

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κατασκευή και μελέτη
πειραματικής εγκατάστασης για μέτρηση
θερμικής αγωγιμότητας δομικών υλικών
σε υψηλές θερμοκρασίες**

Φοιτητής: **Τσαγγέτας Πάρις**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: **Κα. Φούντη Μαρία**

Αθήνα, Μάρτιος 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κατασκευή και μελέτη
πειραματικής εγκατάστασης για μέτρηση
θερμικής αγωγιμότητας δομικών υλικών
σε υψηλές θερμοκρασίες**

Φοιτητής:

Τσαγγέτας Πάρις

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Φούντη Μαρία

Αθήνα, Μάρτιος 2015

Κατασκευή και μελέτη πειραματικής εγκατάστασης για
μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας δομικών υλικών
σε υψηλές θερμοκρασίες

Τσαγγέτας Πάρις

Μάρτιος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια Ε.Μ.Π., κυρία Μαρία Φούντη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τη στήριξη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δήμο Κοντογεώργο, διδάκτορα Ε.Μ.Π., και τον κ. Γιάννη Μανδηλαρά, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τη βοήθειά τους, την αμέριστη συμπαράσταση και τις πολύτιμες συμβουλές τους, που ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Γιώργο Σεμιτέλο και το προσωπικό του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά το στήσιμο των πειραμάτων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αγαπημένα μου πρόσωπα, που με στήριξαν και με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σημαντική απειλή αποτελούσε ανέκαθεν μια επικίνδυνη ανεπιθύμητη φωτιά σε ένα κτίριο για την ασφάλεια των ανθρώπων που ζουν και εργάζονται σε αυτά. Άλλωστε, όπως προκύπτει από στατιστικά στοιχεία, ένα σημαντικό μεγάλο ποσοστό θανατηφόρων πυρκαγιών εντοπίζεται σε κλειστούς χώρους. Η απειλή γίνεται ιδιαίτερα σημαντική στα πολώροφα κτίρια, όπου η δυσκολία μετακίνησης και διαφυγής είναι μεγαλύτερη με δυσμενείς συνέπειες στην ασφάλεια της ζωής των ανθρώπων. Πέρα από την ισχύουσα νομοθεσία κάθε χώρας, η θυσία τόσων αθώων ανθρώπων επιτάσσει την ενδελεχή μελέτη και επιλογή κατάλληλων δομικών και μονωτικών υλικών, που θα εμποδίσουν την εξάπλωση της φωτιάς και θα αποτρέψουν τις ανθρώπινες απώλειες και τις υλικές καταστροφές.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την κατασκευή και τη μελέτη μιας πειραματικής εγκατάστασης με σκοπό τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Με άλλα λόγια, ασχολείται με τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και με την καταγραφή των θερμικών ιδιοτήτων σε υψηλές συνθήκες θερμοκρασιών (της τάξης των 900°C) του υπερμονωτικού υλικού Πάνελ Κενού (VIP) και κατά δεύτερο λόγο του κεραμεικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper. Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στον ειδικά διαμορφωμένο φούρνο του εργαστηρίου, με τη βοήθεια του οποίου εξασφαλίστηκαν οι απαιτούμενες συνθήκες θερμοκρασιών. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα στα οποία, καθ' όλη τη διάρκειά τους έπρεπε να διασφαλίζεται από τη μία πλευρά της πειραματικής διάταξης υψηλή θερμοκρασία-φωτιάς, ενώ από την άλλη πλευρά να επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος. Για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των μονωτικών υλικών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία, τα οποία τοποθετήθηκαν σε κάθε διατομή μεταξύ των υλικών για την καταγραφή των θερμοκρασιών σε κάθε θέση.

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μόνο το υλικό VIP, τα αποτελέσματα του οποίου συνετέλεσαν στην κατανόηση της θερμικής του συμπεριφοράς σε συνθήκες φωτιάς. Το δεύτερο πείραμα είχε ως στόχο την καταγραφή και επαλήθευση των θερμικών ιδιοτήτων του κεραμεικού χαρτιού Kaowool με την ισχύουσα βάση δεδομένων του κατασκευαστή. Τέλος, στο τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τα μονωτικά VIP και Kaowool 1260 Paper συνδυαστικά σε ένα ενιαίο πολυστρωματικό πείραμα με σκοπό τον επαναπροσδιορισμό και επαλήθευση των θερμικών ιδιοτήτων του VIP στις ίδιες συνθήκες φωτιάς με το προηγούμενο πείραμα.

Εν κατακλείδι, από τη σειρά των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τη μελέτη και την καταγραφή της θερμικής συμπεριφοράς του υπερμονωτικού πάνελ κενού VIP και αποτελούν εύφορο έδαφος για περαιτέρω μελέτη και επιστημονική ενασχόληση.

Abstract

Significant threat has always been a dangerous and unwelcome fire in a building for the safety of people who live and work in them. Moreover, as shown by statistics, a significantly large proportion of fatal fires is located in enclosed spaces. This threat is particularly important in high-rise buildings, where the difficulty of movement and escape is greater with bad consequences on the safety of people's lives. Besides the current laws of each country, the sacrifice of so many innocent people requires a thorough study and selection of appropriate structural and insulating materials that will prevent the spread of fire and the loss of human lives and further damage to property.

In this context, this thesis deals with the construction and the study of an experimental set up for measuring the thermal conductivity. In other words, it deals with study of the thermal behavior and the recording of thermal properties at high temperature conditions (around 900°C) of hyper-insulating material Vacuum Insulation Panel (VIP) and secondly the ceramic paper Kaowool 1260 Paper. In order to achieve this objective, a series of experiments took place in a specially designed oven of the laboratory, by means of which secured the required temperature conditions. More specifically, three experiments were performed in which, throughout their duration high temperature should be ensured on the one side of the experimental set, while the other side should be exposed to environmental conditions. Thermocouples were used in order to study the thermal behavior of the insulating materials of the experiments, which are placed in each section between the materials to record the temperatures at each position.

In the first experiment the material VIP was only used, the results of which have contributed to the understanding of his thermal behavior under fire conditions. The second experiment was designed to record and verify the thermal properties of ceramic paper Kaowool with the manufacturer's existing database. Finally, in the third experiment, the Vacuum Insulation Panel and the ceramic paper Kaowool 1260 Paper were both used in a multilayer experiment aiming at redefining and verifying of the thermal properties of the VIP under the same fire conditions with the previous experiment.

In conclusion, the series of experiments that were performed showed remarkable conclusions regarding the study and the recording of the thermal behavior of hyper-insulating material VIP and constitute fertile ground for further study and scientific occupation.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	1
1. Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά της φωτιάς.....	1
1.2 Φωτιά σε κτίριο	2
1.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης φωτιάς σε κτίρια.....	3
1.4 Πυροπροστασία	5
1.4.1 Νομοθεσία πυροπροστασίας.....	6
1.4.2 Ενεργητική πυροπροστασία.....	7
1.4.3 Παθητική πυροπροστασία.....	10
1.5 Διάρθρωση διπλωματικής	12
Κεφάλαιο 2	13
2. Ιδιότητες και θερμική συμπεριφορά δομικών και μονωτικών υλικών.....	13
2.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες δομικών υλικών.....	13
2.2 Κριτήρια επιλογής βάσει προτύπων	14
2.3 Δομικά υλικά	15
2.3.1 Γυψοσανίδα.....	15
2.3.2 Θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδας.....	16
2.3.3 Διογκωμένη Πολυστερίνη.....	17
2.3.4 Εφαρμογές διογκωμένης πολυστερίνης.....	18
2.3.5 Πετροβάμβακας.....	19
2.3.6 Πάνελ Κενού – VIP	22
Κεφάλαιο 3	25
3. Περιγραφή πειραματικών διατάξεων	25
3.1 Μεθοδολογία και διαδικασία πειραμάτων	25
3.1.1 Πείραμα Πάνελ Κενού VIP	28
3.1.2 Πείραμα Κεραμεικού χαρτιού – Kaowool.....	36
3.1.3 Πείραμα Πάνελ Κενού (VIP) και Κεραμεικού Χαρτιού (Kaowool 1260 Paper).....	42
Κεφάλαιο 4	49
4. Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	49
4.1 Πείραμα Πάνελ Κενού VIP	49
4.2 Πείραμα Κεραμεικού χαρτιού – Kaowool	65

4.3 Πείραμα Πάνελ Κενού (VIP) και Κεραμεικού Χαρτιού (Kaowool 1260 Paper).....	85
Κεφάλαιο 5.....	105
5. Συμπεράσματα	Error! Bookmark not defined.05

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή

1.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά της φωτιάς

Η ταχεία οξείδωση μιας καύσιμης ύλης που απελευθερώνει θερμότητα, φως υπό μορφή φλόγας και άλλα προϊόντα αντίδρασης, όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ονομάζεται φωτιά. Πρόκειται για μια χημική αντίδραση κατά την οποία εκλύεται έντονα ποσό θερμότητας και κατά το φαινόμενο αυτό συντηρείται φλόγα, ως ορατό αποτέλεσμα της εξώθερμης αντίδρασης (Εικόνα 1.1).

Καύσιμο ονομάζεται το υλικό που αντιδρά κατά την καύση και όταν το καύσιμο είναι εύφλεκτο συνήθως έχουμε φλόγα και άρα φωτιά. Όταν ένα εύφλεκτο καύσιμο υλικό, υπό την παρουσία οξυγόνου ή κάποιου άλλου οξειδωτικού παράγοντα βρεθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία είναι λόγος για να ξεκινήσει μια φωτιά. Αυτό το μεταίχμιο θερμοκρασίας ονομάζεται «θερμοκρασία ανάφλεξης» ή σημείο ανάφλεξης και διαφέρει από υλικό σε υλικό. Μια φωτιά είναι δυνατόν να ξεκινήσει από μια σπίθα, μια άλλη φωτιά όπως τζακιού, φούρνου κλπ, μια έκρηξη, πηγές έντονης θερμικής ακτινοβολίας όπως ο ήλιος, ένα αναμμένο σπέρτο ή τσιγάρο, ένας λαμπτήρας πυράκτωσης κλπ. Η ένταση της φωτιάς καθώς και το χρώμα της φλόγας ποικίλουν ανάλογα με τη σύσταση του φλεγόμενου υλικού.



Εικόνα 1-1 Φωτιά σε εξέλιξη [33]

Ωστόσο η παρουσία της φλόγας δεν είναι απαραίτητη, μιας και είναι πολλές φορές που υπό περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου μπορεί να υπάρξει καύση χωρίς ύπαρξη φλόγας. Αυτό ονομάζεται αργή καύση και εμφανίζεται συνήθως όταν μία στερεά επιφάνεια υφίσταται ταυτόχρονα πυράκτωση και αποτέφρωση. Μερικά παραδείγματα αργής καύσης είναι η καύση των κάρβουνων και η καύση στο τσιγάρο. Η αργή καύση είναι δυνατόν να μετατραπεί σε φλεγόμενη καύση με ύπαρξη φλόγας αλλάζοντας τις

συνθήκες καύσης αυξάνοντας τη ροή αέρα συνεπώς και την ποσότητα του οξυγόνου στην καιγόμενη επιφάνεια. Πυρκαγιά ονομάζεται η καταστροφική, μεγάλης έντασης φωτιά που έχει τάσεις εξάπλωσης.

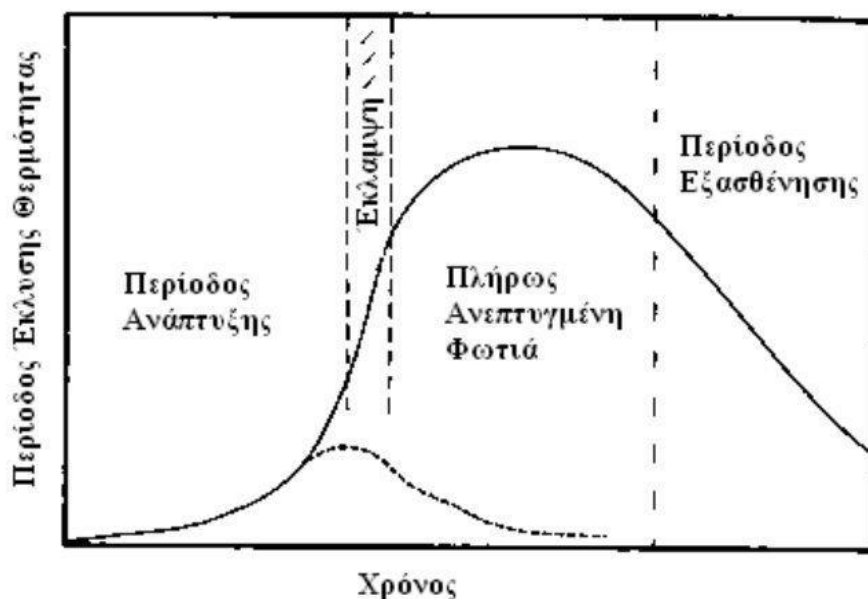
Για τη διατήρηση της φωτιάς χρειάζεται να συνυπάρχουν τέσσερις παράγοντες, η καύσιμη ύλη, η ικανή να διατηρήσει τη θερμοκρασία ανάφλεξης θερμότητα, ένα οξειδωτικό μέσο και η διαδικασία αυτοσυντήρησης της φωτιάς. Κατά τη διαδικασία της καύσης η φωτιά διατηρεί τη θερμότητά της, απελευθερώνοντας θερμική ενέργεια και εξαπλώνεται εφόσον συνεχώς τροφοδοτείται με καύσιμο και με οξειδωτικό μέσο.

1.2 Φωτιά σε κτίριο

Ο όρος «φωτιά σε κτίριο» χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μη ελεγχόμενης καύσης σε κλειστό χώρο. Στην περίπτωση αυτή, η φωτιά εξελίσσεται ελεύθερα και οι ρυθμοί πυρόλυσης και έκλυσης θερμότητας επηρεάζονται, αρχικά, μόνο από τα φαινόμενα της καύσης και όχι από τα όρια του δωματίου, τα οποία επηρεάζουν την φωτιά μόνο όταν αυτή αυξηθεί σε μέγεθος (Drysdale, 1999). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου. Στην περίπτωση που ο αερισμός είναι επαρκής, η φωτιά σε ένα κτίριο μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια:

- 1) Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς, κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του δωματίου είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά περιορίζεται κοντά στην περιοχή από την οποία ξεκίνησε (pre-flashover fire).
- 2) Στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς (post-flashover fire), κατά το οποίο παρατηρείται καύση όλων των αναφλέξιμων αντικειμένων και οι φλόγες εξαπλώνονται σε όλο το χώρο.
- 3) Στάδιο εξασθένησης της φωτιάς, το οποίο επιτυγχάνεται όταν η μέση θερμοκρασία του χώρου γίνει χαμηλότερη του 80% της μέγιστης τιμής της.

Έκλαμψη (flashover) είναι το σημείο μετάβασης από το πρώτο στάδιο στο δεύτερο και περιλαμβάνει την γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς από το αρχικό σημείο έναυσης προς όλες τις αναφλέξιμες επιφάνειες του δωματίου. Η έκλαμψη έχει μικρή χρονική διάρκεια σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια, αποτελεί όμως ένα κρίσιμο χρονικό σημείο, μετά από το οποίο μειώνονται δραματικά οι πιθανότητες επιβίωσης στο εσωτερικό του χώρου. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά το δεύτερο στάδιο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και η φωτιά είναι δυνατόν να επεκταθεί και σε γειτονικά δωμάτια, μέσω των ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα), κάτι που μπορεί να οδηγήσει στην μερική ή ολική κατάρρευση του κτιρίου. Τέλος, στο τρίτο στάδιο δεδομένου ότι η καύσιμη ύλη εξαντλείται, ο ρυθμός καύσης και η ένταση της φωτιάς μειώνονται, ενώ τα αναφλέξιμα στερεά συνεχίζουν να καίγονται αργά, διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1-1 Η εξέλιξη μιας τυπικής φωτιάς σε κτίριο συναρτήσει του χρόνου [2]

Σε μια τοπική εστία φωτιάς τρία πράγματα μπορεί να συμβούν (Drysdale , 1999):

- Η φωτιά να κάψει μόνο το αρχικό αντικείμενο μέχρι τέλους και να μην προλάβει να εξαπλωθεί σε άλλα αντικείμενα, με αποτέλεσμα να σβήσει λόγω έλλειψης περαιτέρω καυσίμου, κάτι που είναι πολύ πιθανό να συμβεί ειδικά όταν η αρχική φωτιά βρίσκεται σε ένα απομονωμένο σημείο.
- Αν δεν υπάρχει επαρκής αέρας η φωτιά μπορεί να σβήσει λόγω έλλειψης οξυγόνου ή να συνεχίσει να καίει με πολύ αργούς ρυθμούς οι οποίοι θα είναι ανάλογοι προς την περιεκτικότητα του αέρα του χώρου σε οξυγόνο.
- Με την παρουσία αρκετού αέρα και καυσίμου η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί σε πλήρως αναπτυγμένη κατά την οποία όλα τα καύσιμα υλικά μέσα στο δωμάτιο έχουν αρχίσει να καίγονται.

1.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης φωτιάς σε κτίρια

Η ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας από το σημείο ανάφλεξης σε άλλες αναφλέξιμες επιφάνειες που βρίσκονται στον ίδιο χώρο παίζει καθοριστικό ρόλο στο ρυθμό διάδοσης της φωτιάς. Για την πλήρη ανάπτυξη μιας φωτιάς σε έναν κλειστό χώρο είναι αναγκαία η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών, συνήθως πάνω από 600°C, στο επίπεδο της οροφής. Ο συνολικός ρυθμός καύσης επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας όσο και από την αύξηση του όγκου που καταλαμβάνει η φωτιά (Thomas, 1981).

Οι φυσικές ιδιότητες ενός υλικού και η χημική του σύσταση επηρεάζουν το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας . Ο ρυθμός εξάπλωσής της σε στερεά αντικείμενα παίζει

καθοριστικό ρόλο στην περίπτωση της φωτιάς σε κτίρια. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς είναι:

➤ *Ο προσανατολισμός της επιφάνειας και η κατεύθυνση διάδοσης.*

Οι στερεές επιφάνειες σε γενικές γραμμές καίγονται σε οποιαδήποτε πλευρά τους ασχέτως προσανατολισμού της επιφάνειας, σε αντίθεση με τα υγρά τα οποία καίγονται μόνο στην οριζόντια επιφάνειά τους. Έχει παρατηρηθεί (Magee and McAlevy , 1971) ότι ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας προς τα πάνω σε μια επιφάνεια λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν η επιφάνεια είναι κάθετη και μειώνεται σταδιακά όσο μειώνεται η γωνία κλίσης. Σε μια επιφάνεια, ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας προς τα κάτω είναι πολύ πιο αργός σε σχέση με το ρυθμό διάδοσης της φλόγας προς τα πάνω και σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο είναι λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές της κλίσης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η φλόγα με το άκαυστο καύσιμο μεταβάλλεται καθώς αλλάζει ο προσανατολισμός της επιφάνειας. Σε μια οριζόντια ή επικλινή προς τα κάτω επιφάνεια η εισροή αέρα (air entrainment) στη φλόγα οδηγεί σε «μετάδοση φλόγας αντίθετα προς το ρεύμα αέρα». Αντιθέτως, στην περίπτωση ανοδικής κλίσης λόγω της άνωσης, τόσο η φλόγα όσο και τα προϊόντα της καύσης κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση δημιουργώντας υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στο μέτωπο της ζώνης καύσης.

➤ *Πάχος καυσίμου*

Ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι αντιστρόφως αναλόγως με το πάχος του υλικού στην περίπτωση που το καύσιμο αντικείμενο είναι πολύ λεπτό και έχει σε όλα τα σημεία του την ίδια θερμοκρασία. Πάντως, η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας από το πάχος γίνεται λιγότερο αισθητή για πάχη μεγαλύτερα των 1.5mm και ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας παραμένει σταθερός για πάχη υλικού μεγαλύτερα των 5.0-7.5mm (Suzuki, 1994). Μεταβαίνοντας από ‘λεπτά’ σε ‘παχιά’ καύσιμα αντικείμενα παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μακριά από την φλόγα. Πιο συγκεκριμένα, στα ‘λεπτά’ καύσιμα αντικείμενα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής μέσω της αέριας φάσης. Από την άλλη μεριά, στα ‘παχιά’ καύσιμα αντικείμενα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής μέσω της στερεάς φάσης. Η συμπεριφορά αυτή αφορά υλικά τα οποία δεν αλλάζουν φάση κατά τη διάρκεια της καύσης τους.

➤ *Φυσικές ιδιότητες*

Η διάδοσης της φλόγας σε ένα αντικείμενο μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το γινόμενο τριών βασικών φυσικών ιδιοτήτων του: της θερμικής αγωγιμότητας του, της πυκνότητας και της θερμοχωρητικότητας.

➤ *Γεωμετρία του αντικειμένου*

Ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας είναι μεγαλύτερος κατά μήκος μιας ακμής ή σε μια γωνία απ'ότι πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια. Όσο μικρότερη είναι η γωνία μεταξύ δύο ακμών του αντικειμένου, τόσο περισσότερο το στερεό αυτό πλησιάζει την συμπεριφορά του 'λεπτού' καυσίμου.

➤ *Περιβαλλοντικοί Παράγοντες*

α) Σύνθεση της ατμόσφαιρας: Η εξάπλωση της φλόγας είναι ταχύτερη στα εύφλεκτα υλικά εφόσον υπάρχει υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου. Για να θεωρηθεί μια περιοχή πλούσια σε οξυγόνο πρέπει η μερική πίεση του οξυγόνου στην περιοχή αυτή να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της κανονικής ατμόσφαιρας, δηλαδή να είναι μεγαλύτερη από 160mmHg.

β) Θερμοκρασία του καυσίμου: Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του καυσίμου αυξάνεται και ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας (Drysdale, 1999) και αυτό διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, τόσο λιγότερη θερμότητα χρειάζεται για την ανάφλεξη του άκαυστου καυσίμου που βρίσκεται μακριά από το σημείο έναυσης της φωτιάς.

γ) Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας: Η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας, διότι με αυτόν τον τρόπο προθερμαίνεται το καύσιμο μακριά από το μέτωπο της φλόγας. Όμως ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας οδηγεί στην εμφάνιση ισχυρότερων φλογών, οι οποίες αυξάνουν την μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ενισχύοντας έτσι την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Drysdale, 1999).

δ) Ατμοσφαιρική πίεση: Με την αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης παρατηρείται αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας και αυτό οφείλεται στον εμπλουτισμό του αέρα με οξυγόνο γεγονός που ενισχύει την σταθερότητα της φλόγας σε μια επιφάνεια.

ε) Κίνηση του αέρα: Ο ρυθμός εξάπλωσής της φλόγας σε μια εύφλεκτη επιφάνεια ενισχύεται όταν η κίνηση του αέρα έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή της φλόγας. Στην περίπτωση όμως που η κίνηση του αέρα έχει αντίθετη κατεύθυνση με αυτή της φλόγας, ο τρόπος που θα επηρεαστεί η φλόγα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Όταν ο αέρας κινείται με μεγάλη ταχύτητα, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα μειώνεται, ενώ αντίθετα όταν η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά μικρή, η εξάπλωση της φλόγας ενισχύεται.

1.4 Πυροπροστασία

Μια ανεπιθύμητη φωτιά σε ένα κτίριο αποτελούσε ανέκαθεν μια σημαντική απειλή για την ασφάλεια των ανθρώπων που ζουν και εργάζονται σε αυτά. Η απειλή γίνεται ιδιαίτερα σημαντική στα πολυώροφα κτίρια, όπου η δυσκολία μετακίνησης και

διαφυγής είναι μεγαλύτερη με δυσμενείς συνέπειες στην ασφάλεια της ζωής των ανθρώπων που έχουν τυχόν παγιδευτεί. Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει ενδεικτικά στατιστικά στοιχεία του εκτιμώμενου αριθμού θυμάτων ανά χώρα για τις χρονιές 2006, 2007, 2008.

Πίνακας 1-1 Αριθμός θυμάτων από πυρκαγιά (2006-2008) [42]

Country	Adjusted estimates (Fire Deaths)		
	2006	2007	2008
Australia	90	105	110
Austria	30	30	55
Czech Republic	150	135	150
Denmark	70	70	
Finland	125	95	110
France	620	605	595
Germany	510		
Greece	90	240	130
Hungary	180	175	190
Ireland	40	55	45
Italy	280	250	285
Japan	2,100	2,050	2,000
Netherlands	85	70	100
New Zealand	25	35	35
Norway	55	70	
Poland	605	600	585
Portugal	65	75	
Singapore	10	5	0
Slovenia	5	15	10
Spain	245	255	270
Sweden	90	110	130
Switzerland	30	15	
United Kingdom	515	465	475
United States	3,550	3,750	3,650

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι είναι αναγκαία η λήψη μέτρων περιορισμού και κατάσβεσης της πυρκαγιάς σε κλειστούς χώρους των κτιρίων με σκοπό την ασφάλεια των πολιτών. Με τον όρο πυροπροστασία εννοούμε το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται για την προστασία από τη φωτιά και τις καταστροφικές συνέπειές της. Μέτρα πυροπροστασίας λαμβάνονται πέρα απο κτίρια και σε μεταφορικά μέσα.

1.4.1 Νομοθεσία πυροπροστασίας

Μέτρα πυροπροστασίας προβλέπονται από τη νομοθεσία κάθε χώρας κατά την μελέτη και κατασκευή ενός κτιρίου και αποβλέπουν αφενός στην πρόληψη του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς στο κτίριο και αφετέρου στην αντιμετώπιση της πυρκαγιάς σε περίπτωση που αυτή εκδηλωθεί. Κάθε κράτος έχει θεσπίσει κανόνες πυροπροστασίας για την ασφάλεια πρωτίστως της ανθρώπινης ζωής, αλλά και της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά στην Ελλάδα η νομοθεσία πυροπροστασίας περιλαμβάνει τα εξής:

- Π.Δ. 71/88 (ΦΕΚ 32 Α' / 17.2.1988) «Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων».

- ΚΥΑ 5905/Φ15/839/1995 (ΦΕΚ 611 Β' /12.7.1995) «Λήψη μέτρων πυροπροστασίας στις βιομηχανικές – βιοτεχνικές εγκαταστάσεις και αποθήκες αυτών, καθώς και αποθήκες εύφλεκτων και εκρηκτικών υλών».
- Π.Δ. 6/96 (ΦΕΚ 150Β της 13.3.96) «Λήψη μέτρων πυροπροστασίας σε αποθήκες».
- Π.Δ. 3/81 «Λήψη βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού».
- Π.Δ. 3α/81 «Περί τροποποιήσεως της υπ' αριθμόν 3/19.1.1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού».
- Π.Δ. 36/95 «Περί τροποποιήσεως και συμπληρώσεως της υπ' αριθμό 3/1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού».

Τα βασικά στοιχεία της μελέτης της πυροπροστασίας μιας κατασκευής , με βάση τους κανονισμούς πυροπροστασίας συνοψίζονται στην επίλυση πέντε βασικών θεμάτων [Purkiss , 1996 , Παπαϊωάννου , 2006] :

- πρόληψη έναρξης πυρκαγιάς, η οποία αφορά στον έλεγχο της ευφλεκτότητας των υλικών της κατασκευής, στη συντήρηση των επιχρισμάτων και, από τη νομοθετική πλευρά, στην επιβολή απαγόρευσης του καπνίσματος και γενικά ελεύθερων φλογών
- περιορισμός ανάπτυξης και διάδοσης πυρκαγιάς, ο οποίος μπορεί να αφορά στο ίδιο το κτίριο (διαμερισματοποίηση), αλλά και σε γειτονικά μέσω ελέγχου της απόστασης μεταξύ των κτιρίων
- παρεμπόδιση της κατάρρευσης, με την οποία επιβάλλεται η σταθερότητα (stability) και η ακεραιότητα (integrity) όλης της κατασκευής ή μέρος της κατά τη διάρκεια της φωτιάς
- οδεύσεις διαφυγής, όπου επιβάλλονται νομοθετικά συγκεκριμένες ρυθμίσεις που αφορούν στις οδεύσεις διαφυγής και στην ενημέρωση των ενοίκων
- έλεγχος φωτιάς και κατάσβεση, το οποίο σχετίζεται με την εγκατάσταση συγκεκριμένων συστημάτων μέσα στο κτίριο για τον έλεγχο και για την κατάσβεση της πυρκαγιάς

Τα μέτρα πυροπροστασίας που λαμβάνονται για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα ενεργητικά ή κατασταλτικά μέτρα πυροπροστασίας και τα παθητικά ή προληπτικά μέτρα πυροπροστασίας. Τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας, τα οποία αφορούν κυρίως στον έλεγχο και στην κατάσβεση (πυρόσβεση) της φωτιάς ενεργοποιούνται κατά την έναρξη ή τη διάρκεια της πυρκαγιάς, ενώ τα παθητικά είναι προβλεπόμενα και ενσωματωμένα στη κατασκευή.

1.4.2 Ενεργητική πυροπροστασία

Η ενεργητική πυροπροστασία ενός κτιρίου αποβλέπει στην αντιμετώπιση και καταστολή της πυρκαγιάς σε περίπτωση που αυτή εκδηλωθεί. Τα προβλεπόμενα από τον μελετητή (μηχανολόγος μηχανικός) μέτρα αφορούν τον εξοπλισμό και τις

προγραμματισμένες ενέργειες που ενεργοποιούνται αν εμφανιστεί και κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς. Η ενεργητική πυροπροστασία αφορά την ανίχνευση της φωτιάς αλλά και την άμεση επέμβαση είτε από τους ίδιους τους ανθρώπους, είτε από ειδικές αυτόματες συσκευές για την κατάσβεσή της. Για την πραγματοποίηση αυτού του στόχου λαμβάνονται κάποια μέτρα με τα οποία θα επιτευχθεί η έγκαιρη αυτόματη ανίχνευση της πυρκαγιάς και ο εντοπισμός των σημείων στα οποία αυτή εκδηλώθηκε. Η ενεργητική πυροπροστασία μεριμνά ακόμα για τη σήμανση συναγερμού, καθώς και την αυτόματη ή χειροκίνητη κατάσβεση.

Τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας είναι είτε εγκατεστημένα μέσα στο κτίριο είτε φορητά σε αυτό και αποτελούν σημαντικά μέτρα ασφάλειας, τόσο για τα άτομα λόγω της έγκαιρης προειδοποίησης τους, όσο και για την κατασκευή καθώς ενεργοποιούνται άμεσα με την εκδήλωση της πυρκαγιάς και μπορούν έτσι να θέσουν υπό έλεγχο την πυρκαγιά πριν λάβει μεγάλες διαστάσεις. Συνοπτικά παρουσιάζονται μερικά από τα μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας παρακάτω και ανάλογα με την κατηγορία τους διακρίνονται σε:

Συστήματα ανίχνευσης και έγκαιρης ειδοποίησης:

- αυτόματη πυρανίχνευση (ανιχνευτές, πίνακες πυρανίχνευσης, καλωδιώσεις, κ.α.)
- σήμανση συναγερμού (Εικόνα 1.2)
 - σειρήνες για ηχητική ειδοποίηση
 - φλας για οπτική ειδοποίηση
 - διακόπτης ροής νερού σε υδροδοτικό δίκτυο με πυροσβεστικές φωλιές



Εικόνα 1-2 Συναγερμός πυρκαγιάς [34]

- αυτόματη ειδοποίηση της πυροσβεστικής υπηρεσίας

Συστήματα πυρόσβεσης – κατάσβεσης:

- αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος, το οποίο διακρίνεται σε υγρού τύπου, ξηρού τύπου, προενέργειας, ολικής κατάκλισης και μικτό (Εικόνα 1.3)



Εικόνα 1-3 Σύστημα καταιονισμού ύδατος [39]

- αυτόματο σύστημα ψεκασμού σταγονιδίων ή ομίχλης (Εικόνα 1.4)



Εικόνα 1-4 Αυτόματο σύστημα ψεκασμού σταγονιδίων [32]

- αυτόματο σύστημα κατάκλισης με αφρό
- αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με ξηρές σκόνες
- αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με αέρια , όπως διοξείδιο του άνθρακα, αδρανή αέρια κ.α.
- υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (πυροσβεστικές φωλιές) – χειροκίνητο

- φορητοί πυροσβεστήρες και άλλα μέσα (Εικόνα 1.5)



Εικόνα 1-5 Χρήση Χειροκίνητου φορητού πυροσβεστήρα ξηράς σκόνης [35]

1.4.3 Παθητική πυροπροστασία

Το σύνολο των μέτρων που είναι ενσωματωμένα στην αρχιτεκτονική και στατική σχεδίαση και κατασκευή του κτιρίου (αρχιτέκτονας, πολιτικός μηχανικός) με απώτερο στόχο την έμμεση προστασία της κατασκευής και την ασφάλεια των πολιτών ορίζεται ως παθητική πυροπροστασία, ή αλλιώς δομική πυροπροστασία ή πυρασφάλεια, αφορά. Η παθητική πυροπροστασία αποτελεί την πλέον σύγχρονη μορφή πυροπροστασίας και σχετίζεται άμεσα με το βαθμό επικινδυνότητας της κατασκευής, ο οποίος διακρίνεται σε χαμηλός, μέσος και υψηλός ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και το είδος της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται σε υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκελετό του κτιρίου και σε διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες που έχουν σκοπό να εμποδίσουν την εξάπλωση της φωτιάς, αλλά και να αυξήσουν το χρόνο της ασφαλούς λειτουργίας μέχρι την κατάρρευση, ένα χρονικό διάστημα που είναι άκρως απαραίτητο για την ασφαλή μετακίνηση των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα στο κτίριο που πλήττεται από πυρκαγιά.

Η παθητική πυροπροστασία ενός κτιρίου χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: την περίπτωση ανάπτυξης της φωτιάς μέσα σε ένα κτίριο και την περίπτωση της φωτιάς από και προς ένα κτίριο. Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά βασικά χαρακτηριστικά των δύο περιπτώσεων παθητικής πυροπροστασίας, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ή να συνυπολογίζονται κατά την κατασκευή.

Φωτιά από και προς ένα κτίριο

Ο πρώτος παράγοντας που πρέπει να ελεγχθεί είναι η χωροθέτηση ενός κτιρίου, δηλαδή το σημείο κατασκευής μιας οικοδομής. Θα πρέπει λοιπόν να συνεκτιμάται από την πλευρά της πυρασφάλειας, αφού οι πρόσθετοι περιορισμοί αυξάνουν την ανάγκη για μέτρα πυροπροστασίας με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής. Ακόμα πρέπει να ελεγχθούν η απόσταση του πλησιέστερου πυροσβεστικού σταθμού από το οικόπεδο, το υδάτινο δυναμικό της περιοχής, η διεύθυνση και η ένταση κύριων ανέμων της περιοχής και οι συνθήκες κυκλοφορίας γύρω από το οικόπεδο. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχουν διευκολύνσεις για τη

πυροσβεστική υπηρεσία αφού η εύκολη διέλευση των οχημάτων της είναι πολύ καθοριστική κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς, όπως είναι η μορφή και το ύψος του κτιρίου, η θέση και το πλήθος των υδροδοτικών σημείων μέσα στο κτίριο καθώς και ο τύπος των πυροσβεστικών αντλιών.

Τέλος για την καθυστέρηση και την εμπόδιση της εξάπλωσης της φωτιάς από κτίριο σε κτίριο είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας επαρκούς απόστασης ανάμεσα στα κτίρια, κάτι που θα μειώσει αισθητά την ένταση της ακτινοβολούμενης θερμότητας από το φλεγόμενο κτίριο να μην ξεπεράσει τα όρια ανάφλεξης των υλικών του μη φλεγόμενου κτιρίου. Δεδομένου των προηγούμενων, η δημιουργία πυροφραγμών ανάμεσα στα κτίρια είναι καταλυτικής σημασίας, όπως για παράδειγμα η αύξηση της πυραντίστασης των υλικών της εξωτερικής τοιχοποιίας και η δημιουργία φραγμών που θα εμποδίσουν την περαιτέρω εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Φωτιά μέσα στο κτίριο

Όσον αφορά τη φωτιά μέσα σε κτίριο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε σημαντικές παραμέτρους που θα παρακωλύσουν την εμφάνιση της φωτιάς και την περαιτέρω εξάπλωση της. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία μιας κατασκευής πρέπει να έχουν την κατάλληλη πυραντίσταση, αφού αποτελεί μια από τις βασικότερες έννοιες της παθητικής πυροπροστασίας. Η ευστάθεια, η ακεραιότητα και η θερμομόνωση είναι τα βασικά κριτήρια που καθιστούν κατάλληλη την πυραντίσταση ενός στοιχείου:

- ❖ ευστάθεια : το κριτήριο της ευστάθειας σηματοδοτεί την οριακή κατάσταση όπου το δομικό στοιχείο παρουσιάζει μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Αναφέρεται ότι για ελαστικά δομικά στοιχεία κυμαίνεται στο ένα τριακοστό του ανοίγματος του στοιχείου.
- ❖ ακεραιότητα : το κριτήριο της ακεραιότητας δηλώνει την οριακή κατάσταση όπου το δομικό στοιχείο παρουσιάζει ρωγμές ή κενά από όπου μπορούν τα καυσαέρια και οι φλόγες να εισέλθουν και να αναφλέξουν εύφλεκτα υλικά. Σε αυτήν την περίπτωση οριακή συνθήκη αποτελεί η ανάφλεξη ενός βαμβακερού υφάσματος που βρίσκεται κοντά στο διάκενο για δέκα δευτερόλεπτα.
- ❖ θερμομόνωση : το κριτήριο της θερμομόνωσης δηλώνει την οριακή κατάσταση όπου η θερμοκρασία της πλευράς του δομικού στοιχείου που δεν είναι εκτεθειμένη στη φωτιά ξεπερνάει προκαθορισμένα όρια. Με μια αύξηση της τάξης κατά μέσο όρο 140°C ή περισσότερο από 180°C σε κάθε σημείο του δοκιμίου θεωρείται ότι το συγκεκριμένο κριτήριο παύει να ισχύει.

Πέραν της πυραντίστασης σημαντικό ρόλο στην παθητική πυρασφάλεια παίζει η διαμερισματοποίηση ενός κτιρίου. Ως διαμερισματοποίηση ορίζεται ο οριζόντιος ή κατακόρυφος διαχωρισμός του κτιρίου σε διαμερίσματα, τα οποία έχουν υψηλό βαθμό πυραντίστασης (πυροδιαμερίσματα), με στόχο την αποτροπή της διάδοσης της

φωτιάς μέσα στο κτίριο διασφαλίζοντας έτσι τα απαραίτητα χρονικά περιθώρια για την εκκένωση του κτιρίου από τους ανθρώπους. Τα βασικά στοιχεία από τα οποία εξαρτάται η διαμερισματοποίηση ενός κτιρίου είναι το είδος και η χρήση του κτιρίου, η πυραντίσταστη της κατασκευής και των πυροδιαμερισμάτων καθώς και το ύψος του κτιρίου.

