μοντελοποιήσεων που έγιναν στο πλαίσιο στης διδακτορικής διατριβής.

Οι πειραματικές μετρήσεις, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και μοντελοποίησης, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο αναλυτικά.

Τα σχόλια, οι συγκρίσεις και τα συμπεράσματα επί των παραπάνω αποτελεσμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι το κύριο αντικείμενο που αναπτύσσεται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν και αναδεικνύεται η συμβολή της παρούσας εργασίας στην έρευνα.

Σ' αυτό το σημείο επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Νικόλαο Ι. Θεοδώρου. Νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη για την ανάθεση της διατριβής και την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγησή του κατά την ενασχόλησή μου με αυτή. Οι επιστημονικές του γνώσεις, οι πολύτιμες συμβουλές του σε όλα τα επίπεδα, το άριστο κλίμα συνεργασίας, η καθοριστική συμβολή του στην υπέρβαση κάθε προβλήματος και στη διασφάλιση των απαιτούμενων μέσων, αποτέλεσαν πολύτιμο αρωγό για την επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη για την υποστήριξή του, τη διαρκή καθοδήγησή του, τη συνεργασία, τις ιδέες του και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του. Η πολύχρονη εργαστηριακή του εμπειρία στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων, η σφαιρικότητα των γνώσεων του, αλλά και η διαρκής προθυμία του να προσφέρει τη βοήθειά του σε κάθε ανακύπτον πρόβλημα αποτέλεσαν πολύτιμο στήριγμα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Η ενθάρρυνσή του και τα εποικοδομητικά του σχόλια συνέβαλαν ουσιαστικά στην περάτωση της. Επίσης, για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω προς τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο για τη υποστήριξή του και την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Ιδιαίτερα οφείλω να ευχαριστήσω την Κυρία Αικατερίνη Πολυκράτη για την εργαστηριακή της βοήθεια, καθώς και τη διαρκή ενθάρρυνση, κατανόηση, συνεργασία και ανεξάντλητη υπομονή της.

Θερμά ευχαριστώ τους Υποψήφιους Διδάκτορες του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μετρήσεων για την υποστήριξή τους και τη συμβολή τους στις ιδέες και τις γνώσεις σε θέματα μετρήσεων.

Φυσικά δεν μπορών να παραλείψω τις ευχαριστίες μου προ την Κυρία Παρασκευή Βελισσαρίου που αγόγγυστα και με ιδιαίτερη προσοχή συνέβαλε στον τελικό έλεγχο της σύνταξης και δομής, ως προς την αγγλική γλώσσα, των άρθρων που στάλθηκαν προς δημοσίευση.

Ευχαριστώ, επίσης την Κυρία Ιωάννα Κούλπα για τη γραμματειακή υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Τέλος, αισθάνομαι το χρέος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, χωρίς τη βοήθεια και την ηθική και συναισθηματική στήριξη της οποίας η εκπόνηση της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Κυρίως, τη μητέρα μου που όλα αυτά τα χρόνια με περίσσια υπομονή, αγάπη και κατανόηση μου έδινε και μου δίνει θάρρος και υποστήριξη στις επιλογές μου.

Πίνακας Περιεχομένων Κεφαλαίων

ПЕРІЛНѰН6
ABSTRACT7
ΠΡΟΛΟΓΟΣδ
Πίνακας Περιεχομένων Κεφαλαίων11
Κεφάλαιο Ι ΕΙΣΑΓΩΓΗ15
1 Εισαγωγή15
1.1 Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά15
1.2 Σχέση θερμοκρασίας με μονωτήρα19
2 Αριθμητικές μέθοδοι 20
2.1 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού θερμοκρασιακών μεταβολών2
2.2 Κατηγοριοποίηση των αριθμητικών μεθόδων21
2.2.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)22
2.3 Πακέτο λογισμικού επίλυσης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων2
3 Π χρηση της υπεροορής σερμογραφίας για τη μεπετή σερμοκρασιακών μεταροπώς υλικών 23 3.1 Τεχνικές θερμογραφίας 31
3.2 Εφαρμογές-αναφορά σε ερευνητικές μελέτες33
4 Μοντελοποίηση συστήματος με χρήση παλινδρόμησης για τη μελέτη της σχέσης μεταξί
των μεταβλητών του 35
4.1 Απλό μοντέλο παλινδρόμησης για πρώτου βαθμού πολυώνυμο36
4.1.1 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για πρώτου βαθμού πολυώνυμο
4.1.2 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για δευτέρου βαθμού πολυώνυμο38
4.1.3 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για τρίτου βαθμού
πολυώνυμο40
Κεφάλαιο ΙΙ Σκοπός της εργασίας42
Κεφάλαιο ΙΙΙ Οι διατάξεις και οι μέθοδοι πειραματισμού44
1 Εισαγωγή 44

2	Επιλο	ογή δοκιμίου πειραματικής διάταξης	44
	2.1 Πε	α ματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών στο δ	οκίμιο
	για διαφ	ορετικές τιμές έντασης ρεύματος	46
	2.2 Oı	μέθοδοι και οι διατάξεις προσομοίωσης των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μονωτή	ρα για
	διαφορε	τικές τιμές έντασης ρεύματος	47
3	Διαδι	κασίες μέτρησης με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας	54
	3.1 Πε	ιραματική διάταξη μέτρησης μεταβολών θερμοκρασίας σε μονωτήρα με χρήση υπέρ	υθρης
	ακτινοβο	λίας για συγκεκριμένες γωνίες και διαφορετικές αποστάσεις	55
	3.2 Па	ειραματική διάταξη μέτρησης μεταβολών θερμοκρασίας σε μονωτήρα με χρήση υπέρ	υθρης
	ακτινοβο	λίας για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές γωνίες	56
4	Επιλο	ογή δοκιμίου πειραματικής διάταξης για μοντελοποίηση εκπεμπτικότητας θερ	μικής
К	αμερας _		50 57
	4.1 112		,
	4.Z Δ0	בסוגמסובל הסירבאסאסווןסוןל בגאבהאנוגסנוןנמל סבאהוול גמהבאמל	56
5	Η ακρ	οίβεια των μετρήσεων	61
1 2	Εισαγ Τα αι	/ωγή ποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων προσομοίωσ	63
- δ	οκίμιο μο	ονωτήρα πορσελάνης για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος.	63
	2.1 Απ τιμές έντ	ιοτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε δοκίμιο μονωτήρα πορσελάνης για διαφορ ασης ρεύματος	 ετικές 63
	2.1.1	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α σε χρονική διάρκεια 175 λεπτών	64
	2.1.2	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών	67
	2.1.3	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών	71
	2.1.4	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών	74
	2.1.5	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 350Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών	77
	2.1.6		81
	2.1.7	Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 400Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών	84
	2.2 Ал	ιοτελέσματα προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων σε δοκίμιο μονι	ωτήρα
	πορσελά	νης για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος	87
	2.2.1	Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α	90
	2.2.2	Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α	94
	2.2.3	Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α	97
	2.2.4	Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α	101

	2.2.5 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 350Α	104	
	2.2.6 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 375A		
	2.2.7 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 400A	111	
3	Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών σε μονο	οτήρα	
Пс	ορσελάνης για διαφορετικές θέσεις παρατήρησης	_ 115	
	3.1 Τα αποτελέσματα και οι γραφικές παραστάσεις για συγκεκριμένες γωνίες και διαφορ	ετικέ	
	αποστάσεις τοποθέτησης της θερμικής κάμερας	116	
	3.2 Αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές	ωνίε	
	τοποθέτησης θερμικής κάμερας	120	
4	Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και της μοντελοποίησης για διαφορετικές αποστ	άσει	
με	εταξύ δοκιμίου και θερμικής κάμερας	_ 125	
	4.1 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ δοκιμίου και θε	ομική	
	κάμερας	125	
	4.2.1 Μετρήσεις και μοντελοποίηση πρώτου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις	126	
	4.2.2 Μετρήσεις και μοντελοποίηση δευτέρου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις	129	
	4.2.3 Μετρήσεις και μοντελοποίηση τρίτου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις	133	
Κεφ	άλαιο V Σχόλια επί των μετρήσεων	_134	
1	Εισαγωγή	_ 134	
2	Σχόλια επί των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης	_ 134	
3	Σχόλια επί των πειραματικών μετρήσεων για διαφορετικές θέσης παρατήρηση	ς τοι	
δο	οκιμίου από τη θερμική κάμερα	_ 14:	
4	Σχόλια επί των αποτελεσμάτων μέτρησης και μοντελοποίησης	142	
		-	
κεφι	αλαιο VI: Συμπερασματα και συμβολη της διατριβης στην ερευνα και τις πρακ	τικε	
εφαι	ρμογές	_14;	
1	Γενικά	_ 147	
2	Ανακεφαλαίωση της διατριβής	_ 147	
3	Συμβολή της διατριβής		
4	Επέκταση της διατριβής	_ 154	
Παρ	άρτημα	_15	
Κατά	άλογος Σχημάτων	_158	
Κατά	άλονος Πινάκων	15	
	······································		

Βιβλιογραφία______160

Κεφάλαιο Ι ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικοί όροι και έννοιες που σχετίζονται με τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους, καθώς και μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη λειτουργία τους. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι που υπάρχουν για την προσομοίωση, παρατήρηση και μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους κατά τις θερμοκρασιακές μεταβολές, στις οποίες υπόκεινται στον κύκλο λειτουργίας τους. Επιπρόσθετα, δίνονται οι νέες μέθοδοι παρακολούθησης-παρατήρησης των θερμοκρασιακών μεταβολών στους μονωτήρες, (υπέρυθρη θερμογραφία), ορολογίες και παράμετροι που επηρεάζουν και απαιτούνται. Τέλος, παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις που μπορούν να περιγράψουν αυτές.

1.1 Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και των διαφόρων διατάξεων που συμμετέχουν σε αυτά είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή λειτουργία και απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως γραμμές Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσης (Υ.Τ. και Υ.Υ.Τ.) [1], προκειμένου να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής προς τους τελικούς καταναλωτές [2,3]. Οι αγωγοί λειτουργούν ως επί το πλείστον σε υψηλή τάση για να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες κατά τη μετάδοση και τη διανομή [4]. Χρειάζονται επίσης στήριξη κατά μήκος για τη διατήρησή τους σε ένα ορισμένο ύψος και απομονωμένοι από γειωμένα στηρίγματα [5]. Είναι βασική προϋπόθεση οι καλές ηλεκτρικές και μηχανικές δομές για να αντέξουν το ευρύ φάσμα των συνθηκών που προκύπτουν. Έτσι βασικό ρόλο εκτός των άλλων διαδραματίζουν τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά [6].

Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά

Είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [7].

Χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν και να διαχωρίζουν αγωγούς Υψηλής Τάσης [8,9]. Από το συνολικό κόστος μιας γραμμής μεταφοράς καταλαμβάνουν λιγότερο του 5%, εντούτοις παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην αξιοπιστία του συστήματος [10].

Σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα υλικά αυτά αναφέρονται ως μονωτήρες και πρέπει να καλύπτουν τόσο ηλεκτρικές, όσο και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση. Στις λειτουργικές ανάγκες καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν, εκτός άλλων, η επιφανειακή αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ) και η μηχανική αντοχή, που ορίζονται στη συνέχεια [11].

1) Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Είναι η αγωγιμότητα που αναπτύσσεται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών υλικών κατά την επικάθιση ρύπων σε αυτή [12]. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος και το εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας. Στα στερεά μονωτικά υλικά, η διηλεκτρική αντοχή μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη ,βροχή, χιόνι, αλάτι, υγρασία, ρύπανση) [13]. Έτσι, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Έχει συσχετιστεί με έννοιες που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους, που είναι σημαντικές στην πράξη για την κατασκευή μονωτήρων. Οι παραπάνω επιπτώσεις καθορίζουν, τόσο τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μονωτήρες, όσο και το σχεδιασμό τους, ειδικά στις κατηγορίες των μονωτήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικό χώρο. Κατά συνέπεια, οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, η ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από δυσμενείς συνθήκες και φυσικά το κόστος είναι οι παράμετροι που συμβάλουν καθοριστικά, στον τρόπο κατασκευής των μονωτήρων [14].

2) Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)

Είναι η ποσότητα θερμότητας (σε Watt) που περνά από τις απέναντι πλευρές ενός υλικού, πάχους ενός μέτρου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με ένα βαθμό Κέλβιν 1°Κ [15]. Επηρεάζεται από τη φύση του ίδιου του υλικού, τη δομή του, τη θερμότητα, την υγρασία και την πίεση. Η θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλή στα υλικά τα οποία αποκαλούνται θερμικά αγώγιμα, όπως είναι τα μέταλλα και είναι χαμηλή στα υλικά που αποκαλούνται θερμομονωτικά, γι

αυτό όσο μικρότερος είναι ο συγκεκριμένος συντελεστής ενός υλικού τόσο καλύτερη θερμομόνωση έχει [16].

3) <u>Η μηγανική αντογή</u>

Είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς των στερεών σωμάτων, όταν αυτά υπόκεινται σε φορτίσεις διαφορετικών τύπων, καθοριστικό ρόλο παίζουν οι μηχανικές ιδιότητές τους [17]. Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν, για τον υπολογισμό του, οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Συχνά ενδιαφέρει σε κατασκευές που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης. Η επιδίωξη αυτή πρέπει να συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης.

Ο καθοριστικός παράγοντας, μέσω του οποίου απορρέει η ως άνω πολυπλοκότητα, είναι η αδυναμία δημιουργίας ενός ιδανικά μη αγώγιμου στοιχείου στην πράξη. Όμως για την καλύτερη κατανόηση αυτών είναι σημαντική η μελέτη των κύριων μερών των μονωτήρων. Έτσι τα τρία κύρια μέρη των μονωτήρων είναι [18]:

- 1. <u>το μονωτικό (διηλεκτρικό)</u>
- 2. <u>οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηγανολογική</u> <u>δομή</u>
- 3. <u>τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο ή</u> <u>λιπαντικά</u>

Η πορσελάνη, το γυαλί ή το πολυμερές, που είναι συνήθως το διηλεκτρικό, απαιτείται να διατηρεί την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσει. Είναι πολύ σημαντικό να αντιστέκεται σε έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Επίσης, να ανθίσταται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπτών του δικτύου, χωρίς να διασπάται [19]. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι στην πράξη ηλεκτρικά αγώγιμες εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθήσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό, τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων [20]. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα (πυριτίου τα κεραμικά, άνθρακα τα πολυμερή), τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών [21]. Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ πολυμερών και κεραμικών υλικών βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και την ευθραυστότητα) και τέλος υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά και όχι μόνο, μέσα [22]. Μια συνήθης διαδικασία που υφίσταται το γυαλί στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές του ως μονωτικό υλικό είναι η σκλήρυνση που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής του αντοχής [23]. Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα [24]. Φυσικά, το σχήμα με τις κοιλότητες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, συμβάλει στη ρύπανση και ύγρανση σημαντικά.

Σε αντίθεση με τους παραπάνω, οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση [25]. Όμως, όλα τα πολυμερή αποσυντίθεται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών δεσμών τους από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανόν να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Δημιουργούν τρύπα με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η είσοδος στην υγρασία και να καταστρέφεται ο πολυεστερικός πυρήνας. Αυτό συνεπάγεται μείωση της μηχανικής αντοχής και τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας [26]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών υλικών είναι ότι το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου, που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, τους παρέχει τη δυνατότητα να διατηρούν το νερό με μορφή σταγόνων και να μην επιτρέπουν τη δημιουργία ροής του, έτσι ανθίσταται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση, περισσότερο απ' όσο τα κεραμικά υλικά. Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων [27] παρουσιάζεται στο Σχήμα Ι.1.1-1



Σχήμα Ι.1.1-1: Μία ταξινόμηση των μονωτήρων υψηλής τάσης

1.2 Σχέση θερμοκρασίας με μονωτήρα

Βασικός παράγοντας που επιδρά και επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών, που είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό γώρο, είναι οι μεταβολές της θερμοκρασίας σε αυτούς. Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός μονωτήρα μεταβάλλεται σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος τιμών σε πραγματικές συνθήκες [28]. Αυτό σε μεγάλο βαθμό οφείλεται και στην όλο και μεγαλύτερη χρήση αγωγών υψηλής θερμοκρασιακής ανοχής. Αυτό έχει δημιουργήσει ερωτήματα σχετικά με την επίδραση αυτών των μεγάλων θερμοκρασιών στην απόδοση όλων των εξαρτημάτων που συνδέονται με τον αγωγό, συμπεριλαμβανομένων και των μονωτήρων. Έτσι, ο μονωτήρας στον ηλεκτρικό εξοπλισμό πρέπει να έχει επαρκή θερμική και ηλεκτρική αντοχή [29]. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη να διερευνηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας στους μονωτήρες, όταν το ρεύμα που περνά από τον αγωγό γραμμής είναι υψηλό [30]. Οι περισσότεροι μονωτές πορσελάνης απαιτούν ακριβή προσδιορισμό της θερμοκρασίας σε διάφορες συνθήκες. Σημαντική έρευνα σχετικά με τις θερμοκρασιακές μεταβολές των υλικών που περιβάλουν τον αγωγό κατά την μετάδοση ρεύματος υψηλής έντασης έχει γίνει από τους Palhade R.D., Tungikar V.B., Dhole G.M. και Kherde S. M. [31].

Επιπλέον, τα διηλεκτρικά των μονωτήρων υφίστανται και θερμικές καταπονήσεις λόγο της αυξημένης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο οποίο μπορεί να βρίσκονται [32]. Έτσι η μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών στου μονωτήρες αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας τους, καθώς και των γραμμών μεταφοράς. Με βάση αυτό έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι για την προσομοίωση, παρατήρηση και μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους.

2 Αριθμητικές μέθοδοι

2.1 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού θερμοκρασιακών μεταβολών

Η επίλυση προβλημάτων θερμοκρασιακών μεταβολών των οποίων η πολυπλοκότητα είτε της υφιστάμενης γεωμετρίας, είτε του θεωρούμενου μέσου, είναι μεγάλη και δύσκολή γίνεται με χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι μονωτήρες που αποτελούν πολύπλοκο γεωμετρικό σώμα.

Βέβαια, στην περίπτωση των αριθμητικών μεθόδων, το πλεονέκτημα ότι επιλύονται προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες και μη γραμμικά μέσα «αντισταθμίζεται» από το γεγονός ότι δεν επιτυγχάνεται η εύρεση της ακριβούς λύσης του προβλήματος, αλλά μίας προσεγγιστικής λύση, η οποία όμως, όταν γίνεται κατάλληλη χρήση των μεθόδων, παρέχει την επιθυμητή ακρίβεια [33]. Η διαφορά αυτή προκύπτει, διότι δεν επιλύεται το πρόβλημα, όπως αυτό εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά επιλύεται κάποιο αντίστοιχο.

Έτσι, δεν υπολογίζεται η άγνωστη ποσότητα σε όλα τα σημεία του, αλλά σε έναν αριθμό «κατάλληλα» επιλεγμένων σημείων (κόμβων). Με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές των μεταβολών στους κόμβους που επελέγησαν. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρέχει τη προσεγγιστική λύση. Η λύση για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής. Επομένως, η επιλογή της διακριτότητας κατά την αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος αποτελεί το συμβιβασμό μεταξύ δύο αντιμαχόμενων παραγόντων:

- την εκλογή αρκετών κόμβων, ώστε το διακριτό πρόβλημα να προσεγγίζει αρκετά το αντίστοιχο συνεχές και τα αποτελέσματα να έχουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια [34] και
- την εκλογή λίγων κόμβων, ώστε το σύστημα εξισώσεων που θα προκύψει να επιλυθεί σε «λογικό» χρόνο από το διατιθέμενο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το σφάλμα προσέγγισης εξαρτάται μεν από τη διακριτότητα, είναι δε στενά συνυφασμένο με το είδος της χρησιμοποιούμενης μεθόδου.

2.2 Κατηγοριοποίηση των αριθμητικών μεθόδων

Οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1) <u>Διαφορικές μέθοδοι</u>

Χρησιμοποιούνται και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, υπό την προϋπόθεση ότι το υπό μελέτη μέγεθος έχει σαφώς καθορισμένα όρια. Είναι κατάλληλες για κλειστά προβλήματα, δηλαδή με περιορισμένες οριακές συνθήκες (limited boundary conditions). Στις διαφορικές μεθόδους, ανήκουν:

- Η μέθοδος των διαδοχικών επαναλήψεων, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως "μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών" (Finite Difference Method, FDM) [35]. Οι λύσεις που αποκτώνται δεν έχουν την απόλυτη ακρίβεια των αναλυτικών λύσεων. Σύμφωνα με τη βασική παραδοχή της μεθόδου η κατασκευή που είναι ένα συνεχές μέσο, αντικαθίσταται από ένα αντίστοιχο διακριτό, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας. Η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης εξαρτάται λοιπόν από το κατά πόσο η προσομοίωση προσεγγίζει τις αναλυτικές εξισώσεις ισορροπίας.
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) [36].
 Είναι για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων, αναλυτικά περιγράφεται στην ενότητα που ακολουθεί.

2) Ολοκληρωτικές μεθόδους

Χρησιμοποιούνται, για προβλήματα που τα υπό μελέτη μεγέθη εκτείνονται ως το άπειρο. Προτιμώνται σε ανοικτά προβλήματα, σε προβλήματα δηλαδή όπου έχουμε ανοικτές οριακές συνθήκες. Στις ολοκληρωτικές υπάγονται:

- Η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «μέθοδος προσομοίωσης φορτίου» (Charge Simulation Method, CSM) [37].
 Στη CSM η συνεχής πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια των αγωγών με οριακές συνθήκες αντικαθίσταται από πεπερασμένα εικονικά φορτία, τα οποία κατανέμονται στον όγκο των τελευταίων.
- Η μέθοδος των επιφανειακών τμημάτων, γνωστή και ως «μέθοδος των οριακών στοιχείων» (Boundary Element Method, BEM) [38]. Στη BEM φορτία τοποθετούνται στις συνοριακές επιφάνειες, καθώς και στις κοινές

επιφάνειες διαφορετικών υλικών, ενώ οι πηγές των φορτίων αρχικοποιούνται με τις οριακές συνθήκες που είναι γνωστές εκ των προτέρων.

Συγκρίσεις ανάμεσα στις διαφορετικές αριθμητικές μεθόδους έχουν δείξει ότι οι προσεγγίσεις μέσω CSM και BEM υπερτερούν λόγω χαμηλότερης πολυπλοκότητας και, ως εκ τούτου, μικρότερης χρονικής διάρκειας στο στάδιο της μοντελοποίησης των (FEM & FDM). Οι διαφορικές μέθοδοι (FEM & FDM) έχουν το μειονέκτημα ότι για μια ανάλυση πεδίου με ανοιχτές οριακές συνθήκες χρειάζονται ένα υπερβολικά μεγάλο πλήθος στοιχείων ή γραμμών πλέγματος, προκειμένου να μοντελοποιηθεί ο χώρος και οι άπειρης έκτασης περιοχές του. Ωστόσο, κερδίζουν έδαφος έναντι των προηγούμενων, καθώς σημαντικά λιγότερος χρόνος καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η γεωμετρία της αναλυόμενης διάταξης είναι εκείνη που καθορίζει το ποια από τις μεθόδους απαιτεί το λιγότερο χρόνο και είναι συνεπώς η πιο συμφέρουσα [39].

2.2.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για το βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε διάφορα επιστημονικά πεδία, όπως είναι ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών, η ακουστική, η θερμική ανάλυση, η μελέτη των δονήσεων, η προσομοίωση των συγκρούσεων, τα προβλήματα λυγισμού, οι δυναμικές αναλύσεις κ.α. [40]. Καλύπτει προβλήματα που περιλαμβάνουν πολύπλοκες γεωμετρίες και ιδιότητες υλικού που είναι δύσκολο να βρεθεί η ακριβής αναλυτική μαθηματική λύση. Η επίλυση του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, για κάθε πεπερασμένο στοιχείο που συνδυάζονται για να ληφθεί ένα σύστημα εξισώσεων για ολόκληρο το σώμα.

Βασικό κομμάτι της παραπάνω μεθόδου για τη βέλτιστη λύση των προβλημάτων που πραγματεύεται αποτελεί η χωρική διακριτοποίηση. Μέσω αυτής γίνεται μοντελοποίηση ενός σώματος με διαχωρισμό του σε ένα ισοδύναμο σύστημα μικρότερων σωμάτων διασυνδεδεμένων σε κοινά σημεία (κομβικά σημεία) ή/και σε συνοριακές γραμμές και επιφάνειες [41].

Η σύγχρονη ανάπτυξη της μεθόδου ξεκίνησε τη δεκαετία 1940 από τους Hrennikoff [42], McHenry [43], Newmark [44], Courant [45], και εξελίχθηκε αρκετά από τον R. Clough [46] μερικά χρόνια αργότερα, όπως και από Ιωάννη Ν.Αργύρη. 1954-55 [47] και Turner [48]. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίσθηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση [49].

Η ανάλυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στο γεγονός ότι ο χώρος (στον οποίο εκτείνεται το υπό μελέτη πεδίο) θεωρείται ότι απαρτίζεται από πολλά μικρά στοιχεία και οι εξισώσεις, από τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους (nodes ή nodal points) του συστήματος, προκύπτουν μέσα από διαδικασίες ελαχιστοποίησης κάποιων ενεργειακών εκφράσεων (συναρτησιακών) που περιλαμβάνουν τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη.

Με βάση τις παραδοχές αυτές, τα βασικά βήματα [50] της μεθόδου για ένα απλό δισδιάστατο ηλεκτροστατικό πρόβλημα με ζητούμενο πεδιακό μέγεθος το δυναμικό φ είναι τα ακόλουθα.

