



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Ανάλυση και σχεδιασμός πρωτότυπου ηλεκτρικού κλιβάνου κενού  
υψηλών θερμοκρασιών για το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών  
ΕΜΠ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**Φωτίου Μινόπετρου**

**Επιβλέπων:** Βασίλειος Σπιτάς  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



## Ευχαριστίες

Στο τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους του Καθηγητές και του συμφοιτητές μου που βρέθηκαν δίπλα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και συνέβαλλαν στην εξέλιξή μου από έναν μαθητή σε έναν εν δυνάμει μηχανικό. Οι γνώσεις και η υποστήριξη που μου προσέφεραν ήταν ανεκτίμητη τόσο για την όμορφη περίοδο των σπουδών μου, όσο και για την μετέπειτα πορεία μου που ελπίζω να είναι εξίσου όμορφη και ενδιαφέρουσα.

Ιδιαίτερα, όμως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Σπιτά, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας. Ο κ. Σπιτάς, από τα πρώτα κιόλας χρόνια των σπουδών μου, με περιέβαλε με την αγάπη και το ενδιαφέρον του και προσπαθούσε ακούραστα τόσο για μένα, όσο και για κάθε συμφοιτητή μου που το επιθυμούσε, να βρει τρόπους να μας εμπνεύσει και να μας εξελίξει. Η στάση του αποτέλεσε και θα αποτελεί πρότυπο στη ζωή μου και εύχομαι να του δίνει δύναμη ο Θεός να συνεχίσει με την ίδιο όρεξη το έργο του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο Βασιλείου για την καθοδήγηση του στα πρώτα βήματα της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και γενικότερα για την επωφελή συνεργασία που είχαμε τον τελευταίο χρόνο. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών για την φιλική ατμόσφαιρα και την υποστήριξή τους. Επιπλέον, ευχαριστώ τον επίκουρο καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π κύριο Μιχάλη Καβουσανάκη για την βοήθεια του στην κατανόηση κάποιων λειτουργιών του υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τα αδέρφια μου, τον πνευματικό μου πατέρα, τους φίλους μου που καθημερινά αποτελούν τα στηρίγματα στη ζωή μου και τη γεμίζουν με χαρά και ευτυχία. Εύχομαι ο Θεός να τους δίνει δύναμη, υγεία και ευτυχία, όπως και εκείνοι τόσα χρόνια προσπαθούν να εξασφαλίσουν για εμένα.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός κλιβάνου υψηλών θερμοκρασιών για θερμική κατεργασία κεραμικών υλικών. Για το σκοπό αυτό, μελετώνται αρχικά οι ιδιότητες των κεραμικών υλικών και ο τρόπος που αυτές επιτυγχάνονται μέσα από θερμικούς κύκλους στους οποίους υποβάλλονται. Οι θερμικοί αυτοί κύκλοι πραγματοποιούνται σε κλιβάνους όπου η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους μπορεί να ξεπεράσει τους 1800 °C. Κατά συνέπεια, η θερμική τους μόνωση έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις και οδηγεί σε μεγάλα κόστη αγοράς ή παραγωγής. Για να μειωθεί το συνολικό κόστος της κατασκευής, χρησιμοποιείται μόνωση με εφαρμογή περιβάλλοντος κενού και χρήση θερμογεφυρών. Στο εξωτερικό περίβλημα του κλιβάνου τοποθετούνται σωλήνες ψύξης για την μείωση των θερμοκρασιών, ενώ σχεδιάζεται ξεχωριστό σύστημα ψύξης όλου του κλιβάνου και κατ' επέκταση του δοκιμίου το οποίο τίθεται σε λειτουργία όταν ο θερμικός κύκλος το απαιτεί. Για τη διαστασιολόγηση όλων των παραπάνω συστημάτων αναπτύσσονται αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται και ελέγχονται με αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Αφού ο βασικός σχεδιασμός έχει ολοκληρωθεί, ακολουθεί η λεπτομερής επιλογή και χωροθέτηση των διάφορων υποσυστημάτων για την κατασκευή μιας ολοκληρωμένης λειτουργικής διάταξης.



## Abstract

The purpose of this work is to design a high temperature furnace for heat treatment of ceramic materials. For that reason, the properties of the ceramic materials and the way they are achieved through thermal cycles are examined. These thermal cycles are carried out in furnaces where the temperature inside them can exceed 1800 °C. As a result, their thermal insulation has high requirements and leads to high purchase or production costs. To reduce the overall cost of construction, vacuum insulation and thermal bridges are used. The outer shell of the furnace is fitted with cooling pipes to reduce temperatures, while a separate cooling system for the whole furnace is designed to operate when the thermal cycle of the specimen requires it. For the design of all the above systems, detailed analytical models are developed, the results of which are compared and checked with results obtained from the solution of corresponding finite element models. After the basic design has been completed, the detailed selection and layout of the various subsystems for the construction of an integrated functional layout is followed.





## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
1. Εισαγωγή.....	11
1.1. Ιδιότητες των κεραμικών .....	11
1.1.1. Θερμικές ιδιότητες .....	11
1.1.2. Ξήρανση .....	13
1.1.3. Έψηση .....	14
1.1.4. Πρόγραμμα έψησης.....	17
1.2. Κλιβανοί χύτευσης κεραμικών υλικών .....	18
1.3 Θερμικές διεργασίες σε μεταλλικά υλικά .....	19
1.3.1. Θερμικές κατεργασίες.....	20
2. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κλιβάνου .....	22
2.1. Αντιστάσεις (electric heating elements).....	22
2.1.1. Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες.....	22
2.1.2. Χημική αντίσταση.....	23
2.1.3. Επιλογή αντιστάσεων.....	24
2.1.4. Ηλεκτρονικός εξοπλισμός.....	28
2.2. Μόνωση .....	28
3. Μοντελοποίηση και Σχεδιασμός Κλιβάνου .....	30
3.1. Μοντελοποίηση συστήματος και φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας .....	30
3.1.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	33
3.1.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	35
3.1.3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία .....	40
3.2. Σχεδιασμός θερμικής μόνωσης και μόνιμη απόκριση συστήματος.....	45
3.2.1. Μόνωση με προσθήκη βαθμίδας κενού .....	45
3.2.2. Μόνωση με προσθήκη δύο βαθμίδων κενού.....	47
3.2.3. Μόνωση με προσθήκη Multi-layer insulation (MLI).....	48
3.2.4. Μόνωση με προσθήκη σωλήνων ψύξης.....	51
3.3. Μεταβατική απόκριση συστήματος, Θέρμανση-Ψύξη .....	57
3.3.1. Μοντελοποίηση φαινομένων μη μόνιμης μετάδοσης θερμότητας.....	57
3.3.2. Ανάλυση ψύξης κλιβάνου .....	62
3.4. Σχεδιασμός συστήματος αυτομάτου ελέγχου .....	76
3.4.1. Παρακολούθηση θερμικών κύκλων .....	76
3.4.2. Απόκριση σε είσοδο βαθμίδας .....	82
4. Τελικός σχεδιασμός κλιβάνου.....	88
5. Συμπεράσματα .....	97
6. Βιβλιογραφία.....	98
Παράρτημα Α.....	99

Κώδικας υπολογισμού θερμικού κύκλου θέρμανσης-ψύξης με ρεύμα αέρα.....	99
Κώδικας υπολογισμού θερμικού κύκλου θέρμανσης-ψύξης με ρεύμα αέρα παρουσία πτερυγίων.....	104

## 1. Εισαγωγή

Κεραμικά υλικά ορίζονται τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά που παράγονται με θερμική κατεργασία και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα χημικών συστάσεων και φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων.

Τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα μέταλλα είναι:

- Η σχετικά χαμηλή τους πυκνότητα
- Το υψηλό σημείο τήξης
- Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας
- Η καλή τους αντίσταση σε θλίψη

ενώ τα μειονεκτήματά τους:

- Η μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό
- Η ευθραυστότητα
- Το υψηλό κόστος παραγωγής
- Η εύκολη διάδοση των ρωγμών
- Η μικρή αντοχή σε κόπωση, λυγισμό και κρούση.

Η αστοχία των κεραμικών υλικών οφείλεται συνήθως στην γρήγορη διάδοση ρωγμών, που προέρχονται από την διαδικασία παραγωγής τους ή που εμφανίστηκαν κατά τη χρήση τους, εξαιτίας των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής διαφορετικών κόκκων ή φάσεων.

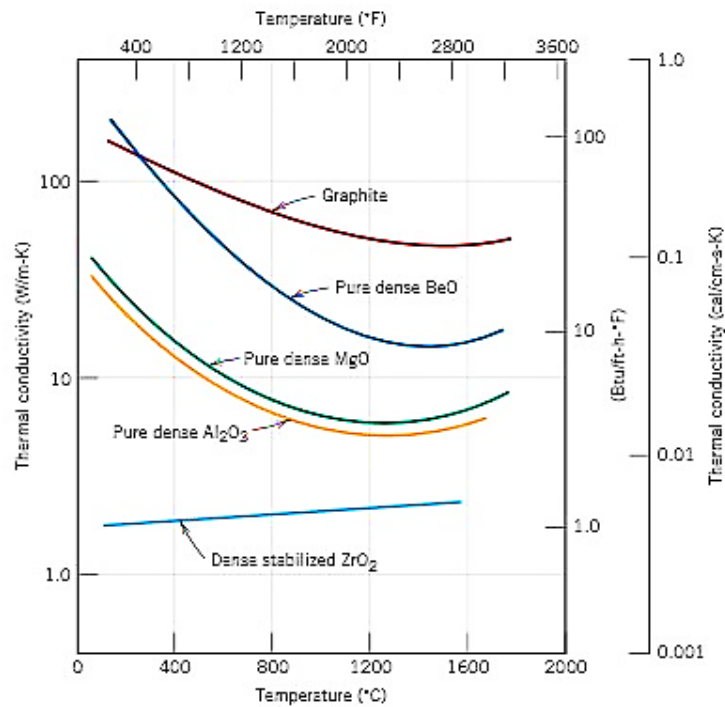
### 1.1. Ιδιότητες των κεραμικών

#### 1.1.1. Θερμικές ιδιότητες

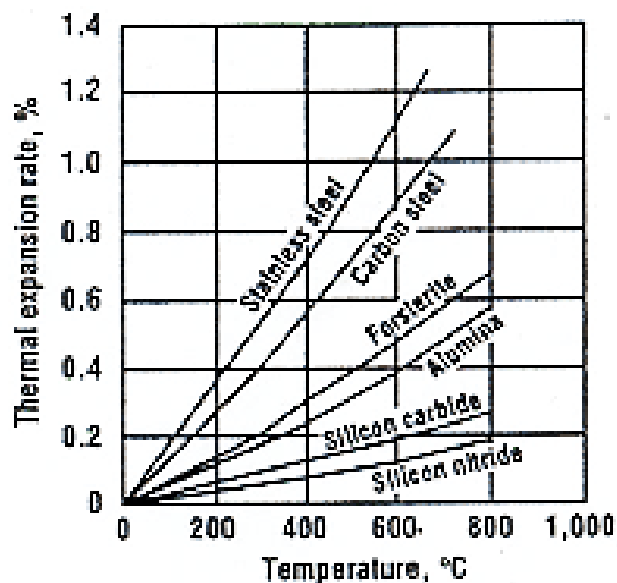
Οι θερμικές ιδιότητες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την παρούσα έκθεση είναι:

- Η θερμική αγωγιμότητα, η οποία κυμαίνεται σε ένα ευρύ πεδίο τιμών (Σχήμα 1.1)
- Η ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα (specific heat ή heat capacity), η οποία είναι το μέτρο της θερμότητας που απαιτείται, ώστε 1 g υλικού να αυξηθεί κατά 1°C. Η θερμοχωρητικότητα των κεραμικών υλικών είναι υψηλότερη αυτής των μετάλλων και χαμηλότερη των πολυμερών
- Ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (linear thermal expansion coefficient) (Σχήμα 1.2)

Οι θερμικές ιδιότητες, τόσο η διαστολή όσο και η αγωγιμότητα, έχουν μεγάλη σημασία λόγω των αναπτυσσόμενων θερμικών τάσεων, που συνήθως προκαλούν ο θερμικός αιφνιδιασμός (thermal shock) ή η θερμική κόπωση (thermal fatigue). Η τάση προς ρηγμάτωση εν θερμώ (spalling) είναι μικρότερη για χαμηλές τιμές θερμικής διαστολής και υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη θερμική αγωγιμότητα για διάφορα κεραμικά υλικά [6]



Σχήμα 1.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη γραμμική θερμική διαστολή διαφόρων κεραμικών υλικών

Τα κεραμικά, όπως και τα μέταλλα, σχηματίζουν κράματα. Ωστόσο, ο λόγος που επιδιώκεται η δημιουργία τέτοιων κραμάτων είναι διαφορετικός: στα μέταλλα επιδιώκεται μέσω της κραματοποίησης, βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της αντοχής σε κόπωση ή σε διάβρωση. Στα κεραμικά υλικά, η δημιουργία κράματος σκοπό έχει την αύξηση της πυκνότητας του υλικού, κατά το στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης, ή τη βελτίωση της αντοχής του σε θραύση.

Τα προηγμένα κεραμικά έχουν θερμοκρασία τήξης γύρω στους 2000 °C, γεγονός που καθιστά τη χύτευσή τους οικονομικά ασύμφορη. Η έλλειψη πλαστικότητας, επίσης, δεν επιτρέπει τη μορφοποίησή τους με κάποια από τις συνήθεις μεθόδους μορφοποίησης των μετάλλων. Η κονιομεταλλουργία, δηλαδή η παραγωγή συμπαγούς υλικού από πρώτη ύλη σκόνη, δίνει λύση στο πρόβλημα της μορφοποίησης των προηγμένων κεραμικών υλικών.