Τέλος, ύψιστη σημασία για την ασφαλή εκκένωση ενός φλεγόμενου κτιρίου έχουν οι οδούσεις διαφυγής προς άλλους ασφαλείς χώρους. Για αυτό το λόγο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό τους. Πιο συγκεκριμένα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη επαρκούς αριθμού εξόδων κινδύνου χωρίς εμπόδια με άνετη προσπέλαση καθώς και εναλλακτικής εξόδου σε περίπτωση αποκλεισμού της υπάρχουσας. Επιπλέον, καθίσταται αναγκαίος ο εφοδιασμός του κτιρίου με συστήματα συναγερμού και με επαρκή φωτισμό που θα υποδεικνύει τις εξόδους κινδύνου και τις οδούσεις διαφυγής. Καλό θα ήταν επίσης να πραγματοποιούνται δοκιμαστικές εκκενώσεις του κτιρίου για ενημέρωση και εξάσκηση των κατοίκων σε αντίστοιχες συνθήκες πυρκαγιάς.

1.5 Διάρθρωση διπλωματικής

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται επιγραμματικά οι θεματικές ενότητες που συνιστούν τη δομή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Μετά την αναφορά των εισαγωγικών εννοιών που προηγήθηκε, ακολουθεί η επιγραμματική παράθεση μερικών κοινών συμβατικών μονωτικών υλικών, όπως είναι η γυψοσανίδα, η διογκωμένη πολυστερίνη και ο πετροβάμβακας. Επίσης, πέρα από την κατηγορία των συμβατικών μονωτικών, αναλύεται η δομή και οι ιδιότητές του πάνελ κενού (VIP) που υπάγεται στην ευρύτερη κατηγορία των υπερμονωτικών υλικών. Εν συνεχεία, στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή των πειραματικών διατάξεων και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε ένα από τα τρία πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κάθε πειράματος. Κατά τη διεκπεραίωση των πειραμάτων έγινε καταγραφή των θερμοκρασιών και της θερμοροής με τη βοήθεια των θερμοστοιχείων και του θερμοροόμετρου, μελέτη της ομοιομορφίας του θερμοκρασιακού πεδίου με τη βοήθεια της θερμοκάμερας και υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της πειραματικής διάταξης. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται επιγραμματικά τα συμπεράσματα, ενώ παράλληλα προτείνονται μερικές ιδέες ως μελλοντικές προοπτικές για περαιτέρω βελτίωση της πειραματικής εγκατάστασης και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 2

2. Ιδιότητες και θερμική συμπεριφορά δομικών και μονωτικών υλικών

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου δημιουργούνται νέα δομικά υλικά προκειμένου να αντέχουν στις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Η Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας (ΑΘΕ) είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου και ασχολείται κυρίως με την αποθήκευση ενέργειας, την αποδοτική χρήση των διαθέσιμων πόρων αλλά και με την κατάλληλη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Πιο συγκεκριμένα, στόχος για τα δομικά υλικά είναι να ελαττωθεί η θερμική αγωγιμότητα τους ή να αυξηθεί η λανθάνουσα θερμότητα τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί αν ενσωματωθούν μέσα στα δομικά υλικά, χωρίς βέβαια να επηρεάζεται η συνολική ακεραιότητα, άλλα υλικά τα οποία μπορούν να αλλάζουν φάση (αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας).

Εν συνεχεία, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάρκεια αντοχής των δομικών υλικών. Με άλλα λόγια, πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλον οπότε να διαθέτουν τις κατάλληλες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην περαιτέρω μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών συμβάλλει η γνώση κάποιων παραμέτρων όπως είναι οι φυσικές ιδιότητες, η θερμική συμπεριφορά ως ξεχωριστό υλικό αλλά και ως τμήμα συνολικής κατασκευής και η χημική κινητική των διάφορων φυσικο-χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του υλικού.

2.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες δομικών υλικών

Τα δομικά υλικά χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο φυσικών ιδιοτήτων που τα διαχωρίζουν και τα διακρίνουν, όπως είναι η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα κ.λ.π. Βέβαια, στην περίπτωση που το υλικό υποστεί ορισμένες διεργασίες στο εσωτερικό του, αυτό θα αλληλεπιδράσει και έτσι οι φυσικές ιδιότητές του μπορούν να μεταβληθούν και να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του υλικού. Αυτό που θα καθορίζει φορά τον τρόπο μεταβολής των φυσικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού είναι η χημική κινητική των διεργασιών. Στη συνέχεια παρατίθενται οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων που καθορίζουν τη θερμική συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους.

- ❖ Ο συντελεστής θερμοπερατότητας: είναι η ποσότητα θερμότητας που περνά σε ένα δευτερόλεπτο μέσα από τις απέναντι πλευρές ενός κύβου πλευράς 1m, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών του στοιχείου είναι 1K . Ο συντελεστής θερμοπερατότητας εξαρτάται από τις ιδιότητες των εκάστοτε δομικών υλικών και συγκεκριμένα το συντελεστή

θερμικής αγωγιμότητας, το πάχος τους και την περιεκτικότητα τους σε υγρασία.

- ❖ Ο βαθμός διαπερατότητας του αέρα: εξαρτάται από το είδος της κατασκευής που διαμορφώνει το περίβλημα ενός χώρου και την επιφάνεια των ανοιγμάτων και τον τρόπο συναρμογής των κουφωμάτων. Για παράδειγμα, οι πόρτες και τα παράθυρα εμφανίζουν υπερβολικά μεγάλο συντελεστή θερμοπερατότητας μιας και υπάρχουν σημαντικές απώλειες θερμότητας από αυτά και αυτό γιατί οι θερμικές απώλειες προκαλούνται πέρα από τη θερμική αγωγιμότητα και από τη θερμική μεταφορά.
- ❖ Η ειδική θερμότητα των δομικών υλικών: συμβάλλει στον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της θερμοπερατότητας των στοιχείων. Όταν οι τοίχοι και οι οροφές έχουν μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα, τότε η θερμότητα που συγκεντρώνουν ενόσω λειτουργεί η θέρμανση, αποβάλλεται όταν αυτή σταματήσει με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η γρήγορη ψύξη των χώρων. Το αντίθετο συμβαίνει το καλοκαίρι όταν οι χώροι ψύχονται. Ανάλογα με την θέση της μόνωσης οι τοίχοι και οι οροφές ενεργούν είτε ως συσσωρευτές θερμότητας, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εξωτερική τους επιφάνεια για αύξηση της διάρκειας μεταβολής της θερμοκρασίας, είτε ως φράγμα προστασίας, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εσωτερική τους επιφάνεια για γρήγορη θέρμανση ή ψύξη των χώρων.

2.2 Κριτήρια επιλογής βάσει προτύπων

Οι απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής έχουν οδηγήσει στη δημιουργία υλικών που θα είναι ανθεκτικά στη φωτιά με σκοπό την προστασία ενός κτιρίου και κατ'επέκταση των ανθρώπων που είναι σε αυτό. Προκειμένου να γίνει αυτό, θα πρέπει ο τύπος των υλικών να διαθέτει επαρκή μηχανική αντοχή και να μπορεί να αντισταθεί σε έντονη θερμότητα.

Για αυτό το λόγο οι ειδικοί έχουν ορίσει ένα σύνολο κριτηρίων επιλογής των δομικών υλικών προκειμένου από τη μία να βελτιώσουν τη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων και από την άλλη να περιοριστεί στο ελάχιστο η πιθανότητα κατάρρευσης του κτιρίου κάτι που βέβαια θα έχει καταστροφικές συνέπειες. Αρχικά προτείνονται πινακοποιημένες τιμές θερμικής αντιστάσεως ή θερμικής αγωγιμότητας (Bjoern et al 2002, CIBSE 1986, prEN 13786) που υπάρχουν σε εναρμονισμένα Ευρωπαϊκά πρότυπα τόσο για απλά, όσο και για πιο σύνθετα και ανισότροπα υλικά. Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν διορθωτικούς συντελεστές της θερμικής αγωγιμότητας, που σχετίζονται με την υγρασία, με την εφαρμοζόμενη πίεση κατά την τοποθέτηση, με τη διάτρηση τους από στηρίγματα μεταλλικά ή μη, με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τέλος με τη γήρανση τους. Η θερμική συμπεριφορά των υλικών τοιχοποιίας για την Ελλάδα περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο EN1745 σύμφωνα με το οποίο ενδέχεται:

- Να χρησιμοποιηθούν πινακοποιημένες τιμές θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.

- Να χρησιμοποιηθούν πινακοποιημένες τιμές ισοδύναμης θερμικής αγωγιμότητας για πιο σύνθετα στοιχεία.
- Να γίνουν μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας των υλικών ή θερμικής αντίστασης των στοιχείων κατά μόνας.
- Να γίνουν μετρήσεις θερμικής αντίστασης των κτισμένων τοίχων.
- Με τη χρήση πινακοποιημένων ή μετρημένων τιμών θερμικής αγωγιμότητας της μάζας να γίνουν υπολογισμοί της θερμικής αντίστασης του στοιχείου ή της τοιχοποιίας. Αυτοί οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους απλοποιημένους (EN ISO 6946) και αυτούς που χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους (π.χ. μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων), οι απαιτήσεις πιστοποίησης των οποίων αναφέρονται στο πρότυπο EN 1745.

2.3 Δομικά υλικά

2.3.1 Γυψοσανίδα

Η κοινή γυψοσανίδα αποτελείται από τον εσωτερικό πυρήνα και από δύο φύλλα χαρτονιού. Ο πυρήνας της είναι ασβεστοκονίαμα γύψου, η ημι-ένυδρη μορφή θειικού άλατος ασβεστίου και νερού, συνθέτοντας τον τελικό εσωτερικό πυρήνα που είναι ο διυδρίτης θειικού ασβεστίου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Είναι δυνατόν επίσης μια γυψοσανίδα να περιέχει κάποια ποσότητα νερού υπό τη μορφή ελεύθερης υγρασίας και διάφορες άλλες ανόργανες ενώσεις, όπως το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και μαγνήσιο (MgCO_3). Οι γυψοσανίδες έχουν τη δυνατότητα ακόμα να αυξάνουν την αντοχή της τοιχοποιίας στη φωτιά, κυρίως σε χώρους που έχουν ανάγκη για υψηλή παθητική πυροπροστασία, ή μπορεί να διαθέτουν άλλα πρόσμικτα τα οποία ελαττώνουν την υδροαπορροφητικότητα τους, το οποίο βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε χώρους με υψηλό ποσοστό υγρασίας, όπως είναι π.χ. τα μπάνια.



Εικόνα 2-1 Φύλλο γυψοσανίδας [40]

Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται ευρέως ως οικοδομικά υλικά σε ολόκληρο τον κόσμο, αφού η πρώτη ύλη από την οποία παράγονται είναι ο γύψος, ο οποίος είναι διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες ανά τον κόσμο. Επίσης, κατασκευάζονται και διαμορφώνονται εύκολα, ενώ χρησιμοποιούνται και στην κατασκευή τοίχων και οροφών και αποτελούν ένα υλικό το οποίο είναι αισθητικά όμορφο και φιλικό προς

το περιβάλλον. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι γυψοσανίδες είναι ότι παρέχουν προστασία έναντι πυρκαγιάς. Η ικανότητα τους να επιβραδύνουν την επέκταση της φωτιάς καθώς αυτή προσεγγίζει έναν τοίχο οφείλεται στις θερμοφυσικές ιδιότητές τους, οι οποίες προκαλούν πτώση της θερμοκρασίας στον τοίχο. Όταν η γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε φωτιά, το ελεύθερο νερό που περιέχει (υπό τη μορφή υγρασίας), καθώς και το κρυσταλλικό νερό εξατμίζονται και μετακινούνται απορροφώντας μεγάλα ποσά θερμότητας με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η θερμοκρασία του τοίχου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό από άποψη ασφάλειας, καθώς προσφέρει επαρκή χρόνο για την εκκένωση ενός κτιρίου (Axenenko και Thorpe, 1995). Για το λόγο αυτό, η γυψοσανίδα χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις κατασκευές και συγκεκριμένα εκατέρωθεν κάθε τοιχοποιίας ενώ η μεταξύ τους διεπιφάνεια είναι κενή ή μονωμένη. Άλλα πλεονεκτήματα της γυψοσανίδας είναι το χαμηλό βάρος της, η ευκολία χρήσης και κοπής της σε επιθυμητές διαστάσεις, ο μικρός όγκος που καταλαμβάνουν, η υψηλή σταθερότητα και ακαμψία που διαθέτουν, η εξαιρετική μόνωση από μεριάς ήχου και θερμότητας και η οικονομική τους τιμή κατά την παρασκευή τους και την εγκατάσταση.

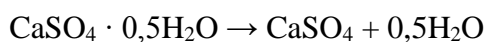
2.3.2 Θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδας

Η γυψοσανίδα αποτελείται κυρίως από γύψο, ενώ περιέχει επίσης ελεύθερο νερό υπό τη μορφή υγρασίας. Η συμπεριφορά του γύψου στις πυρκαγιές μελετάται από το 1960 περίπου (Ryan, 1962). Ο καθαρός γύψος στην φυσική του μορφή είναι ουσιαστικά ένα ορυκτό με κρυσταλλική μορφή, το οποίο περιέχει κρυσταλλικό νερό σε ποσοστό 21% κατά βάρος (Ang και Wang, 2004) και έχει χημικό τύπο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (διωδρίτης θειικού ασβεστίου) (Thomas, 2002). Οι βιομηχανίες παραγωγής γυψοσανίδων προσθέτουν διάφορες χημικές ενώσεις (σε μικρές ποσότητες) για να αυξήσουν την απόδοσή του όταν είναι εκτεθειμένος σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της γυψοσανίδας είναι η συμπεριφορά της έναντι πυρκαγιάς.

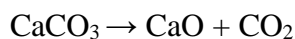
Όταν μια γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε μία πηγή θερμότητας, το κρυσταλλικό νερό αποσπάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και ατμοποιείται (Thomas, 2002). Η γυψοσανίδα κατά την θέρμανσή της υφίσταται δύο ενδόθερμες αντιδράσεις αποσύνθεσης, οι οποίες συνοδεύονται από απορρόφηση ενός μεγάλου ποσού ενέργειας. Αυτές οι αντιδράσεις προκαλούν την επιβράδυνση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μέσα στη γυψοσανίδα. Η πρώτη αντίδραση που γίνεται είναι η διάσπαση του διωδρίτη σε ημιωδρίτη:



Η αντίδραση αυτή ξεκινάει με αργό ρυθμό περίπου στους 80°C κορυφώνεται περίπου στους 120°C και ολοκληρώνεται πριν από τους 160°C. Το αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης ονομάζεται ημιωδρίτης θειικού ασβεστίου, το οποίο με την σειρά του αφυδατώνεται. Η δεύτερη αντίδραση τώρα, λαμβάνει χώρα περίπου στους 200-300°C και είναι:



Το αποτέλεσμα της αντίδρασης αυτής ονομάζεται ανυδρίτης του θειϊκού ασβεστίου. Αυτός έχει τη μορφή μιας ξηρής και μη συνεκτικής σκόνης η οποία ύστερα αποσπάται από την γυψοσανίδα. Για την επιβράδυνση αυτής ακριβώς της διαδικασίας χρησιμοποιούνται υαλονήματα (fiberglass) ως πρόσθετα. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι γύρω στους 800°C λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃), η οποία περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:



2.3.3 Διογκωμένη Πολυστερίνη

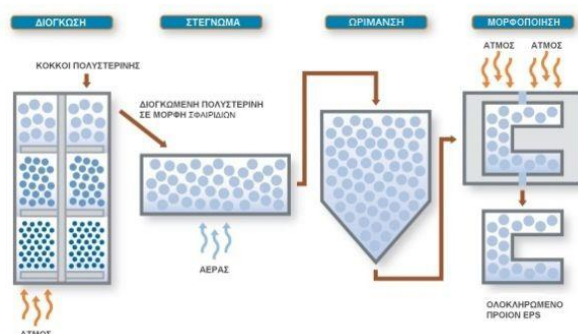
Η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS - Expanded polystyrene), γνωστή και ως φελιζόλ στην καθημερινή γλώσσα, είναι ένα ελαφρύ θερμομονωτικό υλικό με βάση την πολυστερίνη ((C₈H₈)_n) και αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα θερμομονωτικά υλικά της ελληνικής αγοράς (Εικόνα 2.2). Προέρχεται από την πετροχημική βιομηχανία και κατατάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία των αφρωδών πλαστικών.



Εικόνα 2-2 Διογκωμένη πολυστερίνη [47]

Η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται με πολυμερισμό από το μονομερές στυρένιο. Πιο αναλυτικά, η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται από τη διάλυση πεντανίου στο πολυμερές στυρενίου το οποίο όταν θερμανθεί με ατμό, παράγει σφαιρίδια EPS. Η διαστολή επιτυγχάνεται λόγω των μικρών ποσοτήτων αερίου πεντανίου που απελευθερώνονται μέσα στο υλικό και σχηματίζονται ερμητικά κλειστές κυψέλες EPS που περιέχουν 98% αέρα. Ουσιαστικά, στην τελική της μορφή μόνο το 2% του όγκου είναι σε στερεά μορφή, αφού τον υπόλοιπο όγκο καταλαμβάνει το μέσο διόγκωσης δηλαδή ο αέρας. Οι κυψέλες αυτές υπό τη μορφή σφαιριδίων καταλαμβάνουν περίπου 40 φορές τον όγκο της αρχικής σταγόνας πολυστερίνης. Σε αυτό το σημείο τα σφαιρίδια EPS τοποθετούνται μέσα σε κατάλληλες φόρμες-καλούπια, μέσα στα οποία με τη βοήθεια ατμού αποκτούν τη μορφή έτοιμου ή ημιέτοιμου προϊόντος ανάλογα με την χρήση και την εφαρμογή τους. Περαιτέρω

επεξεργασία γίνεται σε ειδικά κοπτικά μηχανήματα και παντογράφους για τα ημιέτοιμα προϊόντα (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2-3 Διαδικασία παραγωγής διογκωμένης πολυστερίνης [45]

Η τελική πυκνότητα του μονωτικού υλικού καθορίζεται από τον τρόπο παρασκευής της διογκωμένης πολυστερίνης. Βέβαια, με την πυκνότητα σχετίζεται άμεσα και η θερμική αγωγιμότητα. Χαρακτηριστικές τιμές πυκνοτήτων και θερμικής αγωγιμότητας του EPS παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Οι διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα του υλικού πιθανώς οφείλονται στη διαφορετική διαδικασία παρασκευής του μονωτικού υλικού.

Πίνακας 2-1 Χαρακτηριστικές τιμές πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας του EPS

Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	
Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
18	50	0,029	0,041
10	50	0,029	0,040
15	50	0,034	0,048

2.3.4 Εφαρμογές διογκωμένης πολυστερίνης

Η διογκωμένη πολυστερίνη βρίσκει πολλές εφαρμογές επειδή είναι ένα οικονομικό, εύχρηστο, ευέλικτο υλικό ενώ ταυτόχρονα είναι ανακυκλώσιμο και περιβαλλοντολογικά ασφαλές. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της είναι απεριόριστη αφού δεν υφίσταται γήρανση, αποδόμηση ή απώλεια διαστάσεων. Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι άοσμο υλικό και έχει λευκό χρώμα. Προσφέρεται αποκλειστικά για θερμική προστασία, αφού η έλλειψη ηχομονωτικών ιδιοτήτων την καθιστά ανεπαρκή στην ηχομονωτική προστασία. Πιο συγκεκριμένα η διογκωμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται:

- Θερμομόνωση πλακών από σκυρόδεμα, για τοποθέτηση στην άνω
- πλευρά (οροφές) ή στην κάτω πλευρά (πλοτή)
- Θερμομόνωση στεγών, κεραμοσκεπών
- Θερμομόνωση στοιχείων φέροντος οργανισμού (υποστυλώματα, τοιχία, δοκοί).

- Θερμομόνωση θερμογεφυρών
- Καλούπια για κορνίζες ή σχήματα στις επιφάνειες σκυροδέματος
- Πλήρωση κενών μεγάλων αρμών διαστολής
- Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2-4 Τοποθέτηση διογκωμένης πολυστερίνης σε εξωτερική τοιχοποιία [46]

- Κατασκευές ανεστραμμένης και συμβατικής θερμομόνωσης ταράτσας και φυτεμένου δώματος
- Δάπεδο και δώμα που προστατεύονται στεγανωτικά
- Ψευδοροφές
- Συσκευασίες τροφίμων και προϊόντων (δίσκοι, ποτήρια και πιάτα μιας χρήσης)

2.3.5 Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας (mineral wool) αποτελείται από ίνες οξειδίου πυριτίου – αλουμινίου και είναι ένα μονωτικό υλικό ανόργανης προελεύσεως που χρησιμεύει στην θερμική και ακουστική μόνωση, καθώς και στην πυροπροστασία στις οικοδομές, τη βιομηχανία και την ναυπηγική (Εικόνα 2.5). Τα ακατέργαστα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του πετροβάμβακα είναι πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος, ο βωξίτης και ο δολομίτης.



Εικόνα 2-5 Πετροβάμβακας [37]

Ο πετροβάμβακας διακρίνεται για το φαιοκίτρινο χρώμα του, παρασκευάζεται με

εκσφενδόνιση ύστερα από τη θέρμανση και τήξη των ορυκτών και αποκτά την τελική του μορφή με την προσθήκη συνδετικών υλικών. Τα ακατέργαστα υλικά τοποθετούνται σε έναν ειδικό κλίβανο όπου τήκονται σε θερμοκρασία πάνω από 1400°C, όπου χρησιμοποιείται γαιάνθρακας ως ενεργειακή πηγή. Ως πρόσθετη πηγή ενέργειας, χρησιμοποιείται πετρέλαιο για την αποτέφρωση των αερίων του καπναγωγού. Η παραγόμενη σκόνη και το μονοξείδιο του άνθρακα κατακρατούνται με ένα ειδικό σύστημα καθαρισμού των αερίων, ενώ ένα μεγάλο μέρος ενέργειας επιστρέφει στην διαδικασία παραγωγής. Η ακατέργαστη αυτή μάζα καταλήγει σε μια διάταξη μέσω της οποίας δημιουργούνται οι ίνες με τη μέθοδο της φυγοκέντρισης. Ο μηχανισμός διαλύει τη μάζα σε σταγόνες και διερχόμενος αέρας διασπά τις σταγόνες σε ίνες, οι οποίες στη συνέχεια διέρχονται μέσα από ένα θάλαμο συγκέντρωσης και έτσι δημιουργείται ένα αρχικό στρώμα πετροβάμβακα. Στη συνέχεια ακολουθεί η προσθήκη ενός συνδέτη, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των νέων πλακών πετροβάμβακα που παράγονται. Το αρχικό στρώμα καταλήγει σε ένα σύστημα εναπόθεσης το οποίο επιτρέπει την δημιουργία εξαιρετικών μονωτικών χαρακτηριστικών προσδίδοντας μια ομοιόμορφη κατανομή των ινών και υψηλά ποσοστά συνύφανσης. Έτσι παράγεται περισσότερος χώρος για την συγκράτηση του αέρα, που είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του μονωτικού υλικού. Στον θάλαμο ξήρανσης πραγματοποιείται η διαδικασία της ξήρανσης και της ωρίμανσης, που διεξάγονται στους 270°C με εξάτμιση του νερού και ωρίμανση του συνδέτη (Εικόνα 2.6). Ύστερα ακολουθεί η κοπή των τελικών προϊόντων στις επιθυμητές διαστάσεις, η στοίβαξη και το πακετάρισμα των παραχθέντων πλακών πετροβάμβακα. Στο εμπόριο ο πετροβάμβακας κυκλοφορεί με τη μορφή παπλώματος, με μεταλλικό πλέγμα, σκληρών πλακών και χύμα με τη μορφή κόκκων επεξεργασμένος με θερμοσκληρυντικές ρητίνες.



Εικόνα 2-6 Έξοδος πετροβάμβακα από θάλαμο ξήρανσης [36]

Πλεονεκτήματα πετροβάμβακα (mineral wool):

- ❖ Άκαυστο υλικό
- ❖ Σε μεγάλες πυκνότητες, έχει υψηλές μηχανικές αντοχές
- ❖ Εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (έως 750°C)

- ❖ Δεν φθείρεται με το πέρασμα του χρόνου, διατηρώντας παράλληλα όλες τις ιδιότητες του και την σταθερότητα των διαστάσεων του
- ❖ Δεν προσβάλλεται από διαλύτες και χημικές ουσίες
- ❖ Δεν προσβάλλει τα μέταλλα
- ❖ Δεν επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία
- ❖ Είναι άοσμος
- ❖ Δεν προσβάλλεται από έντομα και παράσιτα
- ❖ Καλός βαθμός απορρόφησης σε υψηλές συχνότητες ήχου

Μειονεκτήματα πετροβάμβακα (mineral wool):

- ❖ Προσβάλλεται από την υγρασία λόγω της πορώδους φύσης του
- ❖ Μικρή αντοχή σε εφελκυσμό
- ❖ Μικρή αντοχή σε θραύση
- ❖ Μέτριος βαθμός απορρόφησης σε χαμηλές συχνότητες ήχου
- ❖ Δύσκολη και επικίνδυνη τοποθέτηση

Ο πετροβάμβακας είναι ένα μονωτικό υλικό που συγχρόνως προσφέρει θερμομόνωση, ηχομόνωση και πυροπροστασία στα κτίρια σε περίπτωση πυρκαγιάς, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι λοιπόν, ο πετροβάμβακας χρησιμοποιείται για θερμοηχομόνωση σε οικοδομικές και βιομηχανικές εφαρμογές και συγκεκριμένα σε στέγες, σε εσωτερικές και εξωτερικές τοιχοποιίες, σε συστήματα ξηράς δόμησης, σε ψευδοροφές, στη μόνωση σωληνώσεων και σε αεραγωγούς θέρμανσης, κλιματισμού και καυσαερίων.



Εικόνα 2-7 Εφαρμογή στρώματος πετροβάμβακα σε οροφή [43]

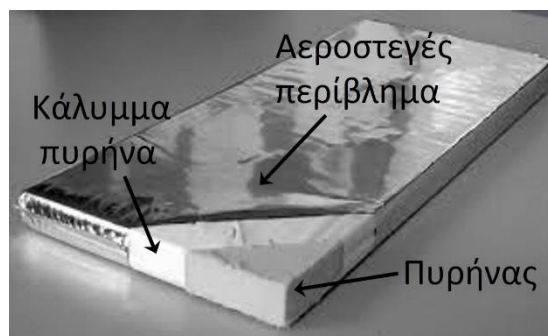
2.3.6 Πάνελ Κενού – VIP

Στη σύγχρονη εποχή οι αυξημένες ανάγκες του ανθρώπου για ενεργειακή κατανάλωση, έχουν οδηγήσει σε μια προσπάθεια ενεργειακής εξοικονόμησης σε όλο και περισσότερους τομείς. Για αυτό το λόγο, για την ενεργειακή βελτίωση των κτιρίων οι επιστήμονες έχουν δημιουργήσει μια νέα γενιά μονωτικών υλικών πέραν των συμβατικών γνωστά και ως υπέρ-μονωτικά υλικά (super insulation materials - SIM). Σε αυτήν την ευρύτερη οικογένεια μονωτικών υλικών ανήκει και το μονωτικό Πάνελ Κενού (Vacuum Insulation Panel ή VIP). Τα πάνελ κενού είναι μια υπερσύγχρονη μορφή μόνωσης και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε κτιριακές εγκαταστάσεις βελτιώνοντας την ενεργειακή συμπεριφορά του, αφού έχουν θερμική αγωγιμότητα κάτω των 0.025W/mK . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, είτε την επίτευξη μεγαλύτερης θερμικής αντίστασης για το ίδιο πάχος μόνωσης, είτε την χρήση μικρότερου πάχους μόνωσης για την επίτευξη της ίδιας θερμικής αντίστασης. Με λίγα λόγια επιτυγχάνεται μέγιστη θερμική μόνωση με το μικρότερο δυνατό πάχος μονωτικού υλικού. Αυτή η τόσο χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται με την παντελή έλλειψη αέρα, δημιουργία κενού από όπου λαμβάνουν και την ονομασία τους [23].

Τα πάνελ κενού έχουν σχήμα επίπεδο το οποίο δε βοηθά στην αντιμετώπιση της υψηλής πίεσης. Σε αυτό το ζήτημα δίνει λύση η χρήση ενός ιδιαίτερα λεπτού υλικού υπό μορφή αφρού, σκόνης, ή ινών (fiberglass) που παρεμβάλλεται μεταξύ των επιφανειών, με νανοπορώδες που αγγίζει τα 100nm . Μια σχετικά μικρή πίεση είναι ικανή πλέον να εκκενώσει τον αέρα, κάνοντας εφικτή την κατασκευή πινάκων (VIPs) και τη χρήση τους στις κατασκευές. Το πάχος αυτών των πινάκων κυμαίνεται από 2mm έως 4mm . Τα VIP χρησιμοποιούνται για τη θερμο-ηχομόνωση νέων κτιρίων κατά την δόμησή τους από την αρχή, αλλά και κατά την αναστύλωση-αναπαλαίωση παλαιότερων κατασκευών στους τοίχους ή στα δάπεδα.

Τα πάνελ κενού VIPs αποτελούνται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα (Εικόνα 2.8):

- τον πυρήνα πυριτίου
- το ενδιάμεσο κάλυμμα του πυρήνα
- το εξωτερικό αεροστεγές περίβλημα



Εικόνα 2-8 Δομή του VIP [41]

Το εξωτερικό περίβλημα, που είναι κατασκευασμένο από πλαστικό και συνήθως καλύπτεται από αλουμίνιο ή από ανοξείδωτο ατσάλι, αποτελεί τον περιβάλλοντα σκελετό που με τη μορφή φακέλου, τυλίγεται γύρω από το υλικό πλήρωσης σε κενό, δηλαδή τον άκαμπτο πυρήνα. Ο πυρήνας του VIP αποτελείται από πεπιεσμένο πυρίτιο και έχει παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά με τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Το υλικό πλήρωσης έχει την μορφή αφρού, σκόνης, ή ινών (fibre glass) και πρέπει πάντα να είναι πορώδες, να αντιστέκεται στην πίεση και να μπορεί να εκκενωθεί. Με αυτόν τον τρόπο, οι συνθήκες κενού ελαττώνουν ουσιαστικά την αγωγή της θερμότητας, αφού ελαττώνονται σημαντικά οι συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών μορίων του αερίου και των ατόμων του υλικού του πυρήνα με του αερίου. Επίσης, το κενό ουσιαστικά εξαλείφει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στο εσωτερικό του μονωτή, αφού έχει άμεση σχέση με την παρουσία των μορίων του αερίου σε αυτό. Τέλος, τα άκρα του εξωτερικού περιβλήματος-φακέλου σφραγίζονται ερμητικά, τυλίγονται προς το εσωτερικό του και κολλάνε σε αυτόν, δίνοντας στο πάνελ κενού την τελική του μορφή.



Εικόνα 2-9 Γραμμή παραγωγής VIP [38]

Η κατασκευή των πάνελ κενού είναι μια απαιτητική διαδικασία και για αυτό το λόγο πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι. Πιο συγκεκριμένα, κατά την κατασκευή των πινάκων πρέπει πάντα να διατηρούνται σταθερές διαστάσεις καθώς σε αντίθετη περίπτωση, λόγω των ιδιαίτερων τεχνικών κατασκευής το κόστος γίνεται αρκετά υψηλό. Ακόμα για να επιτευχθεί σωστή λειτουργία των πινάκων VIP, πρέπει το περίβλημα του φακέλου που περιέχει το κενό να μην έχει οπές, πράγμα που σημαίνει πως οι πίνακες δεν μπορούν να κοπούν, προκειμένου να μεταβληθεί το μέγεθός τους. Για αυτό το λόγο, για περιοχές που διαπερνούν για οποιοδήποτε λόγο το μονωτικό υλικό ή για άλλες που παραμένουν ανοικτές, χρησιμοποιείται συνήθως συνδυασμός πινάκων διαφορετικών μεγεθών για την κάλυψη των αναγκών αυτής της περίπτωσης. Βέβαια, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία κατά την τοποθέτηση των πινάκων ώστε να μην μένουν κενά, γιατί κάτι τέτοιο είναι πιθανόν να λειτουργήσει ως «γέφυρα θερμότητας».

Το βασικό χαρακτηριστικό που κάνει τόσο μοναδική τη χρήση των πάνελ κενού στον τομέα της θερμομόνωσης και της ενεργειακής βελτίωσης των κτιρίων είναι η εκκένωση του αέρα από αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, σε αντίθεση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά, επιτυγχάνεται σαφώς πολύ χαμηλότερη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας. Με άλλα λόγια επιτυγχάνεται υψηλότερη θερμική αντίσταση ανά

μονάδα πάχους. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν δημιουργηθεί VIPs με θερμική αγωγιμότητα 0.004W/mK στο κέντρο του πάνελ. Βέβαια, η ενεργός τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται από 0.006 έως 0.008 W/mK καθώς πρέπει να συμπεριληφθούν και οι θερμογέφυρες που δημιουργούνται στην επιφάνεια [16]. Για την ακρίβεια, αυτό σημαίνει πως ένα τυπικό πάνελ κενού VIP έχει περίπου το ένα πέμπτο της θερμικής αγωγιμότητας ενός κοινού συμβατικού υλικού μόνωσης, δηλαδή πενταπλάσια θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους και αυτό καθιστά το πάνελ κενού ως κυρίαρχο μονωτικό υλικό στον τομέα της θερμομόνωσης των κατασκευών.

Από το 1950 έχουν εμφανιστεί οι μονωτικοί πίνακες κενού αλλά το υψηλό κόστος κατασκευής, τους καθιστούσε απαγορευτικούς για χρήση στις κατασκευές. Αργότερα και συγκεκριμένα κατά τη δεκαετία του 90 τα VIPs εισήλθαν στη βιομηχανία της ψύξης στην Αμερική, την Ευρώπη και την Ιαπωνία, ενώ στις αρχές του 21ου αιώνα ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται ευρύτερα αφού βρήκαν εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο και στη μόνωση των οικοδομών (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2-10 Εγκατάσταση πάνελ κενού-VIP σε τοιχοποιία [48]

Σήμερα, η εκτεταμένη έρευνα έχει οδηγήσει στην σημαντική μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής, λόγω και της χρήσης νέων υλικών, όμως το κόστος τους παραμένει ακόμα αρκετά υψηλό συγκριτικά με τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Ο χρόνος ζωής των πινάκων κυμαίνεται σήμερα μεταξύ 20 και 50 χρόνων, αφού υπάρχει σταδιακή απώλεια του κενού με την πάροδο του χρόνου, ενώ κάποια υλικά εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη αντοχή. Η σημαντική αυτή βελτίωση οφείλεται στον βαθμό του κενού στο εσωτερικό, στην μεγάλη αντοχή του περιβάλλοντος υλικού, στον τρόπο σφράγισης του φακέλου και επιπλέον στον τρόπο εγκατάστασης των πινάκων κατά την κατασκευή. Τέλος αξίζει να τονιστεί ότι τα πάνελ κενού μπορούν να ανακυκλωθούν συμβάλλοντας περισσότερο στην προστασία του περιβάλλοντος. Όλα αυτά βοηθούν στο να γίνει εύκολα αντιληπτό πως το πάνελ κενού-VIP είναι ακόμα πολλά υποσχόμενο στον τομέα της θερμομόνωσης των κτιριακών κελύφων και σίγουρα θα είναι ένα από τα υπερμονωτικά υλικά που θα πρωταγωνιστεί στον οικοδομικό κλάδο τα προσεχή χρόνια.

Κεφάλαιο 3

3. Περιγραφή πειραματικών διατάξεων

3.1 Μεθοδολογία και διαδικασία πειραμάτων

Για τη μελέτη του μονωτικού υλικού πάνελ κενού – VIP και την εξέταση της θερμικής συμπεριφοράς του σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή σε συνθήκες φωτιάς, ακολουθήθηκε μια σειρά πειραμάτων. Στόχος των πειραμάτων ήταν η δημιουργία ενός περιβάλλοντος το οποίο θα ανταποκρινόταν με επιτυχία στις πραγματικές συνθήκες φωτιάς μέσα σε ένα κτίριο. Πιο αναλυτικά, για τη μελέτη των μονωτικών υλικών έπρεπε καθ'όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας να διασφαλίζεται από τη μία πλευρά του δοκιμίου υψηλή θερμοκρασία-φωτιάς, ενώ από την άλλη πλευρά να επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος. Για αυτό το λόγο, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας-φωτιάς χρησιμοποιήθηκε ο ειδικά διαμορφωμένος πειραματικός φούρνος Nabertherm B180 (Εικόνα 3.1). Από το φούρνο αφαιρέθηκε η πόρτα και αντικαταστάθηκε από ένα πλαίσιο κατασκευασμένο από το ίδιο μονωτικό υλικό με αυτόν, με σκοπό την εξασφάλιση των προαναφερθέντων συνθηκών φωτιάς.



Εικόνα 3-1 Πειραματικός φούρνος B180 της εταιρείας Nabertherm [49]

Για την επιτυχή διεκπεραίωση των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε ακόμα η συσκευή Agilent 34972A (Εικόνα 3.2). Η συσκευή αυτή είναι ένα πολύμετρο 6½-ψήφιας ακρίβειας και διαθέτει ειδικά διαμορφωμένες υποδοχές πάνω στις οποίες συνδέονται τα θερμοστοιχεία, με σκοπό την λήψη και καταγραφή των θερμοκρασιών σε κάθε θέση της πειραματικής διάταξης. Το Agilent συνδέεται με τη σειρά του με τον υπολογιστή του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης μέσω καλωδίου Ethernet, στον οποίο αποτυπώνονται οι τιμές των θερμοκρασιών μέσω του ειδικού προγράμματος Labview.



Εικόνα 3-2 Agilent 34972A [50]

Επιπλέον, με τη βοήθεια της ειδικής θερμοκάμερας του εργαστηρίου τύπου FLIR THERMACAM PM595 πραγματοποιήθηκε η καταγραφή της θερμοκρασίας της εκτεθειμένης σε συνθήκες περιβάλλοντος εξωτερικής επιφάνειας του πλαισίου και η μελέτη της ομοιομορφίας της (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3-3 Θερμοκάμερα FLIR THERMACAM PM595 [51]

Στόχος κάθε πειράματος είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς σε συνθήκες φωτιάς και κατ'επέκταση η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας του VIP σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό επετεύχθη με τη σταθεροποίηση του θερμοκρασιακού πεδίου μέσα στα δοκίμια (μόνιμη κατάσταση). Με άλλα λόγια, για να προσδιοριστεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έπρεπε να επιτευχθεί μόνιμη θερμοκρασιακή κατάσταση σε κάθε θέση.

Σύμφωνα με την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας ισχύει:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση Fourier ισχύει:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Σύμφωνα με την Εξ. 3.2, μόνιμη κατάσταση επιτυγχάνεται όταν

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} (q) = 0 \Rightarrow q = C \quad \text{Εξ. 3.3}$$

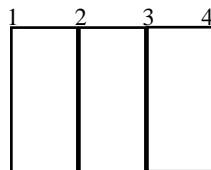
που σημαίνει ότι η ροή θερμότητας είναι σταθερή.

Συνεπώς, δεδομένου ότι κατά τη μόνιμη κατάσταση η ροή θερμότητας με αγωγή είναι σταθερή, από την εξίσωση Fourier είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα k :

$$k \frac{dT}{dx} = q \Rightarrow k \frac{\Delta T}{\Delta x} = q \Rightarrow k = \frac{q \Delta x}{\Delta T} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

Επομένως για συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των δοκιμίων του πειράματος, γνωρίζοντας τη διαφορά των θερμοκρασιών είναι εφικτός ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας.