Αρχικά, σύμφωνα με το θεώρημα της ελάχιστης ενέργειας του Thomson, η πραγματική συνάρτηση δυναμικού φ(x,y) του πεδίου, που ικανοποιεί ως γνωστόν την εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{I.2.2.1-1}$$

ελαχιστοποιεί τη

$$W = \frac{1}{2}\varepsilon \iint (\nabla^2 \varphi) dx dy \tag{I.2.2.1-2}$$

που εκφράζει, προφανώς, την ανά μονάδα μήκους του συστήματος δυναμική ενέργεια. Καμιά άλλη συνάρτηση φ'(x,y) που ικανοποιεί τις ίδιες οριακές συνθήκες του προβλήματος δεν μπορεί να ικανοποιεί την (I.2.2.1-1) ή να ελαχιστοποιεί την (I.2.2.1-2).

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα επίλυσης που ακολουθεί η χρήση της μεθόδου.

1) <u>Διακριτοποίηση και επιλογή του στοιχείου.</u>

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην διακριτοποίηση του προβλήματος είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της. Περιλαμβάνει το διαμερισμό του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία που συνδέονται με κόμβους καθώς και την επιλογή του κατάλληλου στοιχείου ώστε να είναι πιο κοντά στην πραγματική φυσική συμπεριφορά. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, η διακύμανση στο μέγεθος και το είδος του στοιχείου εξαρτάται από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε. Η επιλογή του μεγέθους γίνεται έτσι ώστε να προσεγγίζουν εντός των απαιτούμενων ορίων την ακριβή λύση σε μικρό υπολογιστικό χρόνο. Μικρά στοιχεία είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται όταν τα αποτελέσματα μεταβάλλονται γρήγορα, για παράδειγμα όταν υπάρχουν αλλαγές στη γεωμετρία. Αντίθετα, μεγάλα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιούνται όταν τα αποτελέσματα είναι σχετικά σταθερά. Η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου, γεωμετρία, εξαρτάται από τη φυσική σύνθεση του σώματος κάτω από πραγματικές συνθήκες [51]. Για κάθε πρόβλημα, όμως, αποδεικνύεται ότι πέρα από κάποιον βέλτιστο αριθμό στοιχείων, η ακρίβεια της λύσης δεν αλλάζει σημαντικά με την περαιτέρω αύξηση των στοιχείων.

<u>Επιλογή της συνάρτησης μετατοπίσεων (Συνάρτηση Μορφής – Shape</u> <u>Function).</u>

Όταν η μετατόπιση μιας κατασκευής δεν μπορεί να προβλεφθεί αναλυτικά, γίνεται επιλογή μιας συνάρτησης που θα προσεγγίζει τη μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε κάθε στοιχείο [52]. Το πεδίο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να είναι μονοδιάστατο, δυο ή και τριών διαστάσεων. Στην περίπτωση του δισδιάστατου προβλήματος, το κάθε στοιχείο περιλαμβάνει τρεις ή τέσσερις κόμβους όπως απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα Ι.2.2.1-1: Τριγωνικό τρικομβικό στοιχείο σε δισδιάστατο πεδίο επίλυσης

μονωτήρων υψηλής τάσης

Η συνάρτηση δυναμικού στο τυχόν στοιχείο e με κορυφές *l,m,n* μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varphi(x, y) = a + bx + cy$$
 (I.2.2.1-3)

όπου οι σταθεροί συντελεστές *a, b, c*είναι καθορισμένοι όταν είναι γνωστά τα δυναμικά των κόμβων *l, m, n*.

Έτσι λοιπόν αν $\varphi_{l,}\varphi_{m,}\varphi_{n,}$ είναι τα δυναμικά των τριών κόμβων l,m,n και $(x_l, y_l), (x_m, y_m), (x_n, y_n)$ οι συντεταγμένες των αντίστοιχων κόμβων τότε:

$$\varphi_l = a + bx_l + cy_l \,, \tag{I.2.2.1-4}$$

$$\varphi_m = a + bx_m + cy_m, \tag{I.2.2.1-5}$$

$$\varphi_n = a + bx_n + cy_n \tag{I.2.2.1-6}$$

και σε μητρωική μορφή:

$$\begin{bmatrix} \varphi_l \\ \varphi_m \\ \varphi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Έτσι με βάση τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται τα ακόλουθα:

$$a = \frac{1}{2\Delta} [(x_m y_n - x_n y_m)\varphi_l + (x_n y_l - x_l y_n)\varphi_m + (x_l y_m - x_m y_l)\varphi_n]$$

$$b = \frac{1}{2\Delta} [(y_m - y_n)\varphi_l + (y_n - y_l)\varphi_m + (y_l - y_m)\varphi_n]$$

$$c = \frac{1}{2\Delta} [(x_n - x_m)\varphi_l + (x_l - x_n)\varphi_m + (x_m - x_l)\varphi_n]$$

όπου Δ είναι το εμβαδόν του τριγώνου που προκύπτει από την εξίσωση:

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_l (y_m - y_n)\varphi_l + x_m (y_n - y_l)\varphi_m + x_n (y_l - y_m)\varphi_n \end{bmatrix}$$

το εμβαδόν του στοιχείου e, οπότε

$$\varphi(x,y) = \frac{1}{2\Delta} [(a_l + b_l x + c_l y)\varphi_l + (a_m + b_m x + c_m y)\varphi_m + (a_n + b_n x + c_n y)\varphi_n]$$

όπου

$$a_l = x_m y_n - x_n y_m, \ b_l = y_m - y_n, \ c_l = x_n - x_m$$

 $a_m = x_n y_l - x_l y_n, \ b_m = y_n - y_l, \ c_m = x_l - x_n$

$$a_n = x_l y_m - x_m y_l, b_n = y_l - y_m, c_n = x_m - x_l$$
οπότε

$$\varphi(x,y) = \varphi_l \zeta_l(x,y) + \varphi_m \zeta_m(x,y) + \varphi_n \zeta_n(x,y) = \left[\zeta_l \ \zeta_m \ \zeta_n\right] \begin{bmatrix} \varphi_l \\ \varphi_m \\ \varphi_n \end{bmatrix}$$

όπου ζ_l , ζ_m , ζ_n , είναι συναρτήσεις που ονομάζονται συναρτήσεις μορφής (shapefunctions) του στοιχείου e, δίνονται δε από τις σχέσεις:

$$\zeta_l = \frac{1}{2\Delta} [(a_l + b_l x + c_l y)$$
$$\zeta_m = \frac{1}{2\Delta} [(a_m + b_m x + c_m y)$$
$$\zeta_n = \frac{1}{2\Delta} [(a_n + b_n x + c_n y)]$$

έτσι:

$$W = \frac{\varepsilon}{8\Delta} [(b_l \varphi_l + b_m \varphi_m + b_n \varphi_n)^2 (c_l \varphi_l + c_m \varphi_m + c_n \varphi_n)^2] \Longrightarrow W = \frac{1}{2} [\Phi]^T [A] [\Phi]$$

óπου

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \varphi_l \\ \varphi_m \\ \varphi_n \end{bmatrix}, [\Phi]^T = [\varphi_l \varphi_m \varphi_n] \text{ Kal } [A] = \begin{bmatrix} \alpha_{ll} & \alpha_{lm} & \alpha_{ln} \\ \alpha_{ml} & \alpha_{mm} & \alpha_{mn} \\ \alpha_{nl} & \alpha_{nm} & \alpha_{nn} \end{bmatrix}$$

Η μήτρα εξαρτάται μόνο από τις θέσεις των κορυφών του τριγωνικού στοιχείου e και από ένα συντελεστή ανάλογο προς τη διηλεκτρική σταθερά ε του στοιχείου.

3) <u>Φόρτιση των υλικών, αρχικές και συνοριακές συνθήκες.</u>

Μετά την διαίρεση του χωρίου και την δημιουργία των εξισώσεων που τα διέπουν, προσαρτώνται στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος πεδίου.

Σε ένα πρόβλημα επίλυσης πεδίου ροής απαιτούνται τόσο οι τιμές της συνάρτησης Φ σε όλο το πεδίο για χρόνο t=0 (αρχική συνθήκη), όσο και οι συναρτήσεις που δίνουν τις τιμές αυτής στους συνοριακούς κόμβους του πεδίου για κάθε χρονική στιγμή t (συνοριακές συνθήκες). Σε αυτή την περίπτωση όπου απαιτούνται αρχικές και συνοριακές συνθήκες, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα αρχικώνσυνοριακών τιμών. Σκοπός της εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών είναι:

- 1. Να αποδοθούν δυνάμεις και τάσεις στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί.
- Να επιβληθούν περιοριστικές δυνάμεις, ώστε να κρατηθεί το μοντέλο σε ισορροπία.

Η εφαρμογή αυτών διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο ανάλογα με την γεωμετρία, τον τρόπο φόρτισης και το επιθυμητό αποτέλεσμα του προβλήματος.

Δεομένων των προαναφερθέντων, υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών [53] :

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Dirichlet. Οι συνθήκες Dirichlet (essential boundary conditions) προδιαγράφουν άμεσα την συνάρτηση Φ στους συνοριακούς κόμβους ορίζοντας την τιμή της λύσης σε αυτούς.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δυο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.
- 4) Μητρώο δυσκαμψίας και εξισώσεις.

Καθορίζονται οι εξισώσεις του πίνακα που εκφράζουν τις ιδιότητες των στοιχείων σχηματίζοντας ένα πίνακα δυσκαμψίας. Ο καθορισμός του πίνακα δυσκαμψίας μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες μεθόδους:

• <u>Μέθοδος άμεσης ισορροπίας (Direct Equilibrium Method)</u>.

Εδώ, το μητρώο δυσκαμψίας εκφράζει τις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής.

• <u>Αρχή δυνατών έργων (Work or Energy Method)</u> [54].

Βασίζεται στον υπολογισμό του έργου των εξωτερικών φορτίων και της εσωτερικής ενέργειας η οποία προκύπτει καθώς ο φορέας υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων παραμορφώνεται.

Μέθοδος σταθμικών υπολοίπων (Method of Weighted Residuals) [55].
 Προσεγγιστική λύση των διαφορικών εξισώσεων με τη θεώρηση δοκιμαστικών συναρτήσεων για τις χαρακτηριστικές μετατοπίσεις του προβλήματος.

5) <u>Μετατροπή του μητρώου δυσκαμψίας στο γενικό σύστημα αζόνων και</u> εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.

Περιλαμβάνει τη μετατροπή του μητρώου δυσκαμψίας από το τοπικό (local) σύστημα συντεταγμένων στο γενικό (Global) σύστημα συντεταγμένων. Κατόπιν καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες [56] όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, θερμοκρασίες κ.λπ.

6) Επίλυση των άγνωστων βαθμών ελευθερίας.

Μετά τον καθορισμό το μετασχηματισμό και τις συνοριακές συνθήκες ακολουθεί η επίλυση του συστήματος. Για τον υπολογισμό των άγνωστων βαθμών ελευθερίας γίνεται επίλυση ενός γραμμικού συστήματος που είναι αρκετά εύκολος [57].

7) <u>Υπολογισμός των παραμορφώσεων και τάσεων.</u>

Από τις γνωστές κομβικές μετατοπίσεις, μπορούν να υπολογισθούν οι τάσεις και παραμορφώσεις κάθε στοιχείου χρησιμοποιώντας τις απαραίτητες σχέσεις.

<u>Σύνθεση όλων των στοιχείων, υπολογίζοντας τη συνεισφορά τους στη</u> <u>συνολική ενέργεια του συστήματος.</u>

Λόγω της απαίτησης συνεχούς μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού στα κοινά όρια των γειτονικών στοιχείων, τα δυναμικά φ(x,y) που αντιστοιχούν σε αυτά και αντιπροσωπεύουν στην ουσία τον ίδιο κόμβο, οφείλουν να έχουν την ίδια τιμή.

2.3 Πακέτο λογισμικού επίλυσης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Τα κυριότερα πακέτα λογισμικού που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι των ANSYS, ABAQUS, SOLVIA και PATRAN [58]. Βασίζονται στις αλληλεπιδράσεις όλων των αρχών της φυσικής, της κλασσικής μηχανικής, της δυναμικής των μηχανών, της μηχανικής των ρευστών, της μεταφοράς θερμότητας και του ηλεκτρομαγνητισμού για τους μηχανικούς. Μέσω του σχεδιασμού και των προσομοιώσεων σε τρισδιάστατο εικονικό περιβάλλον, επιτρέπουν τη δοκιμή σε κατάλληλες συνθήκες της συμπεριφοράς πρωτότυπων προϊόντων προκειμένου να αναδειχθούν οι κρίσιμες σχεδιαστικές επιλογές του σχεδιαστή ώστε να επιτύχει βελτιστοποίηση.

Μελέτες και μοντελοποιήσεις, έχουν πραγματοποιηθεί με όλα και βασίζονται στις ίδιες σχεδιαστικές αρχές λειτουργίας [59]. Σημαντική μελέτη σχετικά με τις

θερμοκρασιακές μεταβολές, στις οποίες υπόκεινται τα μονωτικά υλικά όταν συνδέονται με αγωγούς που διαρρέονται από ρεύματα μεγάλης έντασης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει από τους Palhade R.D., Tungikar V.B., Dhole G.M. και Kherde S.M. [60]. Κυρίως, έχει γίνει ανάλυση και μοντελοποίηση του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού για σύνθετους μονωτήρες υψηλής τάσης, στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω από ένα συνθετικό μονωτήρα, όταν στους ακροδέκτες αυτού εφαρμόζεται Υψηλή Τάση (Υ.Τ.) [61]. Επιπλέον, έχει γίνει ανάλυση, μέσω δυσδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων, της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την ανάρτηση γραμμών Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσεως [62]. Σε δισδιάστατα μοντέλα έχει διερευνηθεί και η ηλεκτρική απόδοση των μονωτήρων πορσελάνης και γυαλιού σε εξωτερικό χώρο, όταν υφίστανται τάση AC 11 kV [63]. Ειδικά στον τομέα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα και τα αποτελέσματα είναι αξιοσημείωτα.

3 Η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας για τη μελέτη θερμοκρασιακών μεταβολών υλικών

Η μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών των υλικών μπορούν να γίνουν τόσο με τις κλασικές μεθόδους μετρήσεων, όσο και με χρήση ανέπαφων μεθόδων. Μία από τις σημαντικότερες τεχνικές που τα τελευταία χρόνια βρίσκει μεγάλο πεδίο εφαρμογών είναι η υπέρυθρη θερμογραφία [64]. Είναι μη καταστρεπτική, γιατί δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο, γρήγορη και με μεγάλη ακρίβεια καταγραφής [65].

• <u>υπέρυθρη θερμογραφία</u>

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί μια εξαιρετική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου Non-destructive Tests (NDT) [66]. Γενικά ο όρος θερμογραφία αναφέρεται στο σύνολο των τεχνικών καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός αντικειμένου, ανεξάρτητα από το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζονται. Ειδικότερα, ο όρος υπέρυρθρη θερμογραφία αφορά την ανίχνευση της θερμικής ακτινοβολίας της θερμικής ακτινοβολίας [67] που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός

υλικού ή ενός σώματος, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Καλύπτει την περιοχή από 1 mm έως $7*10^{-7}$ m για μέτρηση και καταγραφή H ένταση, η συχνότητα και το μήκος της υπέρυθρης ακτινοβολίας ελέγχεται βασικά από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της πηγής και από την ικανότητα εκπομπής του υλικού [68]. Η μέθοδος θερμογραφικής επιθεώρησης [69], χρησιμοποιεί την απεικόνιση θερμικών μοτίβων [70,71]. από την επιφάνεια του αντικειμένου [72] με τη χρήση κάποιου τύπου ανιχνευτή υπερύθρων [73]. Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας για την εξέταση υλικών χρησιμοποιείται για τον καθορισμό: υγρασίας [74], φθοράς και ζημιών [75], συμβατότητας των εξεταζόμενων υλικών [76,77]. κάτι που στις μέρες μας βρίσκει αρκετές εφαρμογές. Οι εταιρείες τη χρησιμοποιούν ήδη ως τεχνική πρόγνωσης για συντήρηση σε υποσταθμούς και εξοπλισμό γραμμών μεταφοράς.

Καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία αυτή παίζει ο συντελεστής εκπομπής ε, (emissivity).

• <u>συντελεστής εκπομπής ε, (emissivity)</u>

Αποδίδει το μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός σώματος, που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε συγκεκριμένη θερμοκρασία [78]. Μαθηματικά, ο φασματικός συντελεστής εκπομπής ε ισούται με το λόγο της ενέργειας που εκπέμπει ένα αντικείμενο, προς την ενέργεια που εκπέμπει το μέλαν σώμα, για την ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος [79,80]. Η βασική αρχή για τον προσδιορισμό του βασίζεται στο ότι κατά την πρόσκρουση της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε ένα σώμα ένα μέρος της ανακλάται, άλλο απορροφάται και άλλο διαπερνά το σώμα. Το ποσό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται αυξάνει το ενεργειακό περιεχόμενο των στοιχειωδών σωματιδίων του, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Η εκπεμπτικότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υπό μελέτη αντικειμένου [81,82]. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του υπό μελέτη δοκιμίου, όπως και η αναλογία του μεγέθους του σημειακού φωτός του φακού, καθώς έτσι μπορεί να προσδιοριστεί το ελάχιστο μέγεθος του αντικειμένου που μπορεί να εξεταστεί. Το μέγεθος αυτό διαφοροποιείται, αφού εξαρτάται από το φακό και την κάμερα [83,84]. Οι τιμές της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας στις θερμικές κάμερες [85,86] είναι ο βασικότερο παράγοντας για την αποτελεσματική εξαγωγή του τρόπου της μεταφοράς της θερμότητας [87,88]. Είναι σημαντικό να γρησιμοποιείται η σωστή τιμή του δείκτη εκπεμπτικότητας κατά τη μέτρηση της

θερμοκρασίας, αποφεύγοντας έτσι λάθη που δεν συμφωνούν με τα τελικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια δοκιμών ή επιθεωρήσεων [89].

Σχετικά με το ρόλο και την επίδραση του συντελεστή εκπομπής και της παραμέτρου της απόστασης σε μελέτη ηλεκτρολογικών υλικών, έχει παρουσιαστεί εκτενέστατη μελέτη από τους Wanderley N.Ε.Τ., Da Costa E.G., Maia M.J.A. το 2006 [90]. Συγκεκριμένα, για την επιθεώρηση διαφορετικών υλικών, παρουσίασαν έρευνα με θερμικές εικόνες. Για διαφορετικά υλικά και αποστάσεις της θερμικής κάμερας από την επιφάνεια των δοκιμίων, απεικόνισαν τις μεταβολές στην τιμή της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας. Έτσι, οδηγήθηκαν σε αξιοσημείωτα αποτελέσματα που έδειξαν ότι, η μη σωστή καταχώρηση του συντελεστή εκπομπής, στη θερμική κάμερα και η μη σωστή απόσταση της τελευταίας από το δοκίμιο, για διαφορετικής υφής επιφάνειες, οδηγούν σε εσφαλμένη διάγνωση ή αποτυχίες στην προληπτική συντήρηση των εξοπλισμών. Ο θερμογραφικός έλεγχος, όταν διεξάγεται καλά, είναι ένας ακριβής και πολύ αποδοτικός τρόπος για τη συντήρηση εξοπλισμών, δεδομένου των τιμών της εκπεμπτικότητας, την κατάσταση της επιφάνειας των αντικειμένων, καθώς και της απόστασης παρατήρησης.

3.1 Τεχνικές θερμογραφίας

Η θερμογραφία υπερύθρου χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια. Το κύριο πλεονέκτημα της θερμογραφίας έναντι των κλασικών μεθόδων μη καταστροφικών δοκιμών έγκειται στη δυνατότητα επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών με γρήγορο και ασφαλή τρόπο, χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει πρόσβαση και στις δύο πλευρές του υπό έλεγχο αντικειμένου. Ωστόσο, η θερμογραφία υπερύθρου περιορίζεται στον εντοπισμό σχετικά ρηχών ατελειών (σε βάθος μερικών χιλιοστών κάτω από την επιφάνεια) επειδή επηρεάζεται από τη διάχυση της θερμογραφία υπερύθρου μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική. Αυτοί οι δυο τύποι θερμογραφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται ανάλογα με το εάν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται ή όχι σε θερμική ισορροπία [91].

1) <u>παθητική προσέγγιση (passive)</u>

Εξετάζει υλικά που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασιακή κλίμακα από το περιβάλλον (συνήθως υψηλότερη), δηλαδή, αφορά σε εφαρμογές που το υλικό περιέχει τη δική του πηγή θερμότητας (π.χ. το ανθρώπινο σώμα). Κατά τη μέθοδο αυτή καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας. Οι σημαντικές εφαρμογές της παθητικής προσέγγισης είναι στην παραγωγή, προληπτική συντήρηση, ιατρική, πυρανίχνευση δασών, προγράμματα θερμικής αποδοτικότητας κτιρίων, έλεγχος οδικής κυκλοφορίας, γεωργία και βιολογία, ανίχνευση αερίου και μη καταστρεπτικές δοκιμές [92]. Καθώς δεν υπάρχει εξωτερική πηγή θερμότητας, τα εξαρτήματα που χρειάζονται για μια θερμογράφηση είναι υπέρυθρη κάμερα, οπτικά εξαρτήματα (τηλεσκόπια, μηχανισμοί εστίασης και ζουμ), τρίποδας στήριξης, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και εξοπλισμός ανάλυσης, συσκευή μαγνητοσκόπησης (σε ορισμένες περιπτώσεις), ηλεκτρονικός υπολογιστής (αν και η επεξεργασία εικόνας μπορεί να γίνει σε κάποια άλλη στιγμή), γεννήτρια (σε ορισμένες περιπτώσεις).

2) ενεργητική προσέγγιση (active)

Απαιτείται εξωτερική πηγή διέγερσης των υλικών που εξετάζονται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της δομικής θερμογραφίας για την ανίχνευση ασυνεχειών – ελαττωμάτων σε ένα υλικό ή σε μία κατασκευή, τόσο για το εξωτερικό όσο και για το εσωτερικό της. Δηλαδή, μπορεί να σχηματιστεί μια θερμική τομογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας. Έχουν γίνει πολλές εφαρμογές, οι οποίες όμως παρουσιάζουν δυσκολία στην εφαρμογή τους κυρίως στις εκτεταμένες κατασκευές για τρεις λόγους:

- Σε μια κατασκευή τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο.
- 2. Η κατάσταση φθοράς της κατασκευής, που τροποποιεί τις φυσικές (πορώδες, θερμική αγωγιμότητα) και τις οπτικές παραμέτρους (ανάκλαση, συντελεστή εκπομπής) της επιφάνειας, θεμελιώδεις για τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων υλικών, είναι σε μεγάλο βαθμό ανομοιογενής.
- Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες δε μπορούν να παραμετροποιηθούν με ακρίβεια σε ένα θερμοδυναμικό μοντέλο του συστήματος κατασκευής περιβάλλοντος.

Δεδομένου της πολυπλοκότητας των φαινομένων και της ανομοιογένειας που παρουσιάζει πολλές φορές μια κατασκευή, κρίνεται απαραίτητο να προηγείται συλλογή οποιονδήποτε πληροφοριών [93] για την υπό εξέταση κατασκευή [94,95]. Τα εξαρτήματα που χρειάζονται για μια θερμογράφηση είναι, κάμερα υπερύθρου (imager) με κατάλληλους φακούς, τρίποδας στήριξης της κάμερας, επεξεργαστής και monitor, καταγραφέας, προσωπικός υπολογιστής για την επεξεργασία θερμογραφημάτων και πηγή θερμικής διέγερσης.

Για να θερμανθεί το υλικό χρησιμοποιούνται, υψηλής ισχύος κινηματογραφικές λάμπες (high power cinematographic lamps), υπέρυθρες λάμπες χαλαζία (quarz line infrared lamps), υψηλής ισχύος φωτογραφικά φλας (high power photographic flashes), ακτίνα Laser (Laser beam) και συσκευές θερμότητας (heat gun), εκτοξευτές θερμού νερού/αέρα (heat water/air jets), σάκοι θερμού νερού (hot air bags).

Η θέση του ανιχνευτή ως προς την πηγή θερμότητας είναι πολύ σημαντική. Υπάρχουν δύο δυνατότητες διάταξης:

- ο ανιχνευτής και η πηγή θερμότητας βρίσκονται στην ίδια πλευρά ως προς την υπό εξέταση επιφάνεια, όπου καταγράφεται η ανακλώμενη από την επιφάνεια ακτινοβολία και
- ο ανιχνευτής και η πηγή θερμότητας βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές της εξεταζόμενης επιφάνειας όπου καταγράφεται η ακτινοβολία που διαπερνά την επιφάνεια.

Με τη θέρμανση με ανάκλαση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ανάλυση του εξεταζόμενου υλικού, αλλά το πάχος του εξεταζόμενου υλικού είναι μικρό. Από την άλλη όταν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία διαπερνά την επιφάνεια δίνει πληροφορίες για μεγαλύτερο πάχος υλικού αλλά σε μειωμένη ανάλυση. Επίσης η χρήση της καθίσταται δύσκολη σε σύνθετα υλικά – κατασκευές.

3.2 Εφαρμογές-αναφορά σε ερευνητικές μελέτες

Οι εφαρμογές διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1) Στην παραγωγή (production)

Επιθεώρηση σε ηλεκτρονικές πλακέτες [96] για την ανίχνευση των συγκολλήσεων και των κακών - υπερθερμαινόμενων στοιχείων [97,98].

- Ποιοτικός έλεγχος στα ίχνη συγκόλλησης [99,100]. Εξετάζεται έτσι η ποιότητα [101], καθώς και το βάθος διείσδυσης [102,103].
- Καταγραφή θερμοκρασιών για την επιθεώρηση γυάλινων μπουκαλιών κατά τη διαδικασία παραγωγής τους. Έτσι, το πάχος των μπουκαλιών καθώς και το

κόστος παραγωγής μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, μετρώντας το ρυθμό ψύξης [104].