Η παραγωγική διαδικασία των προηγμένων κεραμικών υλικών παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 1.3.



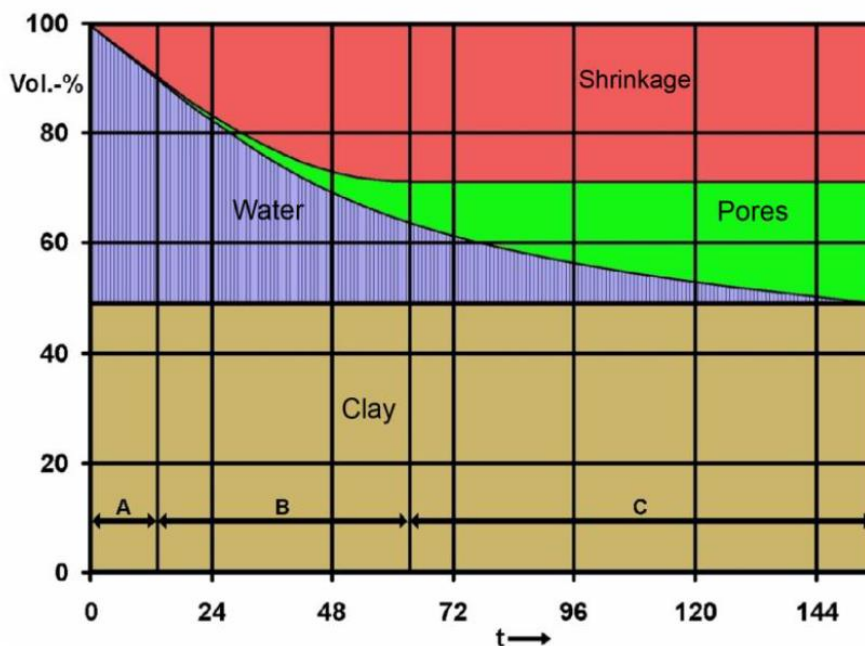
**Σχήμα 1.3 Στάδια παραγωγής κεραμικών προϊόντων [7]**

Η παρούσα έκθεση αναφέρεται εκτενέστερα στις θερμικές διαδικασίες, αφού στόχος είναι ο σχεδιασμός ενός κλιβάνου χύτευσης κεραμικών υλικών. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν την ξήρανση (drying) και την έψηση (firing) των κεραμικών υλικών.

### 1.1.2. Ξήρανση

Μετά την μορφοποίηση του, το κεραμικό υλικό περιέχει υγρασία, υπολείμματα οργανικών λιπαντικών ουσιών και φυσαλίδες, που θα πρέπει να απομακρυνθούν από την μάζα του, γιατί μειώνουν την μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος.

Κατά την ξήρανση, οι διαστάσεις του κεραμικού μεταβάλλονται σημαντικά, κυρίως στην πρώτη φάση, λόγω της σημαντικής απομάκρυνσης του νερού από την κεραμική μάζα. Η συστολή του υλικού τερματίζεται όταν οι κόκκοι έρχονται σε επαφή. Σε αυτή την περίπτωση, μετά από περίπου 72 ώρες, το νερό εντοπίζεται μόνο στους πόρους του υλικού. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4, ενώ η συστολή του υλικού σταματάει μετά από κάποιο σημείο, η ποσότητα του νερού συνεχίζει να μειώνεται. Η θερμοκρασία και ο ρυθμός απομάκρυνσης της υγρασίας πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, ώστε να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παραμένουσες τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μικρορωγμές.



Σχήμα 1.4 Διάγραμμα Bourry

### 1.1.3. Έψηση

Προκειμένου να μετατραπεί η μορφοποιημένη πρώτη ύλη σε ένα ανθεκτικό τελικό προϊόν, υφίσταται κατεργασία σε υψηλή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της έψησης (firing) αυξάνεται προοδευτικά η πυκνότητα και το υλικό συρρικνώνεται με ταυτόχρονη μείωση του πορώδους. Το στάδιο της έψησης των κεραμικών καλείται και πυροσυσσωμάτωση (sintering), λόγω της βασικής μεταλλουργικής διεργασίας που πραγματοποιείται σε αυτό.

Πυροσυσσωμάτωση είναι η διεργασία κατά την οποία επέρχεται δομική διασύνδεση των επιμέρους συστατικών ενός κεραμικού συστήματος κατά την έψηση, με ταυτόχρονη μεταβολή στο σχήμα και το μέγεθος των πόρων. Η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης κεραμικών κόνεων είναι από 0,7 ως 0,75 της χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης των συστατικών της κεραμικής σκόνης, όταν η πυροσυσσωμάτωση γίνεται σε στερεή κατάσταση. Σημαντικό ρόλο παίζει και η ατμόσφαιρα του φούρνου όπου πραγματοποιείται η πυροσυσσωμάτωση. Γενικά, η έψηση κεραμικών οξειδίων μπορεί να πραγματοποιηθεί στον αέρα, ενώ για τα μη οξειδία απαιτείται συνήθως ειδική ατμόσφαιρα.

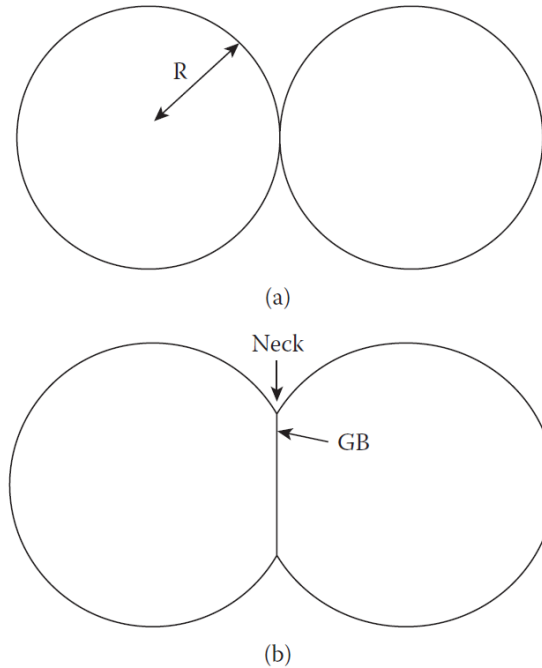
Για τον ακριβή καθορισμό των παραμέτρων έψησης (θερμοκρασία, χρόνος, ατμόσφαιρα θαλάμου) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η χημική σύσταση και η καθαρότητα των πρώτων υλών, η κοκκομετρία και το σχήμα των κόκκων, καθώς επίσης και το ποσοστό του πορώδους που επιδιώκεται για το τελικό προϊόν.