Για παράδειγμα, για την παρακάτω διάταξη δοκιμίων ο υπολογισμός του συντελεστή αγωγιμότητας k για δύο ξεχωριστές περιπτώσεις είναι:



Για την ολική απόσταση των δοκιμίων 1-4

$$k_{41} = q \cdot \Delta x_{41} / \Delta T_{41}$$

ενώ για την ενδιάμεση απόσταση 2-3

$$k_{32} = q \cdot \Delta x_{32} / \Delta T_{32}$$

Τέλος, για τον ορθό υπολογισμό της θερμοροής χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής σφάλματος m . Συγκεκριμένα, η συσκευή Agilent 34972A, στην οποία συνδέθηκαν τα θερμοστοιχεία και το θερμοροόμετρο, χρησιμοποιεί υπορουτίνες που καθορίζουν την ένδειξη που λαμβάνουμε. Πιο αναλυτικά, η πληροφορία που δεχόμαστε από τα θερμοστοιχεία που είναι σε Volt, μετατρέπεται με τη βοήθεια συγκεκριμένων υπορουτινών του Agilent σε βαθμούς Κελσίου, αν αφορά θερμοστοιχείο ή παραμένει σε Volt, αν αφορά θερμοροόμετρο. Εν συνεχεία, μετατρέπουμε την τάση από Volt σε W/m^2 σύμφωνα με τη σχέση:

$$q \left[\frac{W}{m^2} \right] = q[V] * \frac{10^6}{1,8} \quad \text{Εξ. 3.5}$$

Μέσω του προγράμματος Labview λαμβάνουμε αυτές τις μετρήσεις του πειράματος σε υπολογιστή του εργαστηρίου. Από το διάγραμμα του κατασκευαστή προέκυψαν οι παρακάτω εξισώσεις υπολογισμού του συντελεστή σφάλματος m για τα θερμοκρασιακά πεδία:

$$\text{Για } T < 93 \text{ } ^\circ\text{C} : m = -0,000845 * T + 1,01774 \quad \text{Εξ. 3.6}$$

$$\text{Για } T > 93 \text{ } ^\circ\text{C} : m = -0,000585 * T + 0,9946 \quad \text{Εξ. 3.7}$$

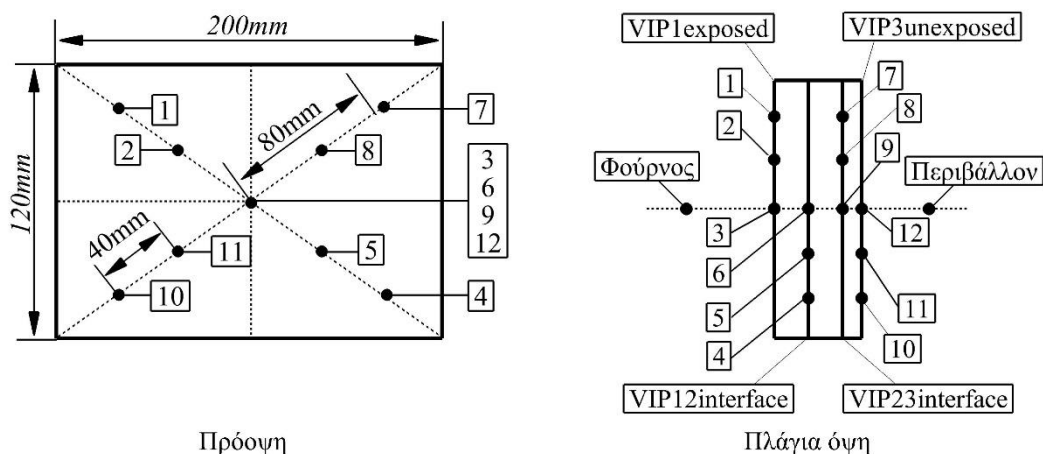
3.1.1 Πείραμα Πάνελ Κενού VIP

Στόχος αυτού του πειράματος ήταν η μέτρηση και καταγραφή της θερμικής συμπεριφοράς του υπερμονωτικού υλικού που εξετάζεται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δηλαδή του πάνελ κενού, σε συνθήκες φωτιάς. Για την διεκπεραίωση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρία δείγματα VIP ίδιων διαστάσεων, αλλά διαφορετικού πάχους (Εικόνα 3.4). Τα δύο δείγματα ήταν διαστάσεων 200mm x120mm x20mm και το τρίτο 200mm x120mm x10mm. Το τελευταίο τοποθετήθηκε στην εξωτερική πλευρά και ακολούθησαν τα άλλα δυο δοκίμια, εδιάμεσα και στην πλευρά που ήταν εκτεθειμένη στο εσωτερικό του φούρνου.



Εικόνα 3-4 Δείγμα VIP

Για τη μέτρηση στο φούρνο τα τρία δοκίμια ενώθηκαν μετωπικά μεταξύ τους και τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία και στις τέσσερις διατομές όπου υπάρχει διαφορετικό θερμοκρασιακό περιβάλλον. Αρχικά επιλέχθηκαν οι θέσεις όπου θα εδράζονταν τα θερμοστοιχεία στα δοκίμια. Ορίστηκε ως θέση «VIP1exposed» η όψη του δείγματος VIP1 που είναι εκτεθειμένη στο εσωτερικό του φούρνου, «VIP12interface» η διεπιφάνεια μεταξύ των VIP1 και VIP2, «VIP23interface» η διεπιφάνεια μεταξύ των VIP2 και VIP3 και «VIP3unexposed» η πλευρά του VIP3 που βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Σε κάθε επιφάνεια του τελικού δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοστοιχεία σε απόσταση 40mm το ένα από το άλλο πάνω στις διαγωνίους. Στην πρώτη επιφάνεια («VIP1exposed»), τοποθετήθηκε ένα θερμοστοιχείο στο κέντρο, το επόμενο σε απόσταση 40mm από αυτό πάνω στην διαγώνιο και το τελευταίο σε απόσταση 80mm από το κέντρο πάνω στην ίδια διαγώνιο. Στη δεύτερη επιφάνεια («VIP12interface»), τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν με την ίδια λογική και αντιδιαμετρικά στην άλλη μεριά της ίδιας διαγωνίου. Στην τρίτη επιφάνεια («VIP23interface»), όμοια τοποθετήθηκε ένα θερμοστοιχείο στο κέντρο, το επόμενο σε απόσταση 40mm από αυτό πάνω στην διαγώνιο και το τελευταίο σε απόσταση 80mm από το κέντρο. Αντίστοιχα, στην τέταρτη επιφάνεια («VIP3unexposed») τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν πάλι αντιδιαμετρικά στην αντίθετη πλευρά της ίδιας διαγωνίου, όπως φαίνεται αναλυτικά στις παρακάτω εικόνες. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοστοιχείο το οποίο τοποθετήθηκε σε βάθος 50mm από το φούρνο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ένα ακόμα θερμοστοιχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος σε απόσταση περίπου 50mm από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου που βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Ο συνολικός αριθμός των θερμοστοιχείων που περιλήφθησαν στο πείραμα ήταν 14 (Σχήμα 3.1).

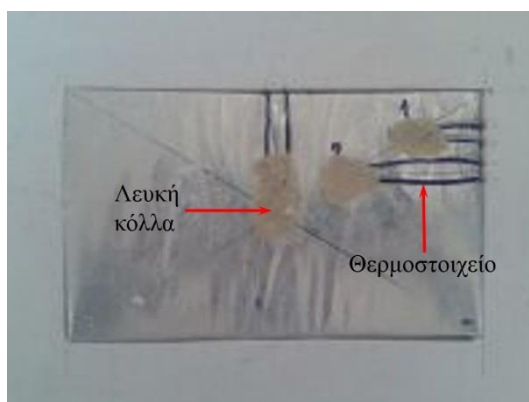


Σχήμα 3-1 Θέσεις θερμοστοιχείων στα δοκίμια

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοστοιχεία τύπου Chal-032 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA στην επιφάνεια του δοκιμίου που βρίσκεται στο εσωτερικό του φούρνου. Στις υπόλοιπες καθορισμένες θέσεις των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν οκτώ θερμοστοιχεία τύπου Chal-010 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοροόμετρο Heatflux και δύο ακόμα τύπου Chal-010 της εταιρίας OMEGA για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός και εκτός του φούρνου. Το θερμοροόμετρο έχει ανώτατο όριο θερμοκρασίας τους 150°C και επιτυγχάνει ακρίβεια $\pm 10\%$.

Μία δυσκολία που παρατηρήθηκε ήταν η στήριξη των θερμοστοιχείων πάνω στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων του VIP. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, κόπηκε τοπικά μικρό κομμάτι της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου στην περιοχή τοποθέτησης της άκρης του θερμοστοιχείου. Σε κάθε επιφάνεια των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός τρόπος συγκόλλησης. Στην εκτεθειμένη στο φούρνο όψη χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων η λευκή κόλλα. Στις ενδιάμεσες διεπιφάνειες χρησιμοποιήθηκε μαύρη κεραμεική πάστα για τη συγκράτησή τους, μιας και τα θερμοστοιχεία συγκρατιόντουσαν μεταξύ τους με το δοκίμιο. Τέλος για το θερμοροόμετρο και τα θερμοστοιχεία της τελευταίας όψης χρησιμοποιήθηκε κόκκινη σιλικόνη αφού δεν αναμενόταν μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα τρία θερμοστοιχεία της εκτεθειμένης επιφάνειας στο εσωτερικό του φούρνου κολλήθηκαν με την ειδική λευκή κόλλα που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες (Εικόνα 3.5). Για να αποφευχθούν τυχόν διογκώσεις της κόλλας και για να μην υπάρξουν ανακρίβειες στα πειραματικά αποτελέσματα, αφαιρέθηκε όλη η ποσότητα του νερού που βρισκόταν υπό τη μορφή υγρασίας στη λευκή κόλλα. Πιο αναλυτικά, αυτό επετεύχθη με την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, στην περιοχή του δοκιμίου όπου τοποθετήθηκε η κόλλα για τη συγκόλληση του θερμοστοιχείου, με τη βοήθεια ενός ειδικού θερμοπιστόλου BOSCH. Η χρήση του θερμοπιστόλου συνετέλεσε στην αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 250 βαθμούς κελσίου, ενώ στη συνέχεια με τη βοήθεια ενός μικρού σφυριού αφαιρούνταν η διόγκωση που είχε δημιουργηθεί από την ύπαρξη υγρασίας, χωρίς να επηρεάζεται η συγκόλληση του θερμοστοιχείου. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβανόταν δύο φορές και πλέον το θερμοστοιχείο είχε κολλήσει επιτυχώς πάνω στην επιφάνεια του υλικού.

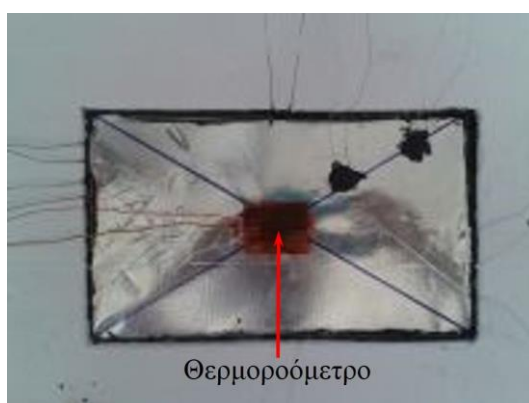


Εικόνα 3-5 Εκτεθειμένη επιφάνεια στο φούρνο

Τα θερμοστοιχεία των ενδιάμεσων διεπιφανειών συγκρατήθηκαν με τη χρήση μαύρης κεραμικής πάστας η οποία αντέχει μέχρι τους 1250 °C, μιας και τα θερμοστοιχεία στερεωνόντουσαν με τη βοήθεια των δοκιμίων (Εικόνα 3.6). Τέλος, για το θερμοροόμετρο που ήταν τοποθετημένο στην ενδιάμεση επιφάνεια και για τα τρία εναπομείναντα θερμοστοιχεία στην εκτεθειμένη στις συνθήκες του περιβάλλοντος όψη, προτιμήθηκε αντί των προαναφερθέντων συγκολλητικών ουσιών, κόκκινη σιλικόνη η οποία αντέχει σε θερμοκρασίες έως 300 °C, αφού δεν αναμενόταν περαιτέρω άνοδος της θερμοκρασίας (Εικόνες 3.7, 3.8).



Εικόνα 3-6 Ενδιάμεση επιφάνεια



Εικόνα 3-7 Ενδιάμεση επιφάνεια με θερμοροόμετρο



Εικόνα 3-8 Εκτεθειμένη επιφάνεια στις συνθήκες περιβάλλοντος

Στη συνέχεια, ακολούθησε η κοπή του πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα σε συγκεκριμένες διαστάσεις, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από το ίδιο μονωτικό υλικό με αυτό του φούρνου. Στο κέντρο του πλαισίου δημιουργήθηκε οπή διαστάσεων 200mm x 120mm, ίδιων δηλαδή διαστάσεων με αυτών των δοκιμίων έτσι ώστε να σφηνώσουν όσο γίνεται στην οπή που δημιουργήθηκε. Με αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιήθηκε η απόσταση μεταξύ δοκιμίων και πλαισίου, το οποίο είναι αναγκαίο για να ελαχιστοποιηθούν και οι απώλειες θερμότητας από το εσωτερικό του φούρνου στο περιβάλλον.



Εικόνα 3-9 Πλαίσιο φούρνου με οπή

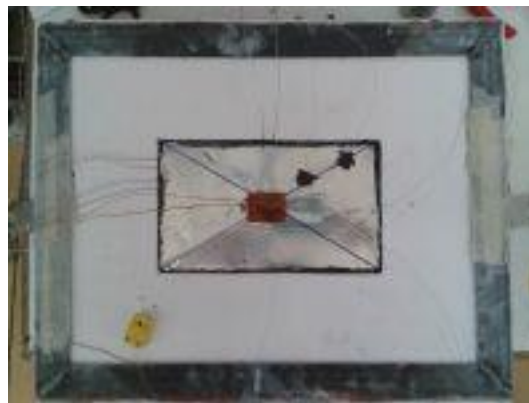
Για την κάλυψη τυχόν μικρών διακένων μεταξύ των δοκιμίων κατά τη στήριξή τους στο πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε μαύρη κεραμική πάστα ανθεκτική σε θερμοκρασίες της τάξης των 1250 βαθμών κελσίου. Πιο συγκεκριμένα, μετά από την προσθήκη κάθε δοκιμίου VIP στο πλαίσιο, τοποθετούνταν περιμετρικά η μαύρη πάστα που συγκρατούσε τα δοκίμια μεταξύ τους. Η σειρά που τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στο πλαίσιο από το εσωτερικό του φούρνου προς το περιβάλλον ήταν η εξής: VIP πάχους 20mm, VIP πάχους 20mm, VIP πάχους 10mm (Εικόνες 3.10-3.13)



Εικόνα 3-10 Τοποθέτηση πρώτου δοκιμίου-εκτεθειμένη στο φούρνο επιφάνεια



Εικόνα 3-11 Τοποθέτηση πρώτου δοκιμίου-ενδιάμεση επιφάνεια



Εικόνα 3-12 Τοποθέτηση δεύτερου δοκιμίου



Εικόνα 3-13 Τοποθέτηση τρίτου δοκιμίου-εκτεθειμένη προς το περιβάλλον επιφάνεια

Μετά τη στήριξη των δοκιμίων στο κέντρο του πλαισίου, το πλαίσιο τοποθετήθηκε στην είσοδο του φούρνου, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κενά μεταξύ του πλαισίου και του φούρνου και κατά συνέπεια να ελαχιστοποιηθούν οι τυχόν απώλειες θερμότητας (Εικόνα 3.14).



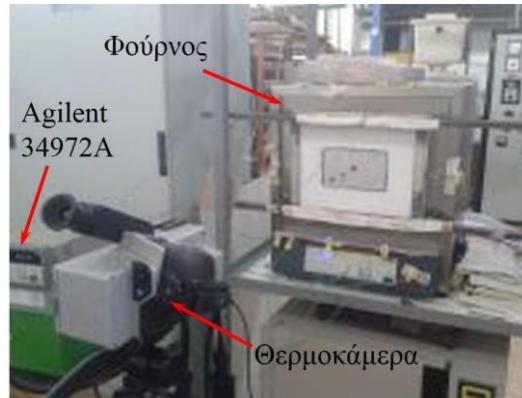
Εικόνα 3-14 Τοποθέτηση πλαισίου στο φούρνο

Εν συνεχεία, τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν με τη συσκευή Agilent 34972A από την οποία λαμβάνονται οι θερμοκρασίες σε κάθε θέση κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Το Agilent συνδέθηκε με τη σειρά του με τον εργαστηριακό υπολογιστή μέσω καλωδίου Ethernet για την καταγραφή των θερμοκρασιών. Η απεικόνιση και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων του πειράματος έγινε με χρήση του προγράμματος Labview. Ακόμα, πρέπει να αναφερθεί ότι η καταγραφή της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του πλαισίου, που ήταν στην αρχή εκτεθειμένη στις συνθήκες περιβάλλοντος και η μελέτη της ομοιομορφίας αυτής, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση θερμοκάμερας τύπου FLIR THERMACAM PM595. Οι φωτογραφίες που ελήφθησαν επεξεργάστηκαν σε υπολογιστή με το αντίστοιχο πρόγραμμα της θερμοκάμερας. Πριν από την έναρξη του πειράματος ανοίχτηκε οπή διαμέτρου 5mm στο πλαίσιο από όπου εισήλθε οριζικά το θερμοστοιχείο που κατέγραφε τη θερμοκρασία του αέρα εντός του φούρνου (Εικόνα 3.15). Το θερμοστοιχείο αυτό ήταν καλυμμένο από έναν κεραμικό κύλινδρο προκειμένου να αντέξει στις υψηλές θερμοκρασίες του πειράματος.



Εικόνα 3-15 Θερμοστοιχείο αέρα φούρνου με κεραμικό κύλινδρο

Τέλος, ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει προσεκτικά η στήριξη του πλαισίου στο φούρνο με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εφάπτονται τα θερμοστοιχεία μεταξύ τους αλλά και με οποιαδήποτε μεταλλική επιφάνεια του πλαισίου ή του φούρνου. Αν συνέβαινε αυτό η ληφθείσα θερμοκρασία θα ήταν εσφαλμένη και ανακριβής, καθώς θα αντιπροσώπευε τη θερμοκρασία επαφής του καλωδίου με τη μεταλλική επιφάνεια. Στην Εικόνα 3.16 φαίνεται εποπτικά η πειραματική διάταξη όπως ακριβώς ήταν στο εργαστήριο.

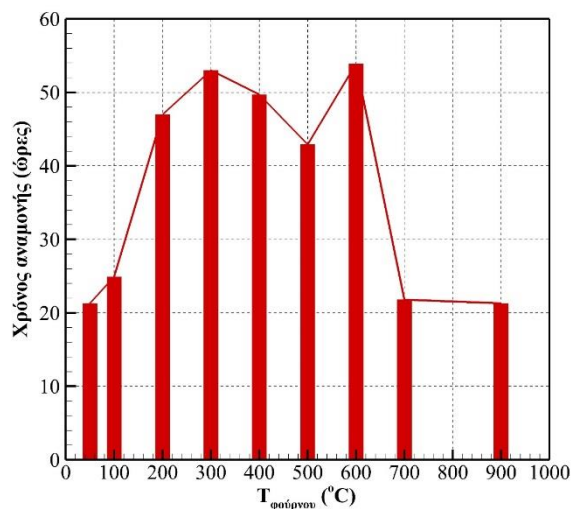


Εικόνα 3-16 Συνολική εποπτεία πειράματος VIP

Σκοπός ήταν να επιτευχθεί σταθεροποίηση του θερμοκρασιακού πεδίου εντός των δοκιμίων, να επέλθει δηλαδή μόνιμη κατάσταση, κάτι το οποίο απαιτούσε πολύωρη παρατήρηση. Οι θερμοκρασιακές τάξεις καθώς και οι χρόνοι αναμονής σε αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 καθώς και στο παρακάτω ραβδόγραμμα (Σχήμα 3.2). Ο φούρνος στην αρχή του πειράματος βρισκόταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C.

Πίνακας 3-1 Χρόνοι αναμονής σε κάθε θερμοκρασία φούρνου

Θερμοκρασία T (°C)	Χρόνος αναμονής t (h)
50	21,3
100	24,9
200	47
300	53
400	49,7
500	42,9
600	53,9
700	21,8
900	21,3



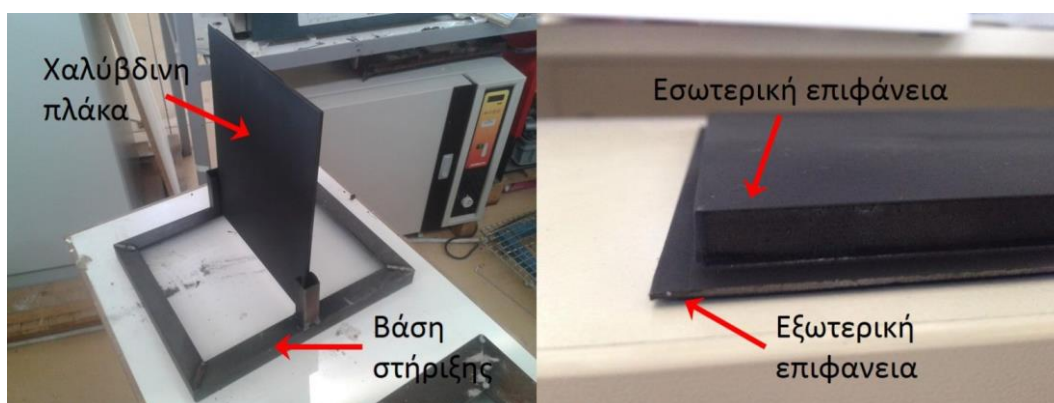
Σχήμα 3-2 Θερμοκρασιακές τάξεις και χρόνοι αναμονής

Παρατηρείται πως για κάθε θερμοκρασιακό πεδίο χρειάζεται διαφορετικό χρονικό διάστημα προκειμένου να επέλθει μονιμότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε κάποιες θερμοκρασίες του φούρνου πραγματοποιήθηκαν εξώθερμες αντιδράσεις (καύσεις στρωμάτων VIP), με αποτέλεσμα να χρειαστεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να έρθει σε μόνιμη κατάσταση.

3.1.2 Πείραμα Κεραμεικού χαρτιού – Kaowool

Στόχος του πειράματος είναι ο προσδιορισμός και η επαλήθευση των ιδιοτήτων του κεραμεικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper και της βάσης δεδομένων του, που προπήρχε από τον κατασκευαστή, με σκοπό τη μελλοντική χρήση του σε επόμενο πείραμα, αφού θα έχει πλήρως ορισθεί η θερμική του συμπεριφορά. Αυτό επετεύχθη με τη βοήθεια της χαλύβδινης πλάκας, η οποία συνετέλεσε στην ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας (Εικόνα 3.17).

Αρχικά ελέγχθηκε ξεχωριστά η ομοιομορφία της θερμοκρασίας πάνω στην πλάκα. Το υλικό της πλάκας που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας και οι διαστάσεις της εξωτερικής πλευράς είναι 258mm x 328mm x 2mm, ενώ της εσωτερικής πλευράς είναι 246mm x 316mm x 8mm. Η πλάκα βάφτηκε σε χρώμα μαύρο με σπρέι σε λεπτές στρώσεις της εταιρίας MOTIP DUPLI GROUP.



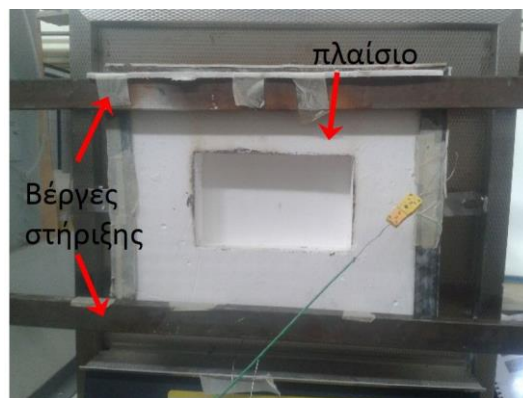
Εικόνα 3-17 Χαλύβδινη πλάκα

Η πλάκα αφέθηκε να στεγνώσει για μία ώρα και μετά τοποθετήθηκε στον ειδικό εργαστηριακό φούρνο CARBOLITE για άλλη μία ώρα στους 160°C (Εικόνα 3.18). Στην πλάκα τοποθετήθηκαν δύο θερμοστοιχεία, το ένα στο κέντρο και το άλλο σε απόσταση 80mm πάνω στη διαγώνιο, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 3-18 Εργαστηριακός φούρνος CARBOLITE

Αρχικά ο εργαστηριακός φούρνος Nabertherm B180 ρυθμίστηκε στους 200°C για δύο ώρες. Εξαιτίας όμως της ύπαρξης ρευμάτων αέρα στην εξωτερική πλευρά της πλάκας δε μπορούσε να επέλθει μόνιμη κατάσταση και να επιτευχθεί ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου στην επιφάνεια της. Για το λόγο αυτό μονώθηκε η εξωτερική πλευρά της πλάκας με κεραμικό χαρτί Kaowool της εταιρίας Morgan Thermal Ceramics. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν πέντε στρώσεις κεραμικού χαρτιού πάχους 6mm x 400mm x 300mm στην εκτεθειμένη στο περιβάλλον επιφάνεια της πλάκας. Η πλάκα μαζί με τις στρώσεις κεραμικού χαρτιού τοποθετήθηκαν στο φούρνο, ο οποίος ρυθμίστηκε στους 400°C για δύο ώρες. Για τη στήριξη της πλάκας και των στρώσεων κεραμικού χαρτιού χρησιμοποιήθηκε ένα παλιό πλαίσιο επιπλέον των βεργών στήριξης για καλύτερη συγκράτηση πάνω στο φούρνο (Εικόνα 3.19). Τα θερμοστοιχεία κατέγραψαν αυτή τη φορά την ίδια θερμοκρασία, αφού πλέον είχε μονωθεί η πλάκα με τις στρώσεις του κεραμικού χαρτιού, οπότε επετεύχθη ομοιομορφία πάνω στην επιφάνεια της πλάκας.



Εικόνα 3-19 Πειραματική διάταξη φούρνου

Δεδομένου ότι το προηγούμενο πείραμα, που είχε στόχο την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας πάνω στη χαλύβδινη πλάκα στέφθηκε με επιτυχία, ακολούθησε νέο πείραμα για να εξακριβωθούν οι ιδιότητες και η θερμική αγωγιμότητα του κεραμικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper με τη βάση δεδομένων που δινόταν από τον κατασκευαστή. Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε νέο πλαίσιο στήριξης πάνω στο οποίο προσαρτήθηκαν με τη βοήθεια ηλεκτροσυγκόλλησης

τέσσερις μεταλλικές προεξοχές στις άκρες του για τη συγκράτηση της εκτεθειμένης στο περιβάλλον χαλύβδινης πλάκας (Εικόνα 3.20).



Εικόνα 3-20 Πλαίσιο με μεταλλικές προεξοχές

Το πλαίσιο είχε διαστάσεις 405mm x 305mm x 60mm και εσωτερικό ωφέλιμο πάχος 55mm. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δύο χαλύβδινες πλάκες για την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου στην εκτεθειμένη στο φούρνο και στην εκτεθειμένη στο περιβάλλον επιφάνεια. Η πλάκα που χρησιμοποιήθηκε προς το εσωτερικό του φούρνου είναι αυτή του προηγούμενου πειράματος με διαστάσεις εξωτερικής πλευράς 258mm x 328mm x 2mm και εσωτερικής πλευράς 246mm x 316mm x 8mm. Η πλάκα που ήταν εκτεθειμένη στο περιβάλλον είχε διαστάσεις 250mm x 320mm x 2mm.

Οι πλάκες βάφτηκαν σε χρώμα μαύρο με σπρέι σε λεπτές στρώσεις της εταιρίας MOTIP DUPLI GROUP, στέγνωσαν για μία ώρα και ύστερα τοποθετήθηκαν στον ειδικό εργαστηριακό φούρνο CARBOLITE στους 160°C για μία ώρα όπως και προηγουμένως (Εικόνα 3.21).



Εικόνα 3-21 Χαλύβδινη πλάκα στον εργαστηριακό φούρνο CARBOLITE

Στη συνέχεια ακολούθησε η κοπή των φύλλων κεραμικού χαρτιού με εργαλείο κοπής σε διαστάσεις 400mm x 300mm (Εικόνα 3.22). Πιο συγκεκριμένα, κόπηκαν εννέα κομμάτια από το κεραμικό χαρτί Kaowool 1260 Paper πάχους 6mm.

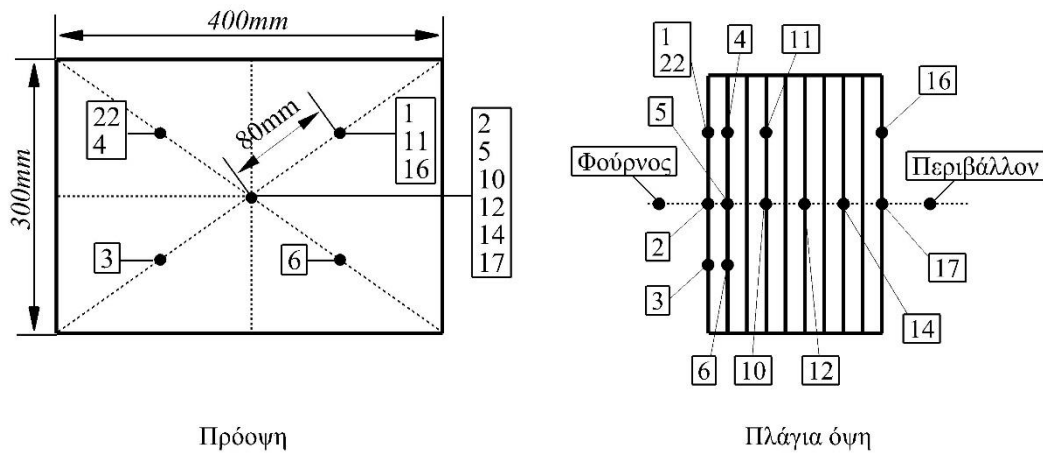


Εικόνα 3-22 Κοπή κεραμικού χαρτιού

Αφού το συνολικό πάχος και των εννέα κομματιών κεραμικού χαρτιού είναι $6 \times 9 = 54 \text{mm}$ και το πάχος της εξωτερικής επιφάνειας της πλάκας είναι 2mm , τότε το συνολικό πάχος ανέρχεται στα 56mm . Δεδομένου ότι το εσωτερικό ωφέλιμο πάχος του πλαισίου είναι 55mm συμπεραίνεται ότι η χαλύβδινη πλάκα «έρχεται πρόσωπο» με το φούρνο, ακολουθεί σε απόσταση 1mm το πλαίσιο του φούρνου και ύστερα σε απόσταση ακόμα 1mm οι στρώσεις του κεραμικού χαρτιού.

Τα εννέα κομμάτια κεραμικού χαρτιού ενώθηκαν μεταξύ τους και ανάμεσά τους τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Ως σύμβαση τέθηκε ότι το κεραμικό χαρτί που ήταν προς το φούρνο ήταν το νούμερο 1 ενώ αυτό που ήταν προς το περιβάλλον ήταν το 9. Αποδέχοντας αυτήν την παραδοχή, ορίστηκε ως θέση 1 η επιφάνεια του κεραμικού χαρτιού 1 που ήταν εκτεθειμένη στο φούρνο, θέση 2 η ενδιάμεση διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων κεραμικού χαρτιού 1 και 2, θέση 3 η ενδιάμεση διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων κεραμικού χαρτιού 2 και 3, θέση 4 η ενδιάμεση διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων κεραμικού χαρτιού 3 και 4 κ.ο.κ. και θέση 10 η επιφάνεια του κεραμικού χαρτιού 9 που ήταν εκτεθειμένη στο περιβάλλον. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 12 θερμοστοιχεία και ένα θερμοροόμετρο. Στη θέση 1 τοποθετήθηκαν τέσσερα θερμοστοιχεία τύπου Chal-032 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA: ένα στο κέντρο και τα άλλα τρία σε απόσταση 80mm από αυτό πάνω στις διαγωνίους (δύο στις άνω άκρες και ένα στην κάτω αριστερή). Στη θέση 2, χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοστοιχεία ίδιου τύπου Chal-032 της εταιρίας OMEGA και τοποθετήθηκαν πάλι ένα στο κέντρο και τα άλλα δύο πάνω στην ίδια διαγώνιο σε απόσταση 80mm , εκατέρωθεν από το θερμοστοιχείο που βρισκόταν στο κέντρο. Στη θέση 4 χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοστοιχεία τύπου Chal-010 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA, ένα στο κέντρο και ένα σε απόσταση 80mm από αυτό. Στις θέσεις 6 και 8 χρησιμοποιήθηκε από ένα θερμοστοιχείο τύπου Chal-010 της εταιρίας OMEGA, το οποίο τοποθετήθηκε στο κέντρο της κάθε επιφάνειας. Τέλος, στη θέση 10 χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοροόμετρο Heatflux με ακρίβεια $\pm 10\%$ και ανώτατο όριο θερμοκρασίας τους 150°C και ένα θερμοστοιχείο τύπου Chal-010 της εταιρίας OMEGA. Το θερμοροόμετρο τοποθετήθηκε στο κέντρο, ενώ το θερμοστοιχείο πάνω στη διαγώνιο σε απόσταση 80mm από αυτό. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα ακόμα θερμοστοιχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση περίπου 50mm από την εξωτερική χαλύβδινη πλάκα. Η θέση των

θερμοστοιχείων και του θερμοροόμετρου στην πειραματική διάταξη φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 3.3.



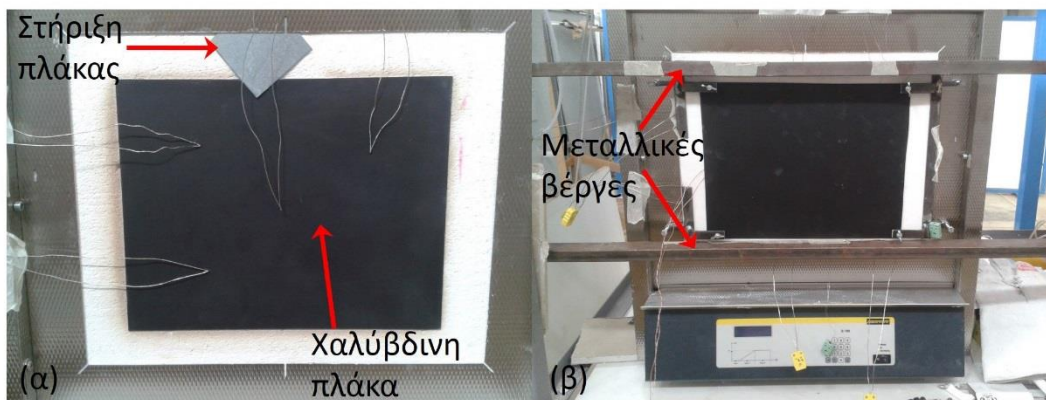
Σχήμα 3-3 Θέσεις θερμοστοιχείων και θερμοροόμετρου

Στη συνέχεια, ακολούθησε η τοποθέτηση και στήριξη των στρώσεων πάνω στο πλαίσιο (Εικόνα 3.23). Πιο αναλυτικά, στην αρχή τοποθετήθηκε η χαλύβδινη πλάκα που ήταν προς το περιβάλλον και η οποία πάτησε πάνω στις ειδικές μεταλλικές προεξοχές του πλαισίου που είχαν κατασκευαστεί. Έπειτα ακολούθησαν οι στρώσεις του κεραμεικού χαρτιού από το περιβάλλον προς το εσωτερικό του φούρνου μαζί με τα θερμοστοιχεία τηρώντας το παραπάνω σχεδιάγραμμα θέσεών τους.



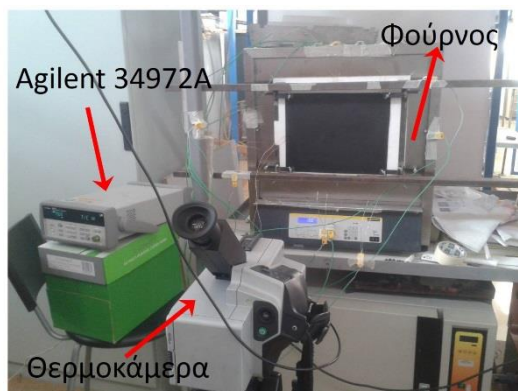
Εικόνα 3-23 Τοποθέτηση κεραμεικού χαρτιού και θερμοστοιχείων στο πλαίσιο

Στον εργαστηριακό φούρνο Nabertherm B180 τοποθετήθηκε η εσωτερική χαλύβδινη πλάκα, η οποία στηρίχθηκε προσωρινά μέχρι την τοποθέτηση ολόκληρου του πλαισίου πάνω στο φούρνο. Το πλαίσιο στηρίχθηκε με τη βοήθεια μεταλλικών βεργών στήριξης πάνω στο φούρνο, οι οποίες κάλυψαν τυχόν διάκενα που υπήρχαν μεταξύ των στρώσεων κεραμεικού χαρτιού και του φούρνου με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση απωλειών θερμότητας και ρευμάτων αέρα (Εικόνα 3.24).



Εικόνα 3-24: (α) Στήριξη χαλύβδινης πλάκας στο φούρνο, (β) Τοποθέτηση πλαισίου στο φούρνο

Ακολούθως, τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν με τη συσκευή Agilent 34972A και αυτή με τη σειρά της συνδέθηκε μέσω καλωδίου Ethernet με τον εργαστηριακό υπολογιστή. Βέβαια ελέγχθηκε να μην εφάπτονται τα θερμοστοιχεία μεταξύ τους ή με οποιαδήποτε άλλη μεταλλική επιφάνεια του πλαισίου ή του φούρνου. Κάτι τέτοιο θα επηρέαζε αρνητικά τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα θα ήταν λανθασμένα, αφού η ληφθείσα θερμοκρασία θα ήταν η στιγμιαία θερμοκρασία επαφής του θερμοστοιχείου με τη μεταλλική επιφάνεια. Με τη βοήθεια του προγράμματος Labview έγινε η απεικόνιση των θερμοκρασιών στον εργαστηριακό υπολογιστή. Τέλος, για τη μελέτη της ομοιομορφίας του θερμοκρασιακού πεδίου πάνω στην εκτεθειμένη επιφάνεια προς το περιβάλλον της εξωτερικής χαλύβδινης πλάκας, χρησιμοποιήθηκε η θερμοκάμερα του εργαστηρίου τύπου FLIR THERMACAM PM595. Στην αρχή, ο φούρνος Nabertherm B180 βρισκόταν σε συνθήκες πειβάλλοντος 20°C.