- Καταγραφή θερμοκρασιών για τον ποιοτικό έλεγχο χυτών χαλύβδινων υλικών
 [105].
- Παρακολούθηση της ποιότητας παραγωγής των υψηλής ποιότητας χαρτιών
 [106].
- 2) Στη διατήρηση-συντήρηση- διάγνωση (maintenance)
- Επιθεώρηση των πτερυγίων στροβίλων σε κινητήρες αερίων, είτε κατά τη διάρκεια συντήρησης, είτε κατά το στάδιο παραγωγής [107,108].
- Θερμικές μονώσεις κτιρίων [109], θερμαινόμενων δαπέδων [110].
- Επιθεώρηση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων [111,112].
- Στην Ιατρική: στον εντοπισμό διαταραχών του μυο-σκελετικού συστήματος [113,114], στη διάγνωση του καρκίνου του μαστού, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια. Είναι γεγονός ότι η υπέρυθρη θερμογραφία αναπτύχθηκε στην ιατρική πριν χρησιμοποιηθεί σε άλλες μη στρατιωτικές εφαρμογές [115].
- Έλεγχος του κυκλοφοριακού σε δρόμους [116,117].
- Ανίχνευση πυρκαγιών σε δάση χρησιμοποιώντας είτε εναέρια, είτε βασισμένα στο έδαφος συστήματα [118,119].
- Εφαρμογές στην επιστήμη της βιολογίας, όπως παρατηρήσεις στη συμπεριφορά των νυχτερίδων [120].
- Έρευνα, παρατήρηση, παρακολούθηση στόχων. Ασφάλεια-φρούρηση [121].
- Ανίχνευση διαστρωμάτωσης δομικών υλικών σε τοιχοποιίες [122].
- Ανερχόμενη και παραμένουσα υγρασία σε τοιχοποιίες [123], κτίρια, μνημεία και ιστορικά σύνολα [124,125].
- Ρωγμές σε υλικά και κατασκευές [126,127].

4 Μοντελοποίηση συστήματος με χρήση παλινδρόμησης για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών του

Η μοντελοποίηση συστήματος με χρήση της διαδικασίας της παλινδρόμησης είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στατιστική τεχνική μοντελοποίησης για την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Χρησιμοποιείται με σκοπό την εκχώρηση δεδομένων σε μία πραγματική μεταβλητή πρόβλεψης [128], όπως ισχύει και στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης όταν είναι διακριτή, αλλιώς καλείται παλινδρόμηση αν η μεταβλητή είναι συνεχής [129]. Η παλινδρόμηση προϋποθέτει ότι τα σχετικά δεδομένα ταιριάζουν με μερικά γνωστά είδη συνάρτησης και μετά καθορίζει την καλύτερη συνάρτηση αυτού του είδους που μοντελοποιεί τα δεδομένα που έχουν δοθεί [130].

Αποτέλεσμα της παλινδρόμησης όταν χρησιμοποιείται ως τεχνική εξόρυξης δεδομένων, αποτελεί ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις τιμές της κατηγορίας για τα νέα δεδομένα. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της παλινδρόμησης αποτελεί η πρόβλεψη της ζήτησης για ένα νέο προϊόν ή υπηρεσία συναρτήσει των δαπανών διαφήμισης ή ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ατμοσφαιρική πίεση του περιβάλλοντος.

Πρόκειται για μία διαδικασία που βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται σχετικά η εξαρτημένη μεταβλητή όταν μία από τις ανεξάρτητες μεταβάλλεται ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές. Η πρώτη από τις μεθόδους παλινδρόμησης εμφανίζεται το 1805 και είναι γνωστή μέχρι και σήμερα ως η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων [131,132].

<u>Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (MET)</u> χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γραφικής παράστασης που περιγράφει ένα φαινόμενο, όταν γνωρίζουμε μόνο μια σειρά από πειραματικές τιμές των μεγεθών που το περιγράφουν και όχι την ακριβή μαθηματική σχέση τους (τύπο). Στην πραγματικότητα, κατά τη μελέτη ενός φαινομένου, προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τη μορφή της άγνωστης μαθηματικής σχέσης, στην οποία ταιριάζουν καλύτερα τα πειραματικά μας δεδομένα, ελέγχοντας μια σειρά γνωστών σχέσεων.

<u>Εφαρμογή της (MET)</u> σε φυσικά φαινόμενα μπορούν να περιγράφονται με μια μαθηματική σχέση που συνδέει τα μεγέθη που τα επηρεάζουν, π.χ.: θερμοκρασία – εκπεμπτικότητα. Τα μεγέθη που μεταβάλλονται ανεξάρτητα από την πορεία του φαινομένου είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές ενώ εκείνα που μεταβάλλονται συναρτήσει αυτών και περιγράφουν το φαινόμενο είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές.

Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Legendre και Gauss στο ζήτημα του προσδιορισμού των τροχιών αστρικών σωμάτων γύρω από τον ήλιο μέσω αστρονομικών παρατηρήσεων. Ο όρος «παλινδρόμηση» επινοήθηκε από τον Francis Galton, [133] εξάδελφο του Καρόλου Δαρβίνου, τον 19ο αιώνα στην προσπάθειά του να περιγράψει ένα βιολογικό φαινόμενο: το ύψος ατόμων με προγόνους μεγάλου ύψους παλινδρομούσαν προς τα κάτω με τάση προς μια κανονική μέση τιμή [134].

4.1 Απλό μοντέλο παλινδρόμησης για πρώτου βαθμού πολυώνυμο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην αρχή η Παλινδρόμηση (Regression) είναι μια στατιστική τεχνική μοντελοποίησης για την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Το βασικό μοντέλο παλινδρόμησης όπου υπάρχει μια μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή και η συνάρτηση παλινδρόμησης μπορεί να παρασταθεί ως εξής [135]:

 $Y_i = aX_i + b + ε_i$ όπου:

- Υ_i είναι η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στην i-οστή δοκιμή.
- Οι *a, b* άγνωστοι σταθεροί συντελεστές.
- *X_i* είναι η τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής στην i-oστή δοκιμή.
- $ε_i$ είναι ένα τυχαίο σφάλμα για το οποίο ισχύουν οι υποθέσεις Gauss Markov με $E{ε_i} = 0$

Για να βρούμε "καλούς" εκτιμητές για τις παραμέτρους παλινδρόμησης *a, b,* χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Για τις παρατηρήσεις (Y_i , X_i) της κάθε περίπτωσης, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων θεωρεί ότι η απόκλιση των από την αναμενόμενη τιμή είναι $Y_i - (aX_i + b)$. Ειδικότερα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων τετραγωνικών αποκλίσεων, δηλαδή το $\sum_{i=1}^{n} (Y_i - (aX_i + b))^2$.
4.1.1 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για πρώτου βαθμού πολυώνυμο

Η Παλινδρόμηση αποτελεί μία στατιστική μέθοδο η οποία αποσκοπεί στον προσδιορισμό ενός μαθηματικού μοντέλου για την περιγραφή, ερμηνεία, πρόβλεψη των τιμών ενός χαρακτηριστικού (μεταβλητής) σε σχέση με τις τιμές ενός πλήθους άλλων χαρακτηριστικών (μεταβλητών).

Ένα πρώτου βαθμού πολυώνυμο έχει τη μορφή:

$$Y = \alpha X + \beta \tag{I.4.1.1-1}$$

Είναι γνωστό ότι:

- Υ = εξαρτημένη μεταβλητή.
- $X = \alpha v \epsilon \xi \dot{\alpha} \rho \tau \eta \tau \eta \mu \epsilon \tau \alpha \beta \lambda \eta \tau \dot{\eta}$.
- Οι α, β πραγματικοί αριθμοί σταθεροί συντελεστές.

Για 2n μετρήσεις της Y και των αντίστοιχων τιμών της X έχουμε (Y_i, X_i) , ..., (Y_n, X_n) . Ο υπολογισμός των σταθερών α και β για να προσαρμοστεί καλύτερα η παραπάνω σχέση προς τις 2n αυτές μετρήσεις με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων έχουμε [136]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} (Y(X_i) - Y_i)^2 \Longrightarrow \Phi = \sum_{i=1}^{n} (\alpha X_i + \beta - Y_i)^2$$
(I.4.1.1-2)

Ελαχιστοποίηση της παραμέτρου Φ δηλαδή Φ = Φ(β, α), minΦ(β, α) αν ισχύουν οι (Ι.4.1.1-3) ÷ (Ι.4.1.1-7) για την ακρίβεια μόνο οι (Ι.4.1.1-3), (Ι.4.1.1-5) και (Ι.4.1.1-7) ή μόνο οι (Ι.4.1.1-4), (Ι.4.1.1-6) και (Ι.4.1.1-7).

$$\frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 2\sum_{i=1}^{n} (\alpha X_i + \beta - Y_i) X_i = 2\alpha \sum_{i=1}^{n} X_i^2 + 2\beta \sum_{i=1}^{n} X_i - 2\sum_{i=1}^{n} Y_i X_i = 0$$
(I.4.1.1-3)

$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta} = 2\sum_{i=1}^{n} (\alpha X_i + \beta - Y_i) = 2\alpha \sum_{i=1}^{n} X_i + 2n\beta - 2\sum_{i=1}^{n} Y_i = 0$$
(I.4.1.1-4)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \alpha^2} = 2 \sum_{i=1}^n X_i^2 > 0$$
 (I.4.1.1-5)

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} = 2n > 0 \tag{I.4.1.1-6}$$

$$\left(\frac{\partial \Phi^2}{\partial \alpha \partial \beta}\right)^2 - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} = 4\sum_{i=1}^n (X_i)^2 - 2\sum_{i=1}^n 2n(X_i^2) < 0$$
(I.4.1.1-7)

$$\begin{cases} (I.4.1.1-3) => \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} + \beta \sum_{i=1}^{n} X_{i} = \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} \\ (I.4.1.1-4) => \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i} + n\beta = \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \end{bmatrix} => \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} Y_i & 2i = 1 \\ \sum_{i=1}^{n} Y_i & n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} X_i^2 & \sum_{i=1}^{n} X_i \end{vmatrix}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i \sum_{i=1}^{n} X_i - n \sum_{i=1}^{n} Y_i X_i}{(\sum_{i=1}^{n} X_i)^2 - n \sum_{i=1}^{n} X_i^2}$$

και

$$\beta = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i} & n \end{vmatrix}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{i}\sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} - n\sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2}\sum_{i=1}^{n} Y_{i}}{(\sum_{i=1}^{n} X_{i})^{2} - n\sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2}}$$

4.1.2 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για δευτέρου βαθμού πολυώνυμο

Η μορφή του πολυωνύμου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$Y(X) = aX^2 + \beta X + \gamma$$
 (I.4.1.2-1)

Για 2n πλήθος μετρήσεων σκοπός είναι ο υπολογισμός των α, β και γ με στόχο να προσαρμοστεί η σχέση ως προς τις 2n αυτές μετρήσεις, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Έχουμε:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} (Y(X_i) - Y_i)^2 \Longrightarrow \Phi = \sum_{i=1}^{n} (aX_i^2 + \beta X_i + \gamma - Y_i)^2$$

Θέλουμε Φ = Φ(α, β, γ), minΦ(α, β, γ) αν (Ι.4.1.2-2) ή (Ι.4.1.2-3) ή (Ι.4.1.2-4) και (Ι.4.1.2-5).

$$\frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i=1}^{n} (\alpha X_{i}^{2} + \beta X_{i} + \gamma - Y_{i}) X_{i}^{2} = 2 (\sum_{i=1}^{n} \alpha X_{i}^{4} + \sum_{i=1}^{n} \beta X_{i}^{3} + \sum_{i=1}^{n} \gamma X_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} Y_{i} X_{i}^{2}) = 0$$
(I.4.1.2-2)
$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta} = 2 \sum_{i=1}^{n} (\alpha X_{i}^{2} + \beta X_{i} + \gamma - Y_{i}) X_{i} = 2 (\sum_{i=1}^{n} \alpha X_{i}^{3} + \sum_{i=1}^{n} \beta X_{i}^{2} + \sum_{i=1}^{n} \gamma X_{i} - \sum_{i=1}^{n} Y_{i} X_{i}) = 0$$
(I.4.1.2-3)
$$\frac{\partial \phi}{\partial \gamma} = 2 \sum_{i=1}^{n} (\alpha X_{i}^{2} + \beta X_{i} + \gamma - Y_{i}) = 2 (\sum_{i=1}^{n} \alpha X_{i}^{2} + \sum_{i=1}^{n} \beta X_{i} + \gamma - Y_{i}) = 0$$
(I.4.1.2-4)

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma^{2}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha^{2}} \end{vmatrix} > 0 (I.4.1.2-5.1) \div (I.4.1.2-5.3)$$

όπου

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \gamma^2} > 0 \tag{I.4.1.2-5.1}$$

επίσης

$$\begin{array}{c} \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta^{2}} \end{array} > 0 \qquad (I.4.1.2-5.2) \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \beta^{2}} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} \end{array} > 0 \qquad (I.4.1.2-5.3) \\ \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \gamma \partial \alpha} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \alpha^{2}} \end{array}$$

ή από τις (Ι.4.1.2-4) και (Ι.4.1.2-5) αρκεί να ισχύει

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} = 2n > 0$$

ισχύει

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} I \\ \sum_{i=1}^{n} X_i & \sum_{i=1}^{n} X_i^2 \end{vmatrix} > 0$$

ισχύει λόγω ανισότητας Gauss και

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} I & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} I & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \end{vmatrix} > 0$$

$$Opi\zetaovta\zeta Z_{1} \triangleq 1 \triangleq \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, Z_{2} \triangleq \begin{bmatrix} X_{1} \\ \vdots \\ X_{n} \end{bmatrix}, Z_{2} \triangleq \begin{bmatrix} X_{i}^{2} \\ \vdots \\ X_{n}^{2} \end{bmatrix}$$

$$explay= \begin{cases} Z_{1}^{2} & Z_{1}Z_{2} & Z_{1}Z_{3} \\ Z_{2}Z_{1} & Z_{2}^{2} & Z_{2}Z_{3} \\ Z_{3}Z_{1} & Z_{3}Z_{2} & Z_{3}^{2} \end{cases} > 0$$

που ισχύει για γραμμικώς ανεξάρτητα Z_1 , Z_2 , Z_3 , που είναι προφανώς ανεξάρτητα. Από τις (I.4.1.2-2) ÷ (I.4.1.2-4) έχουμε:

$$\alpha = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & n \end{vmatrix}$$

$$\gamma = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i} & n \end{vmatrix}$$

4.1.3 Παλινδρόμηση με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για τρίτου βαθμού πολυώνυμο

Η μορφή του πολυωνύμου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$Y(X) = \alpha X^3 + \beta X^2 + \gamma X + \delta \tag{I.4.1.3-1}$$

Για 2n πλήθος μετρήσεων, ο υπολογισμός των α, β, γ και δ έχει:

$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \beta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \gamma}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 \Phi}$	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \beta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \gamma}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 \Phi}$	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \gamma}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \gamma}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma^2}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma^2}$	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \delta \partial \alpha}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \delta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma \partial \delta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma \partial \delta}$	=	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \delta^2}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma \partial \delta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \delta}$ $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2 \Phi}$	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma \partial \delta} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma^2} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma^2} $	$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \delta} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \gamma} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \gamma} $	$ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \delta \partial \alpha} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta \partial \delta} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial \beta} $	> 0 (I.4.1.3-6)
δ φ	<u></u> <i>∂β∂δ</i>	σφ	$\frac{\partial \delta^2}{\partial \delta^2}$		<u></u> <i>δ</i> δ <i>δ</i> α	<u></u> <i>∂β∂δ</i>	<u></u> <i>α∂β</i>	$\frac{\partial \alpha^2}{\partial \alpha^2}$	

Οι παραπάνω εξισώσεις οδηγούν στις ακόλουθες σχέσεις.

$$\begin{split} \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{6} + \beta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} + \gamma \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} + \delta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} &= \sum_{i=1}^{n} Y_{i} X_{i}^{3} \\ \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} + \beta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} + \gamma \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} + \delta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} &= \sum_{i=1}^{n} Y_{i} X_{i}^{2} \\ \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} + \beta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} + \gamma \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} + \delta \sum_{i=1}^{n} X_{i} &= \sum_{i=1}^{n} Y_{i} X_{i} \\ \alpha \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} + \beta \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} + \gamma \sum_{i=1}^{n} X_{i} + \sum_{i=1}^{n} \delta &= \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \\ \frac{\partial^{2} \phi}{\partial \alpha^{2}} &= 2 \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{6} > 0 , \\ \frac{\partial^{2} \phi}{\partial \beta^{2}} &= 2 \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} > 0 , \\ \frac{\partial^{2} \phi}{\partial \gamma^{2}} &= 2 \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} > 0 , \\ \frac{\partial^{2} \phi}{\partial \delta^{2}} &= 2n > 0 \end{split}$$

Μπορεί να αποδειχθεί, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, για την ελαχιστοποίηση του $\Phi(\delta, \gamma, \beta, \alpha)$ από τις (Ι.4.1.3-2) ÷ (Ι.4.1.3-5) έχουμε:

$$\gamma = \frac{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_{i}X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{6} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{3} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{4} \\ \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} & \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{5} \\$$

Κεφάλαιο ΙΙ Σκοπός της εργασίας

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο Ι διαπιστώνεται ότι παρουσιάζει ενδιαφέρον να διερευνηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας στους μονωτήρες, όταν το ρεύμα που περνά από τον αγωγό γραμμής είναι υψηλό. Αυτό προκύπτει από την ανάγκη να έχουν επαρκή θερμική και ηλεκτρική αντοχή, σημαντικοί παράγοντες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας τους, καθώς και των γραμμών μεταφοράς που είναι τοποθετημένοι.

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε το φαινόμενο των θερμοκρασιακών μεταβολών που παρουσιάζεται σε ένα μονωτήρα πορσελάνης όταν ο αγωγός που είναι σε επαφή διαρρέεται από διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος. Οι μετρήσεις έγιναν, τόσο με κλασικές μεθόδους, όσο και με νέες ανέπαφες για σταθερή και μεταβαλλόμενη θέση του οργάνου παρατήρησης. Επιπλέον, με χρήση κατάλληλης μαθηματικής μεθόδου (μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, F.E.M), έγινε προσπάθεια να αναλυθούν, να περιγραφούν και να προσομοιωθούν οι μεταβολές αυτές. Τέλος για τις ανέπαφες μεθόδους παρατήρησης έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης των παραμέτρων των μέσων μέτρησης που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την καλύτερη πρόβλεψη και παρατήρηση των μεταβολών.

Αναλυτικά, αρχικά μέσα από την προσεκτική επιλογή του δοκιμίου σχετικά με τα χαρακτηριστικά του και τη δημιουργία της κατάλληλης πειραματικής διάταξης κυκλώματος θα παρουσιαστούν οι πειραματικές μετρήσεις που προκύπτουν για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος και πώς αυτές επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε συγκεκριμένα σημεία του, στα οποία έχουν τοποθετηθεί κατάλληλοι αισθητήρες. Η άνω πειραματική διάταξη με τη βοήθεια ειδικού εξειδικευμένου προγράμματος βασισμένου σε αριθμητικά μοντέλα θα δημιουργηθεί και θα προσομοιωθεί κάτω από τις, κατά το δυνατόν, ρεαλιστικότερες συνθήκες με τις πειραματικές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των περασμένων στοιχείων.

Στη συνέχεια, σύμφωνα με διαδικασία των ανέπαφων μετρήσεων για την καταγραφή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του δοκιμίου με στόχο τη μοντελοποίηση της, καθώς και το πώς επηρεάζεται η μετρούμενη τιμή της από τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου θα γίνει χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια κατάλληλης θερμικής κάμερας για

διαφορετικά σημεία παρατήρησης. Θα γίνει προσπάθεια να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα σχετικά με τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία μέτρησης των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μονωτήρα πορσελάνης. Συγκεκριμένα, για διαφορετικές τιμές απόστασης και γωνίας παρατήρησης του δοκιμίου από τη θερμική κάμερα πώς πρέπει να μεταβληθεί η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας στην τελευταία για πιο ακριβείς μετρήσεις.

Το τελευταίο βήμα οδήγησε στην προσπάθεια μοντελοποίησης της παραμέτρου με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για πολυώνυμο πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού. Αναπτύχθηκε λοιπόν σχετικός αλγόριθμος μεταβολής της παραμέτρου εκπεμπτικότητας που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ασφαλή εξαγωγή μετρήσεων και πρόβλεψης των θερμοκρασιακών μεταβολών της συμπεριφοράς του μονωτήρα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Φυσικά όλα τα αποτελέσματα από όλα τα βήματα της διδακτορικής διατριβής θα παρουσιαστούν, θα αναλυθούν και θα συγκριθούν οδηγώντας στα συμπεράσματα και τη συμβολή της εργασίας στην έρευνα.

Κεφάλαιο ΙΙΙ Οι διατάζεις και οι μέθοδοι πειραματισμού

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται οι διατάξεις μέτρησης και οι μέθοδοι πειραματισμού για όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται στο σκοπό της εργασίας. Για τη μελέτη και ανάλυση του φαινομένου της επίδρασης των θερμοκρασιακών μεταβολών στους πορσελάνινους μονωτήρες αρχικά λήφθηκε υπόψη το γεγονός ότι η θέρμανση των μονωτήρων πέρα από ένα όριο μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση σε ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους όπως ενδεικτικά παρουσίασαν οι Fujii et al.'s [137] μέσα από εργαστηριακή έρευνα. Στις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν ακολουθήθηκαν τυπικές διαδικασίες όπως αυτές ορίζονται στους κανονισμούς με βάση τις οποίες γίνεται η αξιολόγηση και οι μετρήσεις στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές υψηλών τάσεων.

2 Επιλογή δοκιμίου πειραματικής διάταξης

Αρχικά, το δοκίμιο που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων είχε τα χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στο σχήμα ΙΙΙ.2-1 και είναι ίδιο με τους πορσελάνινους μονωτήρες που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ στο δίκτυό της. Στον πίνακα ΙΙΙ.2-1 δίνονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα ΙΙΙ.2-1: Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πορσελάνινου μονωτήρα σε mm.

Εφαρμογή	Υψηλής-Τάσης
Υλικό	Πορσελάνη
Δομή	Μονωτήρας
Τύπος	Pin
Χρήση	Μεταφορά υπερυψηλής τάσης
Βάρος	11(Kgr)

Πίνακας ΙΙΙ.2-1: Χαρακτηριστικά πορσελάνινου μονωτήρα.

2.1 Πειραματική διάταξη και διαδικασία μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών στο δοκίμιο για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος

Στο σχήμα ΙΙΙ.2.1-1 δίνεται ένα απλοποιημένο σχέδιο της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Αυτή αποτελείται από έναν μετασχηματιστή υψηλού ρεύματος, συσκευή που χρησιμοποιείται για να μετασχηματίσει το ρεύμα στην επιθυμητή τιμή του ρεύματος που απαιτείται στο κύκλωμα, συνδεδεμένο στους ακροδέκτες του με τα άκρα ενός αγωγού ACSR μήκους 2m διατομής 35mm². Λόγω του μικρού μήκους του αγωγού δεν απαιτείται αντιστάθμιση επαγωγής κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Ο πορσελάνινος μονωτήρας είναι τύπου καμπάνας. Οκτώ αισθητήρες θερμοκρασίας PT-100 που τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα ΙΙΙ.2.1-1.

Κανονική τιμή αντίστασης	100 Ω σε 0 °C
Εύρος Μετρήσεων	-50 °C μέχρι +230 °C
Μέτρηση Ρεύματος	Max 1 mA
Κύκλωμα	2 ζευγών
Τάση Μόνωσης	2.5 kV

Πίνακας ΙΙΙ.2.1-1: Χαρακτηριστικά αισθητήρων ΡΤ-100.

Αυτοί τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία στον πορσελάνινο μονωτήρα, ο πρώτος (ονομαζόμενος AI1) απέχει περίπου 10mm από το λαιμό του, εδώ πρέπει να συμπληρωθεί ότι είναι σχεδόν σε επαφή με τον αγωγό, ο δεύτερος, ο τέταρτος στην κορυφή του μονωτήρα (ονομάζονται AI2, AI4), ο τρίτος στην αριστερή πλευρά (AI3), τα άλλα τρία (που ονομάζονται AI5, AI6, AI7) στο κάτω μέρος κάθε πλευράς και ο τελευταίος (ονομάζεται AI8) στο κάτω μέρος στη υποδοχή που υπάρχει για τη στήριξή. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πορσελάνινος μονωτήρας ήταν καθαρός από κάθε μορφή ρύπανσης που μπορεί να επηρέαζε τη συμπεριφορά του στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του σχήματος ΙΙΙ.2.1-1 έγινε ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων για συγκεκριμένες τιμές εφαρμοζόμενης έντασης ρεύματος από 250Α έως 400Α στον αγωγό του δοκιμίου και παρατηρήθηκε πως αυτές επηρέασαν τις θερμοκρασιακές μεταβολές στο μονωτήρα. Οι μετρήσεις έγιναν με συγκεκριμένο εύρος χρονικής διάρκειας από 105 έως 175 λεπτά. Οι συνθήκες που

πραγματοποιήθηκαν ήταν συνθήκες εργαστηρίου, για θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 22,8 °C και σχετική υγρασία 39%.



Σχήμα ΙΙΙ.2.1-1: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης μέτρησης, 1:Μετασχηματιστής, 2:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 3:Ψηφιακό θερμόμετρο.