Κατά την πυροσυσσωμάτωση, λαμβάνει χώρα η σύνδεση μεταξύ των σωματιδίων. Προκειμένου να διευκολυνθεί αυτή η σύνδεση εισάγονται πρόσθετα. Εάν τα σωματίδια έχουν διαφορετικά μεγέθη, υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής, και, επομένως, η πυροσυσσωμάτωση έχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Όταν τα σωματίδια της σκόνης έχουν το ίδιο μέγεθος, η μέγιστη πυκνότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι 74%, ενώ εάν υπάρχουν και μικρότερα σωματίδια, τα διάκενα θα πληρωθούν περισσότερο και η πυκνότητα θα αυξηθεί.

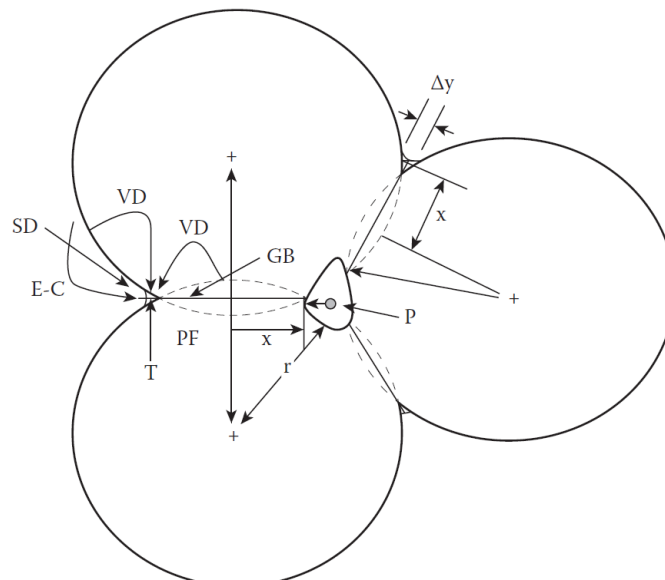
Τα κεραμικά υλικά είναι περισσότερο ασυμπίεστα από τα μεταλλικά. Κατά την συμπίεση, τα μεταλλικά σωματίδια παραμορφώνονται πλαστικά και οι καμπυλωμένες επιφάνειές τους ευθυγραμμίζονται. Στα κεραμικά υλικά, η συμπίεση επιτυγχάνεται από την κατάρρευση των

μεγαλύτερων σωματιδίων. Επειδή δεν υφίσταται πεπλατυσμός των επιφανειών, αυτές διατηρούν σε μεγάλο βαθμό την καμπυλότητα της επιφάνειάς τους. Φυσικά, κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης, υπάρχει η τάση πεπλατυσμού της επιφάνειας των κόκκων, η οποία δημιουργείται λόγω της διαφοράς πίεσης μέσα και έξω από τους κόκκους. Για μικρά σωματίδια (κόκκους), η διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη.

Για την κατανόηση του φαινομένου της πυροσυσσωμάτωσης, θεωρούνται δύο σφαιρικοί κόκκοι σε επαφή (Σχήμα 1.5).



**Σχήμα 1.5 Η δημιουργία λαιμού κατά την πυροσυσσωμάτωση**

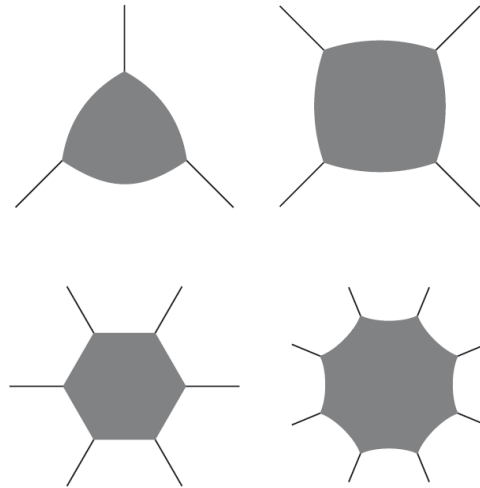


**Σχήμα 1.6 Χαρακτηριστικά μεγέθη πυροσυσσωμάτωσης**

Κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης εμφανίζονται δύο μεγέθη, εκείνο της ακτίνας  $x$  του

“λαιμού”, ο οποίος εμφανίζεται στην περιοχή επαφής των κόκκων και εκείνο της ακτίνας  $\rho$  του Σχήματος 1.6 που προκύπτει από την πυροσυσσωμάτωση περισσότερων από δύο κόκκων. Έτσι, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της διάχυσης. Όσο περισσότερο αναπτύσσεται ο “λαιμός”, τόσο η επιφάνεια επαφής μεταξύ των κόκκων τείνει να εξαφανιστεί.

Το Σχήμα 1.7 παρουσιάζει την πυροσυσσωμάτωση υλικών με διαφορετικά μεγέθη. Όσο μεγαλύτερους κόκκους έχει το υλικό, τόσο μεγαλύτερο αριθμό πλευρών έχουν οι κόκκοι. Όταν ο αριθμός των πλευρών είναι μεγαλύτερος από έξι, τότε η επιφάνεια του πόρου είναι κοίλη, ενώ όταν είναι μικρότερος από έξι, η επιφάνεια του πόρου είναι κυρτή.



**Σχήμα 1.7 Η επίδραση του αριθμού των κόκκων στην κυρτότητα των επιφανειών**

Η διαφορά πίεσης που υπάρχει μέσα και έξω από την επιφάνεια του κόκκου δημιουργεί διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια:

$$\Delta G = \frac{2\gamma V}{r} \quad (1.1)$$

όπου  $V$  είναι ο όγκος των μορίων του κεραμικού υλικού,  $\gamma$  είναι η επιφανειακή ενέργεια των κόκκων και  $r$  είναι η ακτίνα των κόκκων.

Λόγω της διαφοράς στην ελεύθερη ενέργεια, τα όρια του κόκκου τείνουν να μετακινηθούν προς το κέντρο της καμπυλότητας. Στους κόκκους που έχουν κυρτή επιφάνεια, το κέντρο καμπυλότητας βρίσκεται εντός του κόκκου και, επομένως, ο κόκκος υφίσταται συρρίκνωση, κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης. Το αντίστροφο συμβαίνει στην περίπτωση που οι κόκκοι έχουν περισσότερες από έξι πλευρές, και, επομένως, η επιφάνεια καμπυλότητας είναι κοίλη. Σε αυτή την περίπτωση, οι κόκκοι έχουν την τάση να διασταλούν.

Στην περίπτωση μικρών κόκκων, η επιφάνειά τους ανά όγκο είναι μεγαλύτερη. Επειδή το σύστημα τείνει να μειώσει την ολική ενέργεια που έχει, προκειμένου να φθάσει σε μία κατάσταση μικρότερης ενέργειας, τείνει να εξαλείψει τους μικρότερους κόκκους και να διαστείλει περισσότερο τους μεγαλύτερους κόκκους.

Ο βαθμός μετακίνησης του ορίου εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας και από τον βαθμό διάχυσης των ατόμων στα όρια των κόκκων. Όσο η ακτίνα καμπυλότητας μειώνεται, ο βαθμός μετακίνησης αυξάνεται.