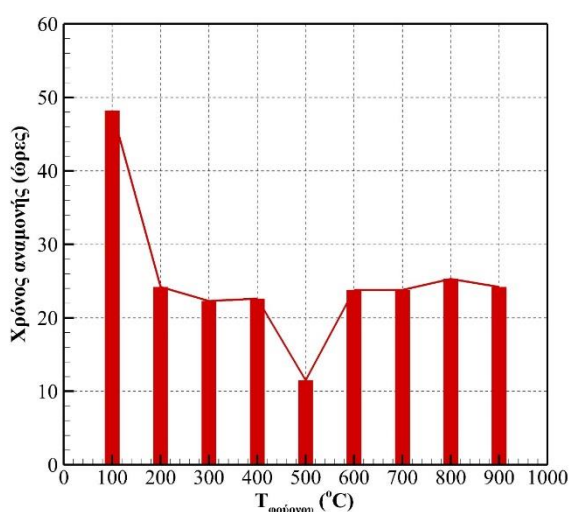


Εικόνα 3-25 Συνολική εσοπτεία πειράματος

Η επίτευξη σταθεροποίησης και μόνιμων συνθηκών απαιτούσε πολύωρη παρατήρηση σε κάθε θερμοκρασιακή τάξη. Οι θερμοκρασιακές τάξεις καθώς και οι χρόνοι αναμονής σε αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 3.2 και στο παρακάτω ραβδόγραμμα (Σχήμα 3.4).

Πίνακας 3-2 Χρόνοι αναμονής σε κάθε θερμοκρασία φούρνου

Θερμοκρασία T (°C)	Χρόνος αναμονής t (h)
100	48,2
200	24,2
300	22,3
400	22,6
500	11,5
600	23,8
700	23,8
800	25,3
900	24,2



Σχήμα 3-4 Θερμοκρασιακές τάξεις και χρόνοι αναμονής

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα γίνεται εύκολα αντιληπτό πως στις περισσότερες θερμοκρασιακές τάξεις χρειάζεται περίπου το ίδιο χρονικό διάστημα για να επέλθει μόνιμη κατάσταση.

3.1.3 Πείραμα Πάνελ Κενού (VIP) και Κεραμικού Χαρτιού (Kaowool 1260 Paper)

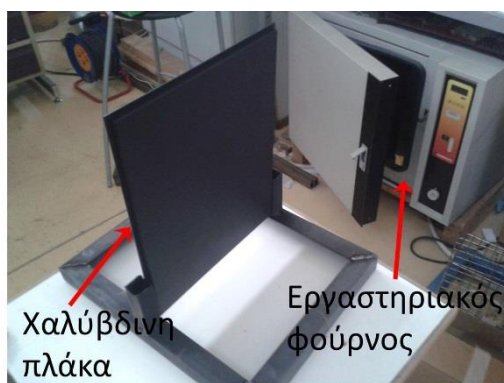
Έχοντας επαληθεύσει πλήρως πλέον τη θερμική συμπεριφορά και τις τιμές του συντελεστή αγωγιμότητας για το κεραμικό χαρτί Kaowool 1260 Paper με τη δοθείσα βάση δεδομένων του κατασκευαστή, στόχος του πειράματος είναι ο επαναπροσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού VIP συνδυαστικά σε ένα ενιαίο πολυστρωματικό πείραμα στις ίδιες συνθήκες φωτιάς. Έτσι λοιπόν, μελετάται η θερμική συμπεριφορά του υπερμονωτικού VIP και καταμετράται η θερμική αγωγιμότητά του, όταν συνυπάρχει μαζί με το κεραμικό χαρτί Kaowool 1260 Paper σε μία κοινή πειραματική διάταξη. Όπως και στο προηγούμενο πείραμα κεραμικού

χαρτιού Kaowool, η ομοιόμορφη κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου ήταν απαραίτητη και για αυτό το λόγο κρίθηκε και πάλι αναγκαία η χρήση χαλόνδινων πλακών.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το ήδη υπάρχον πλαίσιο στήριξης του προηγούμενου πειράματος με τις τέσσερις μεταλλικές προεξοχές στις άκρες του, διαστάσεων 405mm x 305mm x 60mm και εσωτερικού ωφέλιμου πάχους 55mm. Όπως και προηγουμένως, η προβλεπόμενη ομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας επετεύχθη με τη χρήση των δύο μεταλλικών πλακών. Για την πλευρά στο εσωτερικό του φούρνου χρησιμοποιήθηκε καινούρια πλάκα υλικού χάλυβα τηρώντας τις ίδιες διαστάσεις (εξωτερική πλευρά 258mm x 328mm x 2mm και εσωτερική πλευρά 246mm x 316mm x 8mm). Για την εκτεθειμένη στο περιβάλλον επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η ίδια χαλύβδινη πλάκα διαστάσεων 250mm x 320mm x 2mm. Οι πλάκες αφού καθαρίστηκαν από τυχόν σωματίδια στις επιφάνειες τους με ειδικό φλόγιστρο, βάφτηκαν σε χρώμα μαύρο με σπρέι της εταιρίας MOTIP DUPLI GROUP σε λεπτές στρώσεις (Εικόνα 3.26). Στη συνέχεια, στέγνωσαν για μία ώρα και τοποθετήθηκαν στον ειδικό εργαστηριακό φούρνο CARBOLITE στους 160°C για άλλη μία ώρα (Εικόνα 3.27).



Εικόνα 3-26 Καθαρισμός πλάκας με φλόγιστρο



Εικόνα 3-27 Πλάκα σε βάση στήριξης μετά τη βαφή στο φούρνο

Για την εκτέλεση του πειράματος κόπηκαν δύο φύλλα κεραμεικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper με ειδικό εργαλείο κοπής σε διαστάσεις 400mm x 300mm x 6mm. Έπειτα, ακολούθησε η κοπή δύο δοκιμίων VIP διαστάσεων 400mm x 300mm x 20mm με τη βοήθεια οργάνου μέτρησης και τροχού κοπής (Εικόνα 3.28).

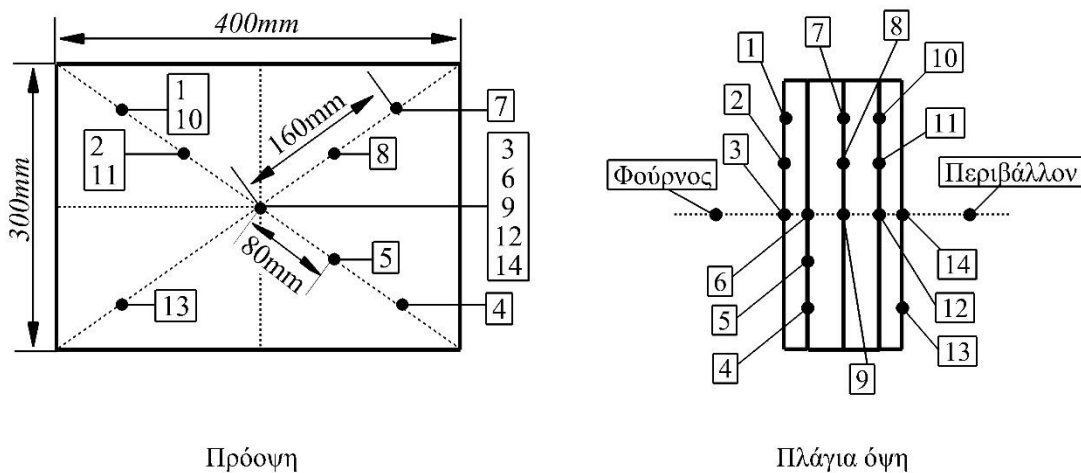


Εικόνα 3-28 Κοπή VIP με βοήθεια τροχού σε προβλεπόμενες διαστάσεις

Το συνολικό πάχος της διάταξης, δύο φύλλα κεραμικό χαρτί και δύο δοκίμια VIP, ανέρχεται στα 52mm (6mm + 6mm + 20mm + 20mm). Η εξωτερική πλάκα έχει πάχος 2mm, ενώ το εσωτερικό ωφέλιμο πάχος του πλαισίου είναι 55mm. Προκειμένου να έρχεται πρόσωπο με πρόσωπο η πειραματική διάταξη με το πλαίσιο στήριξης έπρεπε να καλυφθεί το κενό του 1mm. Για το λόγο αυτό συσφίχθηκαν οι βίδες που βρίσκονται στις μεταλλικές προεξοχές του πλαισίου τόσο ώστε η ανύψωση τους και συνεπώς και της διάταξης να είναι 1mm.

Η σειρά της πειραματικής διάταξης που ακολουθήθηκε ξεκινώντας από το φούρνο προς το περιβάλλον ήταν: ένα φύλλο κεραμικό χαρτί Kaowool, δύο δοκίμια VIP και τέλος το τελευταίο κεραμικό χαρτί Kaowool. Ανάμεσα στα δοκίμια και το κεραμικό χαρτί τοποθετήθηκαν θερμοστοιχεία σε όλες τις ενδιάμεσες θέσεις για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Επιλέχθηκε ως σύμβαση η παρακάτω ονοματολογία θέσεων ξεκινώντας από το φούρνο προς τα έξω: «Kaowool1exposed» η επιφάνεια του πρώτου κεραμεικού χαρτιού που ήταν εκτεθειμένη στο φούρνο, «VIP1exposed» η διεπιφάνεια μεταξύ του πρώτου κεραμεικού χαρτιού και του πρώτου δοκιμίου VIP, «VIP1unexposed» η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο δοκιμίων VIP, «VIP2unexposed» η διεπιφάνεια μεταξύ του δεύτερου δοκιμίου VIP και του δεύτερου κεραμεικού χαρτιού Kaowool, «Kaowool2unexposed» η επιφάνεια του δεύτερου κεραμεικού χαρτιού που είναι εκτεθειμένη στις συνθήκες περιβάλλοντος. Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν 15 θερμοστοιχεία διαφορετικού τύπου και ένα θερμορόμετρο. Στη θέση «Kaowool1exposed» χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοστοιχεία τύπου Chal-032 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA: ένα στο κέντρο των διαγωνίων, το επόμενο σε απόσταση 80mm από αυτό πάνω στην διαγώνιο και το τελευταίο σε απόσταση 160mm από το κέντρο πάνω στην ίδια διαγώνιο. Ακόλουθώντας το ίδιο σκεπτικό, στη θέση «VIP1exposed» τοποθετήθηκαν τρία θερμοστοιχεία ίδιου τύπου Chal-032 της εταιρίας OMEGA: ένα θερμοστοιχείο στο κέντρο και τα άλλα δύο σε απόσταση 80mm το καθένα μεταξύ τους πάνω στην ίδια μεριά της διαγωνίου. Στη θέση «VIP1unexposed» χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοστοιχεία τύπου Chal-032 της εταιρίας OMEGA και ένα θερμοστοιχείο τύπου Chal-010 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της

εταιρίας OMEGA. Το θερμοστοιχείο τύπου Chal-010 τοποθετήθηκε στο κέντρο των διαγωνίων, ενώ τα θερμοστοιχεία τύπου Chal-032 τοποθετήθηκαν σε απόσταση 80mm το ένα από το άλλο πάνω στην ίδια μεριά της διαγωνίου. Ομοίως, στη θέση «VIP2unexposed» τοποθετήθηκαν τρία θερμοστοιχεία τύπου Chal-010 ακολουθώντας την ίδια λογική. Στην τελευταία θέση «Καοωο12unexposed» χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοροόμετρο Heatflux με ακρίβεια $\pm 10\%$ και ανώτατο όριο θερμοκρασίας τους 150°C και ένα θερμοστοιχείο τύπου Chal-010 της εταιρίας OMEGA. Το θερμοροόμετρο τοποθετήθηκε στο κέντρο ενώ το θερμοστοιχείο τοποθετήθηκε πάνω στη διαγώνιο σε απόσταση 160mm από το θερμοροόμετρο. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται αναλυτικά οι θέσεις των θερμοστοιχείων και του θερμοροόμετρου πάνω στην πειραματική διάταξη.



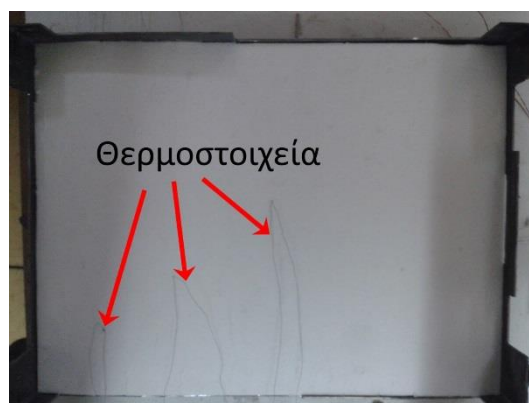
Σχήμα 3-5 Θέσεις θερμοστοιχείων και θερμοροόμετρου

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δύο ακόμα θερμοστοιχεία τύπου Chal-010 (ακρίβειας $\pm 5\%$) της εταιρίας OMEGA για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος αλλά και του εσωτερικού του φούρνου τα οποία τοποθετήθηκαν σε απόσταση περίπου 50mm από την εξωτερική και την εσωτερική χαλύβδινη πλάκα αντίστοιχα. Το θερμοστοιχείο μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα του εσωτερικού του φούρνου ενισχύθηκε με μία στρώση κεραμικού κυλίνδρου προκειμένου να αντέξει στις υψηλές θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (Εικόνα 3.29).



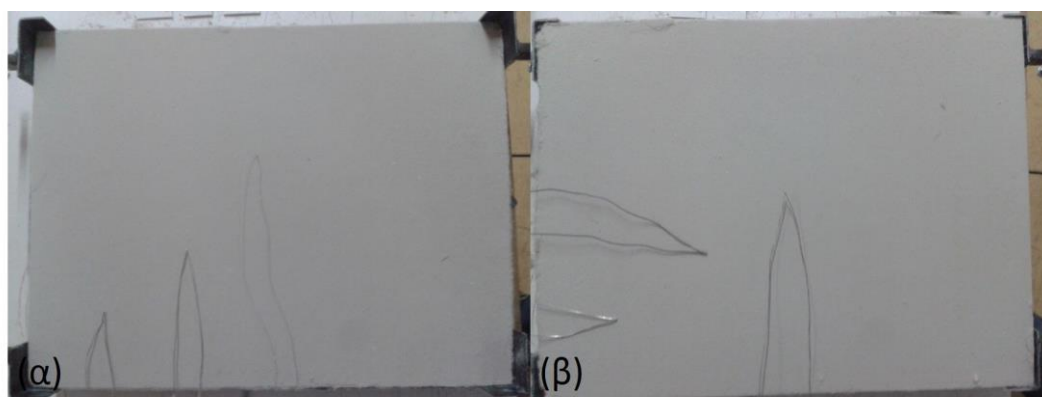
Εικόνα 3-29 Θερμοστοιχείο αέρα στο εσωτερικό του φούρνου

Μετά την επιλογή των θέσεων των θερμοστοιχείων και του θερμοροόμετρου ακολούθησε η τοποθέτηση των δοκιμίων της πειραματικής διάταξης πάνω στο πλαίσιο στήριξης με σειρά από το περιβάλλον προς το φούρνο. Αρχικά τοποθετήθηκε στο πλαίσιο η εξωτερική χαλύβδινη πλάκα που είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον, η οποία στηρίχθηκε στις ανυψωμένες βίδες των μεταλλικών προεξοχών, μαζί με το θερμοροόμετρο και το θερμοστοιχείο. Έπειτα ακολούθησε η τοποθέτηση του εξωτερικού κεραμικού χαρτιού Kaowool με τα θερμοστοιχεία τηρώντας το διάγραμμα τοποθέτησης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.30.



Εικόνα 3-30 Τοποθέτηση κεραμικού χαρτιού Kaowool

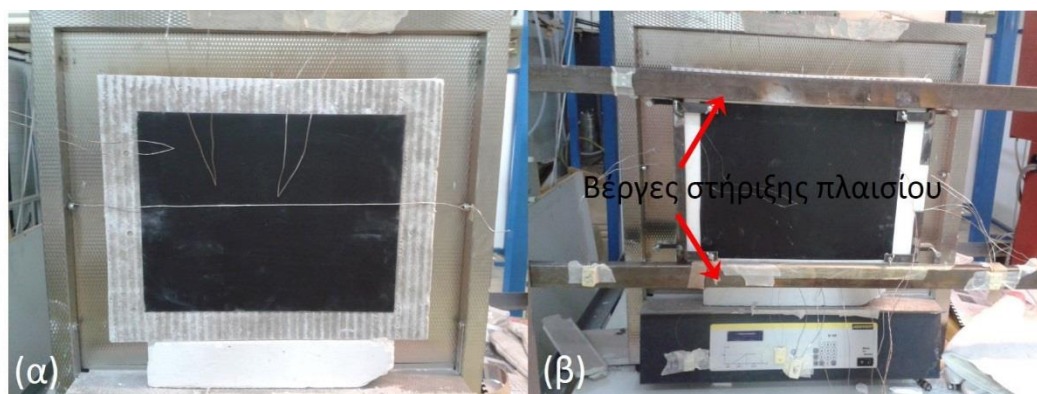
Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο πλαίσιο τα δύο δοκίμια VIP με τα αντίστοιχα θερμοστοιχεία στις ενδιάμεσες θέσεις και τέλος ακολούθησε η τελευταία στρώση κεραμικού χαρτιού, τα θερμοστοιχεία της οποίας στερεώθηκαν απ'ευθείας στην εσωτερική χαλύβδινη πλάκα του φούρνου (Εικόνα 3.31).



Εικόνα 3-31: (α) Τοποθέτηση πρώτου δοκιμίου VIP, (β) Τοποθέτηση δεύτερου δοκιμίου VIP

Η εσωτερική χαλύβδινη πλάκα καθώς και τα θερμοστοιχεία ανάμεσα στην πλάκα και τη πρώτη στρώση κεραμικού χαρτιού τοποθετήθηκαν στον εργαστηριακό φούρνο Nabertherm B180 και στηρίχθηκαν πρόχειρα μέχρι την τελική τοποθέτηση του πλαισίου στο φούρνο (Εικόνα 3.32α). Οι μεταλλικές βέργες στήριξης βοήθησαν στη συγκράτηση του πλαισίου πάνω στο φούρνο καθώς και στην κάλυψη χασμάτων που ενδεχομένως υπήρχαν μεταξύ των δοκιμίων VIP, του κεραμικού χαρτιού και του

φούρνου με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της απώλειας θερμότητας (Εικόνα 3.32β).



Εικόνα 3-32: (α) Στήριξη χαλύβδινης πλάκας στο φούρνο, (β) Τοποθέτηση πλαισίου στο φούρνο

Εν συνεχεία, τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν μέσω των ειδικών υποδοχών με τη συσκευή Agilent 34972A και αυτή με τον υπολογιστή του εργαστηρίου. Για την αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων μέτρησης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην εφραπτόνται τα θερμοστοιχεία μεταξύ τους ή με οποιαδήποτε άλλη μεταλλική επιφάνεια του πλαισίου ή του φούρνου. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, θα μετρούνταν η στιγμιαία θερμοκρασία επαφής του θερμοστοιχείου με την μεταλλική επιφάνεια και θα οδηγούσε σε ανακρίβειες και παρεκκλίσεις στη διεξαγωγή του πειράματος. Η απεικόνιση των μετρήσεων στον υπολογιστή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Labview, ενώ για τη μελέτη της ομοιομορφίας του θερμοκρασιακού πεδίου της εκτεθειμένης στις συνθήκες περιβάλλοντος χαλύβδινης επιφάνειας, προτιμήθηκε η χρήση θερμοκάμερας FLIR THERMACAM PM595 του εργαστηρίου. Στην αρχή του πειράματος, ο φούρνος Nabertherm B180 βρισκόταν σε συνθήκες περιβάλλοντος 15°C.



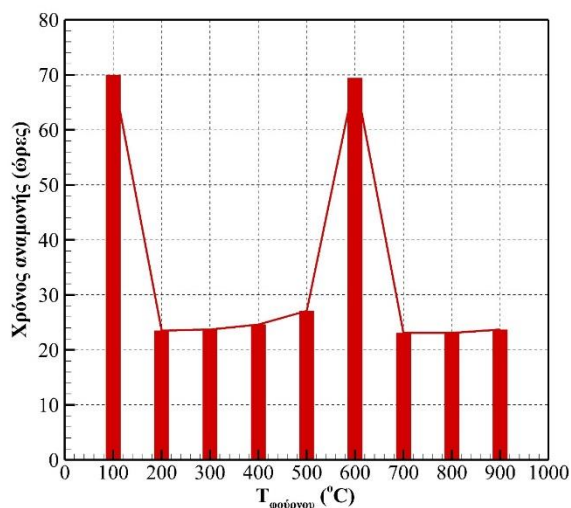
Εικόνα 3-33 Συνολική εποπτεία πειράματος

Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, στόχος και σε αυτό το πολυστρωματικό πείραμα ήταν η επίτευξη μόνιμης κατάστασης σε κάθε θερμοκρασιακή τάξη, κάτι που βέβαια απαιτούσε πολύωρη παρατήρηση. Οι χρόνοι αναμονής για κάθε θερμοκρασία του φούρνου κατά τη διεκπεραίωση του πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 3.3 και ραβδόγραμμα (Σχήμα 3.6). Και σε αυτό το πείραμα, παρά την πολυήμερη διεξαγωγή

του, υπάρχει σχετική ισορροπία στον χρόνο αναμονής μέχρι την επίτευξη μόνιμης κατάστασης για κάθε θερμοκρασία του φούρνου.

Πίνακας 3-3 Χρόνοι αναμονής σε κάθε θερμοκρασία φούρνου

Θερμοκρασία T (°C)	Χρόνος αναμονής t (h)
100	70,0
200	23,5
300	23,7
400	24,6
500	27,1
600	69,4
700	23,1
800	23,1
900	23,7



Σχήμα 3-6 Θερμοκρασιακές τάξεις και χρόνοι αναμονής

Κεφάλαιο 4

4. Αποτελέσματα Πειραμάτων

4.1 Πείραμα Πάνελ Κενού VIP

Στο πείραμα αυτό, με διάρκεια περίπου δύο εβδομάδες, τόσο η χρήση των θερμοστοιχείων όσο και αυτή της θερμοκάμερας οδήγησαν σε πολύ σημαντικά αποτελέσματα, όσον αφορά τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του πάνελ κενού σε υψηλές θερμοκρασίες-συνθήκες φωτιάς.

Κατ'αρχήν με μια πρώτη ματιά στα δοκίμια του VIP μετά το πέρας του πειράματος μπορούν να προκύψουν τα πρώτα συμπεράσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν όπως αυτά ήταν μετά τη διεκπεραίωση του πειράματος.

Όσον αφορά την εξωτερική όψη του δοκιμίου που ήταν εκτεθειμένη στις συνθήκες περιβάλλοντος (Εικόνα 4.1) παρατηρείται έντονη οξείδωση του πάνελ κενού, το οποίο οφείλεται στην παρουσία οξυγόνου κατά τη διεκπεραίωση του πειράματος. Ακόμα είναι εμφανείς οι θραύσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου που έχουν προκληθεί από τις υψηλές θερμοκρασίες και κατ'επέκταση από τη θερμική ακτινοβολία που εκπεμπόταν.



Εικόνα 4-1 Εξωτερική πλευρά τρίτου δοκιμίου

Στη συνέχεια, φαίνεται η όψη του ενδιάμεσου δοκιμίου VIP (Εικόνα 4.2). Και σε αυτήν την όψη παρατηρείται οξείδωση και φθορές κυρίως στην περίμετρό του, λογικά επειδή είχαμε περισσότερες απώλειες θερμότητας από εκεί.



Εικόνα 4-2 Όψη ενδιάμεσου δοκιμίου

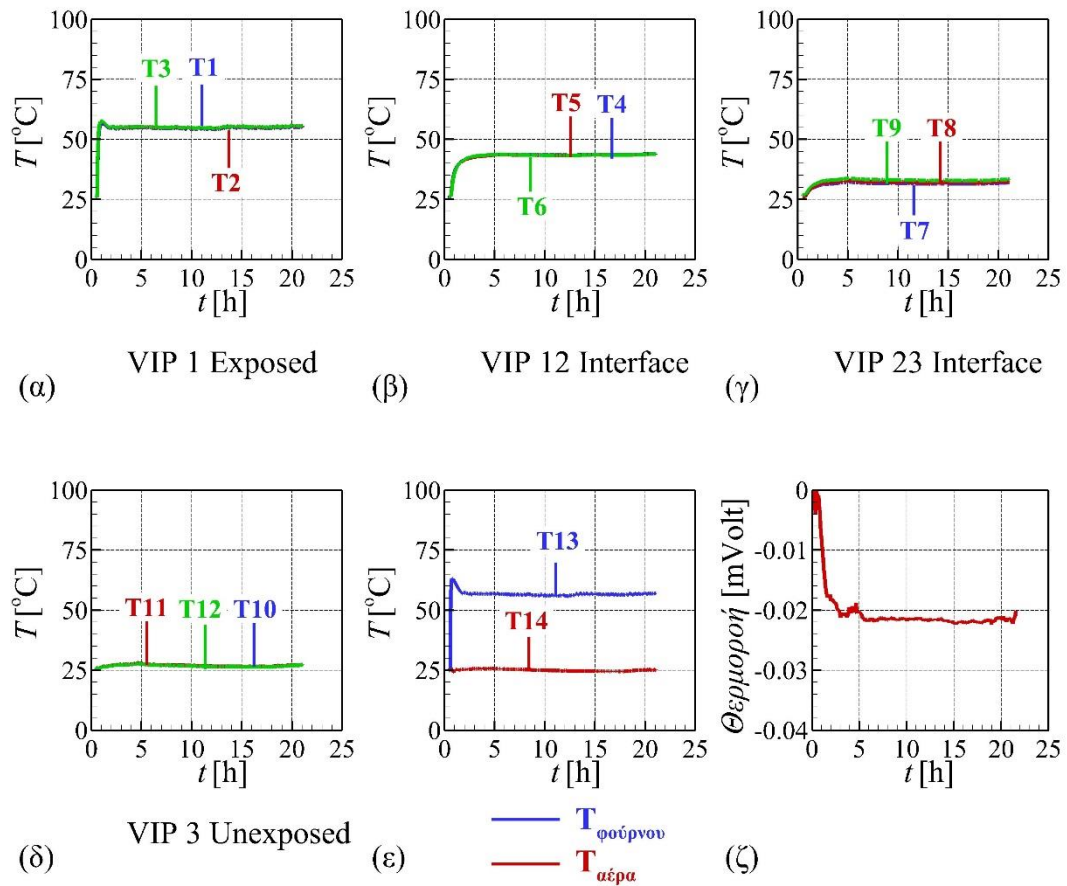
Τέλος, παρατηρείται η εσωτερική όψη του δοκιμίου που βρισκόταν στο εσωτερικό του φούρνου (Εικόνα 4.3). Σε αυτήν την πλευρά δεν παρατηρείται το φαινόμενο της οξείδωσης, κάτι που οφείλεται στην έλλειψη οξυγόνου που υπήρχε στο εσωτερικό του φούρνου. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την όψη παρουσιάζονται σημαντικές ρωγμές καθ'όλη την έκταση της επιφάνειας του δοκιμίου.



Εικόνα 4-3 Εσωτερική όψη πρώτου δοκιμίου

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα θερμοστοιχεία μέσω της συσκευής Agilent στον εργαστηριακό υπολογιστή είναι ιδιαίτερα σημαντικά για να κατανοηθεί σε μεγάλο βαθμό η θερμική συμπεριφορά του υπερμονωτικού πάνελ κενού σε συνθήκες φωτιάς. Σε αυτό το σημείο, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αφορούν τις θερμοκρασίες σε κάθε θέση όλων των θερμοστοιχείων της πειραματικής διάταξης καθώς και της θερμοροής για κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου.

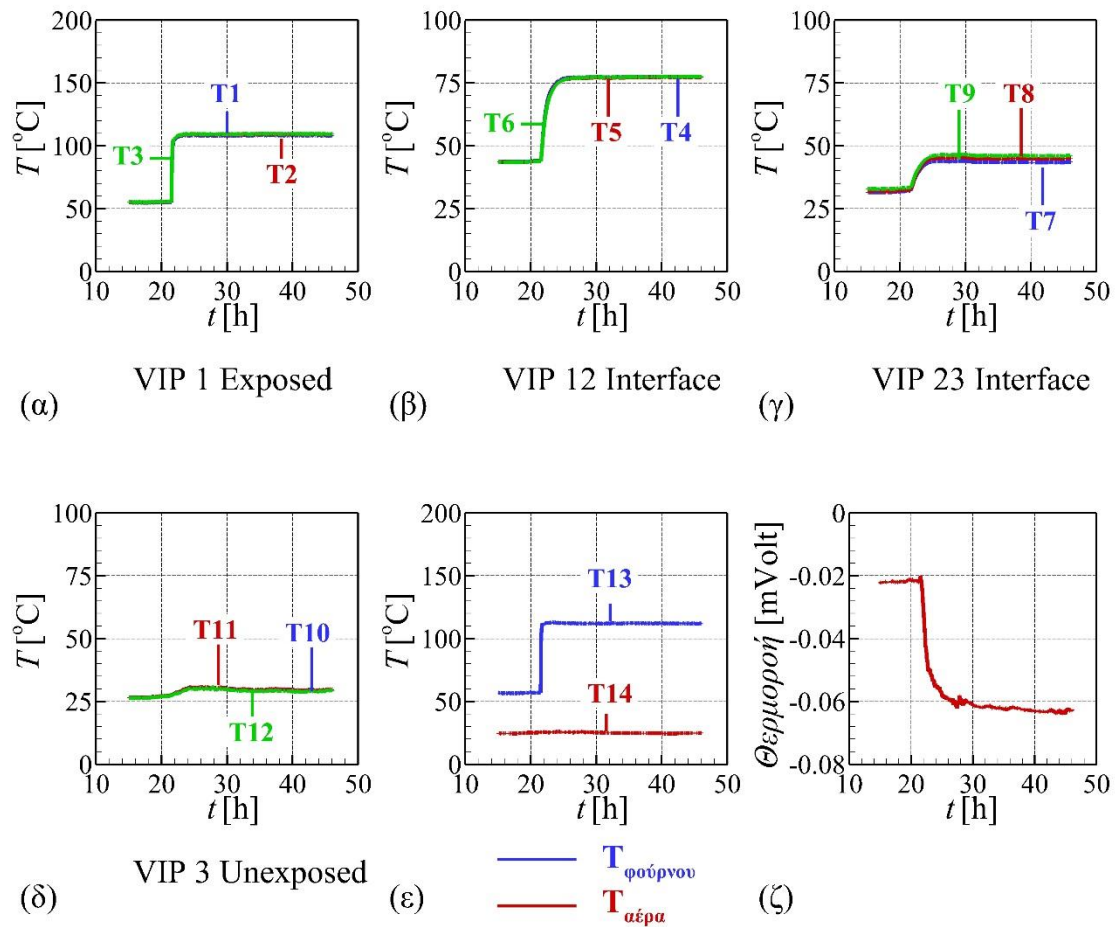
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=50^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-4 Διαγράμματα θερμοκρασιών και θερμοροής για θερμοκρασία φούρνου 50°C

Παρατηρείται πως μετά την 5^η ώρα της πειραματικής διαδικασίας υπάρχει μόνιμη κατάσταση.

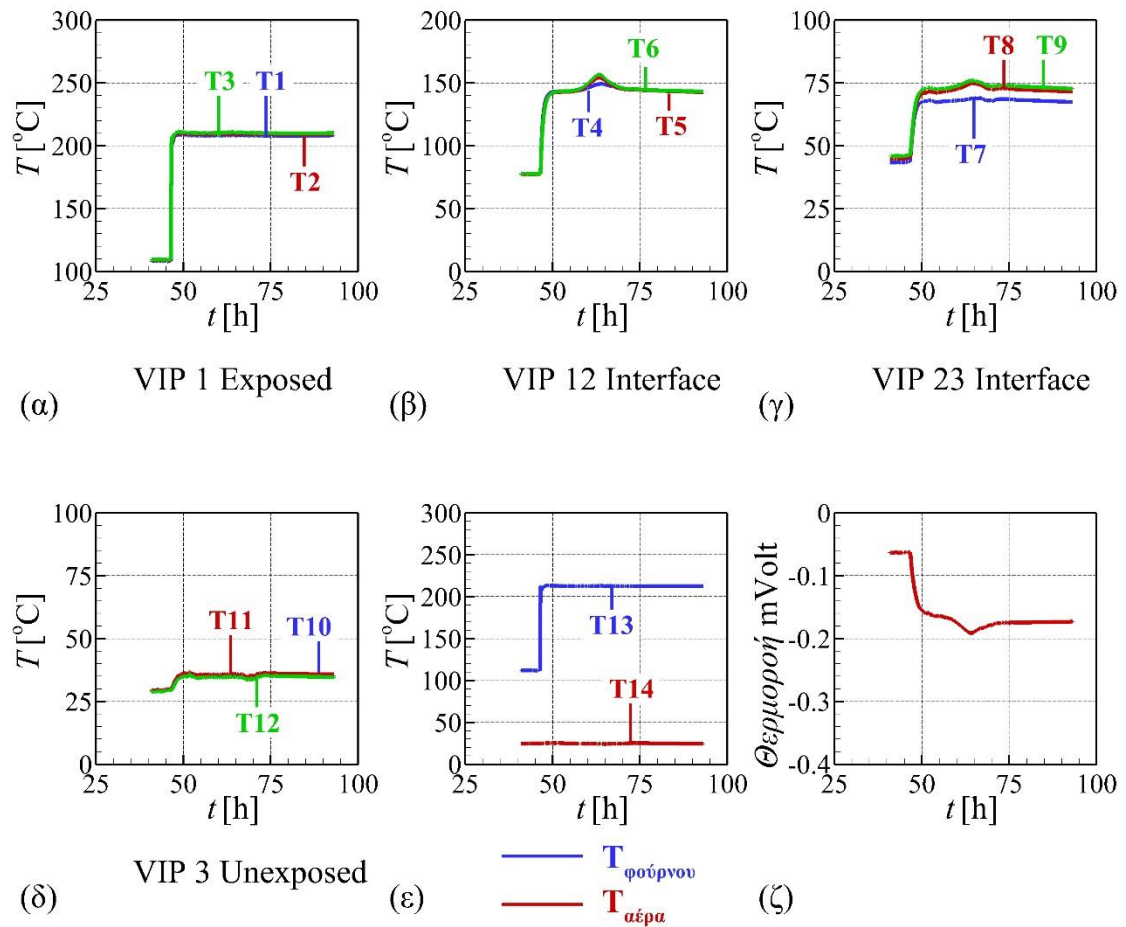
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-5 Διαγράμματα θερμοκρασιών και θερμороής για θερμοκρασία φούρνου 100°C

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρείται μόνιμη κατάσταση μετά τις 35h πειραματικής διαδικασίας.

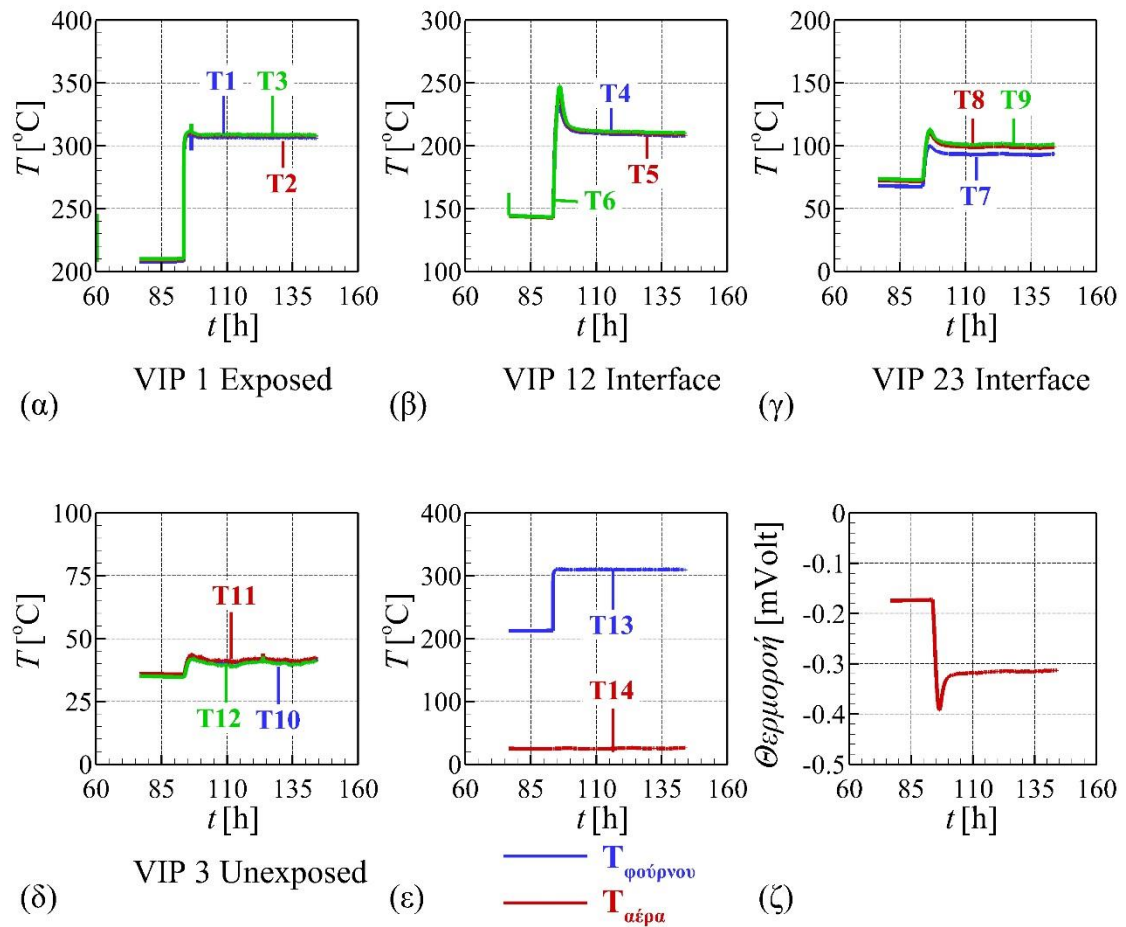
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-6 Διαγράμματα θερμοκρασιών και θερμοροής για θερμοκρασία φούρνου 200°C

Για θερμοκρασία φούρνου 200°C επετεύχθη σταθεροποίηση μετά την 70^η ώρα του πειράματος.