2.2 Οι μέθοδοι και οι διατάξεις προσομοίωσης των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μονωτήρα για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος

Η χρήση προσεγγιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων έχουν το πλεονέκτημα επίλυσης πολύπλοκων γεωμετρικών κατανομών επιτυγχάνοντας μία λύση αρκετά κοντά στην επιθυμητή ακρίβεια. Συγκεκριμένα, μέσω αυτών δεν υπολογίζουμε την άγνωστη ποσότητα που μελετάμε σε όλα τα σημεία, αλλά σε αριθμό επιλεγμένων στοιχείων (κόμβων). Έτσι λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γεωμετρία του μονωτήρα και το σκοπό της μελέτης της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μονωτήρα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι η πλέον ενδεδειγμένη [138]. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [139,140] η ευελιξία της μεθόδου FEM [141,142] έγκειται στην ικανότητά της να μοντελοποιεί σύνθετες κατασκευές, με πολύπλοκα υλικά σε ποικιλία ορίων και συνθηκών και εύκολα να προσαρμοστεί σε διαφορετικά σύνολα εξισώσεων [143], γεγονός που την καθιστά εξαιρετικά σοβαρή και αξιόπιστη λύση για προσομοίωση διανομής θερμοκρασίας [144] όπως προαναφέραμε. Το κλειδί της μεθόδου αυτής είναι η σωστή επιλογή σημείων προς μελέτη.

Με το πρόγραμμα προσομοίωσης (ANSYS) και συγκεκριμένα τη βοήθεια του ενσωματωμένου εργαλείου στην εφαρμογή (Designer), σχεδιάστηκε τρισδιάστατο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη τη δομή και τη γεωμετρία του μονωτήρα πορσελάνης. Στο επόμενο βήμα αποδόθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υλικών που τον αποτελούν. Αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά υλικά (πορσελάνη, σκυρόδεμα, άσφαλτο και σίδηρο). Το μοντέλο μονωτή-αγωγού έχει συγκεκριμένες διαστάσεις που είναι ίδιες με το πειραματικό μοντέλο. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης ήταν σε συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας παρόμοιες με αυτές του εργαστηρίου. Επιπλέον, ο αγωγός που μεταφέρει το ρεύμα είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με τον πειραματικό και ακολουθήθηκε ο ίδιος αριθμός χρονικών βημάτων για την καταγραφή των θερμοκρασιακών μεταβολών.

Η μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις επέτρεψε να ληφθούν υπ' όψη όλα τα στοιχεία τα συνδεόμενα με το μονωτήρα κάτι που οδήγησε σε αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Μέσα από τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε επεξεργασία κατανομής και εξάχθηκαν οι γραφικές παραστάσεις αλλαγών θερμοκρασίας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων είναι σύμφωνα με δεδομένα που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό.

Για της ανάγκες της παρούσας διδακτορικής διατριβής το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ANSYS που είναι διαθέσιμο στο Κέντρο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Στα σχήματα III.2.2-1 έως III.2.2-4 παρουσιάζονται ενδεικτικά η διάταξη του μονωτήρα με τον αγωγό από διαφορετικές γωνίες παρατήρησης όπως αυτή δημιουργήθηκε με τη χρήση του προγράμματος ANSYS. Για τις ανάγκες της κατασκευής ήταν αναγκαίος ο διαχωρισμός των εργασιών σε διακεκριμένα στάδια. Τα στάδια αυτά ήταν πέντε, όπως ορίζονται και από το πρόγραμμα [145].

 Κατασκευή γεωμετρίας: Στο περιβάλλον του ANSYS με τη χρήση διαδοχικών σημείων (keypoints), γραμμών (lines), επιφανειών (areas) και τέλος όγκων (volumes), δημιουργήσαμε το γεωμετρικό σχήμα.

- Ορισμό των μηγανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιγείων: Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών ορίστηκαν μονοσήμαντα, με ιδιαίτερη προσοχή να δίνεται στις μονάδες που ελέχθησαν να είναι σε SI.
- 3. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιγεία και επιβολή των οριακών συνθηκών: Αφού έγινε η επιλογή των στοιχείων, έγινε η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Εδώ ακολουθήθηκαν οι επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές ήταν η αυτόματη δημιουργία πλέγματος, ο ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές με τον ορισμό μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς ή ακμής) καθώς και η επιλογή του Smart Size η οποία έκανε προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία. Αναλυτικά η επιλογή Smart Size δίνει τη δυνατότητα να μικραίνουν τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και να αραιώνουν στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση. Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω ακολούθησε η δημιουργία του πλέγματος στο δοκίμιο που προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε στον καθορισμό ισοπαραμετρικά συζευγμένων [146] στοιχείων πεδίου (Πίνακας ΙΙΙ.2.2-1).

Plane223	\square	2-D 8-κόμβοι τετργώνου
Solid226		3-D 20-κόμβοι εξάεδρου
Solid227	\triangle	3-D 10-κόμβοι τετράεδρου

Πίνακας ΙΙΙ.2.2-1: Ισοπαραμετρικά συζευγμένα στοιχεία πεδίου στους κόμβους

Το τετράπλευρο 8-κόμβων επιτρέπει τη μετατροπή του σε τρίγωνο 6 κόμβων και επιπλέον σε συμπεριφορά επιπέδου 2-D και μοντελοποιεί συμμετρικές γεωμετρίες 3-D. Το 3-D με 20-κόμβους εξάεδρο στοιχείο μπορεί να μετατραπεί σε τετράεδρο με 10 κόμβους, ή πυραμίδα 13 κόμβων ή πρίσμα 15-

κόμβων. Φυσικά η διαφορά θερμοκρασίας από το μηδέν στο απόλυτο μηδέν καθορίστηκε, γιατί ήταν σε μονάδες διαφορετικές από τις τιμές Kelvin.

- 4. Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό μη γραμμικό μεταβατικό υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση: Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έγινε με γραμμική στατική ανάλυση μικρών μετατοπίσεων που κάλυπτε τις ανάγκες μας. Φυσικά, για την επίλυση προσφέρονται πολλές δυνατότητες, οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης και διαφορετικό χρόνο επίλυσης. Υπάρχουν επιλύτες που χρησιμοποιούν περισσότερο το σκληρό δίσκο για ενδιάμεσα αρχεία ή τη φυσική μνήμη. Για τις ανάγκες της μελέτης μας χρησιμοποιήσαμε επιλύτες με χρήση της μνήμης, γιατί η ταχύτητα της είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου και η ακρίβεια είναι σχεδόν ίδια.
- 5. <u>Ανάγνωση και γραφική αναπαράστασή των αποτελεσμάτων:</u> Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφηκαν σε ένα αρχείο (*.rst). Η ανάγνωσή τους είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα, είτε μέσω ενός απλού κειμενογράφου ή του κειμενογράφου που έχει η εφαρμογή. Στην περίπτωσή μας ακολουθήθηκε η δεύτερη επιλογή.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-1: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-2: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα, (κάτοψη).



Σχήμα III.2.2-3: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα από κάτω.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-4: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα τομή.

Στο σχήμα III.2.2-5 παρουσιάζεται ενδεικτικά η δενδροειδής απεικόνιση των υλικών και των τμημάτων που αποτελούν το υπό προσομοίωση δοκίμιο, όπως προκύπτουν μετά τη σχεδίαση.

Iree Outline	4
E → Seometry	
🕀 🗸 XYPlane	
VZPlane	
ironR ironR	
⊞	
⊞	
i porcelainR	
📺 🗤 🖟 aluminiumE	
i∰× 🖪 AirE	
📺 🛶 🚾 remove_cylynderE	
⊨	
remove_cycle	
😑 🗸 👘 5 Parts, 5 Bodies	
📦 ASPHALT_Solid	
GONCRETE_Solid	
Sketching Modeling	

Σχήμα ΙΙΙ.2.2-5: Δενδροειδής απεικόνιση των υλικών του δοκιμίου.

Η επιλογή του πλέγματος έγινε στο τρίτο στάδιο και απεικονίζεται στο σχήμα III.2.2-6.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-6: Απεικόνιση τομής του δοκιμίου μετά τη δημιουργία του πλέγματος.

Δενδροειδής απεικόνιση των υλικών του δοκιμίου μετά τη δημιουργία του πλέγματος και των καθορισμένων εργαστηριακών συνθηκών παρουσιάζεται στο σχήμα III.2.2-7.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-7: Δενδροειδής απεικόνιση των υλικών του δοκιμίου μετά τη δημιουργία του πλέγματος και των καθορισμένων εργαστηριακών συνθηκών.

Στο σχήμα III.2.2-8 που ακολουθεί παρουσιάζονται το διάγραμμα ροής με τις συνδέσεις και σχέσεις των δεδομένων του χώρου, του δοκιμίου και του αγωγού για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.



Σχήμα ΙΙΙ.2.2-8: Διάγραμμα ροής και συνδέσεων στο πρόγραμμα ANSYS
1:Γεωμετρία χώρου, 2:Γεωμετρία πορσελάνινου μονωτήρα,
3:Γεωμετρία αγωγού, 4:Δεδομένα-χαρακτηριστικά για το
περιβάλλον, δοκίμιο, αγωγό, 5:Συνθήκες θερμοκρασίας χώρου,
6:Συνθήκες θερμοκρασίας πορσελάνινου μονωτήρα,7 Συνθήκες
θερμοκρασίας αγωγού.

3 Διαδικασίες μέτρησης με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι πειραματικές μετρήσεις των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μονωτήρα, που είδαμε για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος στον αγωγό, καθώς και η προσομοίωση τους, μας οδήγησαν στην αναζήτηση νέων μεθόδων μέτρησης, όπως είναι η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αυτές έγιναν με τη βοήθεια θερμικής κάμερας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Ανάλυση θερμοκάμερας	640x480 (307,200pixels)
Θερμική ευαισθησία	<0.05 °С оε 30 °С
Εύρος μετρούμενων θερμοκρασιών	-20 °C έως +800 °C

Πίνακας ΙΙΙ.3-1: Χαρακτηριστικά θερμικής κάμερας.

3.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης μεταβολών θερμοκρασίας σε μονωτήρα με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας για συγκεκριμένες γωνίες και διαφορετικές αποστάσεις

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα μονωτήρα υψηλής τάσης, τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν περιγραφεί στον πίνακα ΙΙΙ.2.1-1. Στην επιφάνεια του είναι τοποθετημένοι 6 αισθητήρες PT-100 κατάλληλοι για την καταγραφή των θερμοκρασιακών μεταβολών. Τα χαρακτηριστικά τους έχουν παρουσιαστεί στον πίνακα ΙΙΙ.2.1-2. Αυτοί συνδέθηκαν με ψηφιακό θερμόμετρο για την απεικόνιση των θερμοκρασιακών μεταβολών, καθώς και την αποθήκευση αυτών. Για τη θέρμανση του μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε εξωτερική θερμαντική συσκευή, τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργεί τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στους μονωτήρες που είναι τοποθετημένοι έξω σε πραγματικές συνθήκες. Για κάθε μέτρηση, η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας άλλαξε έτσι ώστε η θερμοκρασία μέτρησης να συμπίπτει με τη θερμοκρασία που μετρήθηκε από τους αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις.

Στις μετρήσεις που έγιναν μεταβλήθηκε η θέση για συγκεκριμένες γωνίες στόχευσης και διαφορετικές αποστάσεις. Για τη συλλογή και επεξεργασία όλων των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός υπολογιστής με το αντίστοιχο λογισμικό. Η σχηματική απεικόνιση των παραπάνω παρουσιάζεται στο σχήμα ΙΙΙ.3-1.



Σχήμα ΙΙΙ.3-1: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης για συγκεκριμένη γωνία 0° και θ°, 1: Υπολογιστής καταγραφής μετρήσεων, 2: Ψηφιακό θερμόμετρο, 3:Θερμική κάμερα, 4:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 5:PT-100 Αισθητήρες θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας.

Η οριζόντια απόσταση μεταξύ της θερμικής κάμερας και του μονωτήρα, απεικονίζεται, όπως φαίνεται και από το σχήμα με το ℓ. Η γωνία τοποθέτησης της θερμικής κάμερας σε σχέση με την οριζόντια θέση απεικονίζεται με θ.

3.2 Πειραματική διάταξη μέτρησης μεταβολών θερμοκρασίας σε μονωτήρα με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές γωνίες

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα μονωτήρα υψηλής τάσης με χαρακτηριστικά που έχουν περιγραφεί πίνακα ΙΙΙ.2.1-1. Η σχηματική απεικόνιση των παραπάνω παρουσιάζεται στο σχήμα ΙΙΙ.3-2.



Σχήμα ΙΙΙ.3-2: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές γωνίες, 1:Υπολογιστής καταγραφής μετρήσεων, 2:Ψηφιακό θερμόμετρο, 3:Θερμική κάμερα, 4:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 5:PT-100 Αισθητήρες θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας.

Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές γωνίες γύρω από το δείγμα. Για κάθε μέτρηση η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας άλλαξε, έτσι ώστε η θερμοκρασία μέτρησης να συμπίπτει με τη θερμοκρασία που μετρήθηκε από τους αισθητήρες PT-100.

4 Επιλογή δοκιμίου πειραματικής διάταξης για μοντελοποίηση εκπεμπτικότητας θερμικής κάμερας

Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων είχε τα χαρακτηριστικά, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο σχήμα ΙΙΙ.2-1 και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που δόθηκαν στον πίνακα ΙΙΙ.2-1.

4.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης εκπεμπτικότητας θερμικής κάμερας

Για την ανίχνευση των μεταβολών της θερμοκρασίας σε μονωτήρες πορσελάνης επί τόπου με χρήση θερμικής κάμερας, δημιουργήθηκαν μοντέλα προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας. Τα μαθηματικά μοντέλα βασίστηκαν στη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων και οδήγησαν στη δημιουργία πολυωνυμικής συνάρτησης με συγκεκριμένα σημεία καμπής. Τα στάδια της δημιουργίας, επαλήθευσης και επικύρωσης των μοντέλων βασίστηκαν σε πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια συνολικά πέντε κύκλων μετρήσεων στο δείγμα πορσελάνινου μονωτήρα.

Η πειραματική διάταξη, στην οποία πραγματοποιήθηκαν, είχε τη δομή που απεικονίζεται στο σχήμα ΙΙΙ.4.1-1.



Σχήμα ΙΙΙ.4.1-1: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης, 1:Υπολογιστής καταγραφής μετρήσεων, 2:Ψηφιακό θερμόμετρο, 3:Θερμική κάμερα, 4:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 5:PT-100 Αισθητήρες θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας, 7:Βάση Δεδομένων.

Αποτελείται από μία ψηφιακή θερμική κάμερα ευθυγραμμισμένη οπτικά με τον πορσελάνινο μονωτήρα που αποτέλεσε και το δείγμα δοκιμής. Η κάμερα, όπως έχει περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα, έχει τη δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας, και των μεταβολών της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας, καθώς και της αποθήκευσης όλων των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά που έχει έχουν περιγραφεί στον πίνακα ΙΙΙ.3-1. Ο πορσελάνινος μονωτήρας είναι τύπου pin, (αναλυτική περιγραφή με τα χαρακτηριστικά του έχει δοθεί στον πίνακα ΙΙΙ.2.1-1) είχε καθαρή επιφάνεια (χωρίς υγρασία, σκόνη και οποιοδήποτε άλλο υλικό) και θερμάνθηκε ομοιόμορφα από μια ελεγχόμενη θερμαντική διάταξη. Στην επιφάνεια του δείγματος τοποθετήθηκαν έξι διαφορετικοί αισθητήρες θερμοκρασίας PT-100 (χαρακτηριστικά τους περιγράφονται στον πίνακα III.2.1-2). Συγκεκριμένα στην κορυφή, στη μέση, στη μέση αριστερά, στη μέση δεξιά, κάτω αριστερά και κάτω δεξιά, αντίστοιχα. Αυτοί οι αισθητήρες είναι πολύ ευαίσθητοι και ακριβείς για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Καθώς το δείγμα θερμάνθηκε, ένας ψηφιακός μετρητής θερμοκρασίας συνέλεξε τα δεδομένα μέσω των αισθητήρων θερμοκρασίας PT-100, σε πραγματικό χρόνο και τα αποθήκευσε σε έναν προσωπικό υπολογιστή. Τα βήματα των θερμοκρασιακών αλλαγών ήταν ανά 5°C και η περιοχή θερμοκρασίας ήταν από 30°C έως 70°C. Η κατανομή της θερμοκρασία στην επιφάνεια ήταν ομοιογενής. Το δωμάτιο δεν περιείχε υλικά που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακτινοβολία από τον περιβάλλοντα χώρο και η θερμοκρασία ήταν στους 28°C. Έτσι, έγινε η παραγωγή ενός ακριβούς και αξιόπιστου μοντέλου μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία και την απόσταση.

4.2 Διαδικασίες μοντελοποίησης εκπεμπτικότητας θερμικής κάμερας

Τα βασικά βήματα της διαδικασίας κατασκευής μοντέλου ήταν η επιλογή του, η ανάπτυξη του και η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Αυτά τα τρία βασικά βήματα χρησιμοποιήθηκαν επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό μοντέλο για τα δεδομένα. Κατά τη διαδικασία επιλογής του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ομάδα δεδομένων, καθώς και διεργασίες σχετικά με τη διαδικασία για τον προσδιορισμό της μορφής του. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το επιλεγμένο μοντέλο μαζί με μια κατάλληλη μέθοδο προσέγγισης για την εκτίμηση των άγνωστων παραμέτρων σε αυτό. Το διάγραμμα ροής που ακολουθεί, δείχνει τη βασική ακολουθία δημιουργίας του μοντέλου βήμα βήμα με την αντίστοιχη ενσωμάτωση των σχετικών βημάτων συλλογής δεδομένων στη διαδικασία κατασκευής του.



Σχήμα ΙΙΙ.4.2-1: Δομή διαγράμματος

Ακολουθώντας το παραπάνω διάγραμμα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων. Μέσα από ένα πλήθος επαναλήψεων των πειραματικών μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των μοντέλων σχετικά με τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας και της εκπεμπτικότητας στο μονωτήρα οδηγηθήκαμε στο βέλτιστο μοντέλο χρήσης.

Αρχικά, υποθέτοντας ένα σύνολο n διακριτών σημείων της θερμοκρασίας και της τιμής της εκπεμπτικότητας (T_i, ε_i) , i = 1, 2,, 2n, χρησιμοποιήσαμε πρώτου βαθμού πολυώνυμο. Έτσι η σχέση της εκπεμπτικότητας με τη θερμοκρασία καθορίζεται από, $\varepsilon(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T$ (Σχέση ΙΙΙ.4.2-1). Στόχος ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων α_0 και α_1 έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η τιμή της παραμέτρου Φ.

Όπου:

$$Φ = \sum_{i=1}^{n} (ε(T_i) - ε_i)^2$$
 (Σχέση ΙΙΙ.4.2-2).

Μέσα από τις 2 παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$Φ = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_1(T_i) + \alpha_0 - \varepsilon_i)^2$$
 (Σχέση ΙΙΙ.4.2-3).

Σύμφωνα με τη θεωρία που έχουμε αναπτύξει στο πρώτο κεφάλαιο Ι.4.1.1, για το παραπάνω σύστημα της πρώτης τάξης προέκυψαν:

$$\alpha_{1} = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} & n \\ \hline \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \hline \sum_{i=1}^{n} T_{i} & n \end{vmatrix}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \sum_{i=1}^{n} T_{i} - n \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i}}{(\sum_{i=1}^{n} T_{i})^{2} - n \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2}}$$

$$\kappa \alpha_{1} \alpha_{0} = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \hline \sum_{i=1}^{n} T_{i} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \tau_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i} & n \end{vmatrix}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i} - n \sum_{i=1}^{n} T_{i} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i}}{(\sum_{i=1}^{n} T_{i})^{2} - n \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2}}}$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε δευτέρου βαθμού πολυώνυμο. Έτσι η σχέση της εκπεμπτικότητας με τη θερμοκρασία καθορίζεται από,

$$ε(T) = α_0 + α_1 T + α_2 T^2$$
 (Σχέση ΙΙΙ.4.2-4)

Ο σκοπός μας ήταν να υπολογίσουμε α_0 , α_1 και α_2 έτσι ώστε η συνάρτηση Φ να ελαχιστοποιείται, όπου Φ δίνεται από τη σχέση ΙΙΙ.4.2-2 όπως έχουμε δει παραπάνω δηλαδή $\Phi = \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon(T_i) - \varepsilon_i)^2$. Με αντικατάσταση της στην τελευταία σχέση τη σχέση ΙΙΙ.4.2-4 προκύπτει

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_2(T_i)^2 + \alpha_1 T_i + \alpha_0 - \varepsilon_i)^2$$
 (Sytéon III.4.2-5).

Σύμφωνα με τη θεωρία που έχουμε αναπτύξει στο πρώτο κεφάλαιο Ι.4.1.2 προέκυψαν:

$$\alpha_{2} = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{4} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{3} & \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} & \sum_{i=1}^{n} T_{i} & n \\ \end{vmatrix} \right\}$$

Τέλος για τρίτου βαθμού πολυώνυμο

$$ε(T) = α_0 + α_1 T + α_2 T^2 + α_3 T^3$$
 (Σχέση ΙΙΙ.4.2-6)

Ο κύριος σκοπός ήταν ο υπολογισμός των α_0 , α_1 , α_2 και α_3 για την ελάχιστη τιμή της Φ, όπου Φ δίνεται από (Σχέση ΙΙΙ.4.2-2) όπως έχουμε δει παραπάνω δηλαδή $\Phi = \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon(T_i) - \varepsilon_i)^2$. Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_3(T_i)^3 + \alpha_2(T_i)^2 + \alpha_1 T_i + \alpha_0 - \varepsilon_i)^2 \qquad (\Sigma \chi \acute{e} \sigma \eta \text{ III.4.2-7})$$

Εδώ πρέπει σύμφωνα με τη σχετική θεωρεία που αναπτύχθηκε στο πρώτο κεφάλαιο Ι.4.1.3 οδηγηθήκαμε, στα ακόλουθα αποτελέσματα.

		$\left \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i}\right ^{3}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^6$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	
	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		
	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$		
a	_	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	n	<i>a</i> –	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	n	1/01
u ₃	_	$\sum_{i=1}^{n} T_i^6$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$, u ₂ –	$\sum_{i=1}^{n} T_i^6$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	Kui
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^{5}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	n		$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	n	
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^{6}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i}^{3}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^6$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	3
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i} T_{i}^{2}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	2
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i T_i$	i
a.	_	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i$	n	<i>a</i> –	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i$	
$\alpha_1 = \cdot$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^{6}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$, u ₀ –	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^5$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$		
	$\sum_{i=1}^{n} T_i^{5}$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		$\sum_{i=1}^{n} T_i$	⁵ $\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$		
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^4$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$		$\sum_{i=1}^{n} T_i$	${}^4 \sum_{i=1}^n T_i{}^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	
		$\sum_{i=1}^{n} T_i^3$	$\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	$n \mid$		$\sum_{i=1}^{n} T_i$	³ $\sum_{i=1}^{n} T_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} T_i$	n	

5 Η ακρίβεια των μετρήσεων

Ένα κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασιακών μεταβολών πρέπει να πληρεί προϋποθέσεις που δίδονται στους αντίστοιχους διεθνείς κανονισμούς. Έτσι η πηγή τάσης καθώς και το κύκλωμα ελέγχθηκαν ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις κατά ΙΕC 60060-1. Η διακρίβωση των οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας έχει εξακολουθήσει το πρότυπο ISO/IEC 17025.

Σχετικά με την ακρίβεια των αναλογικών και ψηφιακών οργάνων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι καθορίζεται από την απόλυτη τιμή, το συντελεστή υποδιαίρεσης, καθώς και το ποσοστό σφάλματος που δίνει ο κατασκευαστής. Φυσικά σε αυτό το σημείο δεν πρέπει να παραλείψουμε τη σύνδεση του ψηφιακού θερμομέτρου με τους αισθητήρες PT-100, καθώς και την εφαρμογή των τελευταίων στο δοκίμιο των μετρήσεων. Για την περιοριστική ακρίβεια των οργάνων έγινε επιλογή και πρόβλεψη ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις και τις ανάγκες των μετρήσεων. Σχετικά με τη χρήση των αισθητήρων έγινε αρχικά έλεγχος του καθενός σχετικά με τη λειτουργικότητα ή μη και στη συνέχεια προσεκτική τοποθέτησή τους στα σημεία μετρήσεων. Στο στάδιο αυτό, πριν την κανονική καταγραφή των βημάτων μέτρησης, έγιναν δοκιμές ώστε να αποφευχθούν τυχών αστοχίες στα σημεία επαφής τους με τον πορσελάνινο μονωτήρα.

Επειδή οι μετρήσεις αφορούσαν μεταβαλλόμενα φαινόμενα σε συγκεκριμένο εύρος και η μεταβολή της θερμοκρασίας ήταν το βασικό προς παρατήρηση-μελέτη μέγεθος, έπρεπε να αποκλεισθεί κάθε μορφή μεταβολής της θερμοκρασίας του χώρου από εξωγενή παράγοντα που θα επιδρούσε στην ακρίβεια των μετρήσεων. Γι' αυτόν τον λόγο προβλέφτηκε αποκλεισμός κάθε μορφής εξωγενούς παράγοντα που θα προκαλούσε μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου και θα επιδρούσε στην ακρίβεια των μετρήσεων. Ο χώρος των μετρήσεων επιλέχθηκε σε σημείο όσο το δυνατό απομονωμένο από την παρουσία θερμαντικών ή ψυκτικών σωμάτων.

Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι για τις μετρήσεις που έγιναν κατεβλήθη ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των αισθητήρων PT-100, σχετικά ως προς το θερμοκρασιακό εύρος -70...+500 °C που καλύπτουν και το βαθμό ευαισθησίας και ακρίβειας στις θερμοκρασιακές μεταβολές. (v=0,4 m/s): T0,5= 0,05s, T0,9= 0,15s, Airflow (v=2m/s): T0,5= 3,0s, T0,9= 10,0s.

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης, χωρίς κανένα απολύτως σχόλιο.