Η εξάρτηση της ανάπτυξης του λαιμού από το φαινόμενο της διάχυσης παρουσιάζεται από την



παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{x}{r} = \left( \frac{40\gamma a^3 D^*}{kT} \right)^{\frac{1}{5}} r^{\frac{3}{5}} t^{\frac{1}{5}} \quad (1.2)$$

όπου  $x$  είναι ο λαιμός της καμπυλότητας σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ ,  $a^3$  ο όγκος του κενού,  $D^*$  ο συντελεστής διάχυσης,  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.

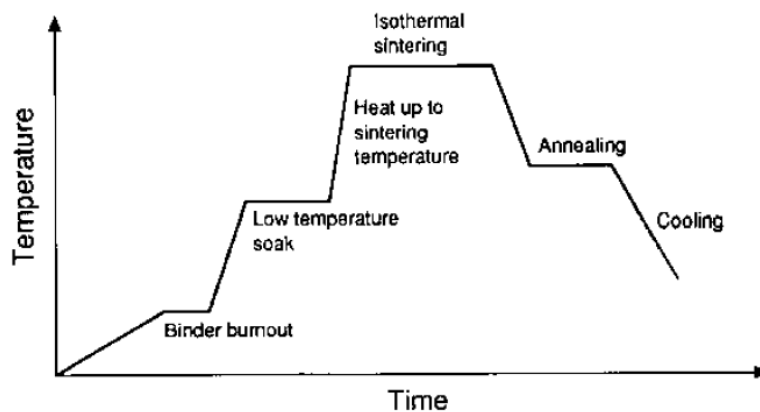
Επίσης, η συρρίκνωση μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3 \frac{\Delta L}{L_0} = 3 \left( \frac{20\gamma a^3 D^*}{2\sqrt{kT}} \right)^{\frac{2}{5}} r^{\frac{6}{5}} t^{\frac{2}{5}} \quad (1.3)$$

όπου  $\Delta V$  είναι η συρρίκνωση σε χρόνο  $t$ ,  $V_0$  ο αρχικός όγκος και  $\Delta L$  η μεταβολή της απόστασης των κέντρων των κόκκων.

#### 1.1.4. Πρόγραμμα έψησης

Μία προσέγγιση του προγράμματος έψησης (*heating schedule*) δίνεται στο Σχήμα 1.7



Σχήμα 1.7 Τυπικό πρόγραμμα έψησης κεραμικών υλικών

##### 1<sup>ο</sup> Στάδιο – Binder burnout

Σε αυτό το στάδιο αποβάλλεται το νερό. Η άνοδος της θερμοκρασίας συνήθως είναι αργή και ελεγχόμενη, συχνά  $< 2 \text{ }^\circ\text{C/min}$ , μέχρι τον βρασμό και την εξάτμιση των οργανικών πρόσθετων, φθάνοντας ακόμη και σε ρηγμάτωση του τεμαχίου. Μία τυπική θερμοκρασία σε αυτό το στάδιο είναι  $400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

##### 2<sup>ο</sup> Στάδιο – Low-temperature soak

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την χημική ομογενοποίηση και την αλληλεπίδραση των κόκκων του τεμαχίου. Η θερμοκρασία σε αυτό το στάδιο είναι αρκετά κάτω από την θερμοκρασία της πυροσυσσωμάτωσης.

##### 3<sup>ο</sup> Στάδιο – Heat-up to the sintering temperature

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την θέρμανση μέχρι την θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης. Η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας εξαρτάται από το μέγεθος και τα θερμικά χαρακτηριστικά του κλιβάνου. Για μεγαλύτερα τεμάχια, η διάρκεια αυτού του σταδίου μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες,

προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας στο τεμάχιο και, επομένως, αστοχία του υλικού (cracking).

#### 4<sup>ο</sup> Στάδιο – *Isothermal sintering*

Η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης επιλέγεται όσο το δυνατόν χαμηλότερη, προκειμένου να επιτύχουμε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά σε λογικό χρόνο (λιγότερο από 24h). Υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε γρηγορότερη διεργασία και, επομένως, το υλικό θα υποστεί αφύσικη ανάπτυξη των κόκκων και μεγάλα πορώδη.

#### 5<sup>ο</sup> Στάδιο – *Annealing*

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την ελεγχόμενη ψύξη του υλικού με ταυτόχρονη αποφυγή των παραμενουσών τάσεων.

#### 6<sup>ο</sup> Στάδιο – *Cool down to room temperature*

Η διάρκεια αυτού του σταδίου εξαρτάται από το μέγεθος του τεμαχίου. Για μικρά τεμάχια, η διάρκεια μπορεί να είναι αρκετά μικρή, ενώ για μεγάλα αυξάνεται ιδιαίτερα, προκειμένου να αποφύγουμε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας στο τεμάχιο και άρα την αστοχία του.

Τα πιο διαδεδομένα κεραμικά υλικά είναι η αλουμίνα, το καρβίδιο και το νιτρίδιο του πυριτίου, η ζirkονία και η τιτανία. Στο παράρτημα Β επισυνάπτονται κάποιοι ενδεικτικοί θερμοκοί κύκλοι.

## 1.2. Κλίβανοι χύτευσης κεραμικών υλικών

Η θερμικές κατεργασίες των κεραμικών υλικών πραγματοποιούνται σε ειδικούς κλιβάνους, αφού απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Ενδεικτικά για τα παραπάνω υλικά, ο κλίβανος χρειάζεται να θερμαίνεται στους 1800 °C. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζονται ορισμένες προδιαγραφές κλιβάνου χύτευσης κεραμικών υλικών του εμπορίου.

<b>BLF 18/21</b>	
Max temp (°C)	1800
Configuration	Floor-standing
Volume (litres)	21
Heat-up time (mins)	220
Dimensions: Internal H x Diameter (mm)	300 x 300
Dimensions: External H x W x D (mm)	1850 x 1250 x 900
Max power (W)	12000
Thermocouple type	Pt20%Rh/Pt40%Rh
Weight (kg)	600

**Σχήμα 1.8 Κλίβανος εμπορίου (CM Furnaces)**

Αντίστοιχα, το μοντέλο HT 40/18 της Nabertherm με εσωτερικές διαστάσεις 300 x 300 x 350 mm<sup>2</sup> έχει μέγιστη ισχύ 12 kW, ζυγίζει 380 kg και κοστίζει 46.000 ευρώ (Σχήμα 1.9).