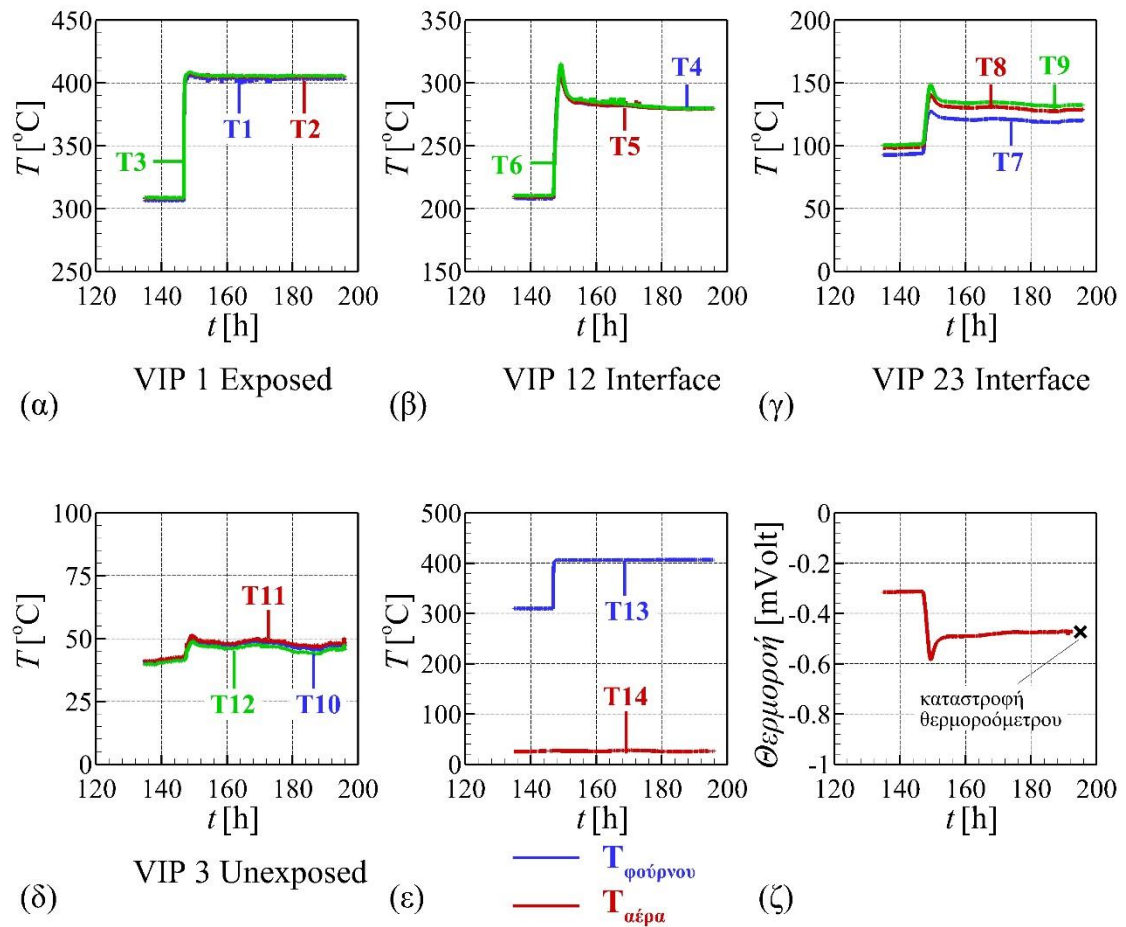
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-7 Διαγράμματα θερμοκρασιών και θερμοροής για θερμοκρασία φούρνου 300°C

Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει πιθανώς κάποια εξώθερμη αντίδραση που τυχόν να οφείλεται σε καύση στρώματος του δοκιμίου VIP, καθώς υπάρχει μια διακύμανση στα διαγράμματα μέχρι να επέλθει η μόνιμη κατάσταση από τις 110 ώρες και μετά.

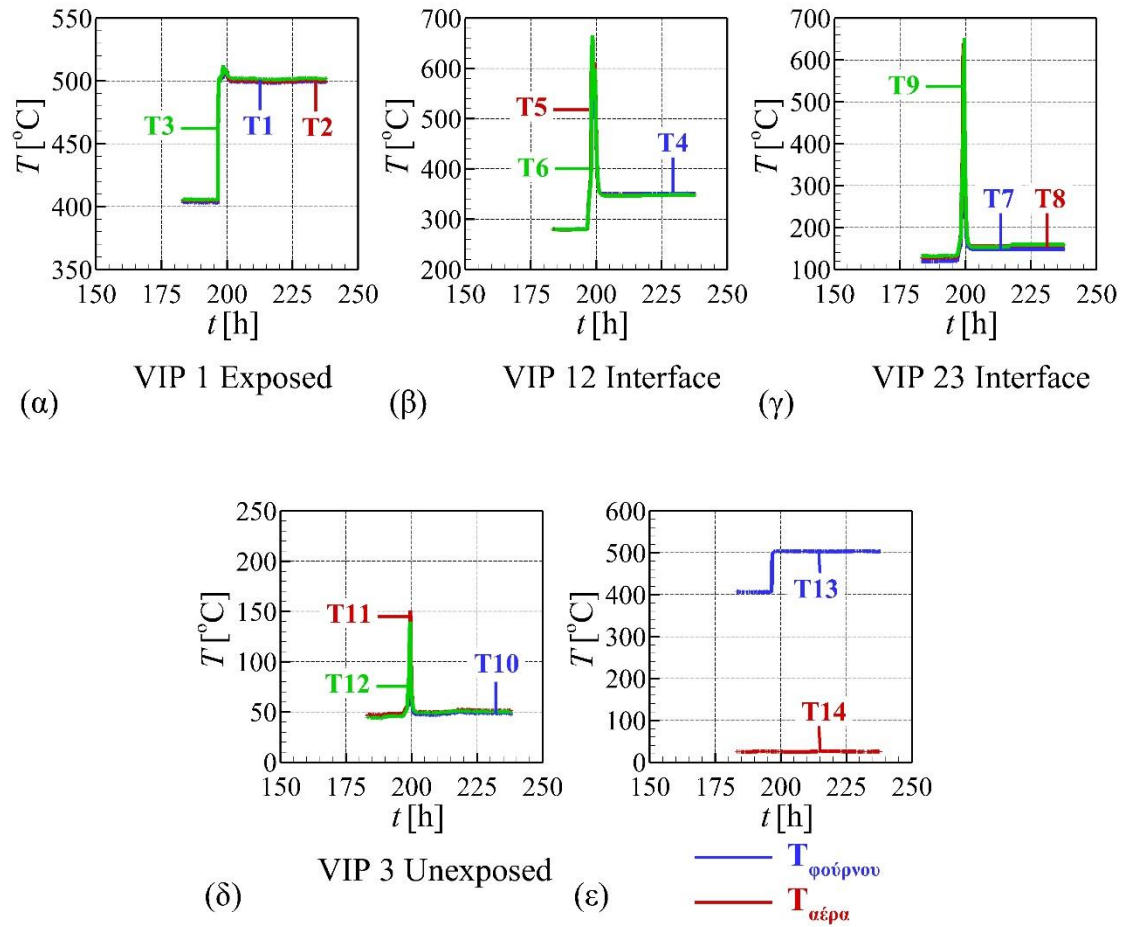
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-8 Διαγράμματα θερμοκρασιών και θερμοροής για θερμοκρασία φούρνου 400°C

Για θερμοκρασία φούρνου 400°C επιτυγχάνεται σταθεροποίηση μετά τις 160 ώρες και περίπου στις 195 ώρες καταστρέφεται το θερμοροόμετρο στους 140°C .

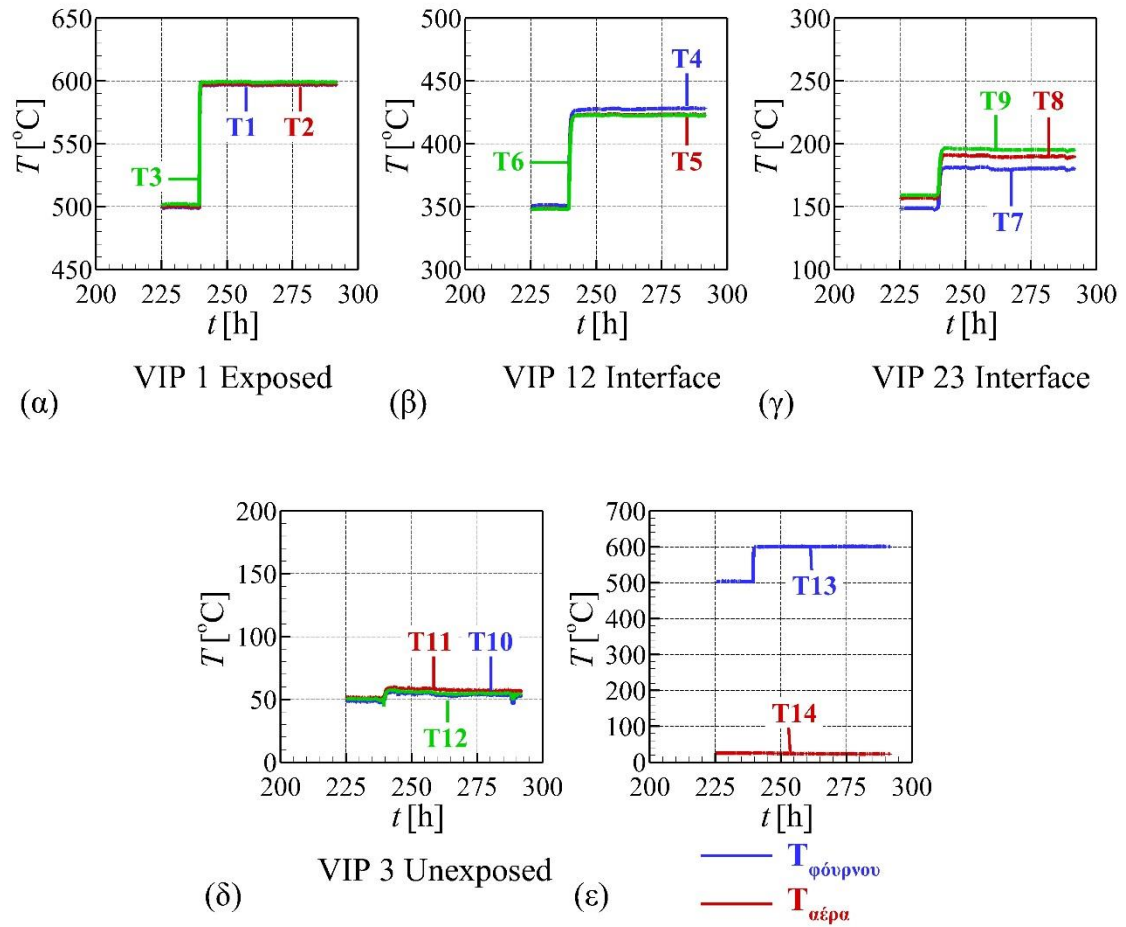
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-9 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 500°C

Ομοίως και για θερμοκρασία φούρνου 500°C υπάρχει πιθανή καύση στρώματος VIP αφού σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μετά απο διακύμανση των διαγραμμάτων θερμοκρασιών.

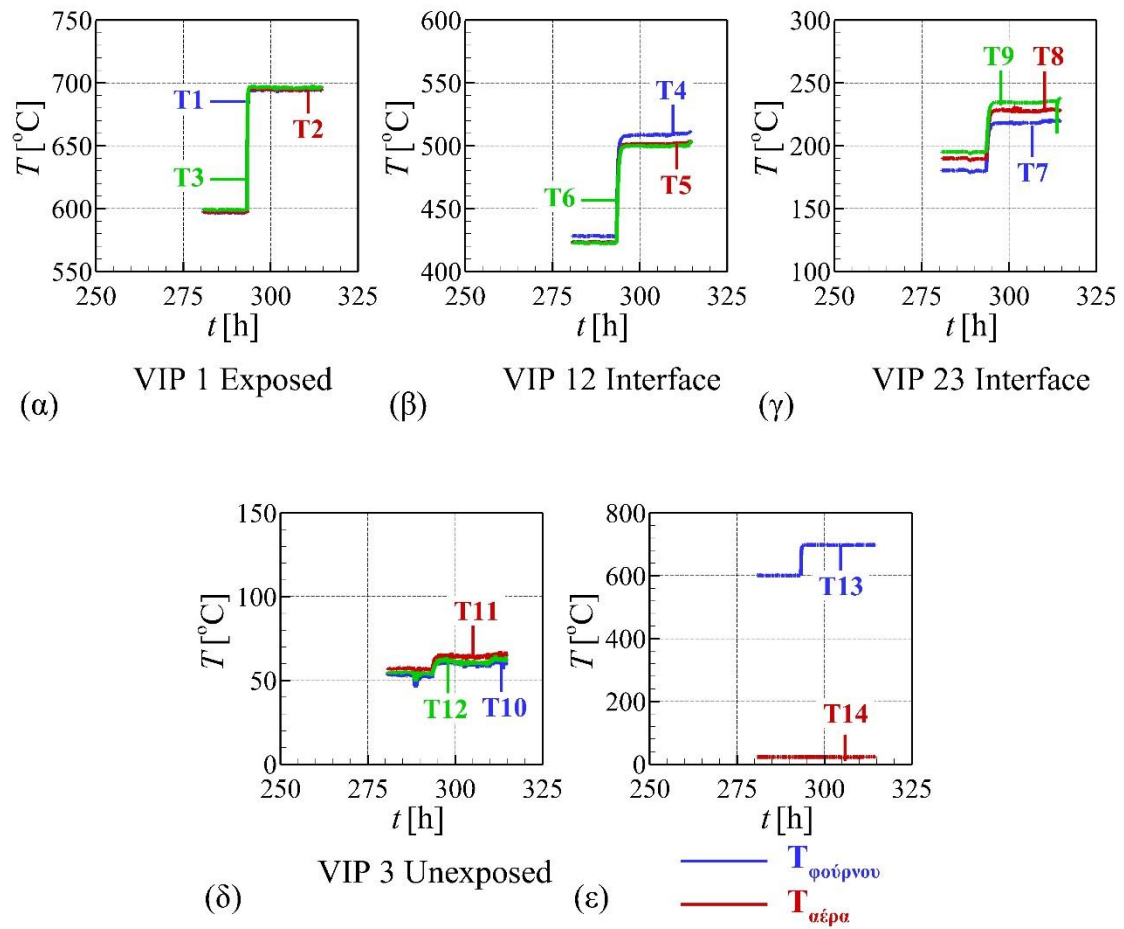
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-10 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 600°C

Μόνιμη κατάσταση επέρχεται μετά τις 250 ώρες για θερμοκρασία φούρνου 600°C .

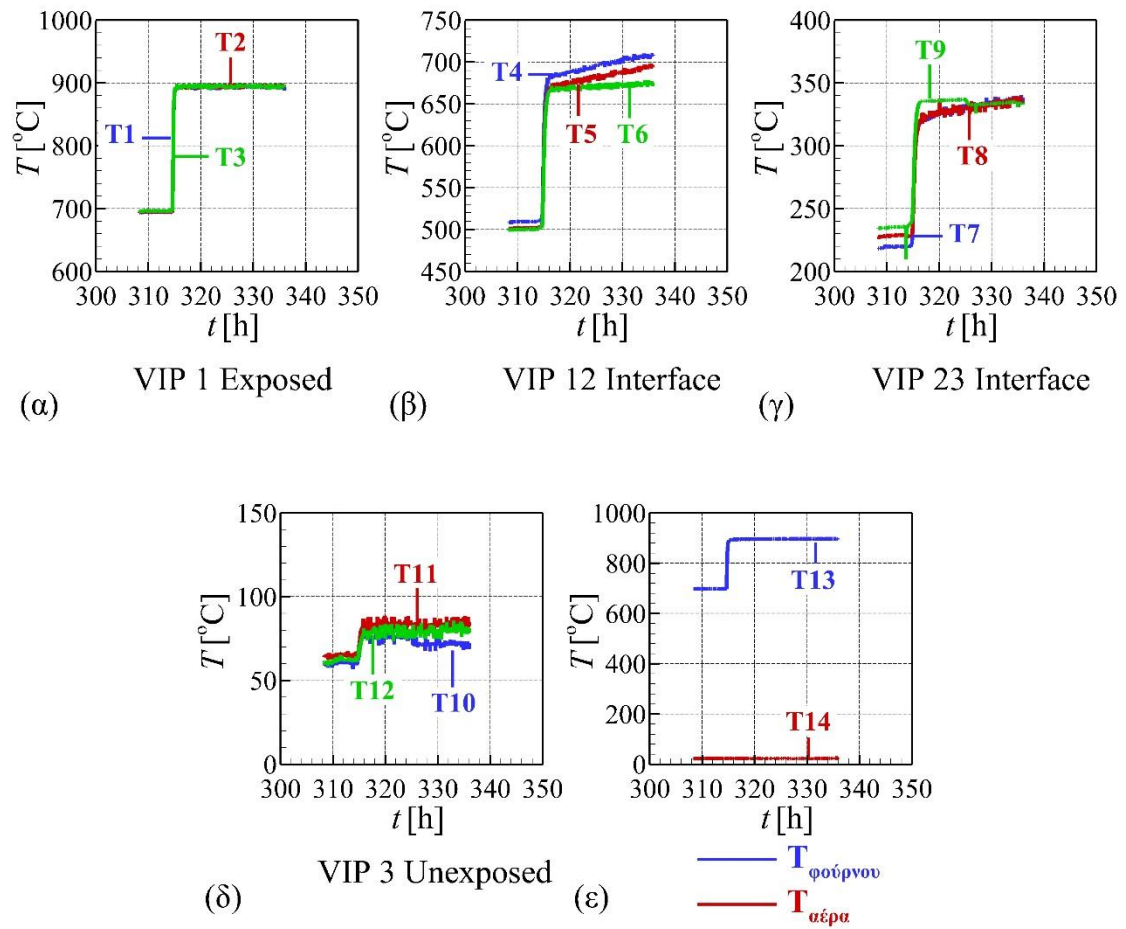
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-11 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 700°C

Μετά τις 300 ώρες επέρχεται σταθεροποίηση των διαγραμμάτων θερμοκρασίας.

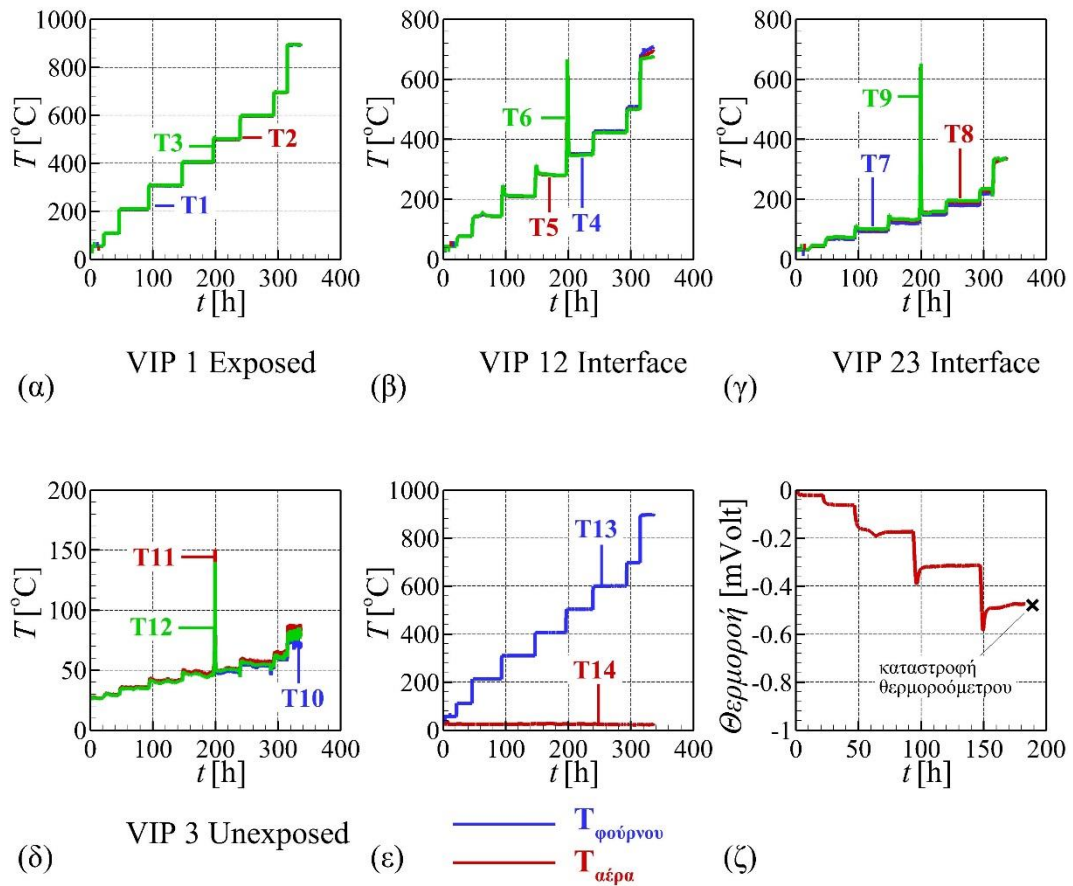
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-12 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 900°C

Παρατηρείται πως μετά από 330 ώρες πειραματικής διαδικασίας επέρχεται μόνιμη κατάσταση.

Συγκεντρωτικό διάγραμμα θερμοκρασιών



Εικόνα 4-13 Συγκεντρωτικό διάγραμμα θερμοκρασιών

Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρατηρήθηκε πως η εξωτερική πλευρά άχισε να μαυρίζει πιο έντονα στις άκρες παρά στο κέντρο της. Με άλλα λόγια, στην εξωτερική πλευρά υπήρχε μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στα άκρα του δοκιμίου απ'ότι στο κέντρο του, κάτι που αποτυπώνεται και στα στιγμιότυπα του προγράμματος της θερμοκάμερας που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος για όλες τις θερμοκρασίες του φούρνου.

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=50^{\circ}C$



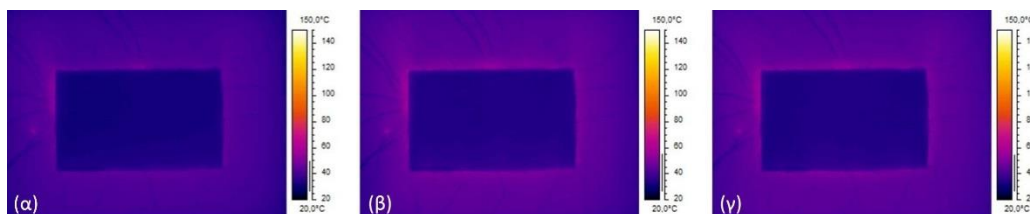
Εικόνα 4-14: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στην αρχή της μέτρησης, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^{\circ}C$



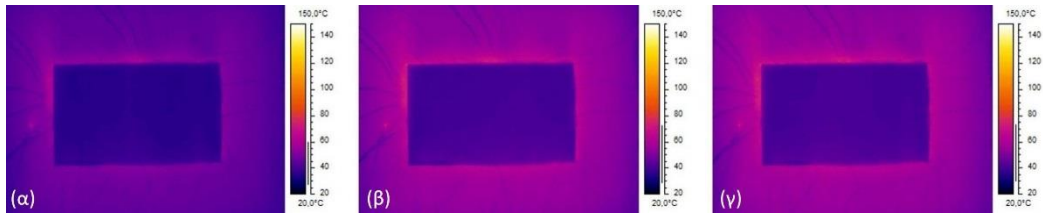
Εικόνα 4-15: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $75^{\circ}C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^{\circ}C$



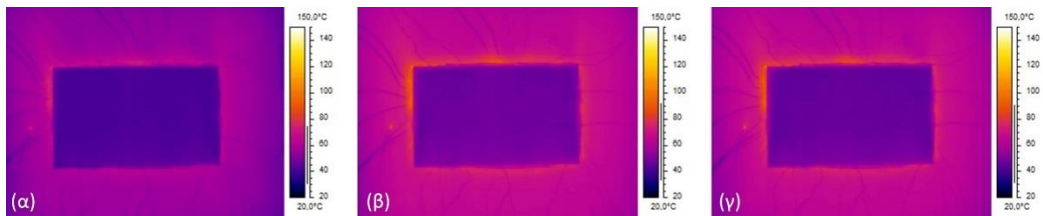
Εικόνα 4-16: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $150^{\circ}C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ C$



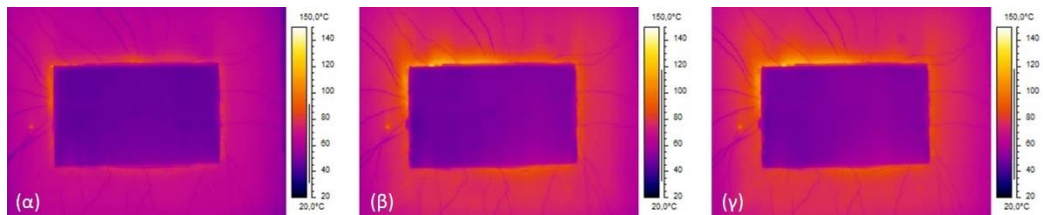
Εικόνα 4-17: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $250^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ C$



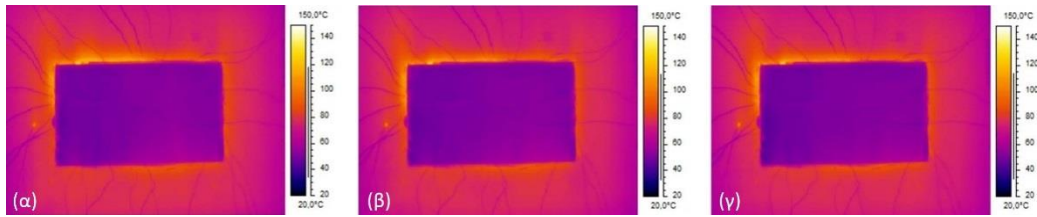
Εικόνα 4-18: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $350^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ C$



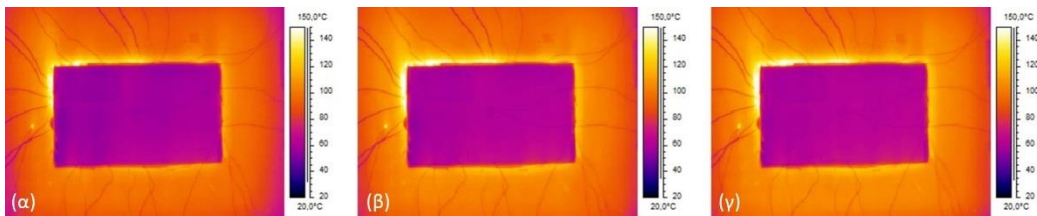
Εικόνα 4-19: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $450^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ\text{C}$



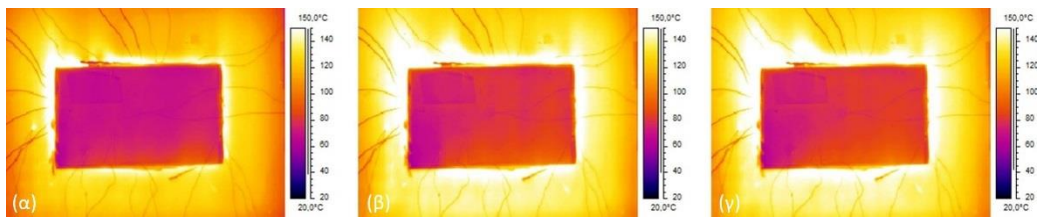
Εικόνα 4-20: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 550°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-21: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 650°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-22: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 800°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Στη συνέχεια ακολούθησε ο προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία υπολογίστηκε η θερμική αγωγιμότητα k για την απόσταση κάθε δοκιμίου δηλαδή 1-2 πάχους 20 mm, 2-3 πάχους 20 mm και 3-4 πάχους 10 mm από τη σχέση:

$$k = \frac{q\Delta x}{\Delta T} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

Τα αποτελέσματα για κάθε τάξη θερμοκρασιών της θερμικής αγωγιμότητας φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1 και στο διάγραμμα παρακάτω:

Πίνακας 4-1 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας

T [oC]	k12 [W/m/K]	k23 [W/m/K]	k34 [W/m/K]
50	0,0205	0,0228	0,0186
100	0,0211	0,0216	0,0200
200	0,0283	0,0262	0,0239
300	0,0336	0,0298	0,0269
400	0,0385	0,0326	0,0277

Για θερμοκρασία φούρνου μεγαλύτερη των 400°C το θερμοροόμετρο καταστράφηκε με αποτέλεσμα να μην έχουμε ορθές μετρήσεις και συνεπώς τιμές του συντελεστή αγωγιμότητας. Για το λόγο αυτό παραλείπονται και οι αντίστοιχες τιμές των θερμοκρασιών στον παραπάνω πίνακα.

Για να προσδιοριστεί βέβαια σωστά η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας πρέπει να κάνουμε ανάλυση σφάλματος, όπως αυτό διαδίδεται μέσω των θερμοστοιχείων, του θερμοροόμετρου και της συσκευής του Agilent. Δεδομένου ότι η ακρίβεια των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 5%, του θερμοροόμετρου 10% και του παχύμετρου που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της απόστασης των δοκιμίων 1%, από τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων συνάρτησης f μιας η παραπάνω μεταβλητής είναι:

$$\delta q \Delta x = q * \Delta x * \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta x}{\Delta x}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.2}$$

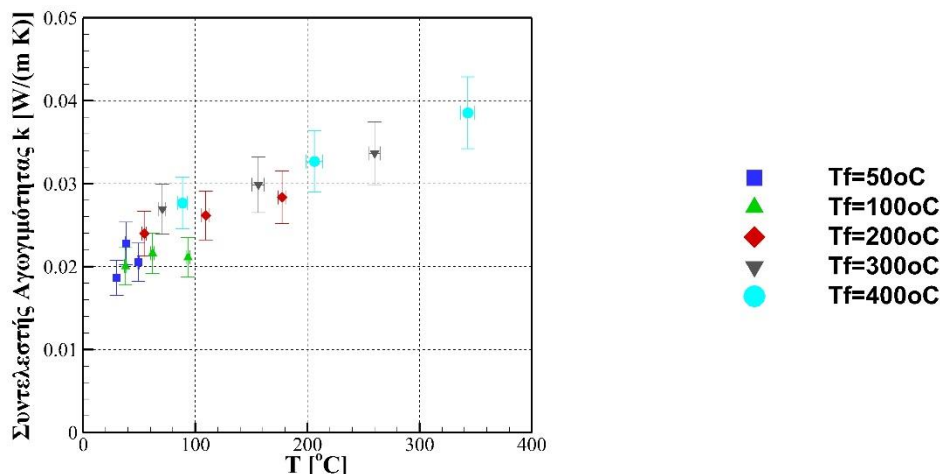
$$\delta k = \frac{q * \Delta x}{\Delta T} * \sqrt{\left(\frac{\delta q \Delta x}{q \Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\Delta T}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Συνεπώς, ύστερα από υπολογισμούς προκύπτουν οι παρακάτω τιμές των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας και των σφαλμάτων τους (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4-2 Διορθωμένες τιμές θερμικής αγωγιμότητας

T [oC]	k12 [W/m/K]	k23 [W/m/K]	k34 [W/m/K]
50	0,0205 ± 0,002305	0,0228 ± 0,002559	0,0186 ± 0,002094
100	0,0211 ± 0,002368	0,0216 ± 0,002424	0,0200 ± 0,002248
200	0,0283 ± 0,003182	0,0262 ± 0,002936	0,0239 ± 0,002691
300	0,0336 ± 0,003777	0,0298 ± 0,003352	0,0269 ± 0,003022
400	0,0385 ± 0,004327	0,0326 ± 0,003669	0,0277 ± 0,003106

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μαζί με το σφάλμα σε κάθε θερμοκρασιακό πεδίο για τις διάφορες θερμοκρασίες του φούρνου (Σχήμα 4.1).

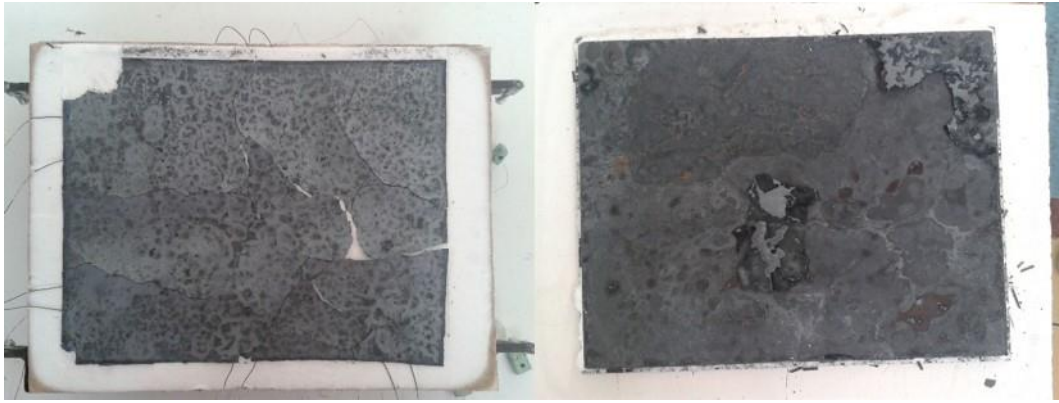


Σχήμα 4-1 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για όλες τις θερμοκρασίες φούρνου

4.2 Πείραμα Κεραμικού χαρτιού – Kaowool

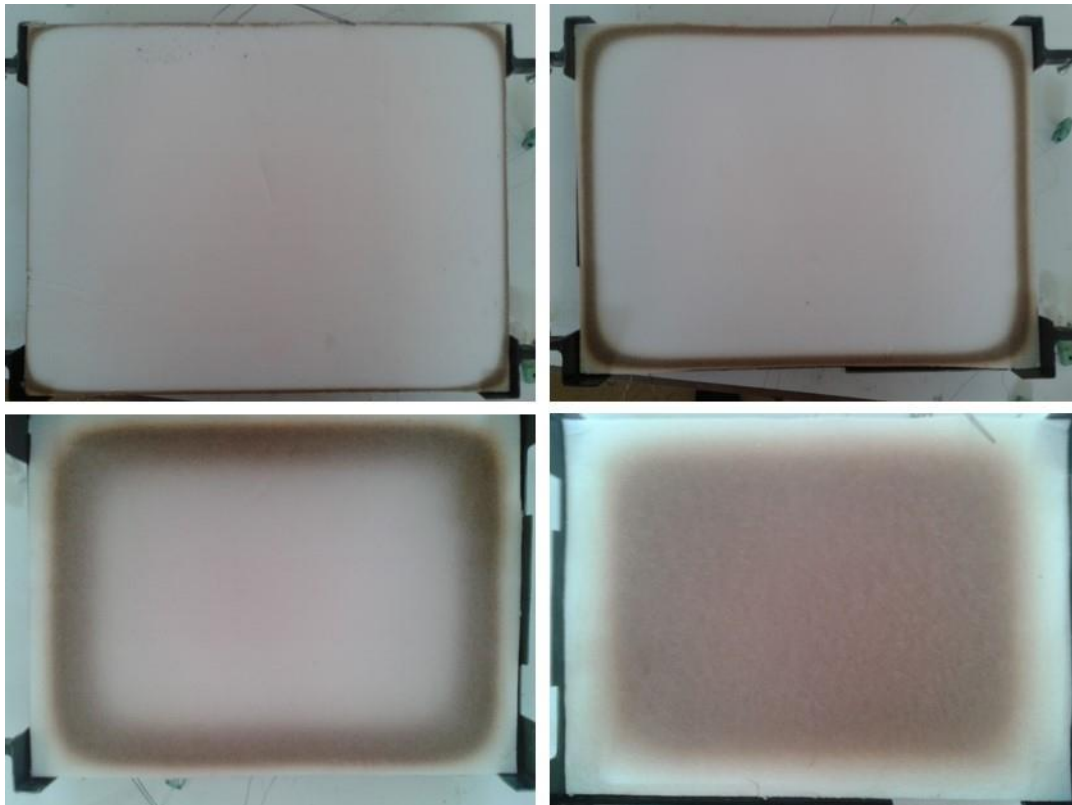
Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος του VIP, το επόμενο πείραμα είχε ως στόχο τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και την επαλήθευση των ιδιοτήτων του κεραμικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper και της βάσης δεδομένων που δινόταν από τον κατασκευαστή. Στην επίτευξη αυτού του σκοπού, τόσο τα θερμοστοιχεία όσο και η θερμοκάμερα που χρησιμοποιήθηκαν οδήγησαν σε σημαντικά αποτελέσματα όσον αφορά τη μελέτη του κεραμικού χαρτιού σε υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας-φωτιάς.

Τα πρώτα συμπεράσματα προκύπτουν από τις εικόνες των χαλύβδινων πλακών και των φύλλων του κεραμικού χαρτιού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και φαίνονται παρακάτω. Η χαλύβδινη πλάκα που βρισκόταν από τη μεριά του φούρνου υπέστη κάποιες αλλοιώσεις, πιθανόν γιατί δεν είχε ως κράμα την καθαρότητα που έδινε ο κατασκευαστής (θερμοκρασία τήξης περίπου 1200°C). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν και της παραγόμενης θερμικής ακτινοβολίας, να φθάσουμε πολύ κοντά στην πραγματική θερμοκρασία τήξης της πλάκας με συνέπεια να αλλοιωθεί η επιφάνειά της και να τηχθεί απείρως λεπτή στρώση της (Εικόνα 4.23).



Εικόνα 4-23 Αλλοίωση πλάκας μετά το πείραμα

Τα φύλλα κεραμικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα παρουσίασαν μια σταδιακή οξείδωση η οποία αυξανόταν όσο κατευθυνόμασταν στα ενδότερα στρώματα, αυτά δηλαδή που βρίσκονταν πλησιέστερα στο εσωτερικό του φούρνου. Πιο συγκεκριμένα, οι στρώσεις κεραμικού χαρτιού που ήταν προς το περιβάλλον παρουσίαζαν μια μικρή οξείδωση περιμετρικά, η οποία γινόταν ολοένα και πιο έντονη και στο κέντρο στις επόμενες στρώσεις που βρίσκονταν προς το φούρνο (Εικόνα 4.24).



Εικόνα 4-24 Στρώσεις κεραμικού χαρτιού μετά την ολοκλήρωση του πειράματος

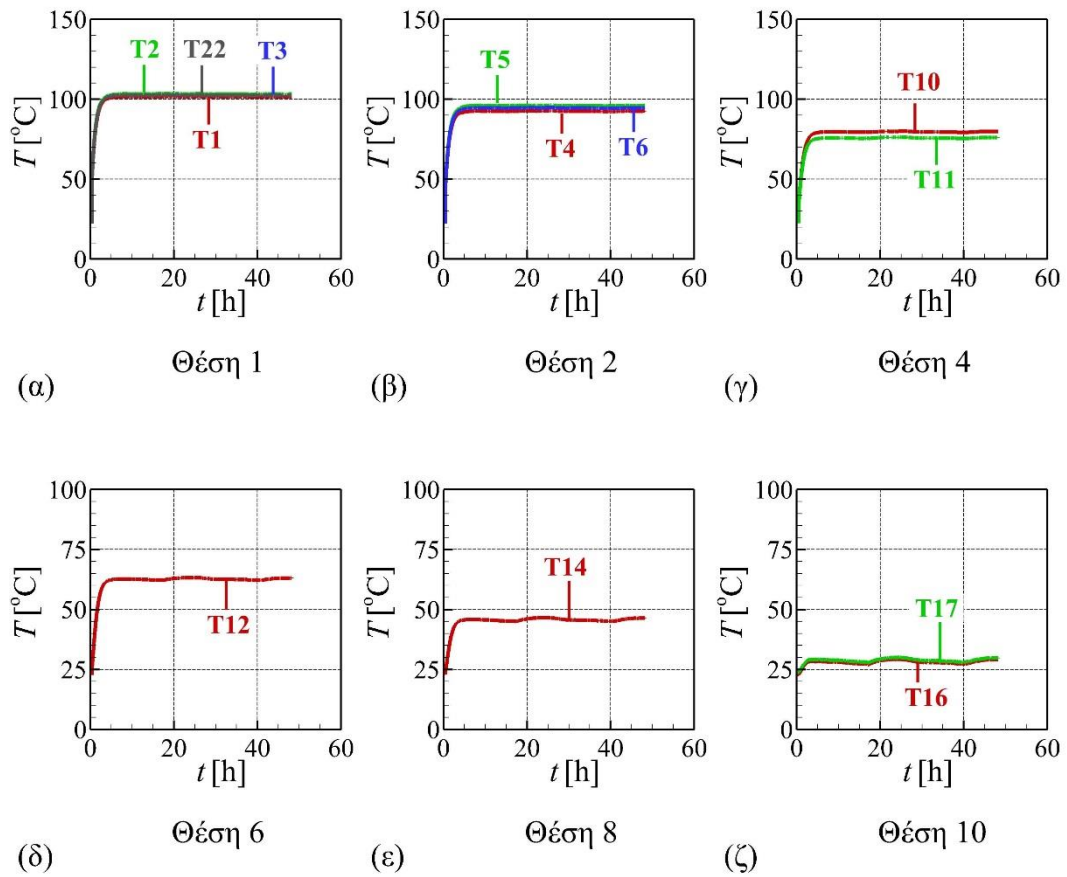
Τέλος, η εξωτερική χαλύβδινη πλάκα που ήταν εκτεθειμένη στο περιβάλλον δεν παρουσίασε κάποια αλλοίωση αξιοσημείωτη, παρά μόνο μερικά ασήμαντα οπτικά σημάδια στην εσωτερική της πλευρά που ακουμπούσε με την τελευταία στρώση κεραμικού χαρτιού (Εικόνα 4.25).