2 Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων προσομοίωσης σε δοκίμιο μονωτήρα πορσελάνης για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος.

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης σε δοκίμιο μονωτήρα πορσελάνης. Το εύρος των τιμών της έντασης του ρεύματος στον αγωγό κυμάνθηκε από 250A έως 400A. Οι μετρήσεις έγιναν με συγκεκριμένο εύρος χρονικής διάρκειας από 105 έως 175 λεπτά.

2.1 Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε δοκίμιο μονωτήρα πορσελάνης για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος

Για το προαναφερθέν δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα και το συγκεκριμένο χρονικό εύρος που αναφέραμε, σε κάθε ενότητα που ακολουθεί παραθέτουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για τις δεδομένες τιμές έντασης ρεύματος.

2.1.1 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α σε χρονική διάρκεια 175 λεπτών

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω πειραματική διάταξη, έγιναν μετρήσεις για τιμή έντασης ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό στα 250Α και συνολική χρονική διάρκεια του εν λόγω πειράματος 2 ώρες και 55 λεπτά. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 10 λεπτά, εκτός από την πρώτη μέτρηση που έγινε 5 λεπτά μετά την έναρξη της διέλευσης ρεύματος 250Α στον αγωγό. Η συνολική χρονική διάρκεια διαδικασίας απεικόνισης των μετρήσεων ήταν 175 λεπτά. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές που προέκυψαν στους αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι στο μονωτήρα, σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα, απεικονίζονται στον πίνακα ΙV.2.1.1-1.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	26,1	26	26,2	26,1	26	26	26	26
15	47,7	28,1	29,3	27,9	26,7	28,1	26,9	26,7
25	48,7	32,8	28,3	29,1	27,6	28	26,9	26,6
35	49,5	36,6	28,8	32	28,5	27,9	26,9	26,5
45	49,5	39,7	29,3	34,2	29,6	27,8	26,9	26,3
55	49,5	42,7	29,9	35,9	30,6	27,8	26,9	26,2
65	49,5	45,1	30,5	37,5	31,6	27,9	27	26
75	49,5	47,4	31,1	38,7	32,5	28	27,1	26
85	49,5	48,8	31,7	39,8	33,4	28,2	27,3	26
95	49,5	44,6	31,9	38,6	34,2	28,3	27,4	25,9
105	49,5	37,8	31,7	35,4	33,9	28,5	27,6	25,9
115	30,6	33,8	31,2	32,5	32,9	28,6	27,8	25,9
125	28,8	31,4	30,7	30,5	31,9	28,7	27,8	25,8
135	27,8	30	30,2	29,5	31	28,7	27,8	25,9
145	27,4	29,4	29,9	29	30,6	28,6	27,7	25,8
155	27,3	29,3	29,8	28,9	30,6	28,6	27,7	25,8
165	27	29	29,6	28,6	30,3	28	27	25,8
175	27,3	29,3	29,2	28,2	30	27,8	26,5	25,8

Πίνακας ΙV.2.1.1-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μετά τη διάρκεια των 105 λεπτών από την αρχή της διαδικασίας λειτουργίας πραγματοποιήθηκε διακοπή παροχής ρεύματος, για να μελετηθεί η μείωση της θερμοκρασίας έναντι του χρόνου.

Οι γραφικές παραστάσεις ΙV.2.1.1-1, IV.2.1.1-2, IV.2.1.1-3, IV.2.1.1-4, IV.2.1.1-5, IV.2.1.1-6, IV.2.1.1-7 και IV.2.1.1-8 δείχνουν τις ενδεικτικές καμπύλες θερμοκρασίας

ως προς το χρόνο που προκύπτουν από μετρήσεις στα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.1-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.1.2 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Για το παραπάνω κύκλωμα έγιναν πειραματικές μετρήσεις, για ρεύμα έντασης 275Α και χρονική διάρκεια 105. Στον πίνακα ΙV.2.1.2-1 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	31	28,8	28,2	27,5	29,1	26,6	26,3	24,7
15	61,1	36,1	29	29,9	29,4	27,5	26,5	24,7
25	72	53	29,8	33	29,8	28,1	27	24,8
35	80,4	48,5	30	36,5	30,1	28,2	27,1	24,7
45	86,5	52,9	31	40,3	32	28,2	27,2	24,7
55	85,4	52,8	31,8	42,1	34	28,2	27,2	24,7
65	48,3	48,2	31,9	40,8	35	28,3	27,3	24,8
75	35,2	39,1	31	36,3	34,9	28,4	27,4	24,7
85	30,3	34,5	30,8	32,5	33,9	28,4	27,5	24,7
95	28,2	31,2	30,6	30,1	32	28,5	27,5	24,6
105	27,5	29,5	30,4	27,8	30	28,6	27,6	24,6

Πίνακας ΙV.2.1.2-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.2-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.1.3 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Για την παραπάνω διάταξη και για ρεύμα διέλευσης στον αγωγό ίσο με 300Α και συνολική χρονική διάρκεια ήταν 105 προέκυψαν τα πειραματικά αποτελέσματα του πίνακα ΙV.2.1.3-1. Στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν.

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	32	29,3	29,6	28,5	30,1	28,6	27,6	25,8
15	62,1	37,1	29,6	30,9	29,8	28,5	27,5	25,7
25	74,7	44	30,2	35	30,7	28,4	27,4	25,8
35	82,4	49,6	31	38,5	32,1	28,3	27,3	25,7
45	87,5	53,6	31,8	41,3	33,6	28,3	27,3	25,7
55	86,6	55,9	32,6	43,1	35	28,3	27,4	25,7
65	50,6	49,4	32,9	41,8	36	28,5	27,6	25,8
75	36,1	40,5	32,6	37,3	35,7	28,6	27,8	25,7
85	31,3	35,3	32	33,5	34,3	28,8	28	25,7
95	29,2	32,3	31,3	31,1	33	28,9	28	25,6
105	28	30,5	30,6	29,8	31,9	28,9	28	25,6

Πίνακας ΙV.2.1.3-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI4.


Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.3-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.1.4 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Όμοια για ρεύμα έντασης 325Α στον αγωγό, στην άνω πειραματική διάταξη έγιναν πειραματικές μετρήσεις χρονικής διάρκειας 105 λεπτών.

Στον πίνακα IV.2.1.4-1 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν.

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	33,1	28,6	29	27,8	28,7	27	26,8	24,6
15	82	41	29,9	30,4	29	28	26,7	24,6
25	92	50,2	30	38,3	31	28,1	26,5	24,5
35	97	57	31,1	42	33	28,1	26,5	24,5
45	99,3	59	32	44	35	28,2	26,5	24,5
55	100,1	59 <i>,</i> 8	33	46,2	36	28,2	26,7	24,6
65	88	61	33,6	46,9	36,7	28,4	27	24,5
75	44,4	50	34	41	37,2	28,8	27,7	24,7
85	35	38	33,6	36	37,2	28,8	28	24,7
95	30,4	34,5	32,2	33	34	28,8	28,1	24,7
105	28	31	31,2	31	33,2	28,9	28,2	24,8

Πίνακας ΙV.2.1.4-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.4-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.1.5 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 350A σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Για ρεύμα έντασης 350A και χρονική διάρκεια 105 λεπτών, στον πίνακα IV.2.1.5-1 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν.

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	34,1	29,7	30	28,8	30,7	28,7	27,8	25,6
15	83,3	43	30,2	32,4	30,4	28,6	27,7	25,6
25	94	52,9	31,2	39,3	32	28,5	27,5	25 <i>,</i> 5
35	98,3	58,4	32,4	43,1	34,1	28,4	27,5	25,5
45	100,3	61,5	33,3	46	36	28,4	27,5	25 <i>,</i> 5
55	101,2	63,4	34,2	47,3	37,5	28,5	27,7	25,6
65	89,5	62,9	34,9	47,7	38,7	28,8	28	25,5
75	45,9	49,9	34,7	43,4	39,1	29,1	28,3	25,7
85	35,5	40,9	34	37,8	37,8	29,4	28,6	25,7
95	31,4	35,8	33,2	34	35,9	29,6	28,8	25,7
105	29,4	32,9	32,2	31,6	34,2	29,7	28,8	25,8

Πίνακας ΙV.2.1.5-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 350Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.5-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ8.

2.1.6 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 375Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Για ρεύμα έντασης 375Α και χρονική διάρκεια 105 λεπτών, στον πίνακα IV.2.1.6-1 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	35	30	29	28	30	28,2	27,8	26,4
15	84	41	30	31	31	28,3	27,8	26,4
25	95	50	31	38	32	28,3	27,9	26,5
35	98	58	32,5	40	33	28,4	27,9	26,5
45	101	60	33,5	42	35	28,8	27,9	26,5
55	103	62	33,9	44	36,2	28,8	27,9	26,5
65	90	63	34	44,9	38,4	28,9	28	26,8
75	50	50	34,5	45	40,2	30	28,2	27
85	35	36	34	38	38,2	30,2	28,3	27,2
95	33	34	33	37	36,2	30,2	28,4	27,2
105	31	31	31	32	32	30,1	28,3	27,3

Πίνακας ΙV.2.1.6-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 375Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.6-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.1.7 Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 400Α σε χρονική διάρκεια 105 λεπτών

Τέλος, για ρεύμα έντασης 400Α και χρονική διάρκεια 105 λεπτών, στον πίνακα IV.2.1.7-1 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	24,1	24	24,2	24,1	24	24	24	24
5	36	32	31	30	32	30,1	29,8	27,6
15	86	45	32	34	32	30,2	29,8	27,6
25	98	54	32,5	41	34	30,3	29,5	27,5
35	100	60	33 <i>,</i> 5	44	36	30,4	29,5	27,5
45	103	63	34,3	48	38	30,9	29,5	27,5
55	106	65	34,6	47,8	38,5	30,9	29,5	27,6
65	92	64	35	47,6	40	31	30	27,5
75	49	52	34,9	45	42	31,5	30,3	27,7
85	38	38	34,5	39	39	31,6	30,6	27,7
95	34	36	34	36	37	31,8	30,8	27,7
105	32	33	33	33	33	31,8	30,8	27,8

Πίνακας ΙV.2.1.7-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 400Α.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-1: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-2: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-3: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-4: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-5: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-6: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-7: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.1.7-8: Απεικόνιση πειραματικών μεταβολών θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8.

2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων σε δοκίμιο μονωτήρα πορσελάνης για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος

Η διαδικασία της προσομοίωσης της παραπάνω πειραματικής διάταξης οδήγησε σε αποτελέσματα που πριν παρουσιαστούν κρίνεται σκόπιμο για την καλύτερη κατανόηση της όλης διαδικασίας να γίνει σχηματική απεικόνιση του μοντέλου που προέκυψε σχετικά με την κατανομή της θερμότητας, τόσο στο σύνολό του, όσο και στα επιμέρους υλικά που το αποτελούν.



Σχήμα ΙV.2.2-1: Δημιουργία πλέγματος εξωτερική απεικόνιση.



Σχήμα ΙV.2.2-2: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση τομής.



Σχήμα ΙV.2.2-3: Δημιουργία πλέγματος εζωτερική απεικόνιση τομής.



Σχήμα ΙV.2.2-4: Δημιουργία πλέγματος εξωτερική απεικόνιση.



Σχήμα ΙV.2.2-5: Δημιουργία πλέγματος εξωτερική απεικόνιση.



Σχήμα ΙV.2.2-6: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση τομής.

Στο σχήμα IV.2.2-7 απεικονίζεται η τομή του τμήματος του μονωτήρα με μόνο το υλικό της πορσελάνης.



Σχήμα ΙV.2.2-7: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό πορσελάνη.

Στο σχήμα IV.2.2-8 απεικονίζεται η τομή του τμήματος του μονωτήρα με μοναδικό υλικό, το υλικό του τσιμέντου του μονωτήρα.



Σχήμα IV.2.2-8: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό τσιμέντο του μονωτήρα.

Ενώ στο σχήμα IV.2.2-9 απεικονίζεται η τομή του τμήματος του μονωτήρα με μόνο το υλικό την άσφαλτο του μονωτήρα.



Σχήμα IV.2.2-9: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό της ασφάλτου του μονωτήρα.

2.2.1 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α

Συνολικά λοιπόν, για χρονική διάρκεια διαδικασίας 175 λεπτών, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες που απεικονίζονται στον πίνακα IV.2.2.1-1.

Κεφάλαιο IV –	Τα αποτελέσματα το	υν πειραματικών	μετρήσεων,	της προσομοίωσης	; και
της μοντελοποίη	ισης				

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	A14	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,5	24,9	24,2	23,8	23,8	23,8	23,8	24
5	26,5	25,9	26,2	25,8	25,8	25,8	25,8	26
15	48,7	30	29,2	30,3	25,8	26,8	26,8	26,1
25	49,7	33	28,1	32,3	26,9	26,9	26,9	26,1
35	49,7	36	28,3	34,3	26,9	26,9	26,9	26,1
45	49,7	40,1	28,5	34,6	26,9	26,9	26,9	26,1
55	49,7	42,9	28,5	35,1	29	28	26,9	26,1
65	49,7	46,1	28,5	37,1	29	28	26,9	26,1
75	49,7	46,8	28,6	37,1	29	28	26,9	26,1
85	49,7	47,2	28,6	38,3	29	28,1	27,1	26,1
95	49,7	47,2	28,6	38,3	32,2	28,1	27,1	26,1
105	49,7	47,2	28,6	36,3	33,4	28,1	27,1	26
115	31,6	35	28,6	35,3	33,2	28,3	27,3	26
125	29,8	33	28,5	35,6	32	28,3	27,3	26
135	27,9	30,1	26,9	28,9	31,1	28,3	27,3	26
145	27,9	28	26,6	27,2	29,9	28,1	27,3	26
155	27,6	26,6	27	27	29,9	28	27	26
165	27,4	26,3	27	26,6	29,9	27,7	27	26
175	27,3	26,1	27,9	26,5	25,6	26	26	26

Πίνακας ΙV.2.2.1-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 250Α.

Οι γραφικές παραστάσεις VI.2.2.1-1, VI.2.2.1-2, VI.2.2.1-3, VI.2.2.1-4, VI.2.2.1-5, VI.2.2.1-6, VI.2.2.1-7 και VI.2.2.1-8 δείχνουν τις ενδεικτικές καμπύλες θερμοκρασίας ως προς το χρόνο που προκύπτουν από το Μοντέλο FEM στα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI4.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση VI.2.2.1-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI8.

2.2.2 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α

Συνολικά, για χρονική διάρκεια διαδικασίας 105 λεπτών και ρεύμα 275Α, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες που απεικονίζονται στον πίνακα VI.2.2.2-1.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,5	24,9	24,2	23,8	23,8	23,8	23,8	24
5	31,2	28,9	28,8	27,6	29,8	27,5	26,5	25
15	62	36,2	29,5	30	30	28	26,6	25
25	74	50	30	34,2	30,5	28,4	27,2	25,3
35	82	51	30	35,7	31	28,4	27,4	25,5
45	87	52	31,2	41	33	28,5	27,4	25 <i>,</i> 5
55	87	53	31,9	41,9	35	28,5	27,4	25,6
65	50	47	32,2	42	36	28,5	27,5	25,6
75	35,6	38	32	36,6	35,5	28,6	27,6	25 <i>,</i> 8
85	31,2	34,8	31	33,2	34	28,6	28	25,8
95	29	32	31	31	33	28,9	28	25,8
105	28	30	30,8	29	31	29	28,2	25,7

Πίνακας VI.2.2.2-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 275Α

Οι γραφικές παραστάσεις VI.2.2.2-1, VI.2.2.2-2, VI.2.2.2-3, VI.2.2.2-4, VI.2.2.2-5, VI.2.2.2-6, VI.2.2.2-7 και VI.2.2.2-8 δείχνουν τις ενδεικτικές καμπύλες θερμοκρασίας ως προς το χρόνο που προκύπτουν από το Μοντέλο FEM στα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI4.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI6.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση VI.2.2.2-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI8.

2.2.3 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α

Συνολικά λοιπόν, για χρονική διάρκεια διαδικασίας 105 λεπτών, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες.

Βήμα Χρόνου	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24,5	24,9	24,2	23,8	23,8	23,8	23,8	24
5	32	29	29	28	30	28,5	27,7	25,6
15	63	37	30	31	31	28,6	27,6	25,6
25	75	45	30	35	32	28,6	27,4	25,8
35	83	50	31	39	33	28,6	27,4	25,8
45	88	54	32	42	34	28,5	27,4	25,9
55	86	56	33	44	36	28,5	27,5	25,9
65	51	48	33	42	37	28,6	27,8	25,9
75	36	40	33	37	36	28,6	27,9	25,8
85	31	35	32	34	34	28,9	28,2	25,8
95	30	33	32	31	33	29	28,2	25,7
105	29	31	31	30	32	29	28	25,7

Πίνακας ΙV.2.2.3-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 300Α

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων οι τιμές θερμοκρασίας των αισθητήρων στο μονωτήρα καταγράφηκαν για συγκεκριμένο χρόνο δειγματοληψίας. Οι γραφικές παραστάσεις IV.2.2.3-1, IV.2.2.3-2, IV.2.2.3-3, IV.2.2.3-4, IV.2.2.3-5, IV.2.2.3-6, IV.2.2.3-7 και IV.2.2.3-8 δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση μέσα από τη χρήση του προγράμματος ANSYS για τα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.3-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ8.

2.2.4 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α

Για χρονική διάρκεια διαδικασίας 105 λεπτών και ρεύμα έντασης 325A, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24.5	24.9	24.2	23.8	23.8	23.8	23.8	24
5	33.5	29	30	29	29	27.8	27	25
15	83	41	30	31	29.5	28.2	27	25.1
25	93	51	31	39	31	28.5	27	25.1
35	97.5	57.2	31.2	42.9	33.2	28.5	27.1	25.2
45	100	59.8	32.5	44.3	35.6	28.7	27.1	25.2
55	101	60	33	47	37	28.7	27.1	25.2
65	89	61.5	33.8	47.1	37.7	28.7	27.4	25.2
75	44.5	51	34.2	41.5	37.7	28.8	27.9	25.2
85	35.5	39	34	37	38	28.9	28.5	25.3
95	31	35	33	33.3	34.5	28.9	28.8	25.4
105	29	31.5	32	31.5	33.9	29	28.8	25.8

Πίνακας ΙV.2.2.4-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 325Α.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων οι τιμές θερμοκρασίας των αισθητήρων στο μονωτήρα, καταγράφηκαν για καθορισμένο χρόνο δειγματοληψίας. Οι γραφικές παραστάσεις ΙV.2.2.4-1, IV.2.2.4-2, IV.2.2.4-3, IV.2.2.4-4, IV.2.2.4-5, IV.2.2.4-6, IV.2.2.4-7 και IV.2.2.4-8 δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση μέσα από τη χρήση του προγράμματος ANSYS για τα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.4-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ8.

2.2.5 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 350Α

Αντίστοιχα, για 350Α ένταση ρεύματος και χρονική διάρκεια μελέτης 105 λεπτών, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες που απεικονίζονται στον πίνακα IV.2.2.5-1.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24.5	24.9	24.2	23.8	23.8	23.8	23.8	24
5	34.6	30	31	29	31	29	28	26
15	84	44	32	33	31	28.9	28	26
25	94.6	54	32	40	32.5	28.8	27.8	26
35	99	59	32	43.6	34	28.7	27.8	26
45	101	62	33.5	46.7	36	28.7	27.8	26
55	102	64	34.5	47.9	37.8	28.6	27.9	26.2
65	90	63	35	47.9	38.9	28.6	28.2	26.1
75	47	50	35	43.8	39	29	28.5	26.2
85	36	42	34.5	38	37.8	29	28.7	26.3
95	32	36	34	34.3	36	29.2	28.9	26.4
105	30	33	32.5	32	34.5	29.2	29	26

Πίνακας ΙV.2.2.5-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 350Α.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων οι τιμές θερμοκρασίας των αισθητήρων στο μονωτήρα καταγράφηκαν για συγκεκριμένο χρόνο δειγματοληψίας. Οι γραφικές παραστάσεις IV.2.2.5-1, IV.2.2.5-2, IV.2.2.5-3, IV.2.2.5-4, IV.2.2.5-5, IV.2.2.5-6, IV.2.2.5-7 και IV.2.2.5-8 δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση μέσα από τη χρήση του προγράμματος ANSYS για τα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI1.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.5-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ8.

2.2.6 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 375Α

Όμοια για ρεύμα αγωγού 375Α και χρονική διάρκεια διαδικασίας 105 λεπτών, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες που απεικονίζονται στον πίνακα IV.2.2.6-1.

Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	Al4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24.5	24.9	24.2	23.8	23.8	23.8	23.8	24
5	36	32	31	29	32	29	28.2	27.2
15	85	45	32	33	32	29	28.3	27.3
25	98	54	32	40	34	29	28.3	27.3
35	100	60	32.6	42	35	29.2	28.3	27.3
45	104	62	34	44	37	29.4	28.4	27.3
55	107	65	34	46	38	29.4	28.5	27.5
65	90	65	34.2	46	40	29.4	28.9	27.9
75	50.2	52	34.8	46	42.8	31	29	27.9
85	39	40	34.5	39	41	31	29.1	28
95	35	36	34	38	37.5	31.2	29.2	28
105	33	33	33	32	34	31.1	29.2	28

Πίνακας ΙV.2.2.6-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 375Α.

Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση μέσα από τη χρήση του προγράμματος ANSYS για τα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.


Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.6-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI8.

2.2.7 Προσομοίωση για ένταση ρεύματος αγωγού 400Α

Τέλος, για χρονική διάρκεια διαδικασίας 105 λεπτών και ρεύμα της τάξης των 400Α, προέκυψαν οι ακόλουθες μεταβολές θερμοκρασίας στους αισθητήρες που απεικονίζονται στον πίνακα IV.2.2.7-1.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης

	r							
Βήμα Χρόνου	Al1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6	AI7	AI8
(min)	°C							
0	24.5	24.9	24.2	23.8	23.8	23.8	23.8	24
5	36.6	33	32	31	33	31	30	28
15	86	46	33	35	33	31	30	28
25	98.6	55	33	42	35	31	30	28
35	101	61	33	45	37	31	30	28
45	105	64	35	49	38	31.4	30	28
55	108	66	35	48	39	31.5	30	28
65	91	65	36	48	41	31.6	30.3	28
75	50	53	35	46	43	32	30.9	28.1
85	40	42	35	40	40	32.2	31	28.1
95	36	38	34.5	36	37.5	32.4	31.1	28.2
105	34	35	34	33	34	32.4	31.2	28.2

Πίνακας ΙV.2.2.7-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 400Α.

Όπως σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και εδώ, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων οι τιμές θερμοκρασίας των αισθητήρων στο μονωτήρα καταγράφηκαν για συγκεκριμένο χρόνο δειγματοληψίας. Οι γραφικές παραστάσεις IV.2.2.7-1, IV.2.2.7-2, IV.2.2.7-3, IV.2.2.7-4, IV.2.2.7-5, IV.2.2.7-6, IV.2.2.7-7 και IV.2.2.7-8 δείχνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση μέσα από τη χρήση του προγράμματος ANSYS για τα σημεία AI1, AI2, AI3, AI4, AI5, AI6, A17 και A18, αντίστοιχα.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-1: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙΙ.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-2: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI2.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-3: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI3.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-4: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ4.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-5: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα AI5.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-6: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ6.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-7: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ7.



Γραφική παράσταση ΙV.2.2.7-8: Απεικόνιση μεταβολών θερμοκρασίας στον αισθητήρα ΑΙ8.

3 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών σε μονωτήρα Πορσελάνης για διαφορετικές θέσεις παρατήρησης

Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του σχήματος ΙΙΙ.3-1 έγινε ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων για το συγκεκριμένο τύπο δοκιμίου που αναφέρθηκε παραπάνω Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται οι μετρήσεις των μεταβολών της τιμής, της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας σε μονωτήρα πορσελάνης για εύρος θερμοκρασιών που κυμαίνονταν από 30 °C έως 70 °C και διαφορετικές τιμές αποστάσεων ℓ της 1m, 2m, 4m και 6m καθώς και διαφορετικές τιμές γωνιών θ, δηλαδή θ=0°, θ=30°, θ=45°, θ=60° και θ=80° από το δοκίμιο. Οι συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν ήταν συνθήκες εργαστηρίου, για θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 25 °C και σχετική υγρασία 41%.

Οι τιμές θερμοκρασίας που μετρήθηκαν με τη θερμική κάμερα συγκρίθηκαν με εκείνες που μετρήθηκαν με ψηφιακό μετρητή θερμοκρασίας. Μια ενδεικτική απεικόνιση τιμών θερμοκρασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα IV.3-1, για το $\ell = 0$ και $\theta = 0^{\circ}$ μετά την προσαρμογή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας στη θερμική κάμερα.

Θερμικοκάμερα Θερμοκρασία(°C)	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
PT-100 (κορυφή) Θερμοκρασία(°C)	30.2	35.3	40.1	45.2	50.1	55.0	60.1	65.1	70.2
PT-100 (μέση) Θερμοκρασία(°C)	30.2	35.2	40.2	45.2	50.2	55.0	60.1	65.2	70.3
PT-100 (μέση αριστερά) Θερμοκρασία(°C)	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
PT-100 (μέση δεξιά) Θερμοκρασία(°C)	30.3	35.3	40.1	45.2	50.1	55.1	60.1	65.2	70.2
PT-100 (βάση αριστερά) Θερμοκρασία(°C)	29.8	34.9	39.8	44.9	49.8	54.9	59.8	64.8	69.9
PT-100 (βάση δεξιά) Θερμοκρασία(°C)	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0

Πίνακας IV.3-1: Τιμές της θερμοκρασίας σε PT-100 και θερμική κάμερα για $\ell=0$ $\theta=0^{\circ}$.