**Σχήμα 1.9 Μοντέλο HT 40/18 της Nabertherm**

### 1.3 Θερμικές διεργασίες σε μεταλλικά υλικά

Η σχεδίαση του κλιβάνου αφορά κατά βάση κεραμικά υλικά. Ωστόσο, μπορούμε να επεκτείνουμε τις δυνατότητες του φούρνου και σε μεταλλικά υλικά, αφού οι αντίστοιχες θερμοκρασίες έψησης τους είναι χαμηλότερες από αυτές των κεραμικών. Γι' αυτό το λόγο θα προβλεφθούν και θερμικές κατεργασίες για χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διεργασίες για έναν ενδεικτικό εργαλειοχάλυβα, τον Sverker 21:

Temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)	400°C (750°F)
Density, kg/m <sup>3</sup> lbs/in <sup>3</sup>	7 700 0,277	7 650 0,276	7 600 0,275
Coefficient of thermal expansion – at low temperature tempering per °C from 20°C per °F from 68°F	– –	12.3 x 10 <sup>-6</sup> 6.8 x 10 <sup>-6</sup>	– –
– at high temperature tempering per °C from 20°C per °F from 68°F	– –	11.2 x 10 <sup>-6</sup> 6.2 x 10 <sup>-6</sup>	12 x 10 <sup>-6</sup> 6.7 x 10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity W/m °C Btu in/ft <sup>2</sup> h °F	20,0 139	21,0 146	23,0 159
Modulus of elasticity MPa ksi	210 000 30 450	200 000 29 000	180 000 26 100
Specific heat J/kg °C Btu/lb°F	460 0.110	– –	– –

**Σχήμα 1.10 Φυσικές ιδιότητες του Sverker 21**

Typical analysis	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	1.55	0.3	0.4	11.3	0.8	0.8
Standard specification	AISI D2, W.-Nr. 1.2379					
Delivery condition	Soft annealed to approx. 210 HB					
Colour code	Yellow/white					

Σχήμα 1.11 Χημική ανάλυση του Sverker 21

### 1.3.1. Θερμικές κατεργασίες

#### Ανόπτηση

Ο χάλυβας θερμαίνεται μέχρι τους 800 °C. Στη συνέχεια, ψύχεται κατά 10 °C ανά ώρα μέχρι τους 650 °C και μετά ελεύθερα στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

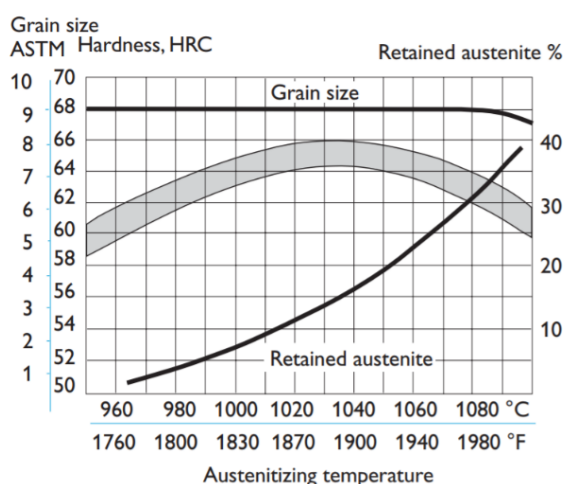
#### Αποκατάσταση των τάσεων

Ύστερα από μία μηχανουργική μορφοποίηση, ο χάλυβας χρειάζεται να θερμανθεί μέχρι τους 650 °C και να διατηρηθεί σε αυτήν την θερμοκρασία για 2 ώρες. Στη συνέχεια, ψύχεται αργά μέχρι τους 500 °C και μετά ελεύθερα στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### Εμποτισμός

Θερμοκρασία προθέρμανσης: 650 – 750 °C.

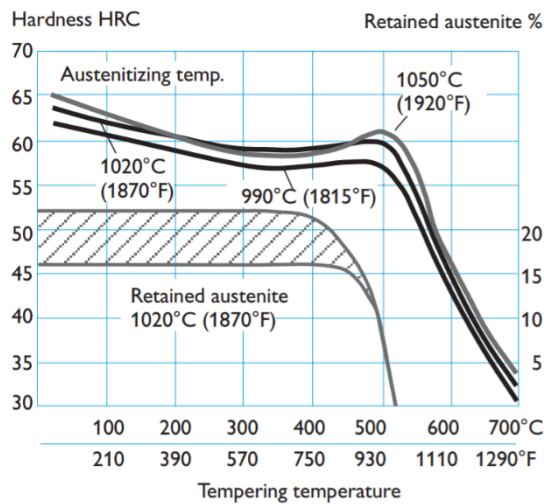
Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης: 990 – 1050 °C.



Σχήμα 1.12 Η επίδραση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης την επιφανειακή σκληρότητα

#### Επαναφορά

Χρειάζεται να επιλεγεί η θερμοκρασία επαναφοράς από το αντίστοιχο διάγραμμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο φορές με ενδιάμεση ψύξη στην θερμοκρασία δωματίου. Ελάχιστη θερμοκρασία επαναφοράς: 180 °C. Η θερμοκρασία επαναφοράς να διατηρηθεί για τουλάχιστον δύο ώρες.



**Σχήμα 1.13 Διάγραμμα επαναφοράς**

### Εναζώτωση

Η εναζώτωση δίνει στο υλικό μια αρκετά σκληρή επιφάνεια, που είναι πολύ ανθεκτική στην φθορά και την διάβρωση. Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση του χρόνου εναζώτωσης στην σκληρότητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Για θερμοκρασία 525 °C, η επιφανειακή σκληρότητα ανέρχεται στα 1250 HV<sub>1</sub>.

Nitriding temperature		Depth of case Nitriding time hours	approx.	
°C	°F		mm	in
525	980	20	0.25	0.010
525	980	30	0.30	0.012
525	980	60	0.35	0.014

**Σχήμα 1.14 Η επίδραση του χρόνου εναζώτωσης στην σκληρότητα της επιφάνειας**

Επίσης, 2 ώρες εναζώτωσης στους 570 °C καθιστούν την επιφάνεια με σκληρότητα 950 HV<sub>1</sub>. Το βάθος σκλήρυνσης είναι 10 – 20 μm.

## 2. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κλιβάνου

Η παρούσα εργασία έχει στόχο τον σχεδιασμό ενός κλιβάνου χύτευσης κεραμικών υλικών για το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών Ε.Μ.Π. στα πλαίσια ανάπτυξης της ιδέας κατασκευής οδοντωτών τροχών από κεραμικά υλικά. Συνεπώς, οι εσωτερικές διαστάσεις του φούρνου επιλέγονται να είναι 300 x 300 x 300 mm<sup>2</sup>. Με δεδομένα τις εσωτερικές διαστάσεις του κλιβάνου και τα επιθυμητά διαγράμματα έψησης ξεκινάει η διαδικασία σχεδιασμού του κλιβάνου.

### 2.1. Αντιστάσεις (electric heating elements)

Επιλέγεται να σχεδιαστεί κλίβανος με ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία, έναντι των υπολοίπων τύπων κλιβάνων. Στο παρόν κεφάλαιο θα υπολογιστούν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις και θα επιλεγεί η κατάλληλη από τις ήδη υπάρχουσες του εμπορίου.