Εικόνα 4-25 Εξωτερική χαλύβδινη πλάκα μετά το πείραμα

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα θερμοστοιχεία που είχαν τοποθετηθεί σε κάθε διατομή μεταξύ των στρώσεων του κεραμικού χαρτιού. Μέσω της συσκευής Agilent καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών και αποτυπώθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Labview στον υπολογιστή του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης. Μέσω αυτών των μετρήσεων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί πλήρως η θερμική συμπεριφορά του κεραμικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper της εταιρίας Morgan Thermal Ceramics και οι θερμικές του ιδιότητες ως μονωτικό υλικό σε συνθήκες φωτιάς. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών κάθε θέσης όλων των θερμοστοιχείων της πειραματικής διάταξης καθώς και του θερμοροόμετρου στην αντίστοιχη θερμοκρασία του φούρνου.

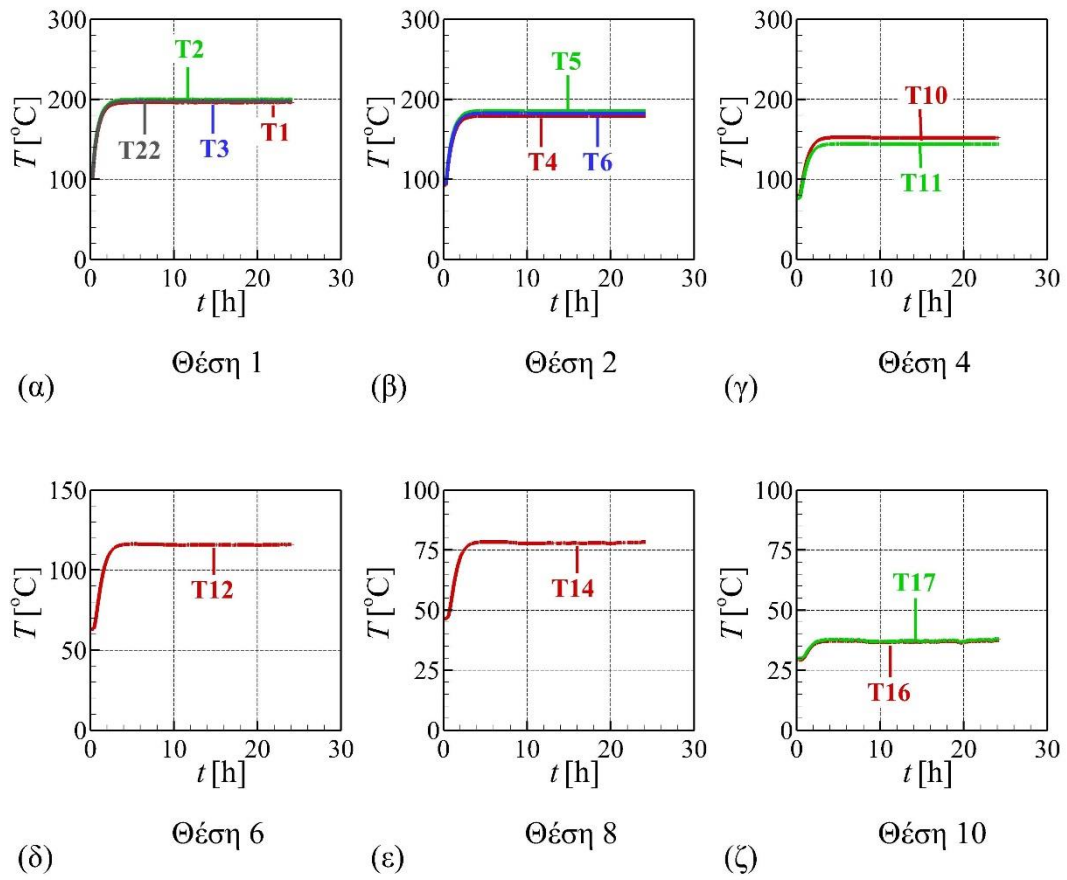
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-26 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 100°C

Παρατηρείται πως μετά την $10^{\text{η}}$ ώρα πειράματος επέρχεται μόνιμη κατάσταση.

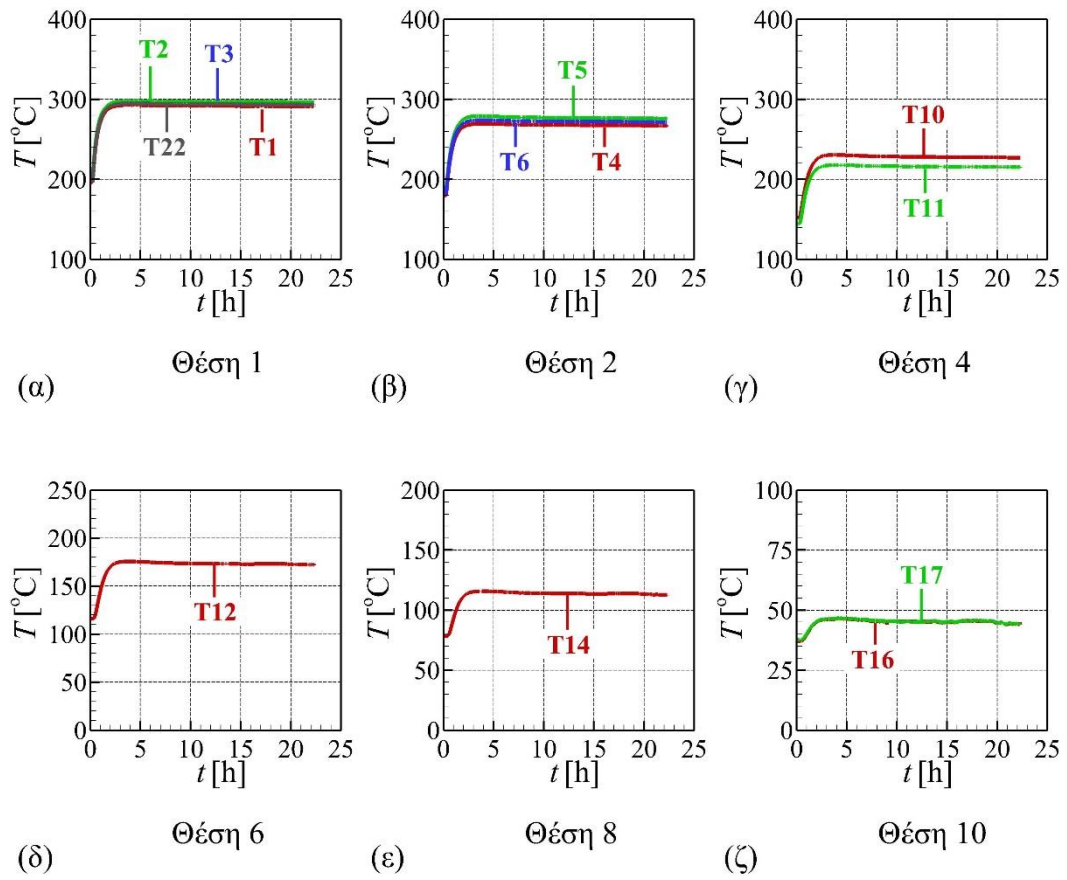
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-27 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 200°C

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρείται μόνιμη κατάσταση πάλι μετά τις 10 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

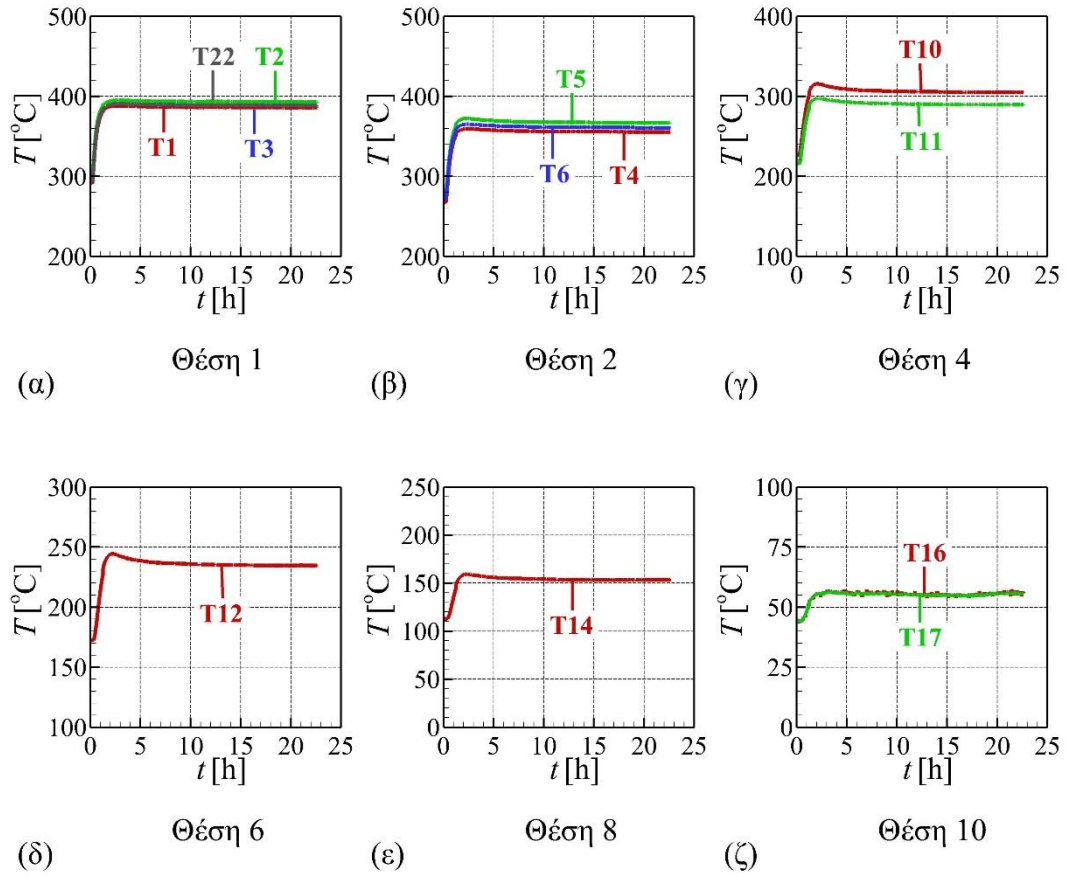
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-28 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 300°C

Για θερμοκρασία φούρνου 300°C επετεύχθη σταθεροποίηση μετά τις 7 ώρες πειράματος.

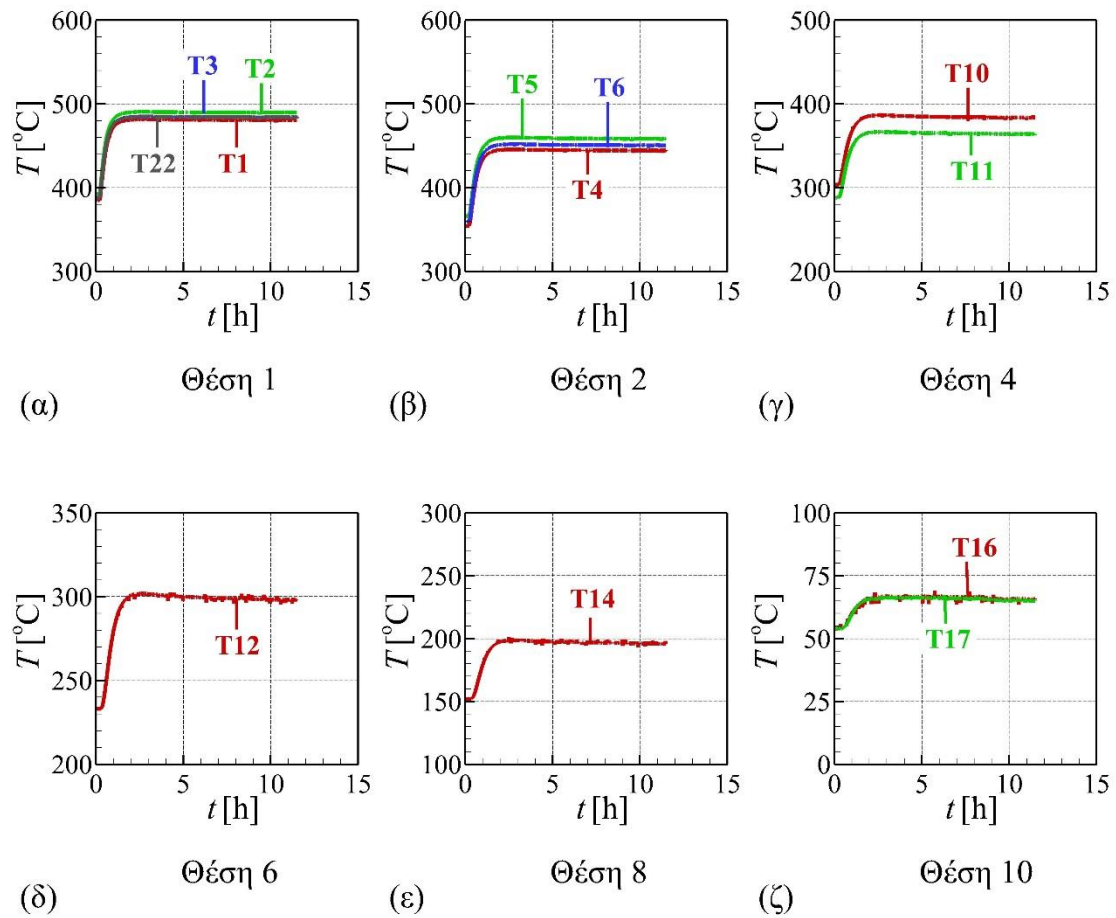
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-29 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 400°C

Για θερμοκρασία φούρνου 400°C επιτυγχάνεται σταθεροποίηση μετά τις 10 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

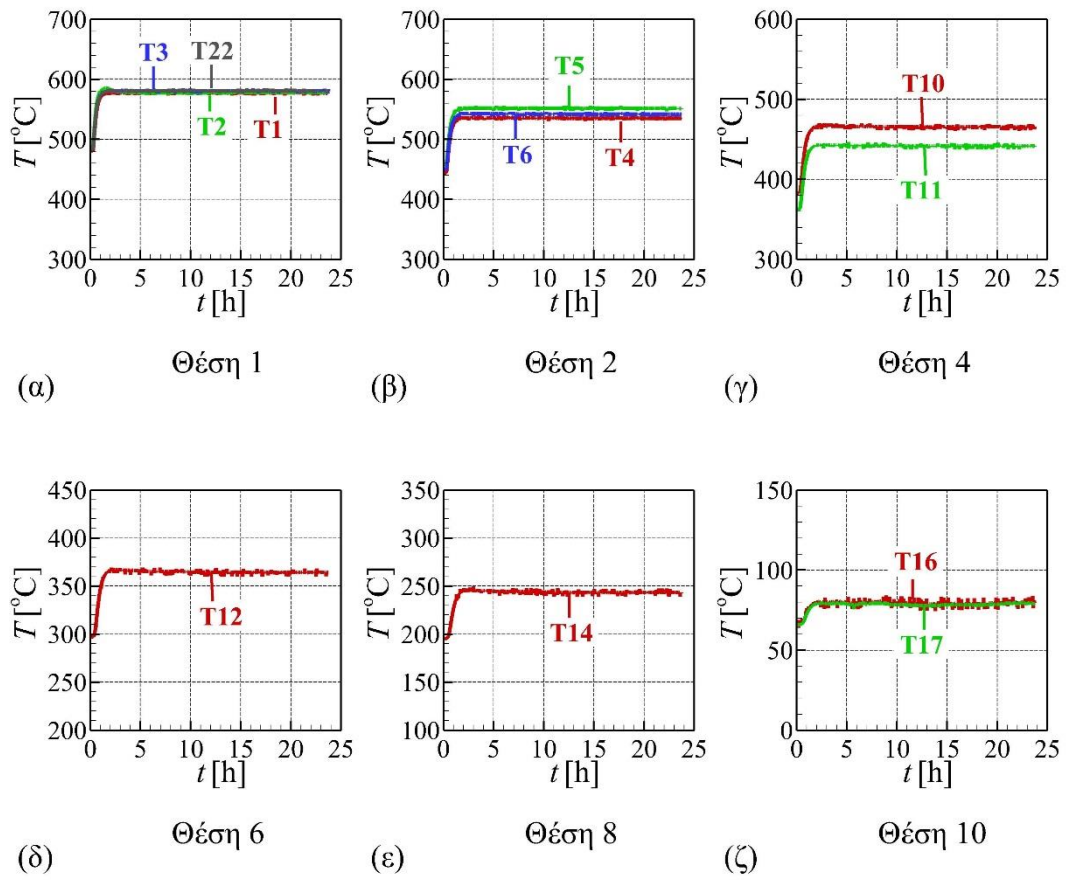
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-30 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 500°C

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρείται μόνιμη κατάσταση πάλι μετά τις 5 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

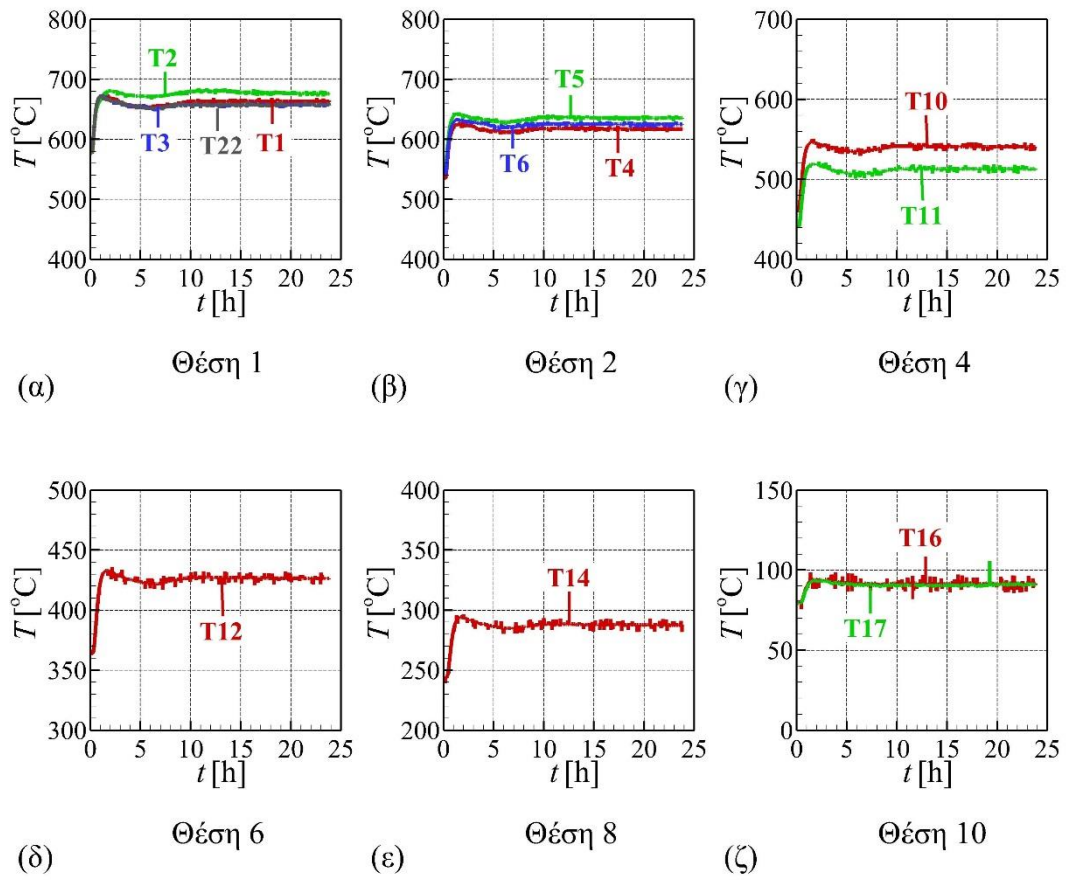
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-31 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 600°C

Ομοίως και για θερμοκρασία φούρνου 600°C υπάρχει σταθεροποίηση μετά τις 5 ώρες.

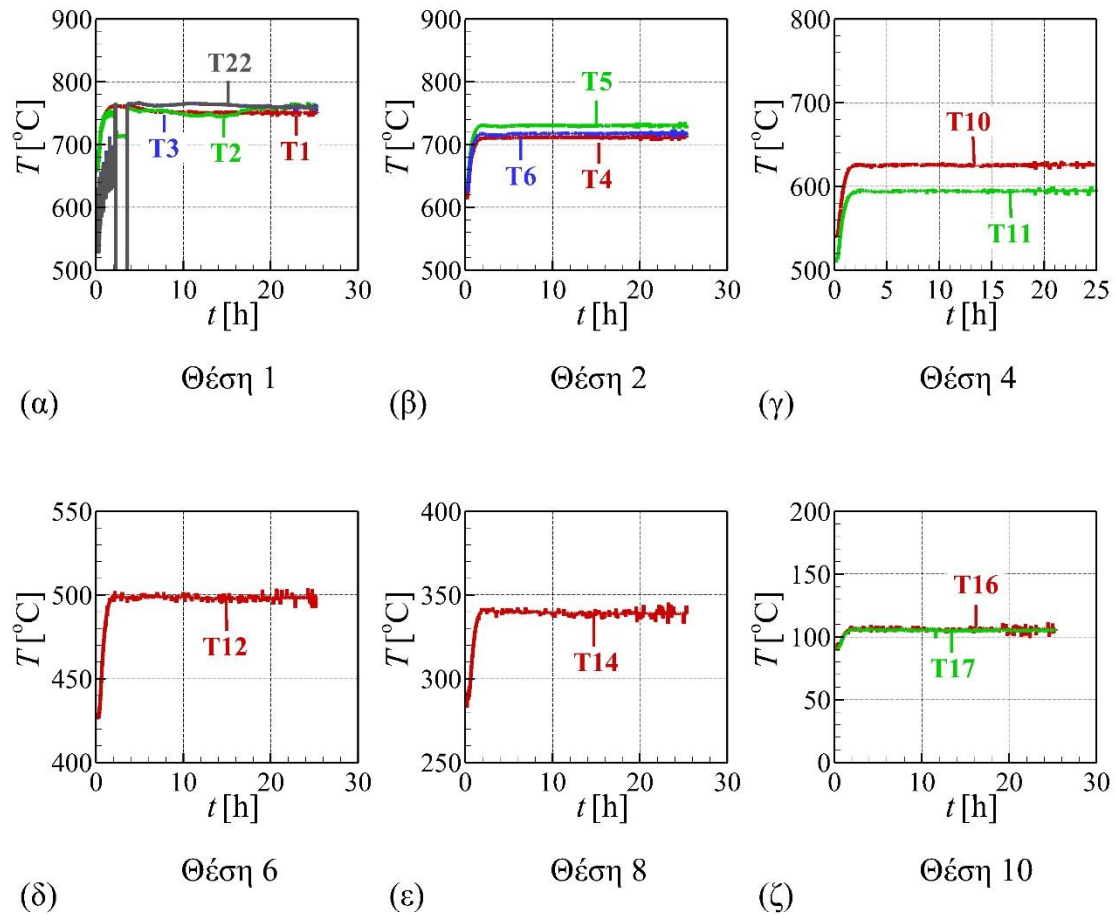
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-32 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 700°C

Μόνιμη κατάσταση επέρχεται μετά τις 10 ώρες για θερμοκρασία φούρνου 700°C .

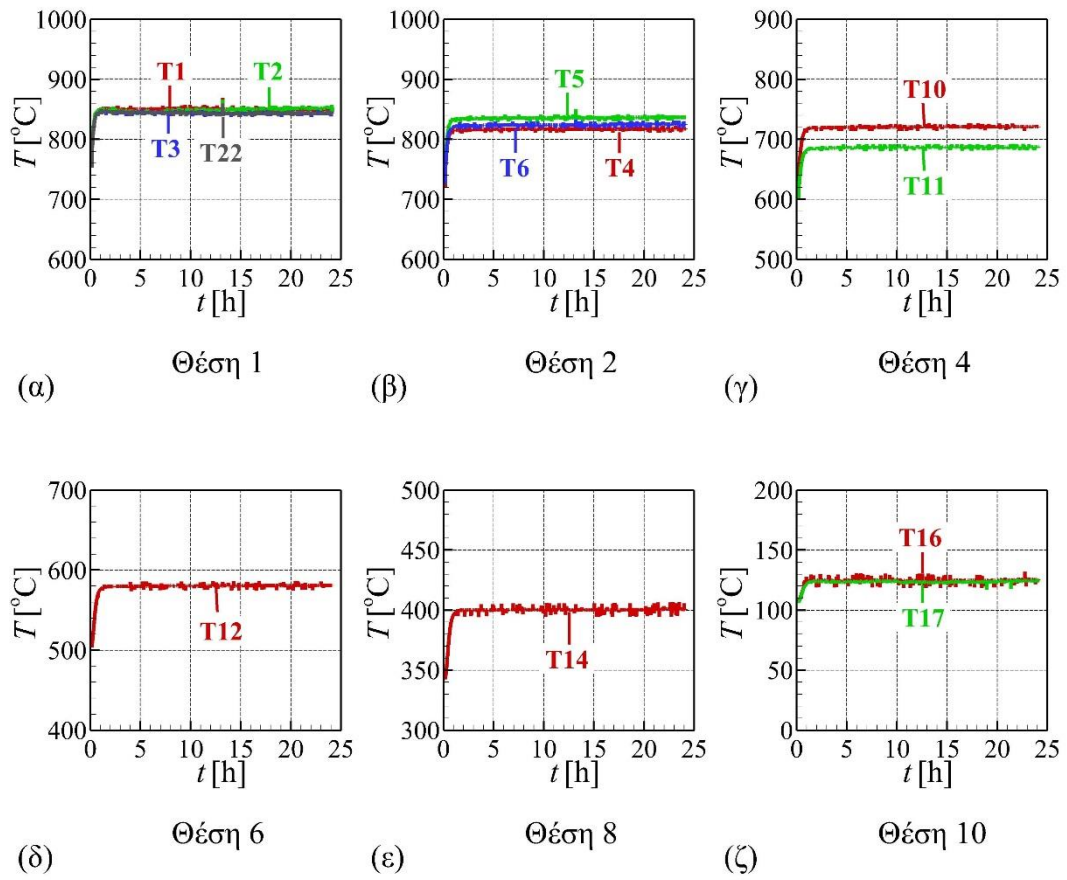
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=800^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-33 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 800°C

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρήθηκε πως τα θερμοστοιχεία της Θέσης 1 βραχυκύκλωσαν, αφού ακουμπούσαν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να λαμβάνονται εσφαλμένες μετρήσεις όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα. Μόλις έγινε αντιληπτό, τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εφάπτονται οι μεταλλικές επιφάνειες μεταξύ τους, οπότε και οι μετρήσεις πλέον ήταν ορθές και τα θερμοστοιχεία λειτουργούσαν σωστά. Αυτό βέβαια γίνεται εύκολα κατανοητό από το θερμοστοιχείο T1, το οποίο εξαρχής μετρούσε σωστά μιας και ήταν το μοναδικό που δεν ακουμπούσε με οποιαδήποτε άλλη μεταλλική επιφάνεια. Μόνιμη κατάσταση επιτυγχάνεται πάλι μετά τις 10 ώρες.

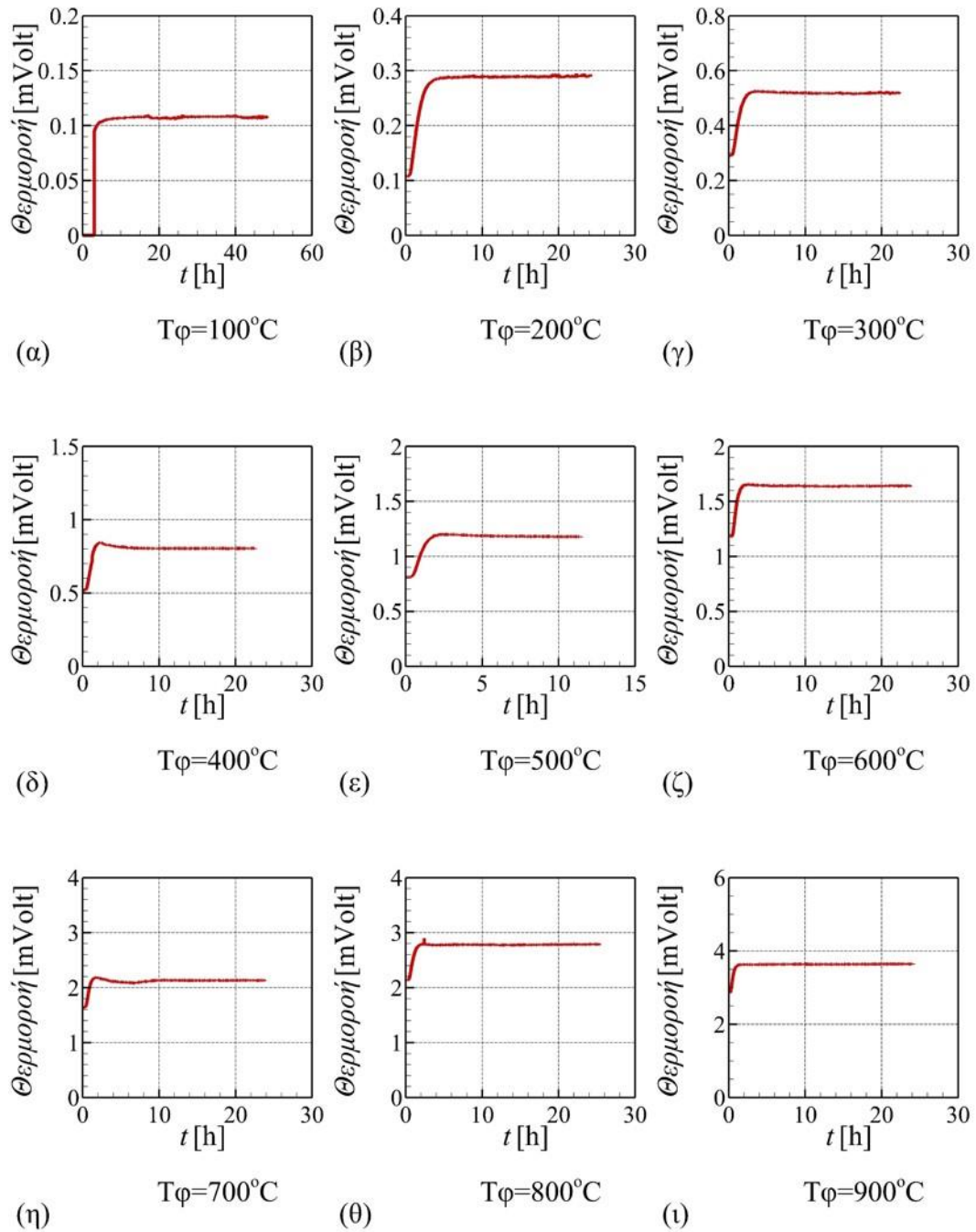
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-34 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 900°C

Παρατηρείται πως μετά από 7 ώρες επέρχεται μόνιμη κατάσταση.

Στο διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω φαίνεται η διακύμανση της θερμοροής όπως αυτή καταγράφηκε για κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου μέσω του θερμοροόμετρου που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος. Παρατηρείται πως η αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας θερμοροής που απαιτείται μέχρι την επίτευξη μόνιμης κατάστασης.



Εικόνα 4-35 Διαγράμματα θερμοροής για κάθε θερμοκρασία φούρνου

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ειδική θερμοκάμερα τύπου FLIR THERMACAM PM595 για τη μελέτη της ομοιομορφίας του θερμοκρασιακού πεδίου της εξωτερικής χαλύβδινης πλάκας. Η θερμοκάμερα ρυθμίστηκε να λαμβάνει φωτογραφίες καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος κάθε πέντε λεπτά. Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα της εκτεθειμένης επιφάνειας προς το περιβάλλον της πλάκας για κάθε θερμοκρασία του φούρνου.

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^\circ C$



Εικόνα 4-36: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στην αρχή της μέτρησης, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^\circ C$



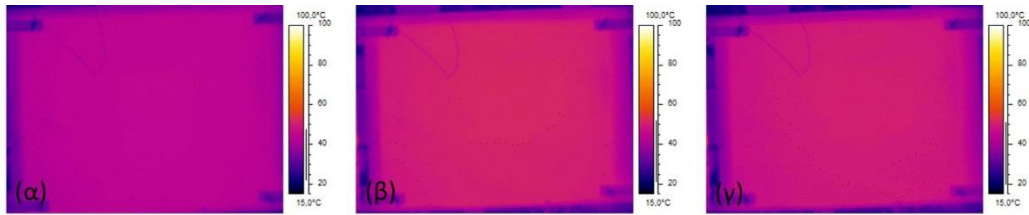
Εικόνα 4-37: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $150^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ C$



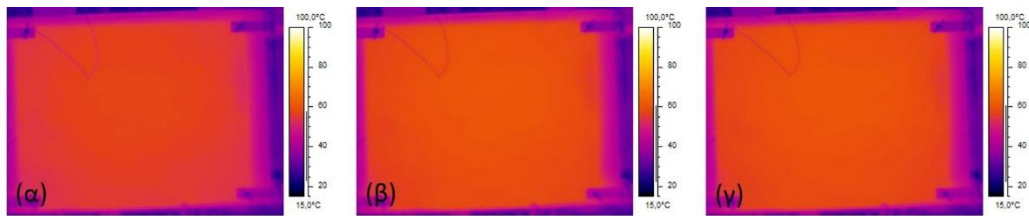
Εικόνα 4-38: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $250^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ\text{C}$



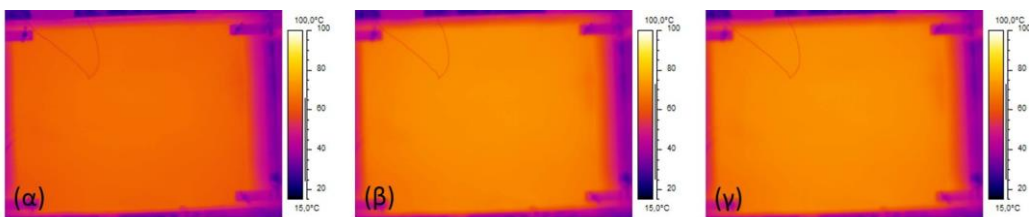
Εικόνα 4-39: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 350°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ\text{C}$



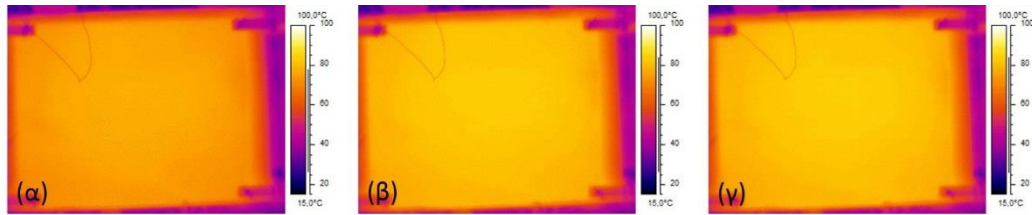
Εικόνα 4-40: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 450°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-41: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 550°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-42: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 650°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=800^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-43: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 750°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

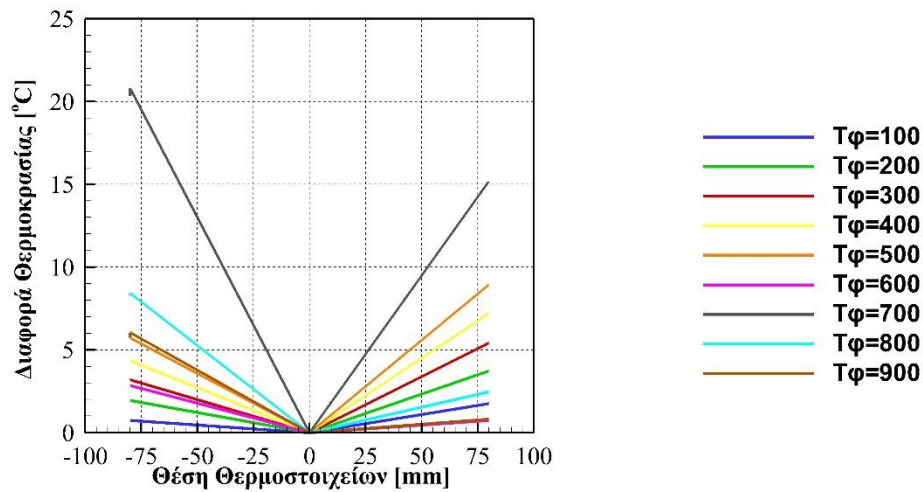
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-44: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 850°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Επίσης μελετήθηκε η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου στις θέσεις 1, 2, 4 και 10 όπου είχαμε παραπάνω από ένα θερμοστοιχείο πέραν του κεντρικού. Με άλλα λόγια υπολογίστηκε η διαφορά θερμοκρασίας του κεντρικού θερμοστοιχείου από αυτά που βρίσκονταν στις άκρες των φύλλων. Η απόσταση των θερμοστοιχείων του κέντρου από αυτά που βρίσκονται στις διαγωνίους όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω είναι 80mm. Θεωρήθηκε ότι το κεντρικό θερμοστοιχείο κάθε θέσης βρίσκεται στη θέση $x=0$, τα εκ δεξιών στη θέση $x=+80\text{mm}$ ενώ τα εξ' αριστερών στη θέση $x=-80\text{m}$.

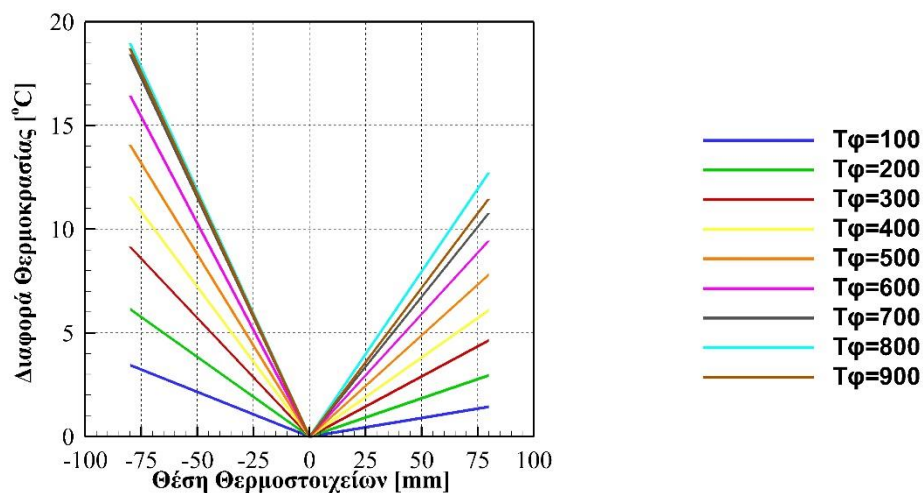
Θέση 1



Σχήμα 4-2 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης 1

Παρατηρείται πως η διαφορά θερμοκρασίας σε αυτή τη θέση φθάνει σε ένα σημείο μέχρι τους 21 °C, διαφορά θερμοκρασίας η οποία είναι αποδεκτή για αυτήν την τάξη θερμοκρασιών του φούρνου. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι σε αυτή τη θέση υπάρχει ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του κεραμικού χαρτιού.