3.1 Τα αποτελέσματα και οι γραφικές παραστάσεις για συγκεκριμένες γωνίες και διαφορετικές αποστάσεις τοποθέτησης της θερμικής κάμερας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την τιμή της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και συγκεκριμένη τιμή γωνίας κάθε φορά παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Συγκεκριμένα για τιμή γωνίας $\theta=0^{\circ}$ έχουμε:

	Γωνία Ο°													
_	E	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	1	Εκπεμπτικότητα	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89			
αIJ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	5 5	60	65	70			
σ	21	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.96	0.94	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87			
πóσ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	5 5	60	65	70			
Ā	4	Εκπεμπτικότητα	0.93	0.91	0.89	0.87	0.86	0.83	0.80	0.78	0.77			
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	6	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.79	0.77	0.76			

Πίνακας IV.3.1-1: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\theta = 0^{\circ}$ και αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

	Γωνία 30°													
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	7	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89			
дIJ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
τα	2	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87			
ò d	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	5 5	60	65	70			
Aд	4	Εκπεμπτικότητα	0.93	0.91	0.88	0.87	0.85	0.83	0.79	0.78	0.77			
	E	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	9	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.88	0.86	0.83	0.81	0.80	0.78	0.77	0.75			

Για τιμή γωνίας θ=30° έχουμε:

Πίνακας IV.3.1-2: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ =30° και αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

Για τιμή γωνίας θ=45° έχουμε:

	Γωνία 45°													
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	7	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89			
αIJ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
τα	2 r	Εκπεμπτικότητα	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.90	0.89	0.88	0.86			
όστ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
Aπ	4	Εκπεμπτικότητα	0.92	0.90	0.88	0.87	0.84	0.83	0.79	0.78	0.77			
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	6 1	Εκπεμπτικότητα	0.89	0.86	0.85	0.83	0.80	0.79	0.78	0.77	0.74			

Πίνακας IV.3.1-3: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ=45° και αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

Για τιμή γωνίας θ=60° έχουμε:

	Γωνία 60°													
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	7	Εκπεμπτικότητα	0.94	0.93	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.83	0.82			
۵J	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
τα	21	Εκπεμπτικότητα	0.92	0.91	0.89	0.86	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78			
, όα	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
Ал	4	Εκπεμπτικότητα	0.90	0.88	0.85	0.82	0.80	0.77	0.75	0.72	0.71			
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	6	Εκπεμπτικότητα	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.73	0.70	0.69	0.67			

Πίνακας IV.3.1-4: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ=60° και αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

	Γωνία 80°													
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	5 5	60	65	70			
	1	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.75	0.71	0.7			
αIJ	۳	Θερμοκρασία(°C)	30	3 5	40	45	50	5 5	60	65	70			
τα	2 r	Εκπεμπτικότητα	0.90	0.85	0.83	0.80	0.78	0.75	0.73	0.70	0.68			
ο φ	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	3 5	40	4 5	50	5 5	60	65	70			
Ал	4	Εκπεμπτικότητα	0.87	0.83	0.81	0.78	0.75	0.73	0.70	0.67	0.64			
	٦	Θερμοκρασία(°C)	30	3 5	40	4 5	50	5 5	60	65	70			
	9	Εκπεμπτικότητα	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.63	0.62	0.60	0.58			

Για τιμή γωνίας θ=80° έχουμε:

Πίνακας IV.3.1-5: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ=80° και αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

Οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι οι ακόλουθες.



Γραφική παράσταση IV.3.1-1: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και γωνία θ=0°.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης



Γραφική παράσταση IV.3.1-2: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και γωνία θ=30°.



Γραφική παράσταση IV.3.1-3: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και γωνία θ=45°.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης



Γραφική παράσταση IV.3.1-4: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και γωνία θ=60°.



Γραφική παράσταση IV.3.1-5: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m και γωνία θ=80°

3.2 Αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης θερμικής κάμερας

Σε αυτή την ενότητα έγινε μελέτη και αξιολόγηση της κατάλληλης επιλογής της τιμής της παραμέτρου εκπεμπτικότητας στη θερμική κάμερα για εύρος θερμοκρασιών που κυμαίνονταν από 30 °C έως 70 °C και 5 ξεχωριστές τιμές γωνιών θ, δηλαδή $\theta=0^{\circ}$, $\theta=30^{\circ}$, $\theta=45^{\circ}$, $\theta=60^{\circ}$ και $\theta=80^{\circ}$.

Αρχικά οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν για απόσταση $\ell=1m$ μεταξύ του οπτικού άξονα της θερμικής κάμερας και της κάθετης προς την επιφάνεια του δείγματος πορσελάνινου μονωτήρα. Επιπλέον, λήφθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις για διαφορετικές τιμές απόστασης $\ell=2m$, $\ell=4m$, και $\ell=6m$.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την τιμή της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για γωνίες θ=0°, θ=30°, θ=45°, θ=60° και θ=80°. και συγκεκριμένη τιμή απόστασης κάθε φορά παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Συγκεκριμένα για τιμή απόστασης $\ell=1$ έχουμε τον πίνακα IV.3.2-1.

	Απόσταση 1m											
	0	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	55	60	65	70	
	0	Εκπεμπτικότητα	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	
	。(Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	55	60	65	70	
	3(Εκπεμπτικότητα	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89	
νία	° C	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	55	60	65	70	
3	4 5	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89	
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
	6 (Εκπεμπτικότητα	0.94	0.93	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.83	0.82	
	。(Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	4 5	50	55	60	65	70	
	8	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.75	0.71	0.7	

Πίνακας IV.3.2-1: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για ℓ =1m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°.

Για τιμή απόστασης ℓ=2m έχουμε:

	Απόσταση 2 m												
	0	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	0	Εκπεμπτικότητα	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89		
	。(Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	30	Εκπεμπτικότητα	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87		
νία	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
Ξ.	4 5	Εκπεμπτικότητα	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.90	0.89	0.88	0.86		
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	60	Εκπεμπτικότητα	0.92	0.91	0.89	0.86	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78		
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	80	Εκπεμπτικότητα	0.90	0.85	0.83	0.80	0.78	0.75	0.73	0.70	0.68		

Πίνακας IV.3.2-2: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\ell=2m$ και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και $\theta=80°$.

Για τιμή απόστασης	ℓ=4m έχουμε:
--------------------	--------------

	Απόσταση 4m													
	0	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	0	Εκπεμπτικότητα	0.93	0.91	0.89	0.87	0.86	0.83	0.80	0.78	0.77			
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	3 C	Εκπεμπτικότητα	0.93	0.91	0.88	0.87	0.85	0.83	0.79	0.78	0.77			
νία	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
ŝ	45	Εκπεμπτικότητα	0.92	0.90	0.88	0.87	0.84	0.83	0.79	0.78	0.77			
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	60	Εκπεμπτικότητα	0.90	0.88	0.85	0.82	0.80	0.77	0.75	0.72	0.71			
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70			
	8 C	Εκπεμπτικότητα	0.87	0.83	0.81	0.78	0.75	0.73	0.70	0.67	0.64			

Πίνακας IV.3.2-3: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για l=4m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°.

Για τιμή απόστασης ε=6m έχουμε:

	Απόσταση 6m												
	0	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	0	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.79	0.77	0.76		
	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	30	Εκπεμπτικότητα	0.91	0.88	0.86	0.83	0.81	0.80	0.78	0.77	0.75		
ωνία	°	Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	43	Εκπεμπτικότητα	0.89	0.86	0.85	0.83	0.80	0.79	0.78	0.77	0.74		
	。(Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	90	Εκπεμπτικότητα	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.73	0.70	0.69	0.67		
	。(Θερμοκρασία(°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70		
	80	Εκπεμπτικότητα	0.83	0.79	0.75	0.71	0.66	0.63	0.62	0.60	0.58		

Πίνακας IV.3.2-4: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για ℓ=6m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°.

Οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τις παραπάνω μετρήσεις είναι οι ακόλουθες:



Γραφική παράσταση IV.3.2-1: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για ℓ=1m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και 80°.



Γραφική παράσταση IV.3.2-2: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για $\ell=2m$ και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και 80°.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης



Γραφική παράσταση IV.3.2-3: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για ℓ =4m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και 80°.



Γραφική παράσταση IV.3.2-4: Τιμή παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για *l*=6m και γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και 80°.

4 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και της μοντελοποίησης για διαφορετικές αποστάσεις μεταζύ δοκιμίου και θερμικής κάμερας

Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του σχήματος ΙΙΙ.4-1 έγινε ένα πλήθος μετρήσεων για το συγκεκριμένο τύπο μονωτήρα που αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς και εφαρμόστηκαν τα μοντέλα προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση των μοντέλων έγινε με τη βοήθεια του ΜΑΤLAB και του κατάλληλου κώδικα που αναπτύχθηκε με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Στην ενότητα αυτή γίνεται γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μοντέλων σε σχέση με αυτά των πειραματικών μετρήσεων.

4.1 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ δοκιμίου και θερμικής κάμερας

Με γνώμονα τη διάταξη μέτρησης που αναφέρθηκε παραπάνω, εκτελέστηκε μια σειρά μετρήσεων για τέσσερις τιμές αποστάσεων 1m, 2m, 4m και 6m. Η γραφική παράσταση IV3.4.1-1, δείχνει τις μεταβολές της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας σε σχέση με τη θερμοκρασία του δείγματος πορσελάνινου μονωτήρα για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.



Γραφική παράσταση IV.4.1-1: Τιμές μεταβολής της παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για διαφορετικές αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m.

4.2.1 Μετρήσεις και μοντελοποίηση πρώτου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις

Όπως έχουμε είδη αναφερθεί για τις ανάγκες της μοντελοποίησης χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Μέσα από τη χρήση αυτής καταγράφηκαν οι μεταβολές της παραμέτρου εκπεμπτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία και την απόσταση. Έτσι για αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m, κάθε φορά χρησιμοποιώντας με τη βοήθεια της μεθόδου, για το πολυώνυμο πρώτου, δεύτερου και τρίτου βαθμού οδηγηθήκαμε στα ακόλουθα αποτελέσματα, σε σχέση πάντα με τις μετρήσεις. Για πρώτου βαθμού και απόσταση 1m προέκυψε η γραφική παράσταση IV.4.2.1-1.

Κεφάλαιο IV – Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης



Γραφική παράσταση IV.4.2.1-1: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 1m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε= $-0.003 * T(^{\circ}C) + 1.069$.



Για πρώτου βαθμού και απόσταση 2m.

Γραφική παράσταση ΙV.4.2.1-2: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 2m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε= $-0.003 * T(^{\circ}C) + 1.050$.

Για πρώτου βαθμού και απόσταση 4m.



Γραφική παράσταση IV.4.2.1-3: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 4m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε= -0,004*T(°C) + 1,057.

Για πρώτου βαθμού και απόσταση 6m.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.1-4: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 6m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε= -0,004*T(°C) + 1,025.

4.2.2 Μετρήσεις και μοντελοποίηση δευτέρου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις



Για δευτέρου βαθμού και απόσταση 1m προέκυψε.

Γραφική παράσταση Ι.2.2-1: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 1m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $0.00001602*T^2(°C) - 0.00423506*T(°C) + 1.10681818$.

Για δευτέρου βαθμού και απόσταση 2m.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.2-2: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 2m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $-0.00000013*T^2(^{\circ}C) - 0.00265701*T(^{\circ}C) + 1.04986364$.

Για δευτέρου βαθμού και απόσταση 4m.



Γραφική παράσταση IV.4.2.2-3: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 4m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε $=-0.00000030*T^2(^{\circ}C)-0.00413303*T(^{\circ}C)+1.0563484.$

Για δευτέρου βαθμού και απόσταση 6m.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.2-4: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 6m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $-0.00000043*T^2(^{\circ}C) - 0.00385671*T(^{\circ}C) + 1.02421212$.

4.2.3 Μετρήσεις και μοντελοποίηση τρίτου βαθμού για διαφορετικές αποστάσεις

Για τρίτου βαθμού και απόσταση 1m προέκυψε.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.3-1: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 1m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $0.00000141 T^3(^{\circ}C) - 0.00019610T^2(^{\circ}C) + 0.00595382T(^{\circ}C) + 0.95090909.$

Για τρίτου βαθμού και απόσταση 2m.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.3-2: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 2m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = - $0.00000004T^3(^{\circ}C)$ + $0.00000593T^2(^{\circ}C)$ - $0.00294812T(^{\circ}C)$ + 1.05431818.

Για τρίτου βαθμού και απόσταση 4m.



Γραφική παράσταση ΙV.4.2.3-3: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 4m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $0.00000014T^3(^{\circ}C) - 0.00002152T^2(^{\circ}C) - 0.00311414T(^{\circ}C) + 1.04075758.$

Για τρίτου βαθμού και απόσταση 6m.



Γραφική παράσταση IV.4.2.3-4: Εκπεμπτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για απόσταση 6m.

Η συνάρτηση που περιγράφει την παράμετρο της εκπεμπτικότητας για την παραπάνω γραφική παράσταση είναι η ακόλουθη ε = $0.00000031T^3(^{\circ}C) - 0.00000043T^2(^{\circ}C) - 0.00385671T(^{\circ}C) + 1.02421212.$

Κεφάλαιο V Σχόλια επί των μετρήσεων

1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς και σχόλια που προκύπτουν από τη σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα προσομοίωσης και μοντελοποίησης.

2 Σχόλια επί των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Πέραν του κατά πόσον μια προσομοίωση ανταποκρίνεται ή όχι σε ρεαλιστικές συνθήκες, τόσο σε επίπεδο πληρότητας του μοντέλου, όσο και σε επίπεδο περιβαλλοντικών συνθηκών έκθεσής του, εκείνο που τελικά αποτιμάται είναι εάν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού (το οποίο κάνει εφαρμογή ορισμένης αριθμητικής μεθόδου) συγκλίνουν ή όχι με τις μετρηθείσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών που καταγράφηκαν ύστερα απ' τη διεξαγωγή ενός πειράματος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατό να αποφασιστεί η εγκυρότητα ή μη της εφαρμοζόμενης αριθμητικής μεθόδου. Τυχόν αποκλίσεις μεταξύ προσομοιωθέντων και μετρηθέντων αποτελεσμάτων ενδεχομένως να οφείλονται, αφ' ενός μεν σε κάποια είδους εξιδανίκευση απ' την πλευρά του λογισμικού, αφ' ετέρου δε σε κάποιο σφάλμα μέτρησης (οφειλόμενο είτε σε αδυναμία του παρατηρητή είτε σε συστηματικό σφάλμα προερχόμενο απ' την προβλεπόμενη ακρίβεια των οργάνων μέτρησης).

Στα δύο στάδια μελέτης (πειραματική, προσομοίωση) δίνεται η δυνατότητα της μελέτης και προσομοίωσης των θερμοκρασιακών μεταβολών στο μονωτήρα πορσελάνης. Έτσι παρατηρήθηκε αρχικά σύγκλιση των πειραματικών μετρήσεων με αυτές που προέκυψαν μέσα από τη διαδικασία της προσομοίωσης για τους αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι κοντά στο σημείο επαφής αγωγού μονωτήρα. Ενδεικτικά αυτό απεικονίζεται στις γραφικές παραστάσεις από V.2-1 έως V.2-8 για διαφορετικές τιμές έντασης ρεύματος και για τους αισθητήρες AI1 και AI2.



Γραφική παράσταση V.2-1: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII για 250A.



Γραφική παράσταση V.2-2: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2 για 250A.



Γραφική παράσταση V.2-3: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII για 300A.



Γραφική παράσταση V.2-4: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2 για 300A.



Γραφική παράσταση V.2-5: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII για 350A.



Γραφική παράσταση V.2-6: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2 για 350A.

Κεφάλαιο V – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης



Γραφική παράσταση V.2-7: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AII για 400A.



Γραφική παράσταση V.2-8: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI2 για 400A.

Δεν ισχύει όμως, το ίδιο και όταν αυτοί ήταν σε σχετική απόσταση από το συγκεκριμένο σημείο. Ενδεικτικά στις γραφικές παραστάσεις από V.2-9 έως V.2-16 και για τους αισθητήρες AI7 και AI8, για διαφορετικές τιμές της έντασης του ρεύματος, φαίνεται η απόκλιση.

Κεφάλαιο V - Σχόλια επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης



Γραφική παράσταση V.2-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7 για 250Α.



Γραφική παράσταση V.2-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8 για 250A.



Γραφική παράσταση V.2-11: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7 για 300Α.

Κεφάλαιο V – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης



Γραφική παράσταση V.2-12: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8 για 300A.



Γραφική παράσταση V.2-13: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7 για 350Α.



Γραφική παράσταση V.2-14: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8 για 350A.

Κεφάλαιο V – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων προσομοίωσης



Γραφική παράσταση V.2-15: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα ΑΙ7 για 400Α.



Γραφική παράσταση V.2-16: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρήσεων για μεταβολές θερμοκρασίας στο αισθητήρα AI8 για 400A.

Οι διαφορές αυτές, αν και δεν είναι μεγάλες, μπορούν να δικαιολογηθούν, στο πλαίσιο των σφαλμάτων και των αποκλίσεων που προκύπτουν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων [147].

Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε με ικανοποιητικά αποτελέσματα η βελτιστοποίηση του τρόπου μοντελοποίησης μονωτήρων υψηλής τάσης. Προς επίτευξη τούτου, ελέγχθηκε η επίδραση του μεγέθους του περιβάλλοντα χώρου του μονωτήρα, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια θεωρήθηκε γειωμένη (άπειρη γη), αυξήθηκε κατάλληλα το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου και βελτιώθηκε ο τρόπος σχεδίασης του μοντέλου. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις αξιοποιήθηκε, επιπλέον, η αξονική συμμετρία που παρουσιάζει ένας μονωτήρας. Η μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις επέτρεψε να ληφθούν υπ' όψη όλα τα στοιχεία που ήταν συνδεόμενα με το μονωτήρα, κάτι που οδήγησε σε αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαφάνηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα, γεγονός το οποίο αποτέλεσε πολύτιμη πληροφορία για τη βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων.

3 Σχόλια επί των πειραματικών μετρήσεων για διαφορετικές θέσης παρατήρησης του δοκιμίου από τη θερμική κάμερα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματά μας είναι προφανές ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας του υπό μέτρηση δοκιμίου και της τιμής της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας. Αυτό το αποτέλεσμα είναι κοινό για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάσαμε, όπως φάνηκε και από τις γραφικές παραστάσεις.

Επιπλέον, η σωστή τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας επηρεάζεται από την απόσταση, όσο η απόσταση αυξάνεται, τόσο η τιμή της εκπεμπτικότητας μειώνεται για διάφορες γωνίες. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι καθώς οι αποστάσεις αυξάνονται το μέγεθος της εικόνας του δείγματος γίνεται μικρότερο και υπεισέρχονται και εξωτερικοί παράγοντες που δείχνουν να επιδρούν στη ρύθμιση της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας. Τα σχήματα V.3-1 και V.3-2 δείχνουν τις θερμικές εικόνες για τον ίδιο μονωτήρα σε διαφορετικές αποστάσεις κατά τα πρώτα στάδια θέρμανσης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο μονωτήρας πορσελάνης θερμάνθηκε ομοιογενώς. Αυτό το παράδειγμα παρουσιάζει τη μείωση του μεγέθους του πορσελάνινου μονωτήρα, καθώς η απόσταση αυξάνεται. Επομένως, είναι σημαντικό η κάμερα να τοποθετηθεί σε σταθερή θέση παρατήρησης, διότι διαφορετικά είναι δύσκολο να εστιάσει με ακρίβεια στα σημεία που πρέπει να μετρηθούν. Αυτό το πρόβλημα δεν είναι τόσο σημαντικό όταν τα δείγματα είναι μεγαλύτερα.



Σχήμα V.3-1: Θερμική εικόνα μονωτήρα πορσελάνης σε απόσταση 1m.



Σχήμα V.3-2: Θερμική εικόνα μονωτήρα πορσελάνης σε απόσταση 6m.

Σχετικά με την επίδραση της γωνίας στην επιλογή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας, όπως μπορεί να φανεί καθαρά από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας αυξάνεται καθώς μειώνεται η γωνία. Αυτό πιθανώς υποδηλώνει ότι η εκπομπή ενέργειας ΙR εξαρτάται από τη γωνία ακτινοβολίας.

4 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων μέτρησης και μοντελοποίησης

Αρχικά μέσα από τα δεδομένα που προέκυψαν από τα παραπάνω μοντέλα έγινε δυνατή η εξαγωγή μαθηματικών συναρτήσεων που σχετίζουν την παράμετρο της εκπεμπτικότητας (ε) με τη θερμοκρασία T (°C) κάτι που λεπτομερώς έχει αναφερθεί στο εισαγωγικό κεφάλαιο I.4 σχετικά με τη χρήση και λειτουργία της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (MET). Το ζητούμενο ήταν να μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνάρτηση και κατ' επέκταση την τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας για οποιαδήποτε μετρούμενη τιμή της θερμοκρασίας από οποιαδήποτε απόσταση έχοντας στη διάθεσή μας τον πίνακα των τιμών που μας δίνεται ή τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από αυτόν. Επιπλέον, η ακρίβεια των μοντέλων συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα και έγινε επαλήθευση των μαθηματικών εκφράσεων που προέκυψαν. Με την ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) εξετάσαμε τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών με σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της μιας μέσω των τιμών της άλλης.

Φυσικά, κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων η απόσταση μεταξύ της θερμικής κάμερας και του δείγματος άλλαζε ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων που είχαμε προσδιορίσει. Η όλη επιφάνεια ήταν πολύ ομαλή διαφορετικά τα αποτελέσματα θα είχαν επηρεαστεί από την αντανάκλαση.

Επιπλέον, για κάθε σημείο μέτρησης η τιμή της παραμέτρου εκπεμπτικότητας της θερμικής κάμερας άλλαζε έτσι ώστε η θερμοκρασία μέτρησης να συμπίπτει με τη θερμοκρασία που μετρήθηκε από τους αισθητήρες PT-100. Τα δεδομένα και οι εικόνες συλλέχθηκαν από τη θερμική κάμερα και αποθηκεύτηκαν στην εξωτερική μνήμη της που αποτελούσε και το αποθηκευτικό μέσο για μεταφορά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα δεδομένα από τη μνήμη της θερμικής κάμερας και του ψηφιακού θερμόμετρου μεταφέρθηκαν σε κοινή βάση δεδομένων προσωπικού υπολογιστή για μελέτη και ανάλυση.

Η τιμή της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας 0,99 επιλέχθηκε ως αφετηρία. Αυτή η τιμή συνήθως υποδεικνύεται από τους κατασκευαστές θερμικών μηχανών. Αυτή η τιμή τροποποιήθηκε στη συνέχεια προκειμένου να εκτιμηθεί ποια τιμή της ήταν πιο κατάλληλη σε σύγκριση με τον μετρητή θερμοκρασίας.

Όπως είναι προφανές από τα αποτελέσματα των παραπάνω γραφικών παραστάσεων και μαθηματικών σχέσεων τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για πολυώνυμα πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού έχουν διαφορές. Καθένα από τα τρία που αναλύθηκαν παρουσίασαν μαθηματικές ιδιότητες που σχετίζονταν άμεσα με την ποιότητα και την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Φυσικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επικύρωση των παραπάνω πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων που έγιναν. Στην πραγματικότητα όπως εύκολα είναι αντιληπτό καθώς αυξάνεται ο βαθμός του πολυωνύμου είναι καλύτερη και ακριβέστερη η προσέγγιση του μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι, το πολυώνυμο τρίτου βαθμού ήταν ο καλύτερος, αποτελεσματικότερος και πληρέστερος τρόπος για να προσεγγίσουμε όσο το δυνατό ακριβέστερα τα πειραματικά αποτελέσματα, κάτι που προκύπτει και από τις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν.



Γραφική παράσταση V.4-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και μοντελοποίησης για πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού πολυώνυμο για απόσταση 1m.


Γραφική παράσταση V.4-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και μοντελοποίησης για πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού πολυώνυμο για





Γραφική παράσταση V.4-3: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και μοντελοποίησης για πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού πολυώνυμο για απόσταση 4m.



Γραφική παράσταση V.4-4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων και μοντελοποίησης για πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού πολυώνυμο για απόσταση 6m.

Κεφάλαιο VI: Συμπεράσματα και συμβολή της διατριβής στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές

1 Γενικά

Η αριθμητική επίλυση σύνθετων συστημάτων-προβλημάτων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών, όταν η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι δύσκολη. Χάρη στην αλματώδη πρόοδο της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι πλέον δυνατή η αποδοτική προσομοίωση σύνθετων συστημάτων που προκύπτουν σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η μηχανική, η ιατρική κ.α..

Πλεονέκτημα της υπολογιστικής μηχανικής αποτελεί η δυνατότητα επίλυσης σύνθετων προβλημάτων χωρίς να απαιτείται η χρήση ακριβού εξοπλισμού και δοκιμίων. Πολύ συχνά μάλιστα οι απαιτούμενες προσομοιώσεις μπορούν να γίνουν σε συμβατικούς προσωπικούς υπολογιστές, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύς.

Η εξοικονόμηση πόρων είναι μία σημαντική παράμετρος, ωστόσο σημαντικότερο είναι το γεγονός ότι με την υπολογιστική επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποιείται η έκθεση του εργαστηριακού προσωπικού σε κινδύνους. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπως τα εργαστήρια υψηλών τάσεων, όπου τα μέτρα ασφαλείας και προφύλαξης του προσωπικού πρέπει να είναι ιδιαίτερα αυξημένα.

Φυσικά οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν αποτελούν πανάκεια στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Οι πραγματικές συνθήκες που διέπουν μία φυσική διεργασία δεν είναι πάντα εύκολο να μοντελοποιηθούν, ενώ οι παραδοχές που απαιτούνται κάποιες φορές εισάγουν σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Μολαταύτα, με συνεχή έρευνα και σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων τα εμπόδια αυτά μπορούν να υπερκεραστούν προς όφελος της επιστημονικής κοινότητας, της βιομηχανίας και τελικά του κοινού.