Τα δεδομένα είναι ότι η θερμοκρασία του τεμαχίου, που θα υποστεί την κατεργασία της έψησης, και επομένως, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φούρνου χρειάζεται να φθάνει τους 1800 °C. Έπειτα από έρευνα σε εταιρείες που παράγουν αντίστοιχες αντιστάσεις, παρατηρούμε ότι οι αντιστάσεις που ξεπερνούν την επιθυμητή θερμοκρασία κατασκευάζονται από διπυριτικό μολυβδαίνιο (MoSi<sub>2</sub>).

#### 2.1.1. Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες

Το διπυριτικό μολυβδαίνιο αποτελεί μία καλή επιλογή, αφού συνδυάζει καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αντίσταση σε διάβρωση και αντοχή σε θερμικό σοκ.

Η αντίσταση του διπυριτικού μολυβδαινίου αυξάνεται απότομα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι όταν τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σταθερή τάση, η απαιτούμενη ισχύς θα είναι μεγαλύτερη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος για να φθάσει ο φούρνος την επιθυμητή θερμοκρασία. Επιπλέον, όσο η ισχύς των θερμαντικών στοιχείων ελαττώνεται, η πιθανότητα υπερθέρμανσης μειώνεται.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του διπυριτικού μολυβδαινίου.

<b>Mechanical and physical properties MoSi<sub>2</sub></b>	
Tensile strength at 1550 °C	100 MPa
Bending strength at 20 °C	450 MPa
Compression strength at 20 °C	1400-1500 MPa
Fracture toughness at 20 °C	3-4 Mpa m <sup>1/2</sup>
Hardness, HV, at 20 °C	9 GPa
Density	6,5 g/cm <sup>3</sup>
Thermal conductivity at 20-600 °C	30 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal conductivity at 600-1200 °C	15 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Coefficient of linear expansion	7-8 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Specific heat capacity at 20 °C	0,42 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Emissivity	0,70-0,80

**Πίνακας 2.1 Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες του MoSi<sub>2</sub>**

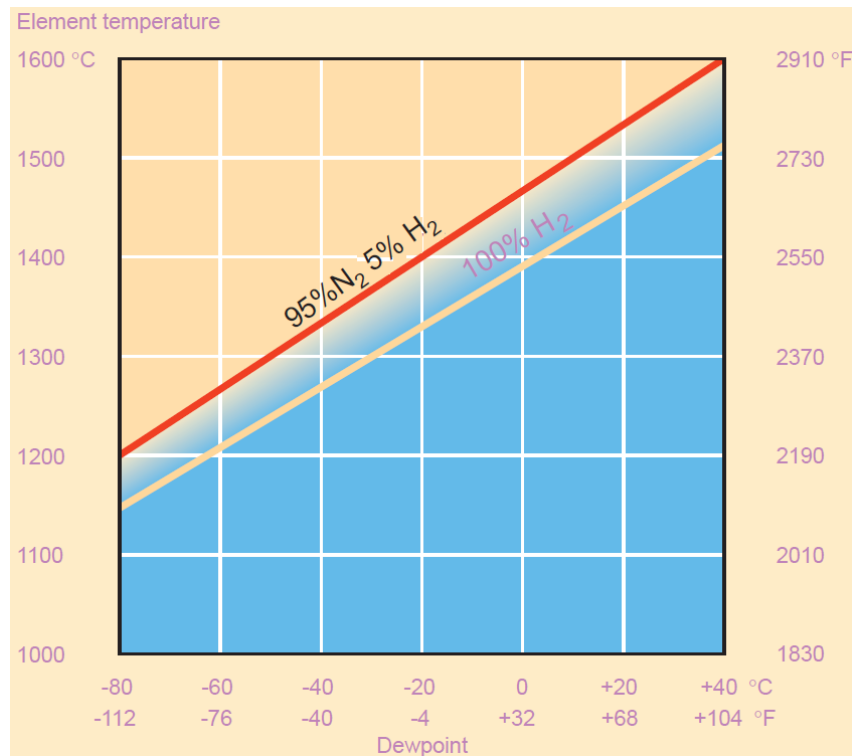
### 2.1.2. Χημική αντίσταση

Το διπυριτικό μολυβδαίνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα περιβάλλοντα κλιβάνων. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες για διάφορα περιβάλλοντα κλιβάνων.

Στον αέρα, στις χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου στους 500 °C) λαμβάνει χώρα η οξείδωση του μολυβδαινίου στην επιφάνεια των θερμαντικών στοιχείων. Τα παράγωγα της οξείδωσης είναι μία κιτρινωπή σκόνη,  $M_2O_3$ , η οποία όμως δεν επηρεάζει την λειτουργία των αντιστάσεων. Επίσης, σε περιβάλλον υγρασίας και διοξειδίου του άνθρακα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της οξείδωσης. Το διοξείδιο του θείου δεν εμποδίζει την ομαλή λειτουργία των θερμαντικών στοιχείων. Σε περιβάλλον ενανθρακωτικού μέσου, θερμοκρασίες πάνω από 1400 °C θα οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού. Σε κάθε περίπτωση ο άνθρακας θα πρέπει να αφαιρείται από την επιφάνεια των αντιστάσεων, λειτουργώντας τον φούρνο σε οξειδωτικό περιβάλλον. Σε περιβάλλον αζώτου, θερμοκρασίες άνω των 1250 °C μπορούν να προκαλέσουν αντίδραση του πυριτίου των αντιστάσεων με το άζωτο, δημιουργώντας σταδιακά φθορά (η οποία ελαττώνεται αρκετά, αν στις αντιστάσεις έχει προηγηθεί θερμική κατεργασία). Σε θερμοκρασίες κάτω από 1250 °C, η αντίστοιχη φθορά είναι ελάχιστη. Σε θερμοκρασίες από 1500 °C μέχρι 1800 °C, η συμπεριφορά θερμαντικών αυτών στοιχείων εξαρτάται από το σημείο δρόσου και την διάρκεια της κατεργασίας. Επίσης, το διπυριτικό μολυβδαίνιο αντιδρά με το υδρογόνο, ανάλογα με την θερμοκρασία του στοιχείου και το σημείο δρόσου. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του στοιχείου σε σχέση με το σημείο δρόσου για περιβάλλοντα αζώτου.

Atmosphere	°C
Air	1850
Nitrogen	1800
Argon, Helium	1800
Dry hydrogen	1150
Moist hydrogen	1450
Ammonia	1400

**Πίνακας 2.2 Μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες σε διάφορα περιβάλλοντα**



**Σχήμα 2.1 Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του στοιχείου σε περιβάλλον υδρογόνου**

### 2.1.3. Επιλογή αντιστάσεων

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι εκείνες με τα δύο στελέχη. Υπάρχουν και αντιστάσεις με τέσσερα στελέχη ή άλλες διαμορφώσεις, οι οποίες όμως χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις επιθυμητές. Επιπλέον, οι αντιστάσεις με δύο στελέχη μπορούν να καμφθούν στις 45° ή στις 90°, σε περίπτωση που δεν υπάρχει χώρος για τις αντιστάσεις πάνω από τον φούρνο.