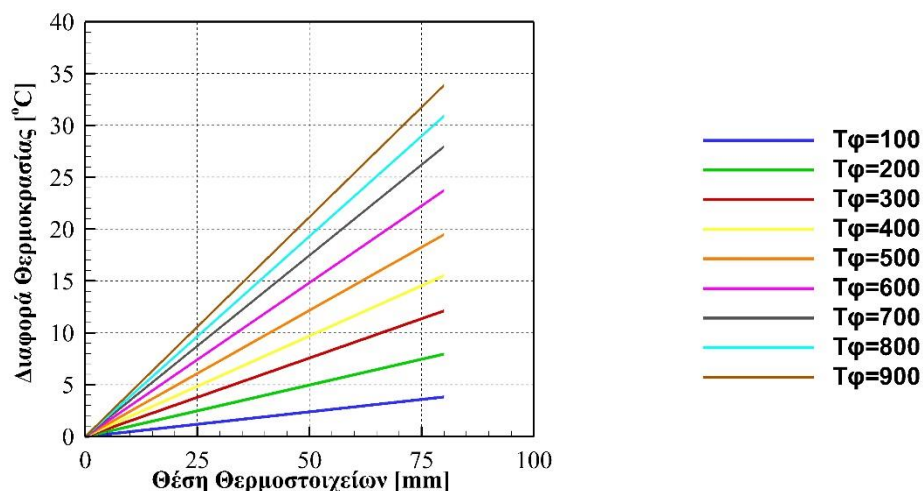
Θέση 2



Σχήμα 4-3 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης 2

Στη θέση 2 η διαφορά θερμοκρασίας του κεντρικού από τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται στη θέση $x=-80\text{mm}$ φθάνει μέχρι τους 19 °C, ενώ με τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται στη θέση $x=+80\text{mm}$ φθάνει μέχρι τους 13 °C, πράγμα που δηλώνει ότι υπάρχει ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου.

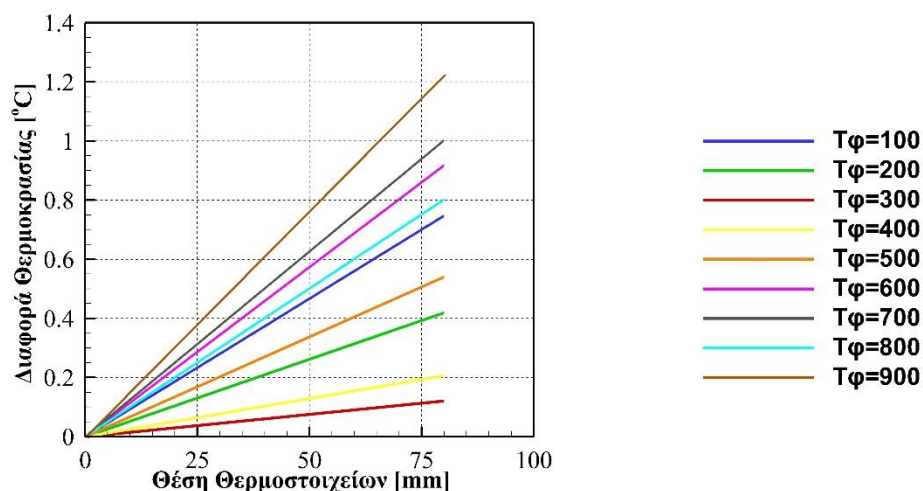
Θέση 3



Σχήμα 4-4 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης 3

Σε αυτή τη θέση, υπάρχει μόνο ένα θερμοστοιχείο επιπλέον του κεντρικού στη θέση $x=+80\text{mm}$. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας παρουσιάζεται για θερμοκρασία φούρνου $900\text{ }^\circ\text{C}$ και είναι $34\text{ }^\circ\text{C}$, η οποία είναι αποδεκτή, οπότε και σε αυτή τη θέση επιτυγχάνεται ομοιομορφία στην επιφάνεια του κεραμικού χαρτιού.

Θέση 4



Σχήμα 4-5 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης 4

Στη θέση 4 υπάρχει πάλι ένα θερμοστοιχείο επιπλέον του κεντρικού στη θέση $x=+80\text{mm}$ για τη μελέτη της κατανομής. Σε αυτή τη θέση προφανώς υπάρχει ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου, αφού η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι μόλις $1,2\text{ }^\circ\text{C}$.

Σε αυτό το σημείο και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας με αυτή του προηγούμενου πειράματος, υπολογίστηκε η θερμική αγωγιμότητα k από τον τύπο $k = \frac{q\Delta x}{\Delta T}$ για τις εξής αποστάσεις της πειραματικής διάταξης του κεραμικού χαρτιού Kaowool:

- Στρώση k1-Απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων θέσης 1 και θέσης 2: 6mm
- Στρώση k2-Απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων θέσης 2 και θέσης 4: 12mm
- Στρώση k3-Απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων θέσης 4 και θέσης 6: 12mm
- Στρώση k4-Απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων θέσης 6 και θέσης 8: 12mm
- Στρώση k5-Απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων θέσης 8 και θέσης 10: 12mm

Για την εύρεση του συντελεστή αγωγιμότητας κάθε στρώσης υπολογίστηκε η αντίστοιχη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT ως ημιάθροισμα των θερμοκρασιών στις άκρες της εκάστοτε στρώσης. Ακόμα, υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση το ποσό θερμότητας και η απόσταση της στρώσης. Έτσι, είναι δυνατός πλέον ο υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k . Τα αποτελέσματα του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k κάθε στρώσης κεραμικού χαρτιού για κάθε τάξη θερμοκρασιών του φούρνου φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4-3 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για κάθε θερμοκρασία φούρνου

	Tφ [oC]								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
k1[W/m/K]	0,0487	0,0656	0,0840	0,1005	0,1218	0,1975	0,1585	0,3702	0,8334
k2[W/m/K]	0,0435	0,0571	0,0696	0,0845	0,1023	0,1210	0,1405	0,1652	0,1941
k3[W/m/K]	0,0422	0,0525	0,0619	0,0740	0,0894	0,1031	0,1172	0,1360	0,1595
k4[W/m/K]	0,0421	0,0502	0,0569	0,0638	0,0742	0,0866	0,0962	0,1087	0,1242
k5[W/m/K]	0,0423	0,0466	0,0494	0,0529	0,0579	0,0630	0,0678	0,0739	0,0808

Σύμφωνα με τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων είναι δυνατή η ανάλυση σφάλματος οπότε κατ' επέκταση ο ορθός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στα προηγούμενα πειράματα η ακρίβεια του παχύμετρου που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της απόστασης των δοκιμίων είναι 1%, των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 5% και του θερμοροόμετρου 10%. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις παρακάτω εξισώσεις διάδοσης σφαλμάτων για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων συνάρτησης f μιας η παραπάνω μεταβλητής προκύπτουν οι τιμές του παρακάτω πίνακα για όλες τις τάξεις θερμοκρασιών του φούρνου.

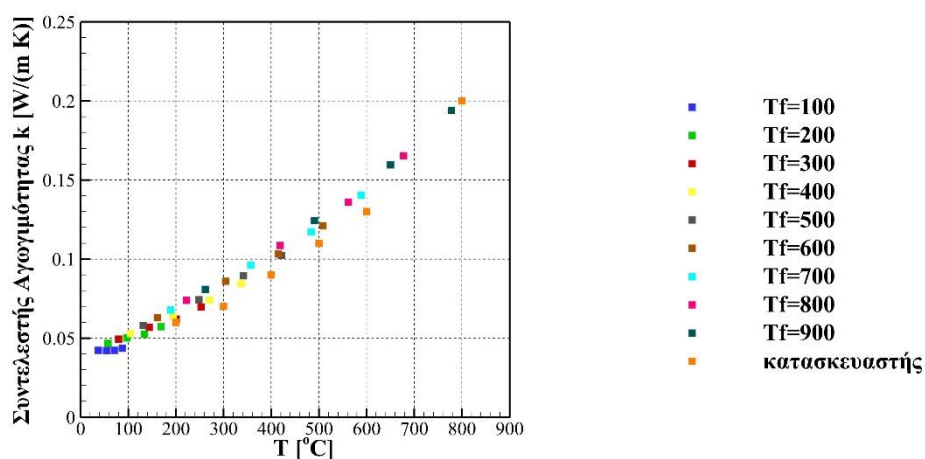
$$\delta q \Delta x = q * \Delta x * \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta x}{\Delta x}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.2}$$

$$\delta k = \frac{q * \Delta x}{\Delta T} * \sqrt{\left(\frac{\delta q \Delta x}{q \Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\Delta T}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Πίνακας 4-4 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας με σφάλμα

	T _φ [°C]								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
k1 [W/m/K]	0,0487 ± 0,00547	0,0656 ± 0,00737	0,0840 ± 0,00944	0,1005 ± 0,01129	0,1218 ± 0,01367	0,1975 ± 0,02217	0,1585 ± 0,01779	0,3702 ± 0,04155	0,8334 ± 0,09355
k2 [W/m/K]	0,0435 ± 0,00489	0,0571 ± 0,00641	0,0696 ± 0,00781	0,0845 ± 0,00948	0,1023 ± 0,01148	0,1210 ± 0,01358	0,1405 ± 0,01577	0,1652 ± 0,01855	0,1941 ± 0,02179
k3 [W/m/K]	0,0422 ± 0,00474	0,0525 ± 0,00589	0,0619 ± 0,00696	0,0740 ± 0,00831	0,0894 ± 0,01003	0,1031 ± 0,01158	0,1172 ± 0,01315	0,1360 ± 0,01527	0,1595 ± 0,01791
k4 [W/m/K]	0,0421 ± 0,00473	0,0502 ± 0,00563	0,0569 ± 0,00639	0,0638 ± 0,00717	0,0742 ± 0,00833	0,0866 ± 0,00966	0,0962 ± 0,01080	0,1087 ± 0,01220	0,1242 ± 0,01395
k5 [W/m/K]	0,0423 ± 0,00475	0,0466 ± 0,00524	0,0494 ± 0,00555	0,0529 ± 0,00594	0,0579 ± 0,00650	0,0630 ± 0,00707	0,0678 ± 0,00761	0,0739 ± 0,00830	0,0808 ± 0,00907

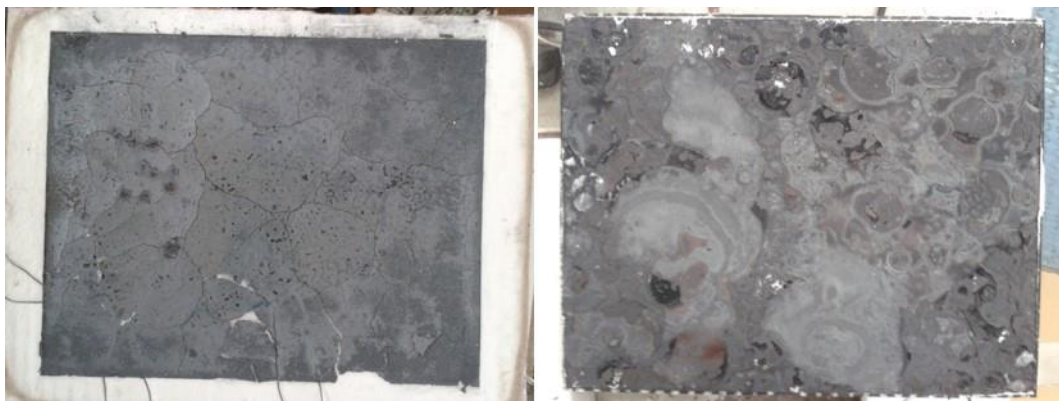
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.6) φαίνονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των εξεταζόμενων στρώσεων για κάθε επίπεδο θερμοκρασίας του φούρνου μαζί με τις προτεινόμενες προδιαγραφές του κατασκευαστή όπως αυτές συμπεριλαμβάνονται στη συσκευασία του κεραμικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper της εταιρίας Morgan Thermal Ceramics. Παρατηρείται εύκολα πως υπάρχει σημαντική ταύτιση των πειραματικών τιμών με τις δοθείσες από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4-6 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για όλες τις θερμοκρασίες φούρνου

4.3 Πείραμα Πάνελ Κενού (VIP) και Κεραμεικού Χαρτιού (Kaowool 1260 Paper)

Το πολυστρωματικό αυτό πείραμα είχε ως στόχο τη μελέτη και τον επαναπροσδιορισμό των ιδιοτήτων και της θερμικής συμπεριφοράς του πάνελ κενού σε συνθήκες φωτιάς. Για την πραγματοποίηση αυτού του στόχου τόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων των θερμοκρασιών, που ελήφθησαν από τα θερμοστοιχεία μέσω της συσκευής Agilent, όσο και τα αποτελέσματα της θερμοκάμερας ήταν πολύ σημαντικά. Τα πρώτα κιόλας συμπεράσματα προκύπτουν από τα οπτικά αποτελέσματα της διάταξης μετά το πέρας του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, η χαλύβδινη πλάκα που ήταν προς το εσωτερικό του φούρνου, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και της παραγόμενης θερμικής ακτινοβολίας, αλλοιώθηκε η εκτεθειμένη επιφάνεια της και τήχθηκε πολύ λεπτή στρώση της πάνω στο πρώτο φύλλο του κεραμεικού χαρτιού με το οποίο βρισκόταν σε επαφή (Εικόνα 4.45).



Εικόνα 4-45 Αλλοίωση πλάκας μετά το πείραμα

Εν συνεχεία, το πρώτο φύλλο κεραμεικού χαρτιού Kaowool που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και βρισκόταν προς το εσωτερικό του φούρνου υπέστη μια ελαφριά οξείδωση περιμετρικά πιθανώς λόγω κάποιων απωλειών θερμότητας από εκεί (Εικόνα 4.46).



Εικόνα 4-46 Πρώτο φύλλο κεραμεικού χαρτιού μετά το πείραμα

Παρατηρώντας τα δύο δοκίμια VIP της πειραματικής διάταξης μετά το τέλος του πειράματος διαπιστώνονται μερικές φθορές και ρωγμές και παράλληλα μία μικρή περιμετρική οξείδωση, η οποία για το πρώτο που βρισκόταν στο εσωτερικό του φούρνου ήταν πιο έντονη από ότι στο δεύτερο δοκίμιο (Εικόνα 4.47).



Εικόνα 4-47 Αριστερή: Πρώτο δοκίμιο VIP, Δεξιά: Δεύτερο δοκίμιο VIP μετά το πείραμα

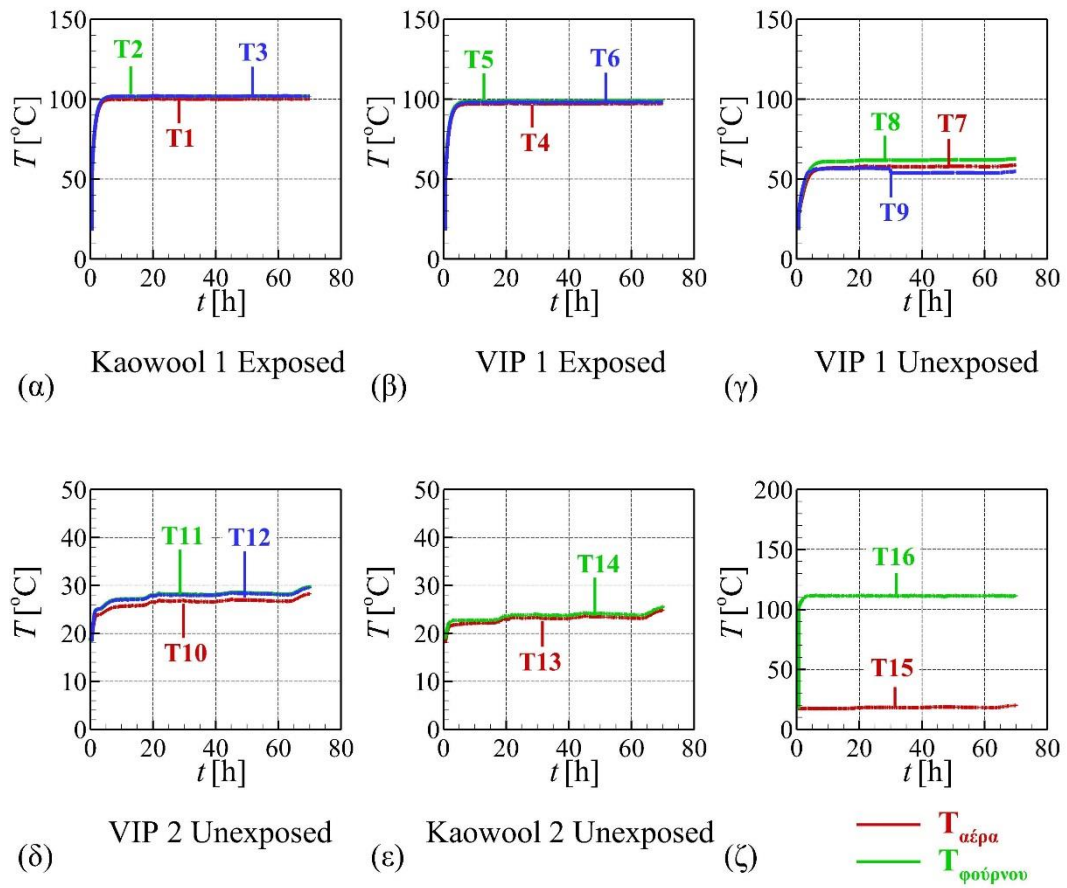
Τέλος, η δεύτερη στρώση κεραμικού χαρτιού της διάταξης δεν είχε υποστεί σχεδόν καμία αλλοίωση πέραν μιας ελαφριάς οχρώτητας στο κέντρο της επιφάνειάς της (Εικόνα 4.48), ενώ η εξωτερική χαλύβδινη πλάκα που ήταν προς το περιβάλλον δεν υπέστη καμία απολύτως αλλοίωση ή φθορά μετά τη διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 4-48 Δεύτερο φύλλο κεραμικού χαρτιού μετά το πείραμα

Σε αυτό το σημείο για τον επαρκή προσδιορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του υπερμονωτικού υλικού VIP, παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα για κάθε θερμοκρασία του φούρνου τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα ελήφθησαν από τα θερμοστοιχεία όλων των θέσεων της πειραματικής διάταξης, που είχαν συνδεθεί με τη συσκευή Agilent μέσω ειδικών υποδοχών όπως αυτά αποτυπώθηκαν στον εργαστηριακό υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Labview.

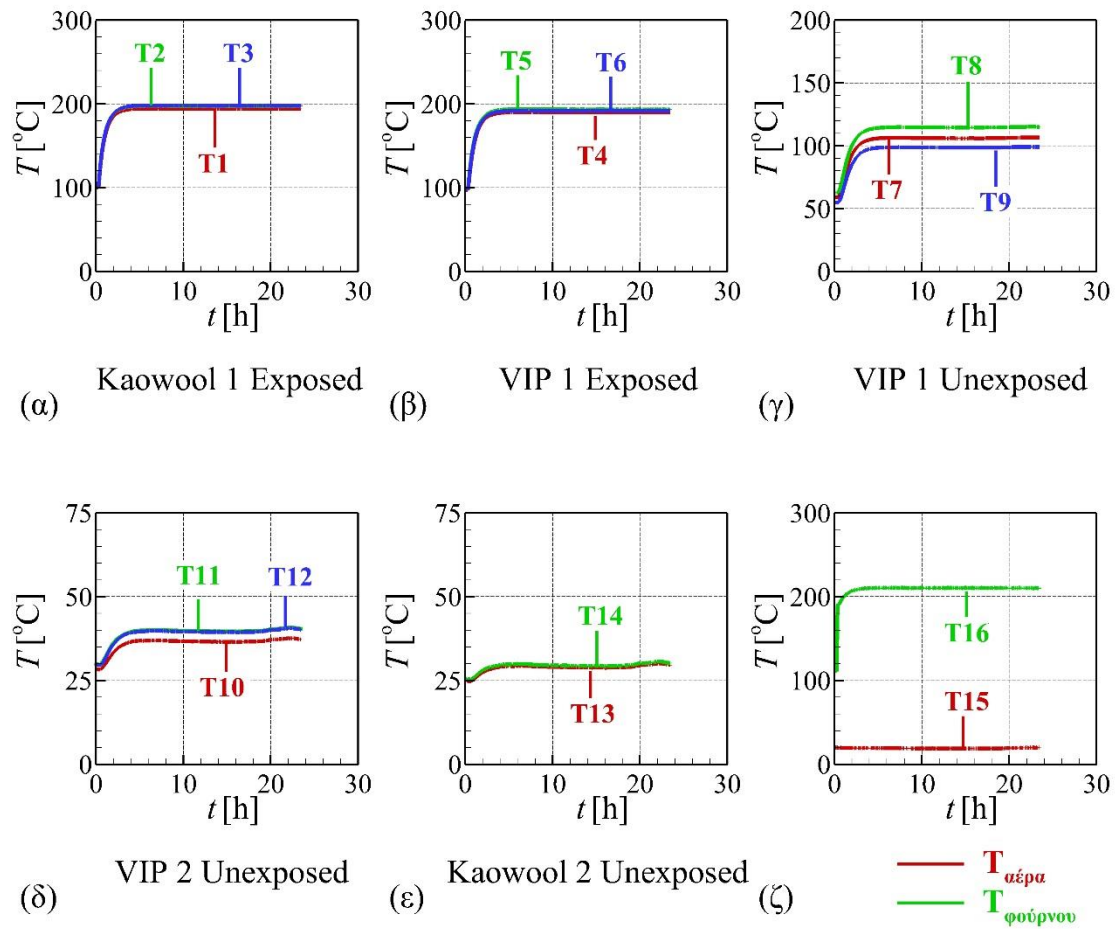
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-49 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 100°C

Για θερμοκρασία φούρνου 100°C επετεύχθη σταθεροποίηση μετά τις 20 ώρες πειράματος.

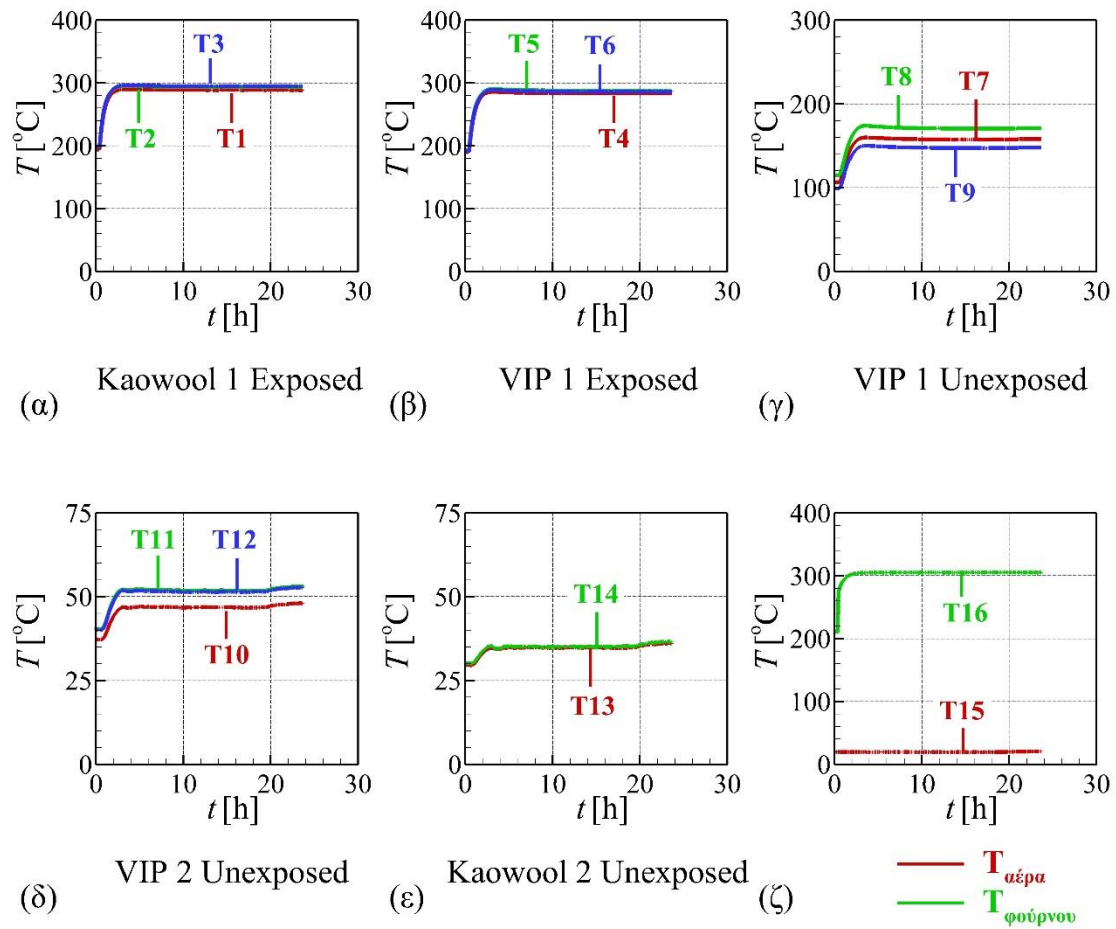
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^\circ C$



Εικόνα 4-50 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου $200^\circ C$

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρείται μόνιμη κατάσταση μετά τις 10 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

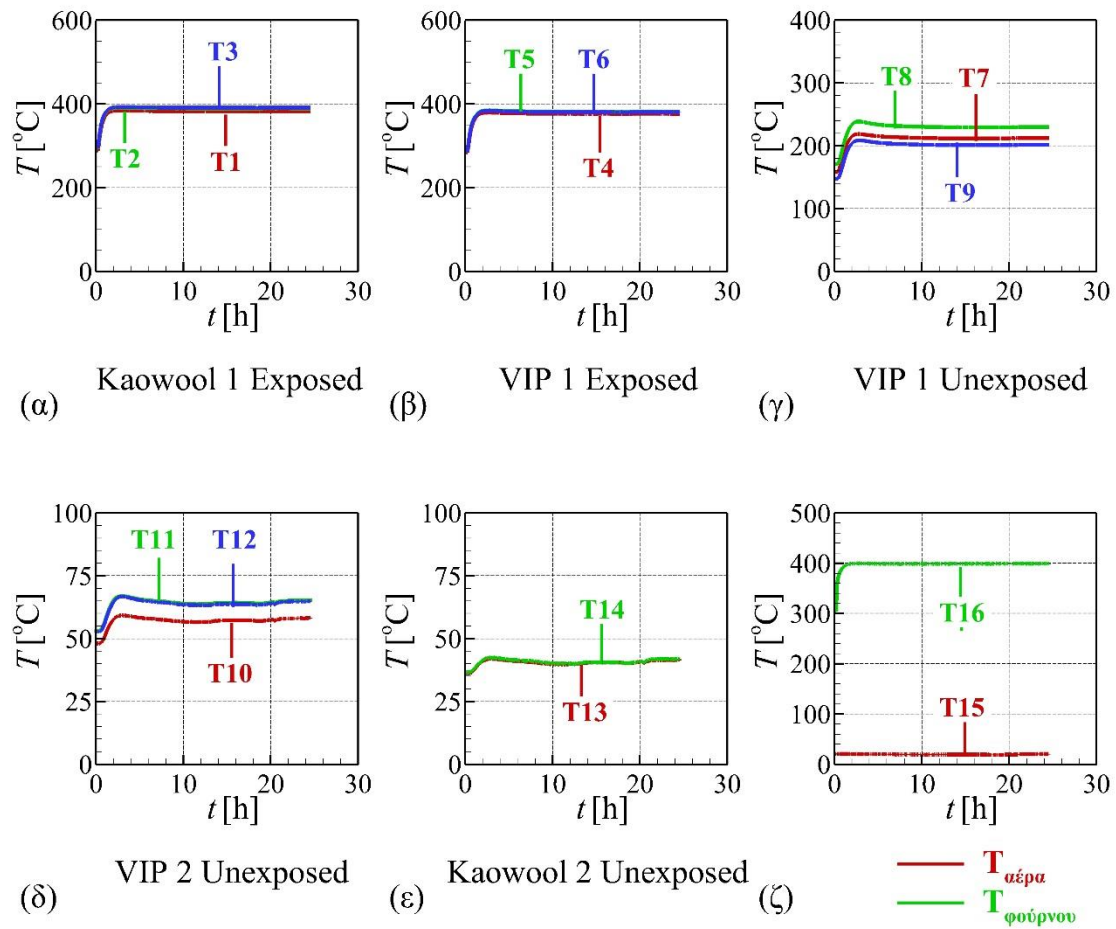
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-51 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 300°C

Μόνιμη κατάσταση επέρχεται μετά τις 10 ώρες για θερμοκρασία φούρνου 300°C .

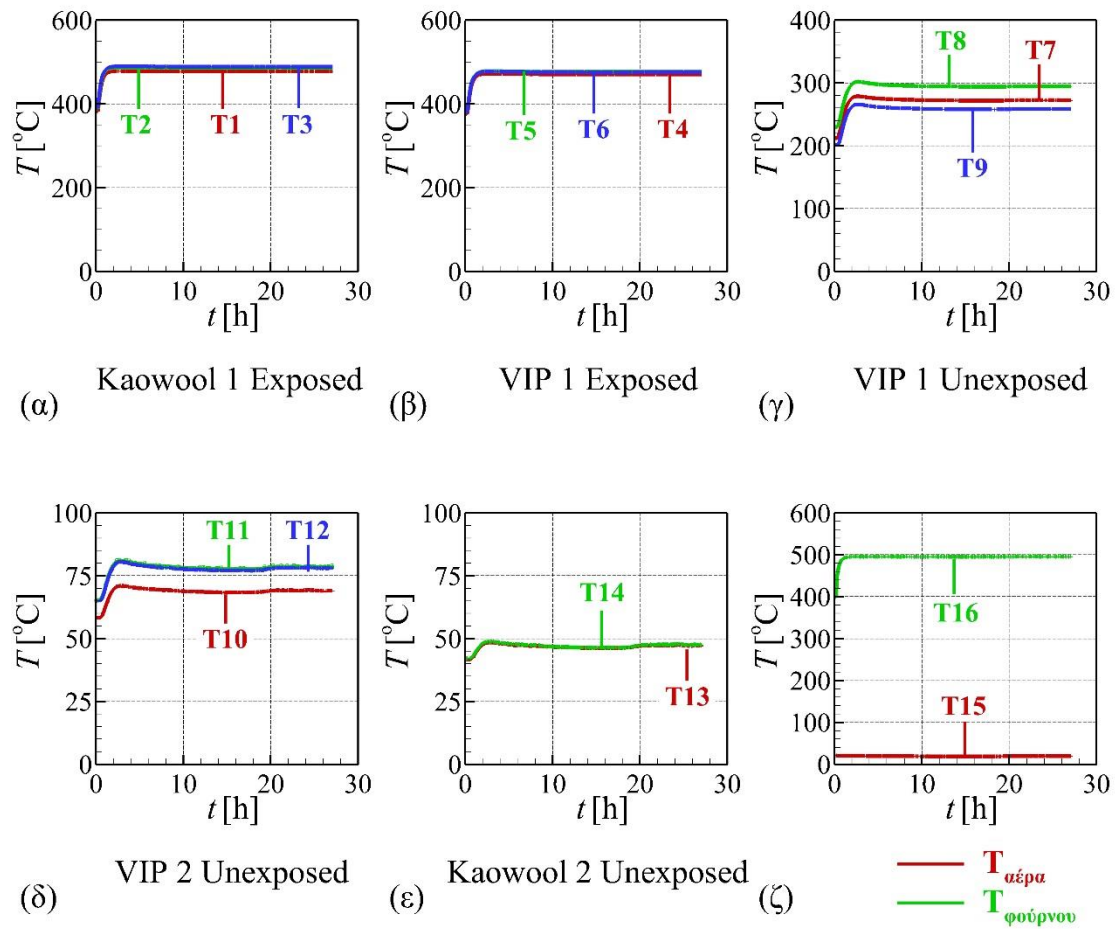
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ C$



Εικόνα 4-52 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου $400^\circ C$

Σε αυτήν την θερμοκρασία φούρνου παρατηρείται μόνιμη κατάσταση πάλι μετά τις 10 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

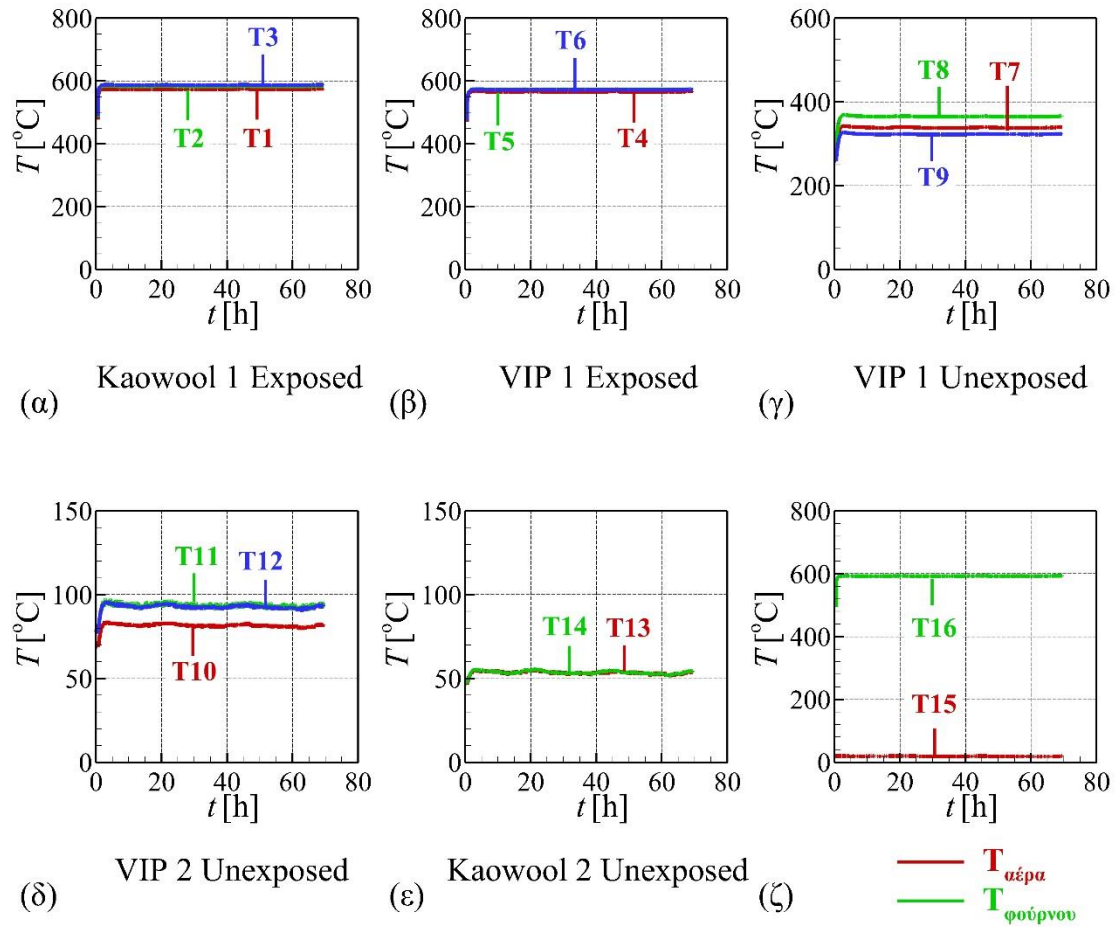
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ C$



Εικόνα 4-53 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου $500^\circ C$

Και σε αυτή τη θερμοκρασία φούρνου επέρχεται σταθεροποίηση περίπου μετά από 10 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

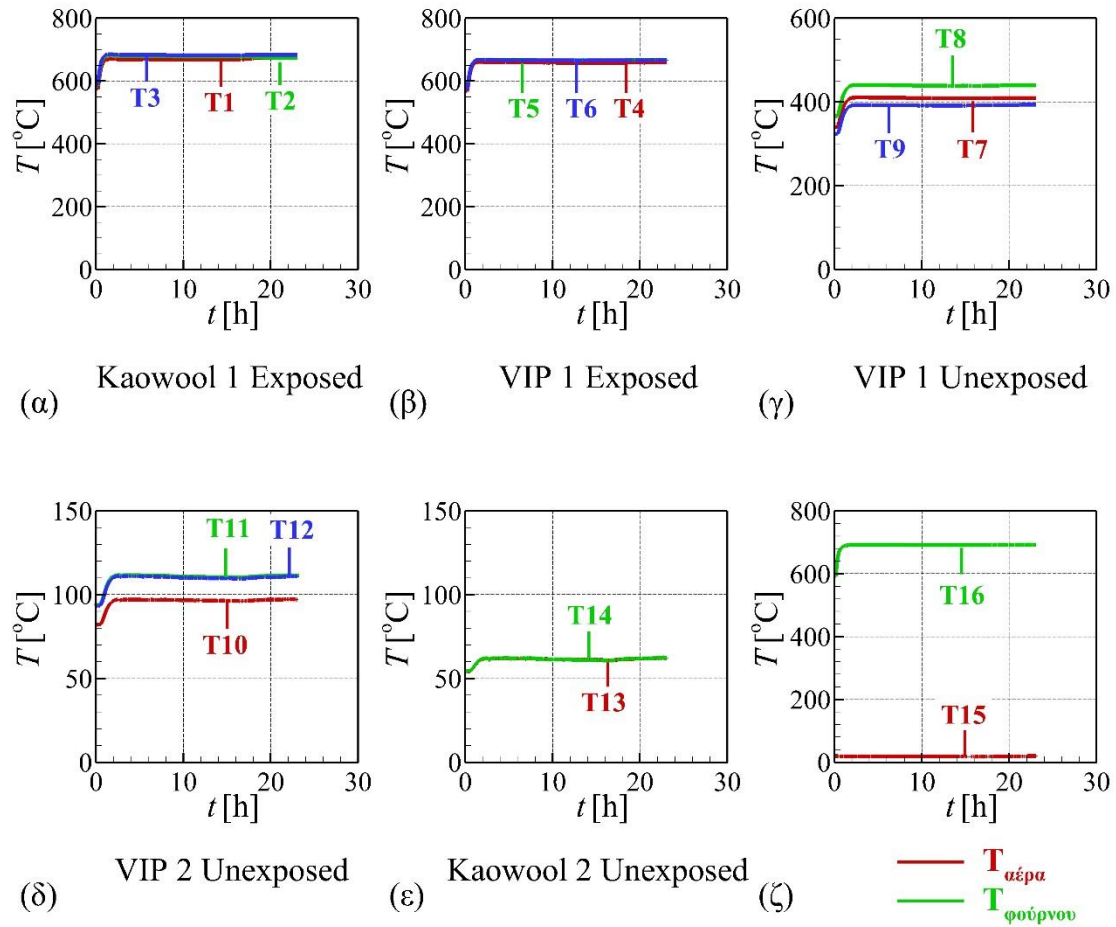
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-54 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 600°C

Για θερμοκρασία φούρνου 600°C επιτυγχάνεται σταθεροποίηση μετά από 20 ώρες.