2 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει την παρουσίαση της σχετικής με τους μονωτήρες γραμμών μεταφοράς βιβλιογραφίας, μελετών που έχουν γίνει, την

περιγραφή των διεξαχθέντων πειραμάτων και επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους και την ανάλυση και μοντελοποίηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά των μονωτήρων στις γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσεως.

Τα κύρια σημεία της διδακτορικής διατριβής είναι:

- Η αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων περί των θερμοκρασιακών μεταβολών προκειμένου να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για την καλύτερη και ακριβέστερη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.
- Η προσέγγιση των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσω της δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνθήκες περιβάλλοντος, τη δομή του μονωτήρα, τα χαρακτηριστικά του και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που τον αποτελούν.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραμάτων.
- Η πειραματική μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών με χρήση νέων ανέπαφων μεθόδων. Συγκεκριμένα, μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας και της κατάλληλης θερμικής κάμερας, πώς τα διαφορετικά σημεία παρατήρησης. και οι παράμετροι της τελευταίας επηρεάζουν τη διαδικασία.
- Η αξιολόγηση υπαρχουσών αναλυτικών μεθοδολογιών για την ανάπτυξη του βέλτιστου μοντέλου των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στη χρήση ανέπαφων μεθόδων μέτρησης με την ακριβέστερη δυνατή προσέγγιση.

Σκοπός της διατριβής όπως δηλώνεται με τον τίτλο της είναι η μελέτη, ανάλυση και μοντελοποίηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στις θερμοκρασιακές μεταβολές στους μονωτήρες γραμμών μεταφοράς κατά τη λειτουργία τους στο δίκτυο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβολές αυτές και τη συμπεριφορά των μονωτήρων είναι: η μορφή των μονωτήρων, τα υλικά κατασκευής τους, το μέγεθος τους, η καθαρότητα της επιφάνειας τους, καθώς και το περιβάλλον και οι συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένοι. Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα αυτά που επηρεάζουν τη λειτουργία τους για την ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς τους

πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια πορσελάνινων μονωτήρων που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς από 250 A έως 400 A. Τα πειράματα αυτά, καθώς και προγενέστερα διεξαχθέντα πειράματα αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών, καθώς και για την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών.

Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαφάνηκε ότι ο προσδιορισμός των θερμοκρασιακών μεταβολών σε ένα μονωτήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη λειτουργία, την αξιολόγηση και φυσικά την επιλογή του προς χρήση. Για το λόγο αυτό διεξήχθησαν μετρήσεις σε μονωτήρες που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων λήφθηκαν υπ' όψιν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα καθώς και η φύση των υλικών που τον απαρτίζουν.

Οι ληφθείσες μετρήσεις αποτέλεσαν τη βάση για την αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης μονωτήρων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης των μονωτήρων σύμφωνα με τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των πραγματικών. Η μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις επέτρεψε να ληφθούν υπ' όψη μη συμμετρικά στοιχεία συνδεόμενα με το μονωτήρα κάτι που οδήγησε σε αύξηση της ακριβείας των αποτελεσμάτων.

Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ αυτών. Επιπλέον, όπως αποδείχτηκε από τις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά όσο αυξάνει ο βαθμός τμηματοποίησης προσεγγίζοντας καλύτερα τα πειραματικά. Έτσι, δημιουργήθηκε το βέλτιστο δυνατό μοντέλο προσομοίωσης που μπορεί να βρει εφαρμογή σε διαφορετικού τύπου μονωτήρες με βασική προϋπόθεση τη λεπτομερή καταχώρηση των επιμέρους χαρακτηριστικών τους στο μοντέλο.

Ένα απ' τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε μονωτήρες Υψηλής Τάσης που λειτουργούν σε δίκτυο είναι ο έλεγχος τους σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας τους και πως οι θερμοκρασιακές μεταβολές επιδρούν σε αυτές. Στο σημείο αυτό έγινε χρήση νέων μεθόδων ανέπαφων μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών στους μονωτήρες. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η υπέρυθρη ακτινοβολία και με βασικό όργανο μέτρησης τη θερμική κάμερα έγιναν μετρήσεις για διαφορετικά σημεία παρατήρησης. Συνεπώς, η γνώση του σημείου παρατήρησης και των παραμέτρων της θερμικής κάμερας που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία.

Ο τρόπος με τον οποίο καθεμιά από τις παραμέτρους αυτές συμβάλλει δεν είναι γνωστός. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου εισάγει αβεβαιότητα, η οποία οδηγεί στη υιοθέτηση προσεγγίσεων. Στο σημείο αυτό η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση πρόβλεψη και εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη ρύθμιση των παραμέτρων και κύρια της εκπεμπτικότητας που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ελέγχθηκε η αξιοπιστία μαθηματικών μοντέλων προκειμένου να ευρεθεί το βέλτιστο για την εκτίμηση της παραμέτρου. Υλοποιήθηκαν δοκιμές για διαφορετικό βαθμό πολυωνύμων με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Σε κάθε περίπτωση γρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα. Κρίνοντας τόσο από την τιμή της συσχέτισης μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου όσο και από την τιμή των μέσων σφαλμάτων για τρίτου βαθμού πολυώνυμο είναι δυνατό να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η μεταβολή της παραμέτρου της εκπεμπτικότητας. Έτσι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης της ανεξάρτητα από τον τύπο του μονωτήρα, συμβάλλοντας στον ανέπαφο έλεγγο της κατάστασής τους.

3 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής στη μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών των μονωτήρων υψηλής τάσης, προκύπτει συσχετίζοντας τα εκτεθέντα στο τέλος της προηγούμενης ενότητας κυριότερα συμπεράσματά με τις αντίστοιχες εργασίες άλλων ερευνητών που ορίζουν το σημερινό επίπεδο γνώσεων στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί εν συντομία να συνοψιστεί στα ακόλουθα:

<u>Πειραματικό μέρος</u>

 Πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραμάτων για τη μελέτη των θερμοκρασιακών μεταβολών που δημιουργούνται, τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο εσωτερικό μονωτήρων. Οι τιμές του ρεύματος που διαρρέει τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κινήθηκαν σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος και μελετήθηκε η επίδραση τους σε βάθος χρόνου. Οι μετρήσεις των μεταβολών αυτών συμβάλλουν σημαντικά στη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς των μονωτήρων σε πραγματικές συνθήκες. Αποδεικνύουν πόσο μεγάλη είναι η επίδραση των υλικών κατασκευής του μονωτήρα, της γεωμετρίας του σχήματός του, καθώς και της θέσης τοποθέτησής του. Η διεξαγωγή σε δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενισχύει τη χρησιμότητά τους και αποτελεί συμβολή - πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής.

- Σχετικά με την κατανομή της θερμότητας το πλησιέστερο προς τον αγωγό υψηλής τάσης μέρος μονωτήρας θερμαίνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη, ενώ σταδιακά η θερμοκρασία του μειώνεται πλησιάζοντας προς τον πυλώνα. Μέσα από αυτό είναι φανερό πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα επιμέρους υλικά που αποτελούν το εσωτερικό του μονωτήρα. Στη διατριβή αυτή κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό στα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών τους, καθώς και στις θερμοκρασιακές μεταβολές που τα επηρεάζουν.
- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαφάνηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής της επιφάνειας του μονωτήρα στην κατανομή της θερμότητας. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε πολύτιμη πληροφορία για τη βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων που ακολούθησαν.
- Όπως σημασία δόθηκε και στην ομοιομορφία, ομαλότητα και καθαρότητα της επιφάνειας του μονωτήρα. όσο πιο ομοιόμορφη είναι η επιφάνεια τόσο πιο ομαλή είναι η κατανομή της θερμότητας. Επιπλέον, η επικάθηση ρύπανσης παρουσιάζει μεταβολές στη συμπεριφορά του μονωτήρα καθιστώντας προφανώς ανεπιθύμητη την ύπαρξη της.
- Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων για την κατανομή της θερμότητας. Η μικρή διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων αποδεικνύει την ακρίβεια τους.
- Οι ληφθείσες μετρήσεις συνέβαλαν στην επαλήθευση και επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, αποτέλεσαν βασική αρχή για την ανάπτυξη

μοντέλου υπολογισμού των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μετρήσεις κυρίως κατά τη χρήση της ανέπαφης μεθόδου.

<u>Προσομοιώσεις</u>

- Προτάθηκαν και επιλύθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια και αποτελούν αρωγό στην επιλογή του σωστού τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή. Η επίλυσή τους έγινε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστούν οι θερμοκρασιακές μεταβολές, τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα, κάτι καινοτόμο σχετικά με το εύρος των προσομοιώσεων που έγινε, τόσο ποσοτικά, όσο και χρονικά, προσεγγίζοντας με λεπτομέρεια πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε με ικανοποιητικά αποτελέσματα η βελτιστοποίηση του τρόπου μοντελοποίησης μονωτήρων υψηλής τάσης. Προς επίτευξη τούτου ελέγχθηκε η επίδραση του μεγέθους του περιβάλλοντα χώρου του μονωτήρα και αυξήθηκε το πλήθος των κόμβων σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου. Στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις αξιοποιήθηκε επιπλέον η αξονική συμμετρία που παρουσιάζει ένας μονωτήρας.
- Η ανάγκη δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης προέκυψε από την αδυναμία προσομοίωσης σε δύο διαστάσεις των μη συμμετρικών στοιχείων που συνδέονται με τον μονωτήρα (γραμμή μεταφοράς και πυλώνας). Η σαφής οριοθέτηση όλων των σχηματικών ιδιαιτεροτήτων και των καμπυλών που τον αποτελούν αποτελεί πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής.
- Η αξιοπιστία των μοντέλων ενισχύεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα για την κατανομή θερμότητας, που προέκυψαν από το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες. Η σύγκλιση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα οδηγεί στη σκέψη ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατανομής της θερμότητας του μονωτήρα δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα. Η διαδικασία δημιουργίας και βελτιστοποίησης των μοντέλων προσομοίωσης αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.

<u>Κυκλωματική -μαθηματική προσέγγιση</u>

- Η θερμοκρασιακή μεταβολή αποτελεί ένα μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο είναι δυναμικό στην εξέλιξή του και επηρεάζεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και από τις συνθήκες λειτουργίας. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου καθιστά ανέφικτη τη δημιουργία ενός κυκλωματικού μοντέλου που να εφαρμόζεται σε όλους τους μονωτήρες δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών μεταβολών. Προκειμένου να ευρεθεί το βέλτιστο συγκρίθηκαν με όλα με τα πειραματικά αποτελέσματα και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους. Η διαπίστωση της σημαντικής επίδρασης που παίζουν τα υλικά του δοκιμίου και το μέσο παρατήρησης οδήγησε στη χρήση μοντέλου που να ελαχιστοποιεί το σφάλμα υπολογισμού σε σχέση με τις πειραματικές τιμές.
- Τα αποτελέσματα και τα μοντέλα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης τους με κατάλληλη προσαρμογή των επιμέρους χαρακτηριστικών τους σε μεγάλο εύρος μελετών.
- Το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που επιλέχθηκε οδήγησε στην κατάλληλη εξίσωση με κύριο σημαντικό κριτήριο επιλογής τα σημεία καμπής των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν από την απεικόνιση των πειραματικών μετρήσεων.

<u>Άλλες εφαρμογές</u>

- Μέσα από την ανάλυση του σύνθετου μοντέλου μπορούν να εξαχθούν σημαντικές μαθηματικές εκφράσεις ερμηνεύοντας έτσι τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες του υπό μελέτη δοκιμίου και των συγκεκριμένων συνθηκών. Αυτές οι μαθηματικές εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν συμπεριφορές και λειτουργίες ποικιλίας τέτοιων διατάξεων προσομοιώνοντας τες και οδηγώντας σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία τους.
- Οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ δεν αποτέλεσαν πρόβλημα μέσα από τη χρήση του PC ANSYS (προγράμματος προσομοίωσης). Η εκτενής ενασχόλησή μας με το πρόγραμμα προσομοίωσης PC ANSYS

ανέδειξε την ικανοποιητική λειτουργία του και την ευκολία στη χρήση του για επίλυση παρόμοιων προβλημάτων με υλικά διαφορετικής σύνθεσης σε διαφορετικές συνθήκες. Έτσι, σημαντική είναι η συνεισφορά της εργασίας αυτής στον τρόπο μελέτης, ανάλυσης και κατανόησης φαινομένων που αναπτύσσονται σε σύνθετα μονωτικά. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη διαγνωστικών εργαλείων, τα οποία είναι χρήσιμα (και απαραίτητα) για τη διάγνωση βλαβών σε ήδη εγκατεστημένους μονωτήρες και όχι μόνο.

- Μέσα από την υπέρυθρη θερμογραφία και τη μελέτη που έγινε είναι δυνατή η προληπτική συντήρηση δεδομένου ότι η θερμοκρασία είναι από τους κύριους λειτουργικούς παράγοντες που καταδεικνύουν την κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Επιπλέον, δεδομένου των ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών της παλαιότητας του εξοπλισμού καθώς και των απότομων διακυμάνσεων του φορτίου, η μελέτη και έρευνα στα πλαίσια της διατριβής αυτής συμβάλλει στον εντοπισμό των σφαλμάτων και μελλοντικών δυσλειτουργιών.
- Επίσης, είναι δυνατή η ανίχνευση ανωμαλιών, οπότε καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της σοβαρότητάς τους και η λήψη ορθών αποφάσεων για την επισκευή τους. Φυσικά όλα αυτά συμβάλλουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής των εγκαταστάσεων της ηλεκτροπαραγωγής.
- Επιπλέον η μελέτη που πραγματοποιήθηκε καθιστά δυνατή την ακριβή επιθεώρηση του εξοπλισμού χωρίς διακοπή της παραγωγής μειώνοντας αισθητά το χρόνο και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού. Οποιοδήποτε μη ορατό σφάλμα στον μονωτήρα είναι ανιχνεύσιμο πλέον πολύ γρήγορα. Επιπρόσθετα, δίνει τη δυνατότητα επιθεωρήσεων συντήρησης από απόσταση και με ασφάλεια.

4 Επέκταση της διατριβής

Κλείνοντας, παρατίθενται κάποιες σκέψεις, οι οποίες θα μπορούσαν να υλοποιηθούν στα πλαίσια μίας ενδεχόμενης επέκτασης της παρούσας διατριβής.

Αρχικά, οφείλουμε να επισημάνουμε τους βασικότερους παράγοντες, στους οποίους πρέπει ο μελλοντικός σχεδιαστής που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα ANSYS να δώσει ιδιαίτερη προσοχή. Έτσι:

- Ο αριθμός των πεπερασμένων τριγωνικών στοιχείων, στα οποία το πρόγραμμα υποδιαιρεί την υπό ανάλυση επιφάνεια είναι ικανοποιητικός όμως στα σημεία που δύο ή περισσότερα υλικά είναι σε επαφή θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην πλεγματοποίηση-τμηματοποίηση, ώστε να είναι λεπτομερής και ακριβής η αποτύπωση της συμπεριφοράς σε εκείνα τα σημεία.
- Η εξωτερική περιοχή που συνιστά τον ατμοσφαιρικό αέρα πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλη. Σε διαφορετική περίπτωση το δυναμικό της εξωτερικής επιφάνειας θα επηρεάσει τη διάταξη παρέχοντας ανακριβείς τιμές για τα υπό μελέτη χαρακτηριστικά μεγέθη της διάταξης.
- Η απεικόνιση μας μπορεί να γίνει ακόμα καλύτερη με τη χρήση περισσότερων χρωμάτων. Το πρόγραμμα έχει ορίσει σαν αρχική επιλογή τη χρήση 11 αποχρώσεων, όμως εμείς αυτό μπορούμε να το αλλάξουμε και να βάλουμε 32.
- Ιδιαίτερα προσεκτικός οφείλει να είναι ο καθορισμός των διαφορετικών υλικών σε μια διάταξη. Εκτός από τον ορισμό ρεαλιστικής τιμής της αγωγιμότητάς τους (σ), είναι απαραίτητος και ο ανάλογος προσδιορισμός της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (εr). Ορίζοντας μόνο το πρώτο μέγεθος το πρόγραμμα δεν αντιλαμβάνεται το υλικό που θέλουμε να παραστήσει μία περιοχή.
- Πολύ σημαντικό για την επίλυση των προβλημάτων είναι ο προσεκτικός σχεδιασμός του μονωτήρα. Σε περίπτωση που το σχέδιο μας έχει λάθη τότε το πρόγραμμα δεν μας αφήνει να προχωρήσουμε στον καθορισμό των υλικών.

Όπως αποδείχτηκε από τη διαδικασία προσομοίωσης του μονωτήρα, στα αποτελέσματα επιδρά σημαντικά η επιφάνεια, οι διαστάσεις και τα υλικά του. Κάθε εμπορικά διαθέσιμο υλικό έχει άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη συμπεριφορά. Έτσι, η διεξαγωγή πειραμάτων με τη γνώση των υλικών και της ακριβούς εσωτερικής δομής των μονωτήρων μπορεί να οδηγήσει στη βέλτιστη επιλογή τους ανάλογα με τη χρήση.

Τέλος, η ενσωμάτωση στο τρισδιάστατο πρόγραμμα προσομοίωσης ANSYS του κατάλληλου επιλύτη για την ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος ροής ρεύματος αναμένεται να γίνει από την εταιρεία υποστήριξης του λογισμικού. Η χρήση του θα μειώσει το σφάλμα των μοντέλων προσομοίωσης. Παράλληλα, είναι δυνατή η δημιουργία υβριδικών προγραμμάτων προσομοίωσης, τα οποία θα συνδυάζουν

περισσότερες της μίας αριθμητικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων ροής θερμότητας.

Δεν πρέπει να παραλείψουμε εδώ τη σημασία της χρήσης του MATLAB, μέσω του οποίου είναι δυνατή η άμεση και ακριβής εξαγωγή των σχέσεων, καθώς και της επαλήθευσής τους. Έτσι, μεταβάλλοντας τις αρχικές συνθήκες καθορισμού του μοντέλου, είναι δυνατή η χρήση του στη μελέτη και παρατήρηση διαφορετικών δοκιμίων με διαφορετική κατανομή και σύνδεση σε δίκτυο.

Παράρτημα

<u> Δημοσιεύσεις σε συνέδρια</u>

J.S.Katsanis, P.I.Lerantzis, P.T.Tsarabaris: "Energy Saving Opportunities for HVAC Systems in Hospitals", The Case of Ventilation and Air-Conditioning Systems", 6th International Conference on Interdisciplinarity in Education Icie'11: Research in Engineering and Related Disciplines & Jointly International Steering Committee Meeting, Karabuk/ Safranbolu, Turkey, (April 14-16, 2011)

P.I.Lerantzis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Study of Thermal Behavior of Porcelain Insulators with the Finite Element Method", Materials and applications for sensors and transducers : selected, peer reviewed papers from the 1st International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (IC-MAST), May 13-17 2011, Kos Island, Greece

P.I.Lerantzis, N.V.Kontogiannis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Evaluation of Wall Paint Emissivity during Infrared Thermography Temperature Measurement", Materials and applications for sensors and transducers : selected, peer reviewed papers from the 1st International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (IC-MAST), May 13-17 2011, Kos Island, Greece

<u> Δημοσιεύσεις σε περιοδικά</u>

P.I.Lerantzis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Study of Thermal Behavior of Porcelain Insulators with the Finite Element Method", Sensor Letters, Vol 11, pp. 237-241, (2013)

P.I.Lerantzis, N.V.Kontogiannis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Evaluation of Wall Paint Emissivity during Infrared Thermography Temperature Measurement Sensor Letters, Vol 11, pp. 311-313, (2013)

P.I.Lerantzis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Study of Thermal Behavior of Porcelain Insulators with the Finite Element Method", Key Engineering Materials, Vol 495, pp. 245-248, (2011) (περιοδικό συνεδρίου)

P.I.Lerantzis, N.V.Kontogiannis, P.T.Tsarabaris, N.J.Theodorou: "Evaluation of Wall Paint Emissivity during Infrared Thermography Temperature Measurement", Key Engineering Materials, Vol 495, pp. 242-244, (2011) (περιοδικό συνεδρίου)

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα Ι.1.1-1: Μία ταξινόμηση των μονωτήρων υψηλής τάσης
Σχήμα Ι.2.2.1-1: Τριγωνικό τρικομβικό στοιχείο σε δισδιάστατο πεδίο επίλυσης
Σχήμα ΙΙΙ.2-1: Διαστάσεις και χαρακτηριστικά πορσελάνινου μονωτήρα σε mm
Σχήμα ΙΙΙ.2.1-1: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης μέτρησης, 1:Μετασχηματιστής,
2: Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 3: Ψηφιακό θερμόμετρο
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-1: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-2: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα, (κάτοψη)51
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-3: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα από κάτω
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-4: Απεικόνιση μοντέλου πορσελάνινου μονωτήρα τομή
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-5: Δενδροειδής απεικόνιση των υλικών του δοκιμίου
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-6: Απεικόνιση τομής του δοκιμίου μετά τη δημιουργία του πλέγματος
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-7: Δενδροειδής απεικόνιση των υλικών του δοκιμίου μετά τη δημιουργία του πλέγματος και
των καθορισμένων εργαστηριακών συνθηκών53
Σχήμα ΙΙΙ.2.2-8: Διάγραμμα ροής και συνδέσεων στο πρόγραμμα ANSYS 1:Γεωμετρία χώρου,
2: Γεωμετρία πορσελάνινου μονωτήρα, 3: Γεωμετρία αγωγού, 4: Δεδομένα-χαρακτηριστικά για το
περιβάλλον, δοκίμιο, αγωγό, 5:Συνθήκες θερμοκρασίας χώρου, 6:Συνθήκες θερμοκρασίας πορσελάνινου
μονωτήρα,7 Συνθήκες θερμοκρασίας αγωγού54
Σχήμα ΙΙΙ.3-1: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης για συγκεκριμένη γωνία 0° και θ°, 1:Υπολογιστής
καταγραφής μετρήσεων, 2: Ψηφιακό θερμόμετρο, 3:Θερμική κάμερα, 4:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα,
5: ΡΤ-100 Αισθητήρες θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας
Σχήμα ΙΙΙ.3-2: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης για συγκεκριμένες αποστάσεις και διαφορετικές
γωνίες, 1: Υπολογιστής καταγραφής μετρήσεων, 2: Ψηφιακό θερμόμετρο, 3: Θερμική κάμερα, 4: Δοκίμιο
πορσελάνινου μονωτήρα, 5:PT-100 Αισθητήρες θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας
Σχήμα ΙΙΙ.4.1-1: Δομή πειραματικής διάταζης μέτρησης, 1:Υπολογιστής καταγραφής μετρήσεων,
2:Ψηφιακό θερμόμετρο, 3:Θερμική κάμερα, 4:Δοκίμιο πορσελάνινου μονωτήρα, 5:PT-100 Αισθητήρες
θερμοκρασίας, 6:Θερμαντήρας, 7:Βάση Δεδομένων57
Σχήμα ΙΙΙ.4.2-1: Δομή διαγράμματος
Σχήμα ΙV.2.2-1: Δημιουργία πλέγματος εζωτερική απεικόνιση
Σχήμα ΙV.2.2-2: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση τομής
Σχήμα ΙV.2.2-3: Δημιουργία πλέγματος εζωτερική απεικόνιση τομής
Σχήμα ΙV.2.2-4: Δημιουργία πλέγματος εζωτερική απεικόνιση
Σχήμα ΙV.2.2-5: Δημιουργία πλέγματος εζωτερική απεικόνιση
Σχήμα ΙV.2.2-6: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση τομής
Σχήμα ΙV.2.2-7: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό πορσελάνη
Σχήμα ΙV.2.2-8: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό τσιμέντο του μονωτήρα90
Σχήμα ΙV.2.2-9: Δημιουργία πλέγματος εσωτερική απεικόνιση στο υλικό της ασφάλτου του μονωτήρα90
Σχήμα V.3-1: Θερμική εικόνα μονωτήρα πορσελάνης σε απόσταση 1m142
Σχήμα V.3-2: Θερμική εικόνα μονωτήρα πορσελάνης σε απόσταση 6m

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας ΙΙΙ.2-1: Χαρακτηριστικά πορσελάνινου μονωτήρα	45
Πίνακας ΙΙΙ.2.1-1: Χαρακτηριστικά αισθητήρων ΡΤ-100	46
Πίνακας ΙΙΙ.2.2-1: Ισοπαραμετρικά συζευγμένα στοιχεία πεδίου στους κόμβους	49
Πίνακας ΙΙΙ.3-1: Χαρακτηριστικά θερμικής κάμερας	55
Πίνακας ΙV.2.1.1-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 250Α	64
Πίνακας ΙV.2.1.2-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 275Α	68
Πίνακας ΙV.2.1.3-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 300Α	71
Πίνακας ΙV.2.1.4-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 325Α	74
Πίνακας ΙV.2.1.5-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 350Α	78
Πίνακας ΙV.2.1.6-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 375Α	81
Πίνακας ΙV.2.1.7-1: Αποτελέσματα για ένταση ρεύματος αγωγού 400Α	84
Πίνακας ΙV.2.2.1-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 250Α	91
Πίνακας VI.2.2.2-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 275A	94
Πίνακας ΙV.2.2.3-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 300Α	98
Πίνακας ΙV.2.2.4-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 325Α	101
Πίνακας ΙV.2.2.5-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 350Α	105
Πίνακας ΙV.2.2.6-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 375Α	108
Πίνακας ΙV.2.2.7-1: Αποτελέσματα για τιμή ρεύματος αγωγού 400Α	112
Πίνακας ΙV.3-1: Τιμές της θερμοκρασίας σε PT-100 και θερμική κάμερα για $\ell=0$ $\theta=0^{\circ}$	116
Πίνακας ΙV.3.1-1: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $ heta=$	0° каі
αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m	116
Πίνακας ΙV.3.1-2: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\theta=3$	0° каі
αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m	117
Πίνακας ΙV.3.1-3: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ =4	5° και
αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m	117
Πίνακας ΙV.3.1-4: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\theta{=}6$	0° каі
αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m	117
Πίνακας ΙV.3.1-5: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για θ =8	0° каі
αποστάσεις 1m, 2m, 4m και 6m	118
Πίνακας IV.3.2-1: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\ell=1$	т каі
γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°	121
Πίνακας ΙV.3.2-2: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\ell=2$	т και
γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°	121
Πίνακας ΙV.3.2-3: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\ell=4$	т каі
γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°	122
Πίνακας ΙV.3.2-4: Τιμή εκπεμπτικότητας σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας για $\ell=6$	т кал
γωνίες 0°, 30°, 45°,60° και θ=80°	122

Βιβλιογραφία

- [1] Νικολάου Σ.: "Σύζευξη ενεργειακών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων", Κρήτη, (2014).
- [2] Que W., Sado S.A.: "Electric field and potential distributions along nonceramic insulators with water droplets", IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 441 - 444, (2001).
- [3] Que W.: "Electric field and potential distributions along dry and clean nonceramic insulators", dissertation, The Ohio State University, (2001).
- [4] Γεωργιλάκης Σ. Π.: "Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής
 Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ
 ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ Ε.Μ.Π, Αθήνα, (2015).
- [5] Χαριτάκης Ι.: "Μελέτη γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60826", Πτυχιακή εργασία, Κρήτη, (2012).
- [6] Δημητριάδου Δ.Δ.: "Μία διερεύνηση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάσπαση σε στερεά ηλεκτρομονωτικά, στον ατμοσφαιρικό αέρα, υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, μέσω μετρήσεων των μερικών εκκενώσεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, (2016).
- [7] Σταθόπουλος Ι.Α.: "Υψηλές Τάσεις Ι", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, (2001).
- [8] Looms J.S.T.: "Insulators for high voltages", Peter Peregrinus Ltd., London, (1990).
- [9] Δέρβος Κ.Θ.: "Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων", Εκδόσεις
 Πολυτεχνείου, Αθήνα (2001).
- [10] Βαΐτσης Η.: "Ρύπανση Μονωτήρων Υψηλής τάσης Μέθοδοι καθαρισμού", Πτυχιακή εργασία, Πάτρα, (2018).
- [11] Σαχπαζίδης Γ.: "Μελέτη Θερμικής Αγωγιμότητας Σύνθετων Υλικών με
 Υπολογιστικές Μεθόδους", Μεταπτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη, (2015).

- [12] Μελιάδης Π.: "Μέτρηση μονωτήρων και υλικών με χρήση Megger 5KV
 Εφαρμογή στη διάγνωση της κατάστασης μόνωσης", Πτυχιακή Εργασία,
 Αθήνα, (2020).
- [13] Αράπη Γ.: "Μελέτη στερεών μονωτήρων", Διπλωματική Εργασία, Πάτρα,(2012).
- [14] Στεργίου Θ.: "Μεταβατική συμπεριφορά γραμμών μέσης τάσης",Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, (2015).
- [15] Ξυδιάς Χ.: "Πειραματική μέτρηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών επιχρισμάτων που χρησιμοποιούνται στη θερμομόνωση κτιρίων", Διπλωματική Εργασία, Χίος, (2016).
- [16] Ρήγας Δ.: "Ανάλυση πειραματικών μετρήσεων του συντελεστή θερμοπερατότητας κτιρίων", Διπλωματική Εργασία, Χανιά, (2017).
- [17] Γιαννακόπουλος Κ.: "Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής Υλικών", ΤΕΙ, Πειραιάς, (2011).
- [18] Δρακωτός Γ.Α.: "Υπολογισμός παρασίτων χωρητικοτήτων και παραμέτρων τόξου υπερπήδησης αλυσοειδών μονωτήρων μέσω γενετικού αλγορίθμου", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2007).
- [19] Πλοκάμης Α.: "Φαινόμενα σε μονωτήρες του δικτύου διανομής λόγω
 βυθίσεων τάσης και λόγω υπερτάσεων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα,
 (2013).
- [20] Μυλωνά Κ.Μ.: "Σπινθηρισμοί σε αγωγούς, μονωτήρες και στατικούς ηλεκτρικούς συνδέσμους", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2015).
- [21] Αναμούρλη Μ.Α.: "Προηγμένα Κεραμικά υλικά (Advanced ceramics) Τεχνολογικές εφαρμογές τους", Πτυχιακή Εργασία, Ηράκλειο, (2014).
- [22] Khan A.A., Husain E.: "Porcelain Insulator Performance under Different Condition of Installation around Aligarh", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 7, No. 7, (2013).

[23]	Κοντομάρης Κ.Ε, Σουρτζής Φ.Α.: "Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2005).
[24]	Mackevitch J., Shah M.: "Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, pp.5-12, (May/June 1997).
[25]	Αλεξοπούλου Β.Ε.: "Γήρανση Μονωτήρων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2006).
[26]	Leguenza E.L., Scarpa P.C.N., Das-Gupta D.K.:"Dielectric Behavior of Aged Polyethylene Under UV Radiation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, pp 507-513, (August 2002).
[27]	Holtzhausen J.P.: "High voltage insulators", Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.idc-online.com/assets/files/highvoltage.pdf.
[28]	Πυλαρινός Δ.: "Διερεύνηση συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης μέσω μετρήσεων του ρεύματος διαρροής", Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα, (2012).
[29]	Lucas J.R.: "High Voltage Direct Current Transmission", High Voltage Engineering, Department of Electrical Engineering, Sri Lanka, (2001).
[30]	Wen C.D., Mudawar I.: "Experimental Investigation of Emissivity of Aluminum Alloys and Temperature Determination Using Multispectral Radiation Thermometry (MRT) Algorithms", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 11, Issue 5, pp.551–562, (1993).
[31]	Palhade R.D., Tungikar V.B., Dhole G.M., and Kherde S. M.: "Transient Thermal Conduction Analysis of High Voltage Cap and Pin Type Ceramic Disc Insulator Assembly", International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 56, pp.73–85, (July 2013).
[32]	Mackevitch J., Shah M.: "Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, pp.5-12, (May/June 1997).

[33]	Λυκοθανάσης Δ.Σ., Μαυροδή Σ., Σκαρλάς Λ.: "Εισαγωγή στις Ευρετικές Μεθόδους", Πάτρα, (2007).
[34]	Περλεπέ Ι.Π.Γ.: "Διάγνωση σφαλμάτων λόγω δυναμικής εκκεντρότητας σε ασύγχρονη μηχανή με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική εργασία, Πάτρα, (2014).
[35]	Liszka T., Orkisz J.: "The finite difference method at arbitrary irregular grids and its application in applied mechanics", Elsevier Computer & Structures, Vol. 11, pp.83-95, (February 1980).
[36]	Panthi S.K., Ramakrishnan N., Pathak K.K., Chouhan J.S.: "An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM)", Elsevier Journal of Materials Technology, Vol. 186, pp.120-124, (May 2007).
[37]	Katsurada M., Okamoto H.: "A mathematical study of the charge simulation method I", Journal of the faculty of science, Vol. 35, pp.507-518, (November 1988).
[38]	Fuchs M., Kastner J., Wagner M., Hawes S., Ebersole S.J.: "A standardized boundary element method volume conductor model", Elsevier Clinical Neurophysiology, Vol. 113, pp.702-712, (May 2002).
[39]	Zhao T., Comber M.G.: "Calculation of electric field and potential distribution along non ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers", IEEE Transactions on power delivery, Vol 15, No. 1, pp. 313-318, (January 2000).
[40]	Πετροπούλου Ε.: "Περιγραφή της εξέλιξης της οστεοπόρωσης στη σπονδυλική στήλη με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία. Πάτρα, (2008).
[41]	Κονταράς Κ.: "Κατασκευή θερμοκηπίου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων", Πτυχιακή Εργασία. Πάτρα, (2020).
[42]	Hrennikoff A.: "Solution of Problems in Elasticity by the Framework Method", J. Appl. Mech. Vol 8, pp.169-175, (1941).

[43]	McHenry D.: "A Lattice Analogy for the Solution of Plane Stress Problems", J. Inst. Civil Eng. Vol 21, pp.59-82, (1943).
[44]	Newmark N.M.: "Numerical methods of analysis in bars, plates and elastic bodies", In L.E. Grinter, editor, Numerical Methods in Analysis in Engineering . Macmillan, NewYork, (1949).
[45]	Courant R.: "Variational Methods for Solution of Equilibrium and Vibration", Bull. Am. Math Soc., Vol. 49, pp.1-43, (1943).
[46]	Clough, R.W.: "Original Formulation of the Finite Element Method", FiniteElements in Analysis and Design Vol 7, pp.89-101, (1991).
[47]	Argyris J., Kelsey. S.: "Energy Theorems and Structural Analysis", Aircraft Engineering, (1954 and 1955).
[48]	Turner, M., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J.: "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures", J. Aeronautical Science Vol 23, No. 9, pp.805-823, (September 1956).
[49]	Καρύδης Π.Α.: "Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές", διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/chapters_pdf.html.
[50]	Bathe K.J.: "Finite element procedures", (2006).
[51]	Longan, D. L.: "A first course in the finite element method", Wisconsin– Platterille: Thomson, (2007).
[52]	ADINA R&D.: "Report ARD 05-7: Theory and Modeling Guide", Volume I, ADINA Solids & Structures, (2005).
[53]	Αγιουτάντης, Ζ.Γ: "Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων", Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, (2002).
[54]	Glowinski R., Rodin E.Y., Zienkiewicz O.C.: "Energy methods in finite element analysis", Wiley Interscience, New York, (1979).
[55]	Segerlind L.J.: "Applied finite element analysis", John Wiley & Sons, (1976).

[56]	Γεωργίου Χ.: "Μελέτη ευστάθειας δομικών στοιχείων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων", Πτυχιακή Εργασία, Κύπρος, (2013).
[57]	Παπαγιαννάκης Α.Ε.: "Επίλυση προβλημάτων πολλαπλών κλιμάκων με τη μέθοδο των υποφορέων", Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., (2013).
[58]	Μπανανή Ν.: "Ανάπτυξη λογισμικού για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα ακουστικής μικρών χώρων", Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, (2007).
[59]	Σωτηρόπουλος Γεώργιος.: "Προσομοίωση συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης", Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, (2012).
[60]	Palhade R.D., Tungikar V.B., Dhole G.M.and Kherde S.M.: "Simulation of Structural, Thermal and Electrical Load for High Voltage Ceramic Cap and Pin Disc Insulator Assembly", International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME), vol. 3, pp. 66-79, (2013).
[61]	Δημήτριος Ν. Χατζηπέτρος.: "Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Υψηλής Τάσης", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (Μάρτιος 2012).
[62]	Βασιλική Θ. Κονταργύρη.: "Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων" Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., (Δεκέμβριος 2007).
[63]	Krzma A., Khamaira M., and Abdulsamad M.: "Comparative Analysis of Electric Field and Potential Distributions over Porcelain and Glass Insulators Using Finite Element Method", AIJR Proceedings2, pp.176- 184, (2018).
[64]	Maldague X.P.V.: "Nondestructive evaluation of Materials by Infrared Thermography", Springer Verlag, (1993).
[65]	Αβδελίδης Ν.Π.: "Προτυποποίηση της υπέρυθρης θερμογραφίας για την εφαρμογή της στην διάγνωση της φθοράς και την αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης σε ιστορικές τοιχοποιίες", Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π, (2000).

[66]	Φαρμάκη Σ.: "Μελάτη της δομικής ακεραιότητας σύνθετων υλικών αεροπορικού τύπου με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ιωάννινα, (2019).
[67]	Perry. R.H., Hilton C.H.: "Chemical Engineer's Handbook", Fifth Edition, (1973).
[68]	Kaplan H.: "Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment", SPIE Press, (1999).
[69]	Μπραζιώτη.Ε.: "Η θερμική απεικόνιση στη μελέτη αστικού περιβάλλοντος", Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, (2015).
[70]	Clark M.R., McCann D.M., Forde M.C.: "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges", Elsevier Science Ltd., (2003).
[71]	Buyukozturk O.: "Imaging of concrete structures", Elsevier Science Ltd. NDT&E International, (1998).
[72]	Sakagami T., Kubo S.: "Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay thermography", Elsevier Science Ltd. Infrared Physics & Technology, (2002).
[73]	Maldague X.P.V., Moore P.O.: "Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing", 3rd Ed., ASNT Press, (2001).
[74]	Baranski M., Polak A.: "Thermographic Diagnostic in Electrical Machines", Przeglad Electrotechniczny (Electrical Review), Vol.10, pp.305-308, (2011).
[75]	Κατσάς Χ., Λύρας Ι.: "Πρόβλεψη και διάγνωση βλαβών σε ηλεκτρικούς κινητήρες με χρήση θερμοκάμερας", Πτυχιακή Εργασία, Πάτρα, (2018).
[76]	Τσανάκας Ι.: "Προηγμένες τεχνολογίες διάγνωσης-πρόβλεψης βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές με χρήση εποπτικών μεθόδων: Περίπτωση υπέρυθρης θερμογραφίας", Διδακτορική Διατριβή, Θράκη, (2013).
[77]	Μπότσαρης Π.Ν., Τσανάκας Ι.Α.: "Θερμογραφία και Εφαρμογές της στην Επιστήμη του Μηχανικού", Εκπαιδευτικό Υλικό Επιδοτούμενου

Σεμιναρίου Κατάρτισης Μηχανικών, στα Πλαίσια της Δράσης e-Μηχανικοί: Εκπαίδευση Μηχανικών στις Τεχνολογίες Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, ΙΕΚΕΜ–ΤΕΕ, Αθήνα, (2010).

- [78] Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R.: "Thermal Radiation Heat Transfer",6th Edition, Taylor and Francis, (2015).
- [79] Madding R.P.: "Handbook of Applied Thermal Design", Me Graw Hill, (1989).
- [80] Benko I.: "Determination on the infrared spectral surface emissivity", Meres es Automatika, Vol. 38, No. 6, pp.346-352, (1990).
- [81] Madding R.P.: "Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations", In: Thermosense XXL Proc SPIE, Vol 3700, pp.39-47, (1999).
- [82] Benko I.: "Energy conservation through increased emissivity in furnaces", periodica polytechnica Ser. Mech. Eng, Vol. 35, No. 4, pp.235-245, (1991).
- [83] Thomas R.A.: "Thermography Monitoring Handbook", Coxmoor, (1999).
- [84] Miller S.J.: "The Method of Least Squares", Mathematics Department Brown University Providence, pp.1–7, (2006).
- [85] Cockeram B.V., Measures D.P., Mueller A.J.: "The development and testing of emissivity enhancement coatings for themophotovoltaic (TPV) radiator applications" Thin Solid Films, pp.355-356, (1999).
- [86] Kawakita S., Imaizumi M., Sumita T., Kushiya K., Ohshima T., Yamaguchi M., Matsuda S., Yoda S., Kamiya T.: "Super radiation tolerance of CIGS solar cells demonstrated in space by MDS-1 satellite" Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, (11-18 May 2003).
- [87] Sumita T., Imaizumi M., Kawakita S., Matsuda S., Kuwajima S., Ohshima T., Kamiya T., "Analysis of radiation effects in space for terrestrial solar cells on MDS-1" IEEE Radiation Effects Data Workshop, Monterey, U.S.A., (21 –25 July 2003).

[88]	Taylor J.R.: "An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements", 2nd ed. Sausalito, University Science Books, (1997).
[89]	Sumita T., Imaizumi M., Kawakita S., Matsuda S., Kuwajima S.: "Terrestrial solar cells in space [radiation tolerance]", IEEE Radiation Effects Data Workshop, pp.130, Atlanta, U.S.A., (19-23 July 2004).
[90]	Wanderley N.E.T., Da Costa E.G., Maia M.J.A.: "Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, pp.1-4, (2006).
[91]	Korendo Z. Florkowski M.: "Thermography based diagnostic of power equipment", IEE Power Engineering Journal, Vol. 15, No. 1, pp. 33-42, (2001).
[92]	Μιχαλάκης Λ.: "Τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος θέρμασης του κλειστού κολυμβητηρίου Κοζάνης & βελτίωση ενεργειακής κατανάλωσης", Πτυχιακή Εργασία, Κοζάνη, (2015).
[93]	Grinzato E., Peron F., Strada M.: "Moisture monitoring of historical buildings by long period temperature measurements", In: Thermosense XXL Proc SPIE, Vol 3700, pp.47-58, (1999).
[94]	Haralambopoulos D.A., Paparsenos G.F.: "Assessing the thermal insulation of old buildings - the need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography", Energy Convers. Mgmt. 39(1/2), pp.65-79, (1998).
[95]	Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T.: "Quantitative infrared thermography in buildings", Energy and Buildings, Vol 29, pp. 1-9, (1998).
[96]	Pau L.F.: "Integrated testing and algorithms for visual inspection of integrated circuits", IEEE Trans Patt Anal Mach Intell, Vol 5, No 6,pp.602-608, (1983).

[97]	Williams V.H., Fike D.K.: "Failure analysis of raw printed circuit boards using infrared thermography", In: Thermosense IX. Proc SPIE, Vol 780, pp.139-147, (1987).
[98]	Dresser D.: "IR Imaging for printed circuit boards (PCB)", Testing Imag. pp.46-48, (5 April 1990).
[99]	Wang Y., Chin B.A.: "On line sensing of weld penetration using infrared thermography", In: Cielo P (ed) Optical techniques for industrial inspection. Proc SPIE, Vol 665, pp. 314–320, (1986).
[100]	Dufour M., Maldague X.: "Prevention of spatter and molten particles emission on protective windows in welding applications", Weld J, Vol 66, No. 6, pp.43-46, (1987).
[101]	Nagarajan S., Chen W.H., Groom K.N, Chin B.A.: "Infrared sensing for adaptive arc welding", Weld Vol. 68, No. 11, pp.462-466, (1989).
[102]	Gayer A., Saya A., Shiloh A.: "Automatic recognition of welding defects in real - time radiography", NDT Int, Vol. 23, No. 3, pp.192-196, (1990).
[103]	Fuchs E.A., Mahin K.W., Ortega A.R.: "Thermal diagnosis for monitoring welding parameters in real time", In: Baird GS (ed) Thermosense XIII. Proc SPIE, Vol 1467, pp.136-149, (1991).
[104]	Wilson J.: "Thermal analysis of the bottle forming process", In: Baird GS (ed) Thermosense XIII. Proc SPIE, Vol 1467, pp.219-228, (1991).
[105]	Maldague X., Krapez J.C., Cielo P., Poussart D.: "Processing of thermal images for the detection and enhancement of subsurface flaws in composite materials", In: Chen CH (ed) Signal processing and pattern recognition in nondestructive evaluation of materials, Vol F44, Springer, Berlin Heidelberg, pp.257-285, New York, (1988).
[106]	Land Instruments International, "A Basic Guide to Thermography", (2004).
[107]	Ding K.: "Test of jet turbine blades by thermography", Opt Engng, pp.1055-1059, (1985).

[108]	Florin C.: "Thermal testing methods as new tool in NDT", Thermosense IX. Proc SPIE, Vol 780, pp.76-83, (1987).
[109]	Ljungberg S.A.: "Infrared techniques in buildings and structures: operation and maintenance", In: Maldague XPV (ed) Infrared methodology and technology, Chapter 6., New York, (1992).
[110]	Matikas T. E.: "Optimum Operation and Maintenance of Road Network Bridges", Research and Technological Development Program "New Knowledge", Epirus Region, Ioannina, Greece, (2014).
[111]	Safabakhsh R.: "Processing infrared images for high speed power line inspection", In: McIntosh GB (ed) Thermosense XI. Proc SPIE, Vol 1094, pp. 75–82, (1989).
[112]	Hurley T.L.: "Infrared techniques for electric utilities", In: Maldague XPV (ed) Infrared methodology and technology, chapter 8, New York, (1992).
[113]	Traycoff R.B.: "Computerized infrared thermography: clinical applications and diagnostic value", Proc 9th conference IEEE engineering in medicine and biology society, Boston, p.p. 103–106, (1987).
[114]	Traycoff R.B.: "Medical applications of infrared thermography", In: Maldague XPV (ed) Infrared methodology and technology, chapter 14, New York, (1992).
[115]	Jakowatz C.V., Smiel A.J., Eichel P.H.: "Pyroelectric line scanner for remote IR imaging of vehicles", In: Spiro IJ (ed) Infrared technology XIII. Proc SPIE, Vol 819, pp.36-41, (1987).
[116]	Nandhakumar N., Aggarwal J.K.: "Integrated analysis of thermal images for scenes interpretation", IEEE Trans Patt Anal Mach Intell Vol. 10, No. 4, pp. 469 -481, (1988).
[117]	Lu Y.J., Hsu Y.H., Maldague X.: "Vehicle classification using infrared image analysis", J Transport Engng, Vol. 118, No. 2, pp.223-240, (1992).
[118]	Young R.W.L.: "Forest fire detection and mop-up of smoldering fires : the role of thermography in the Alberta forest service", 5th infrared

information exchange, pp.93–99, New Orleans, (29-31 October1985).

[119]	Young R.W.L.: "Utilization and application of infrared techniques in forest fire detection and suppression operations", In: Maldague XPV (ed) Infrared methodology and technology, chapter 13, New York, (1992).
[120]	Kirkwood J.J.: "Behavioral observations in thermal imaging of the big brown bat, Eptesicus fuscus", In: Baird GS (ed) Thermosense XIII. Proc SPIE, Vol 1467, pp.369-371, (1991).
[121]	Bernard K.J., Boreman G.D.: "Synthesis of infrared spectral signatures", Opt. Engineering pp.233-239, (1990).
[122]	Lerantzis P.I., Kontogiannis N.V., Tsarabaris P.T, Theodorou J.N.: "Evaluation of Wall Paint Emissivity During Infrared Thermography Temperature Measurement", Sensor letters, Vol. 10, pp.1–3, (2012).
[123]	Ljungberg S.A.: "Infrared survey of fifty buildings constructed during 100 years - thermal performances and damage conditions", Thermosense Proc SPIE, Vol 2473, pp.36-52, (1995).
[124]	Gayo E., Frutos J.: "Interference filters as an enhancement tool for infrared thermography in humidity studies of building elements", Infrared Physics & Technology Journal 38, pp. 251-258, (1997).
[125]	Ludwig N., Rosina E.: "Moisture detection through thermografic measurements of transpiration", Thermosense Proc SPIE, Vol 3056, pp.78-86, (1998).
[126]	Qin Y.W., Bao N.K.: "Infrared thermography and its application in the NDT of sandwich structures", Optics and Lasers in Engineering, pp.205-211, (1996).
[127]	Weil G.J.: "Remote sensing of land-based voids using computer enhanced infrared thermography", Advanced optical instrumentation for remote sensing of the earth's surface from space Proc SPIE, Vol 1129, pp.75-81, (1989).
[128]	Βαζιργιάννης Μ., Χαλκίδη Μ.: "Εξόρυξη Γνώσης από Βάσεις Δεδομένων και τον Παγκόσμιο Ιστό", Εκδ. Gutenberg (2005).

[129]	Ντάλλα Μ.: "Εφαρμογή αλγορίθμων επαγωγικού λογικού προγραμματισμού στη σχεσιακή εξόρυξη δεδομένων", Μεταπτυχιακή Εργασία, Πάτρα, (2009).
[130]	Κεχαγιά Π.Ε.: "Αλγόριθμοι Εξόρυξης Χωρικών Δεδομένων Εφαρμογή σε Αλγόριθμους Συσταδοποίησης", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., (2006).
[131]	Qin Y.W., Bao N.K.: "Infrared thermography and its application in the NDT of sandwich structures", Optics and Lasers in Engineering, pp.205-211, (1996).
[132]	Weil G.J.: "Remote sensing of land-based voids using computer enhanced infrared thermography", Advanced optical instrumentation for remote sensing of the earth's surface from space Proc SPIE, Vol 1129, pp.75-81, (1989).
[133]	Κούρτας Μ., Ευαγγελάρας Χ.: "Ανάλσση Παλινδρόμησης", Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε. Αθήνα, (2010).
[134]	Gauss C.F.: "Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientum", Cambridge University Press, (1809).
[135]	Galton F.: "Regression toward mediocrity in heredity stature. Journal of the Anthropological Institute", Vol 15, pp.246-263, (1885).
[136]	Θεοδώρου Ι. Ν.: "Ηλεκτρικές μετρήσεις (Θεωρία και Ασκήσεις), Εκδόσεις Τζιόλας, Αθήνα, (2018).
[137]	Fujii O., Mizuno Y., Naito K,: "Temperature of insulators as heated by conductor",IEEE Trans. Power Delivery Vol 22, pp.523, (2007).
[138]	Terada K., Kurumatani M.: "Finite Elements in Analysis and Design ", Elsevier, Vol.41, pp.111, (2004).
[139]	Boutaayamou M., Sabariego R., Dular P.: "Finite element modeling of electrostatic mems including the impact of fringing field effects on forces, thermal, mechanical and multiphysics simulation and experiments in micro-electronics and micro-systems", EuroSime 7th International Conference, Vol. 6, pp.115–120, (April 2006).

[140]	Moaveni S.: "Finite Element Analysis:Theory and Application with ANSYS", Prentice-Hall Inc, (1999).
[141]	Mahmud S., Wissam M.: "Introduction to Ansys Workbench", Empires Aviation Collage, (2013).
[142]	Lee H.H.: "Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12", Schroff Development Corporation, (2010).
[143]	"ANSYS Advantage", Vol3,Issue 1, Ansys(2009).
[144]	Kolchuzhin V., Doetzel W., Mehner J.: "Efficient Generation of MEMS Reduced-Order Macromodels Using Differentiation of Finite Elements", Sensor Letters. Voll 6, pp.115, (2008).
[145]	"ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 2020 R1", (2020)
[146]	Στούρας Δ.Α.:"Προσομοίωση ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS)", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2015).
[147]	Taylor J.R.: "An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements", 2nd ed. Sausalito, University Science Books, (1997).