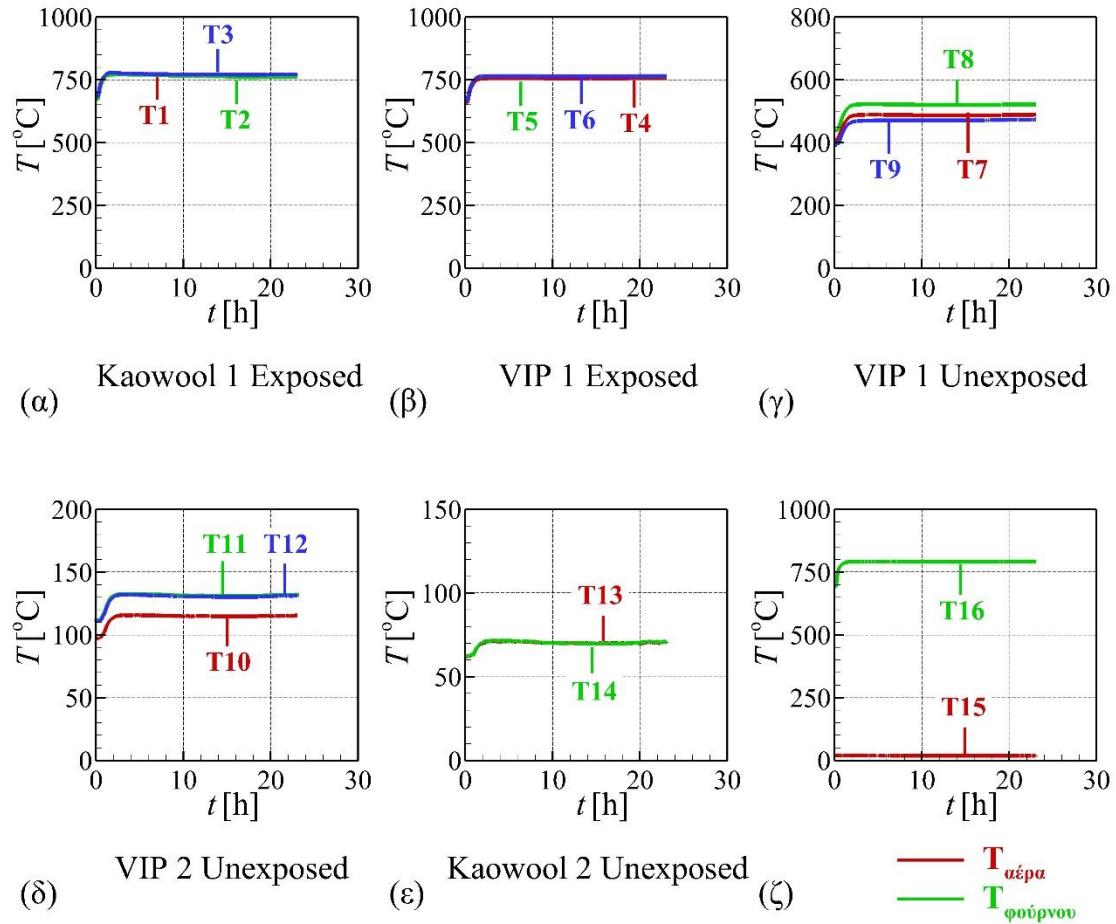
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-55 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 700°C

Παρατηρείται πως μετά από 10 ώρες επέρχεται μόνιμη κατάσταση.

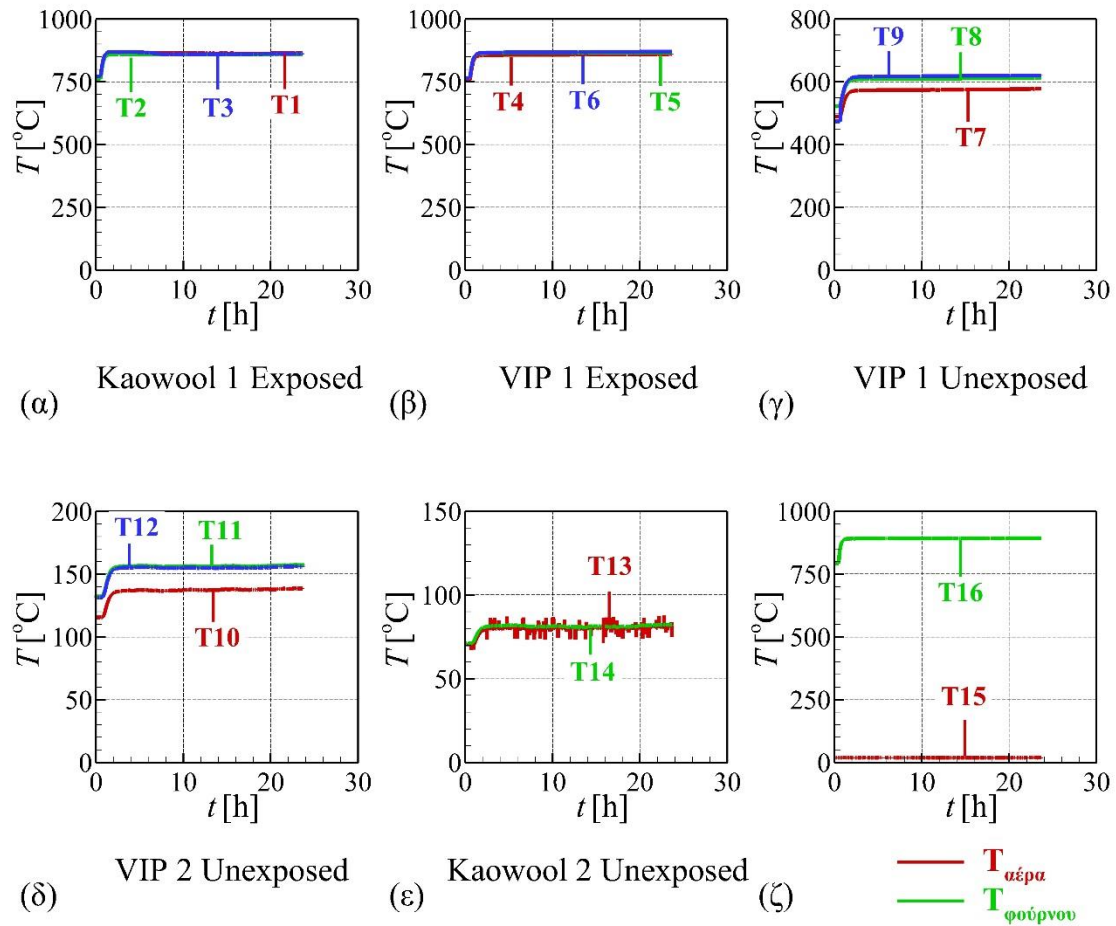
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=800^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-56 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 800°C

Ομοίως και για θερμοκρασία φούρνου 800°C υπάρχει σταθεροποίηση μετά τις 5 ώρες.

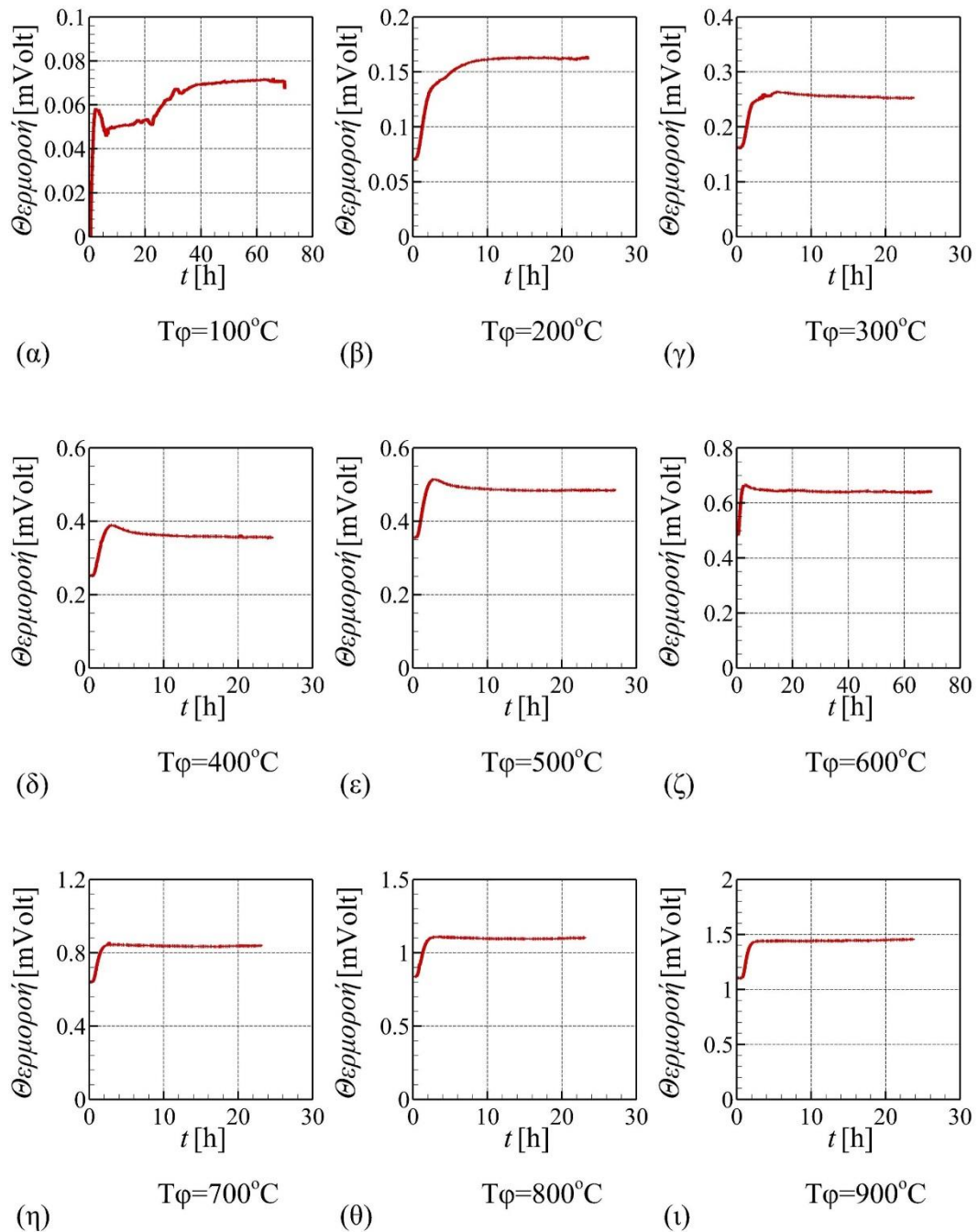
Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-57 Διαγράμματα θερμοκρασιών για θερμοκρασία φούρνου 900°C

Παρατηρείται πως μετά από περίπου 10 ώρες επέρχεται μόνιμη κατάσταση.

Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται η διακύμανση της θερμοροής για κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου όπως εκλήφθηκε με τη βοήθεια του θερμοροόμετρου. Κατά την εκτέλεση του πειράματος όσο αυξανόταν η θερμοκρασία του φούρνου τόσο αυξανόταν η ποσότητα της θερμοροής που χρειαζόταν για να επέλθει η μόνιμη κατάσταση.



Εικόνα 4-58 Διαγράμματα θερμοροής για κάθε θερμοκρασία φούρνου

Για τη μελέτη της ομοιομορφίας της κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου στην εκτεθειμένη στο περιβάλλον επιφάνεια της εξωτερικής χαλύβδινης πλάκας χρησιμοποιήθηκε η θερμοκάμερα του εργαστηρίου τύπου FLIR THERMACAM PM595. Η θερμοκάμερα χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη διάρκεια του πειράματος και έπαιρνε φωτογραφίες της χαλύβδινης όψης κάθε πέντε λεπτά. Οι εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνουν τα αντίστοιχα στιγμιότυπα σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες και στη μόνιμη κατάσταση για κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου.

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=100^\circ C$



Εικόνα 4-59: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στην αρχή της μέτρησης, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=200^\circ C$



Εικόνα 4-60: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $150^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=300^\circ C$



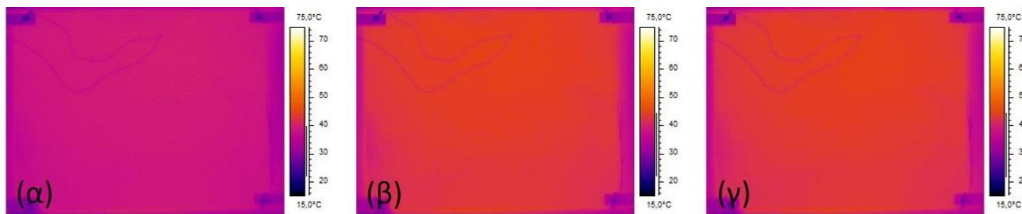
Εικόνα 4-61: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $250^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=400^\circ C$



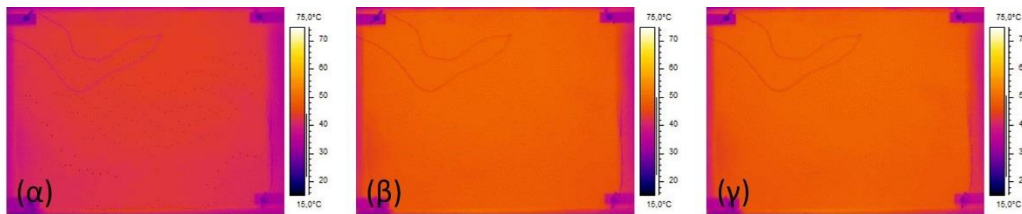
Εικόνα 4-62: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $350^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=500^\circ C$



Εικόνα 4-63: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $450^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=600^\circ C$



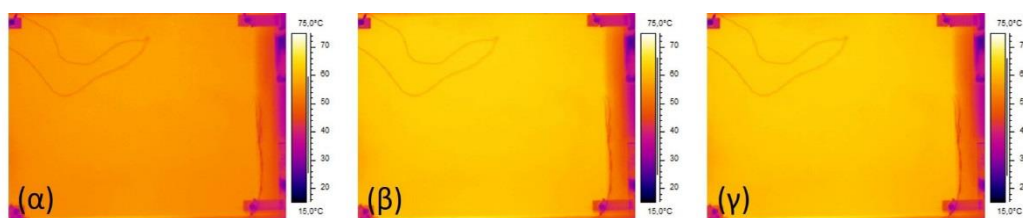
Εικόνα 4-64: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου $550^\circ C$, (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=700^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-65: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 650°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=800^\circ\text{C}$



Εικόνα 4-66: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 750°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Θερμοκρασία Φούρνου, $T_f=900^\circ\text{C}$

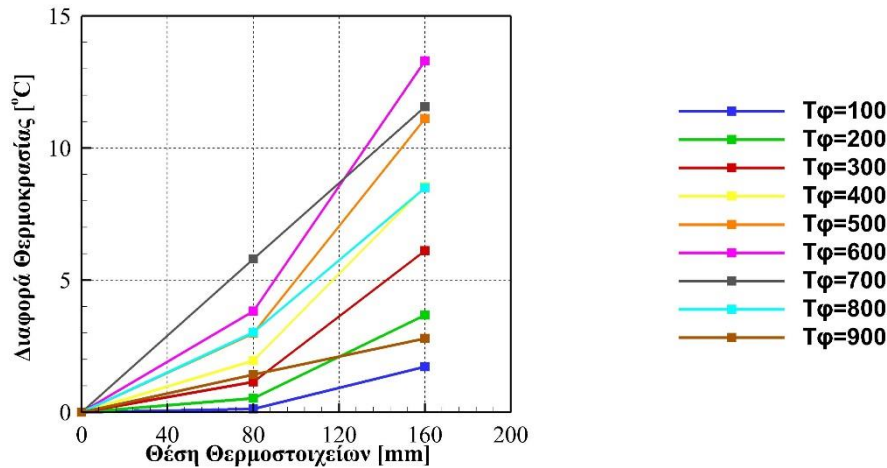


Εικόνα 4-67: (α) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας σε θερμοκρασία φούρνου 850°C , (β) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση, (γ) Στιγμιότυπο θερμοκάμερας στη μόνιμη κατάσταση

Στη συνέχεια εξετάστηκαν οι πλευρικές απώλειες στις θέσεις της πειραματικής διάταξης «Kaowool1exposed», «VIP1exposed», «VIP1unexposed», «VIP2unexposed» και «Kaowool2unexposed». Με άλλα λόγια μελετήθηκε η ομοιομορφία της κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου ως προς το κέντρο κάθε θέσης ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκε η θέση του κεντρικού θερμοστοιχείου ως θέση $x=0$ και θέτοντας ως σύμβαση ότι η απόσταση των θερμοστοιχείων των διαγωνίων είναι

80mm το καθένα όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ορίστηκαν τα πλησιέστερα θερμοστοιχεία στο κέντρο ως θέση $x=+80\text{mm}$ και τα άλλα ως θέση $x=+160\text{mm}$.

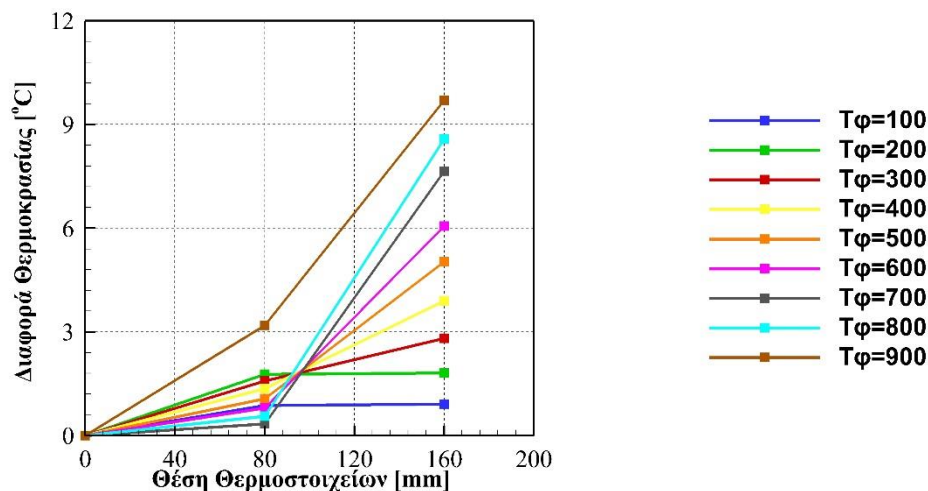
Θέση Kaowool1exposed



Σχήμα 4-7 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης Kaowool1exposed

Σε αυτή τη θέση η διαφορά θερμοκρασίας ανέρχεται μέχρι τους 14 °C, διαφορά η οποία είναι αποδεκτή για αυτή την τάξη θερμοκρασιών συνεπώς υπάρχει ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου.

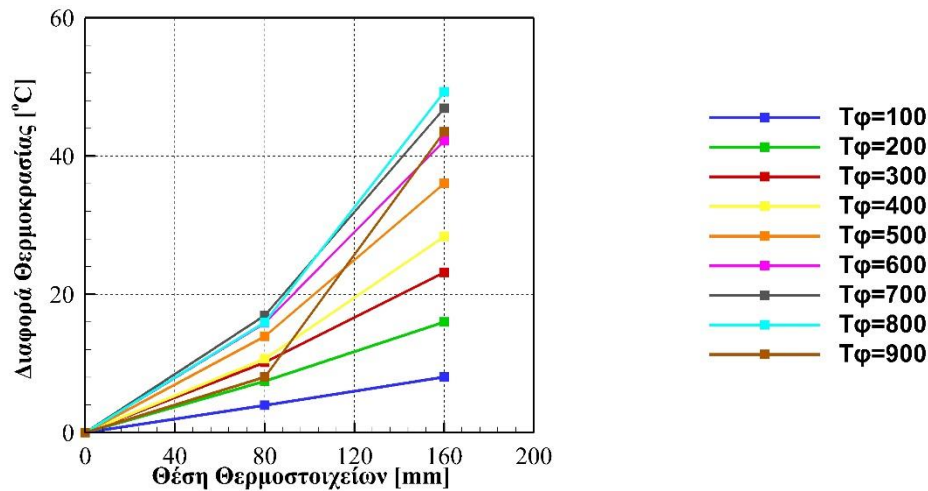
Θέση VIP1exposed



Σχήμα 4-8 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης VIP1exposed

Πάλι και σε αυτή τη θέση της πειραματικής διάταξης υπάρχει ομοιομορφία, αφού η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στα θερμοστοιχεία στη θέση $x=+160\text{mm}$ φθάνει στους 10 °C για θερμοκρασία φούρνου 900 °C.

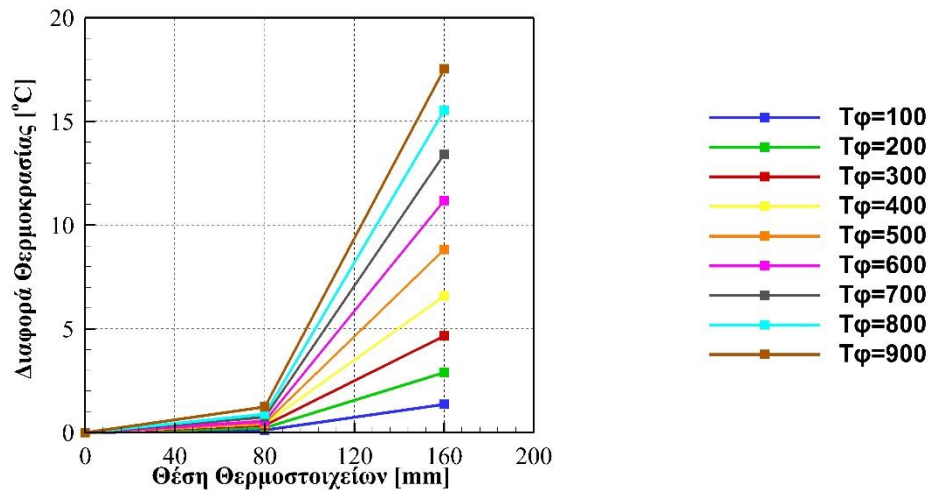
Θέση VIP1unexposed



Σχήμα 4-9 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης VIP1unexposed

Σε αυτή τη θέση, η διαφορά θερμοκρασιών του κεντρικού θερμοστοιχείου με αυτό της θέσης $x = +80\text{mm}$ φθάνει μέχρι τους $18\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ με αυτό της θέσης $x = +160\text{mm}$ φθάνει μέχρι τους $50\text{ }^\circ\text{C}$, πράγμα που σημαίνει ότι επιτυγχάνεται ομοιομορφία.

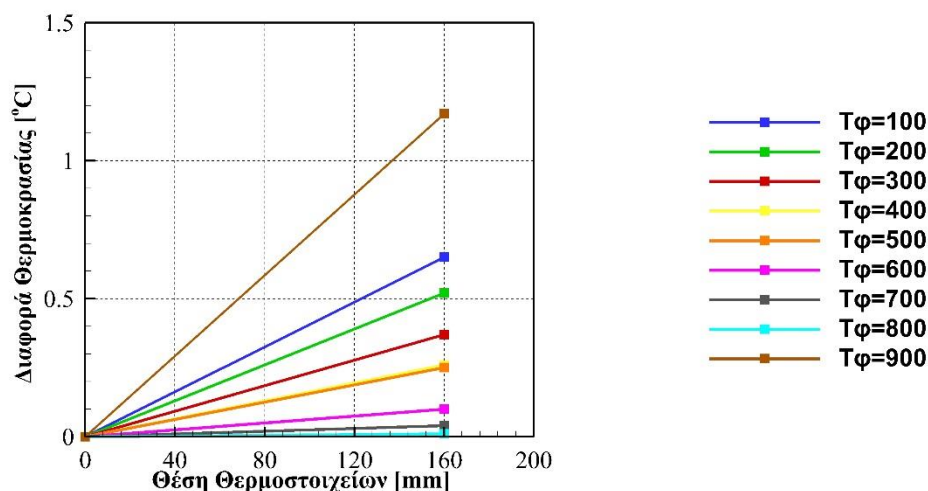
Θέση VIP2unexposed



Σχήμα 4-10 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης VIP2unexposed

Ομοίως και στη θέση αυτή υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου μιας και η μέγιστη διαφορά θερμοκρασιών είναι $18\text{ }^\circ\text{C}$ για θερμοκρασία φούρνου $900\text{ }^\circ\text{C}$ στη θέση $x = +160\text{mm}$.

Θέση Kaowool2unexposed



Σχήμα 4-11 Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου Θέσης Kaowool2unexposed

Σε αυτή τη θέση υπάρχει μόνο ένα θερμοστοιχείο στη θέση $x = +160\text{mm}$ πέραν του κεντρικού πάνω στη διαγώνιο, με μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά τους $1,2\text{ }^\circ\text{C}$ με αποτέλεσμα να υπάρχει και εδώ ομοιόμορφη κατανομή.

Όπως και στα προηγούμενα πειράματα είναι δυνατός σε αυτό το σημείο ο υπολογισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από τον τύπο $k = \frac{q\Delta x}{\Delta T}$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας για τις δύο ενδιάμεσες στρώσεις του VIP στην πειραματική διάταξη, δηλαδή

- Στρώση k1: απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων μεταξύ των θέσεων «VIP1exposed» και «VIP1unexposed» συνολικού πάχους 20mm
- Στρώση k2: απόσταση κεντρικών θερμοστοιχείων μεταξύ των θέσεων «VIP1unexposed» και «VIP2unexposed» συνολικού πάχους 20mm

Για τον ορθό υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υπολογίστηκε για κάθε εξεταζόμενη στρώση το αντίστοιχο ποσό θερμοροής q , η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT ως ημιάθροισμα των θερμοκρασιών στα κέντρα των θέσεων εκατέρωθεν κάθε στρώσης και το συνολικό πάχος της κάθε στρώσης. Έχοντας αυτά ως δεδομένα είναι εφικτό πλέον να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k κάθε στρώσης VIP για κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.5. Από τον πίνακα φαίνεται εύκολα ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας του φούρνου, αυξάνεται και η θερμική αγωγιμότητα για την εξεταζόμενη στρώση k1, ενώ για τη στρώση k2 παρατηρείται μικρότερη αύξηση του συντελεστή όσο αυξάνεται το θερμοκρασιακό πεδίο.

Πίνακας 4-5 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για κάθε θερμοκρασία φούρνου

Tφ [oC]	k1[W/m/K]	k2[W/m/K]
100	0,0178	0,0205
200	0,0193	0,0213
300	0,0201	0,0221
400	0,0219	0,0235
500	0,0242	0,0251
600	0,0278	0,0292
700	0,0328	0,0329
800	0,0399	0,0401
900	0,0610	0,0589

Βέβαια, είναι απαραίτητη η ανάλυση σφάλματος όπως αυτό διαδίδεται μέσω των θερμοστοιχείων, του θερμοροόμετρου και της συσκευής του Agilent, για το σωστό προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, η ακρίβεια των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 5%, του θερμοροόμετρου 10% ενώ του παχύμετρου που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της απόστασης των δοκιμίων είναι 1%. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία διάδοσης σφαλμάτων για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων συνάρτησης f μιας η παραπάνω μεταβλητής προκύπτει:

$$\delta q \Delta x = q * \Delta x * \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta x}{\Delta x}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.2}$$

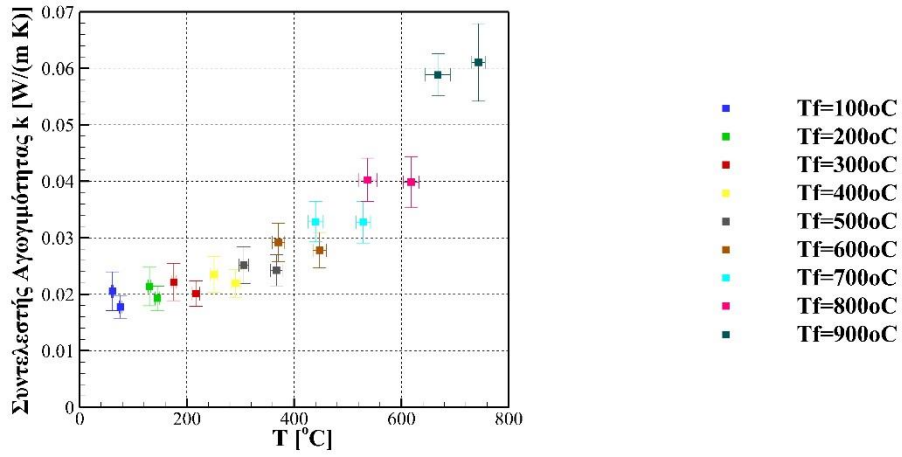
$$\delta k = \frac{q * \Delta x}{\Delta T} * \sqrt{\left(\frac{\delta q \Delta x}{q \Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\Delta T}\right)^2} \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας, δηλαδή οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματα, αποτυπώνονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.6 για κάθε τάξη θερμοκρασιών του φούρνου.

Πίνακας 4-6 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας με σφάλμα

Tφ [oC]	k1 [W/m/K]	k2 [W/m/K]
100	0,0178 ± 0,0020	0,0205 ± 0,0021
200	0,0193 ± 0,0022	0,0213 ± 0,0022
300	0,0201 ± 0,0023	0,0221 ± 0,0023
400	0,0219 ± 0,0025	0,0235 ± 0,0025
500	0,0242 ± 0,0027	0,0251 ± 0,0029
600	0,0278 ± 0,0031	0,0292 ± 0,0034
700	0,0328 ± 0,0037	0,0329 ± 0,0036
800	0,0399 ± 0,0045	0,0401 ± 0,0038
900	0,0610 ± 0,0069	0,0589 ± 0,0064

Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μαζί με τις διορθώσεις σφάλματος φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.12) για κάθε θερμοκρασιακό πεδίο για τις διάφορες θερμοκρασιακές τάξεις του φούρνου.



Σχήμα 4-12 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για κάθε θερμοκρασία φούρνου

Κεφάλαιο 5

5. Συμπεράσματα

Ύστερα από μια ολοκληρωμένη σειρά πειραμάτων και από μία εκτεταμένη μελέτη του υπερμονωτικού υλικού πάνελ κενού VIP και του κεραμεικού χαρτιού Kaowool 1260 Paper, προέκυψαν πολλά και σημαντικά συμπεράσματα για την ευρεία κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς τους σε συνθήκες φωτιάς. Ουσιαστικά, κατασκευάστηκε και μελετήθηκε μία πειραματική εγκατάσταση με σκοπό τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας μονωτικών υλικών κάτω από συνθήκες φωτιάς. Βέβαια, για την επίτευξη αυτού του σκοπού δόθηκε η πρότερη σημασία κατά το στήσιμο του πειράματος, προκειμένου να υπάρχει, όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια, η απαιτούμενη προσομοίωση συνθηκών φωτιάς μέσα σε κτίριο. Πιο αναλυτικά, έπρεπε από τη πλευρά των δοκιμών που εξετάζονταν να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες-συνθήκες φωτιάς (900 °C), ενώ από την άλλη να επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος, όπως δηλαδή θα συνέβαινε σε μια αντίστοιχη περίπτωση φωτιάς σε κτίριο. Επιπλέον, ήταν απαραίτητη η επίτευξη της μόνιμης κατάστασης, δηλαδή η χρονική παραμονή της πειραματικής διάταξης σε κάθε θερμοκρασιακή τάξη του φούρνου έως ότου να επέλθει σταθεροποίηση. Πιστοποιήθηκε η ορθότητα της πειραματικής εγκατάστασης χρησιμοποιώντας ως υλικό αναφοράς το κεραμεικό χαρτί του οποίου γνωρίζαμε τη βάση δεδομένων από τον κατασκευαστή. Έτσι μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα του υπερμονωτικού υλικού Πάνελ Κενού.

Τα πειράματα κατέδειξαν ότι οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψαν είναι εντός των πλαισίων των προβλεπόμενων τιμών της παγκόσμιας βιβλιογραφίας. Το καινούριας τεχνολογίας υπερμονωτικό VIP έχει σημαντική διαφορά συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τα κοινά συμβατικά υλικά, πράγμα που το καθιστά να υπερερεί έναντι αυτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να επιτυγχάνονται τα ίδια αποτελέσματα θερμομόνωσης με αισθητά μικρότερο πάχος μονωτικών υλικών. Επιπλέον, ενώ τα συμβατικά μονωτικά υλικά είναι ευάλωτα στις υψηλές θερμοκρασίες-συνθήκες φωτιάς, αφού τήκονται και αλλοιώνονται, το υπερμονωτικό υλικό VIP έχει πολύ καλή θερμική συμπεριφορά μιας και οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι σαφώς ικανοποιητικές και σαν μονωτικό υλικό αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 900°C. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με εκθετικό ρυθμό, χωρίς όμως οι τιμές του να ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια. Χάρη στην καλή θερμομονωτική ικανότητα του VIP επετεύχθη αξιοσημείωτη επιβράδυνση της αύξησης της θερμοκρασίας και εμφάνιση αισθητά χαμηλότερων θερμοκρασιών στην εξωτερική επιφάνεια του μονωτικού υλικού ακόμα και στη μέγιστη θερμοκρασία του φούρνου (συνθήκες φωτιάς 900 °C). Αυτός ο χρόνος που εξασφαλίζει το υπερμονωτικό VIP είναι ιδιαίτερα πολύτιμος, αφού χρησιμεύει στην πραγμάτωση μιας αποτελεσματικής και ασφαλούς εκκένωσης του φλεγόμενου κτιρίου χωρίς ανθρώπινες απώλειες.

Ως μελλοντικές προοπτικές προτείνεται η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας και άλλων υπερμονωτικών υλικών (π.χ. αερογέλη), συμβατικών μονωτικών (π.χ. πετροβάμβακας) και ξηράς δόμησης (π.χ. γυψοσανίδα). Βέβαια, ενδείκνυται η εύρεση πλάκας κατάλληλου υλικού ανθεκτικού σε υψηλές θερμοκρασίας. Συμπερασματικά, η σειρά των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε εμφάνισε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη θερμομονωτική και θερμική συμπεριφορά του VIP, πράγμα που το καθιστά ως ένα υψηλής ποιότητας μονωτικό υλικό. Ωστόσο, το πεδίο μελέτης του υλικού παραμένει εύφορο για περαιτέρω μελέτη και βελτιστοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

1. Axenenko O. and Thorpe G., The modelling of dehydration and stress analysis of gypsum plasterboards exposed to fire, *Computational Materials Science*, 6 (1996) 281-294.
2. Drysdale D., “An Introduction to Fire Dynamics”, John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England (1999).
3. Magee R.S., McAlevy R.F., “The mechanism of flame spread”, *J. Fire and Flammability* 2 (1971).
4. Suzuki M., Dobashi R., Hirano T., “Behaviour of fire spreading downward over thick paper”, 25th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh (1994).
5. Thomas P.H., “Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms”. *Fire and Materials*, 5 (1981).
6. Ang C.N. & Wang Y.C., “The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure”. *Construction and Building Materials* 18 (2004).
7. Ryan J.V., “Study of Gypsum Plasters Exposed to Fire”. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, C. Engineering and Instrumentation* (1962).
8. Thomas G., “Thermal Properties of Gypsum Plasterboard at High Temperatures”. *Fire and Materials*, Vol. 26 (2002).
9. Κ. Παπαιωάννου, (2005), *Η τεχνολογία της τοιχοποιίας*, Εκδόσεις University studio press, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη.
10. Kontogeorgos D. and Founti M., Gypsum board dehydration kinetics at autogenous water vapour partial pressure, *Thermochimica Acta*, 545 (2012) 141-147.
11. Kontogeorgos D. and Founti M., Gypsum board reaction kinetics at elevated temperatures, *Thermochimica Acta*, 529 (2012) 6-13.
12. Kontogeorgos D. and Founti M., Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 1461-1469.
13. Ghazi Wakili K. and Hugi E., Four Types of Gypsum Plaster Boards and their Thermophysical Properties Under Fire Condition, *Journal of Fire Sciences*, 27 (2009) 27-43.
14. Guido Grause, Jun Ishibashi, Tomohito Kameda, Thallada Bhaskar, Toshiaki Yoshioka, Kinetic studies of the decomposition of flame retardant containing high-impact polystyrene, *Polymer Degradation and Stability*, 95 (2010) 1129-1137.

15. Lingling Jiao, Guangdong Xu, Qingsong Wang, Qiang Xu, Jinhua Sun, Kinetics and volatile products of thermal degradation of building insulation materials, *Thermochimica Acta*, 547 (2012) 120-125.
16. Mandilaras I, Atsonios I, Zannis G, Founti M.: Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS. *Energy and Buildings*.
17. Malliotakis E. MI, Kontogeorgos D., Katsourinis D., Founti M.: The Ageing Effects of Vacuum Insulation Panels (VIPs) on the Long Term Thermal Performance of a Building Envelope with the use of Dynamic Simulation Tools, *IVIS 2013 - 11 th International Vacuum Insulation Symposium Vol. Empa, Switzerland, 2013*.
18. Ασημακοπούλου Ε., Υπολογιστική Προσομοίωση Διάδοσης Φωτιάς σε Κτίριο με Συστήματα Ξηράς Δόμησης και με Υλικά Αλλαγής Φάσης, *Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα (2011)*.
19. Φούντη Μ., “Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης”, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (2005)*.
20. Κοντογεώργος Δ., Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης φαινομένων μεταφοράς σε στερεά όρια (δομικά υλικά) για συνθήκες καύσης/φωτιάς, *Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα (2012)*.
21. Σεμιτέλος Γ., Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Δομικών Υλικών και Τοιχοποιίας σε Θερμοκρασίες Φωτιάς, *Διπλωματική Εργασία, Αθήνα (2013)*.
22. Κουντούρης Α., Πειραματική Μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων και των Μορφών Αστοχίας Σύνθετων Δομικών Πάνελ (τύπου Sandwich) υπο Σύνθετη Καταπόνηση, *Διπλωματική Εργασία, Αθήνα (2009)*.
23. Ατσόνιος Ι., Υπολογιστική Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας σε Δομικά Υλικά, *Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα (2014)*.
24. Μυρωδιά Α., Μοντελοποίηση Μεταφοράς Θερμότητας Γυψοσανίδας σε Συνθήκες Φωτιάς, *Διπλωματική Εργασία, Αθήνα (2010)*.
25. Bjorn Petter Jelle. Traditional, state of the art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43:2549-2563, 2011.
26. EN 13501-1: 2007 + A1 2009. Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.
27. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*. Harper, 2004.
28. Cho K, Hong Y, Seo J: Assessment of the economic performance of vacuum insulation panels for housing projects. *Energy and Buildings*, 2014.
29. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Cruster, J. R. Hall, and J. M. Watts. *S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering*, 3rd Edition. National Fire Protection Association, U.S.A., 2002.
30. F. Ochs and H. Müller-Steinhagen. Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials. *Cesme*, 2005.

31. Markstein G.H., de Ris J.N., "Upward fire spread over textiles", 14th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh (1972).
32. www.fire.gr
33. www.culture.thessaloniki-portal.gr
34. www.weltuk.com
35. www.firenews.gr
36. www.knaufinsulation.gr
37. www.tsakiroglou.gr
38. www.pvd-metallizer.com
39. www.firesecurity.gr
40. www.maraggas.com
41. www.starch.dk
42. www.bloko.gr
43. www.isoren.gr
44. www.omega.fr
45. www.unisol.gr
46. www.ioannidis.com
47. www.monotikaylika.gr
48. www.bdonline.co.uk
49. www.aparatura.ro
50. www.us-instrument.com
51. www.flir.com
52. www.nanoforum.org: European Nanotechnology gateway. Nanotechnology helps solving the world's energy problem. April 2004.
53. Web-site Institute of Nanotechnology, 30 August 2001.