Οι αντιστάσεις με τα δύο στελέχη προσδιορίζονται από (Σχήμα 2.2):

- Την μέγιστη θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου
- Την διάμετρο  $d$  της θερμικής ζώνης
- Την διάμετρο  $D$  των ακροδεκτών
- Το μήκος  $L_e$  της θερμικής ζώνης
- Το μήκος  $L_u$  των ακροδεκτών
- Την απόσταση των κέντρων των δύο στελεχών  $a$ .

Τα δεδομένα για τον προσδιορισμό των αντιστάσεων είναι η επιθυμητή θερμοκρασία του φούρνου

$T_f = 1800\text{ }^\circ\text{C}$  και οι διαστάσεις του ωφέλιμου χώρου περίπου 300 x 300 x 300 mm.

Η ισχύς που χρειάζεται ο σχεδιαζόμενος φούρνος δεν είναι εξ αρχής γνωστή, αφού δεν υπάρχει υφιστάμενος φούρνος. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.3, η εκτιμώμενη ισχύς που απαιτείται είναι 11 kW.

Το μήκος των ακροδεκτών εξαρτάται από το πάχος της σχεδιαζόμενης μόνωσης:

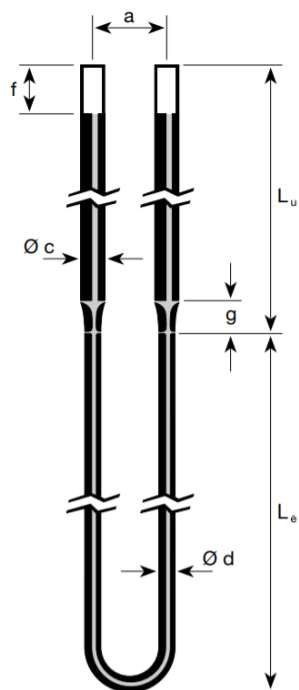
$$L_u = 300 + g = 315\text{ mm} \quad (2.1)$$

Το μήκος της θερμικής ζώνης υπολογίζεται

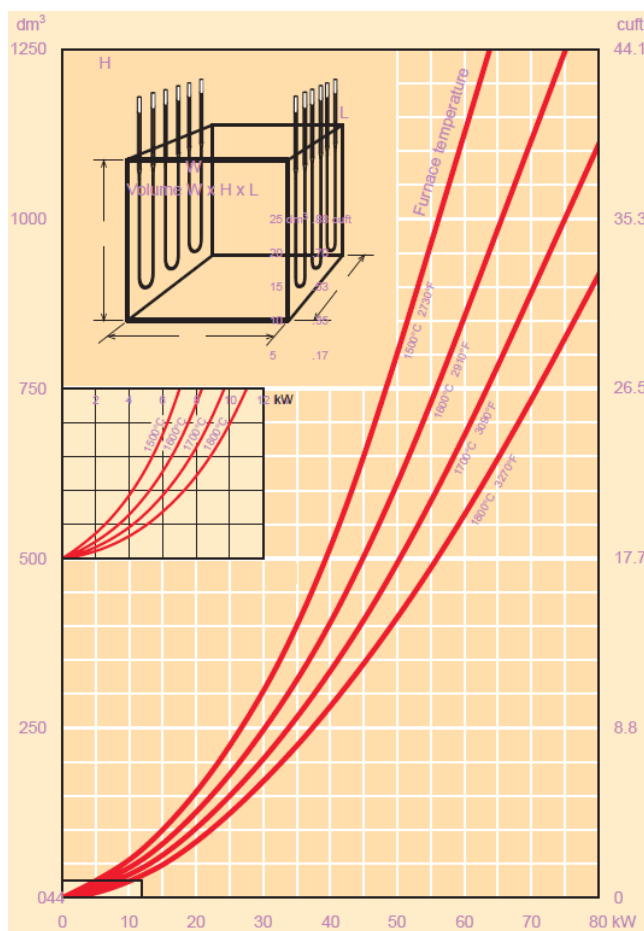
$$L_{e\max} = 0.95 H - g = 0.95 \cdot 300 - 15 = 284.25\text{ mm} \quad (2.2)$$



Επομένως, επιλέγεται από τις τυποποιημένες αντιστάσεις, εκείνη που είναι πιο κοντά στον παραπάνω υπολογισμό, άρα  $L_e=280$  mm.



Σχήμα 2.2 Βασικές διαστάσεις



Σχήμα 2.3 Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος για δεδομένο όγκο φούρνου

Από τις τυποποιημένες αντιστάσεις του εμπορίου, επιλέγονται εκείνες με διαμέτρους 4/9. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι διαστάσεις για τα διάφορα μεγέθη των αντιστάσεων.

Element size	a, mm		c, mm	d, mm	f, mm	g, mm
	Stand.	Min.				
3/6	25	16	6	3	25	15
4/9	25	19	9	4	25	15
6/12	50	26	12	6	45	25
9/18	60	38	18	9	75	30
12/24	80	54	24	12	100	40

**Πίνακας 2.3 Σύγκριση διαστάσεων για τα διάφορα μεγέθη των αντιστάσεων**

Επιλέγεται ο αριθμός των αντιστάσεων να είναι 12. Επομένως, η επιθυμητή ισχύς κάθε αντίστασης είναι

$$P_e = \frac{P}{n} = \frac{11}{12} = 0.917 \text{ kW} \quad (2.3)$$

Το επιφανειακό θερμικό φορτίο είναι

$$p = \frac{P_e}{P_{e,tab}} P_{tab} = \frac{917}{905} \cdot 10.7 = 10.8 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \quad (2.4)$$

όπου  $P_{tab}=10.7 \text{ W/cm}^2$  είναι το επιφανειακό θερμικό φορτίο για  $P_{e, tab}=905 \text{ W}$ .

Η μέγιστη θερμοκρασία του κλιβάνου υπολογίζεται από το Σχήμα 2.4 για επιφανειακό φορτίο  $10.8 \text{ W/cm}^2$ ,  $T_f = 1820 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Το συνολικό μήκος της θερμικής ζώνης είναι

$$L_H = \frac{2L_e + 20 + 0.57a - d}{1000} = 0.59 \text{ m} \quad (2.5)$$

Το συνολικό μήκος των ακροδεκτών είναι

$$L_T = \frac{2L_u}{1000} = 0.63 \text{ m} \quad (2.6)$$

Άρα

$$r_e = \frac{(0.00261T_e - 0.255)}{d^2} = 0.286 \frac{\Omega}{\text{m}} \quad (2.7)$$

$$r_u = \frac{(0.00183T_f - 0.255)}{D^2} = 0.038 \frac{\Omega}{\text{m}} \quad (2.8)$$

Επομένως, η ηλεκτρική αντίσταση στη μέγιστη θερμοκρασία είναι

$$R_t = r_e L_H + r_u L_T = 0.192 \text{ } \Omega \quad (2.9)$$

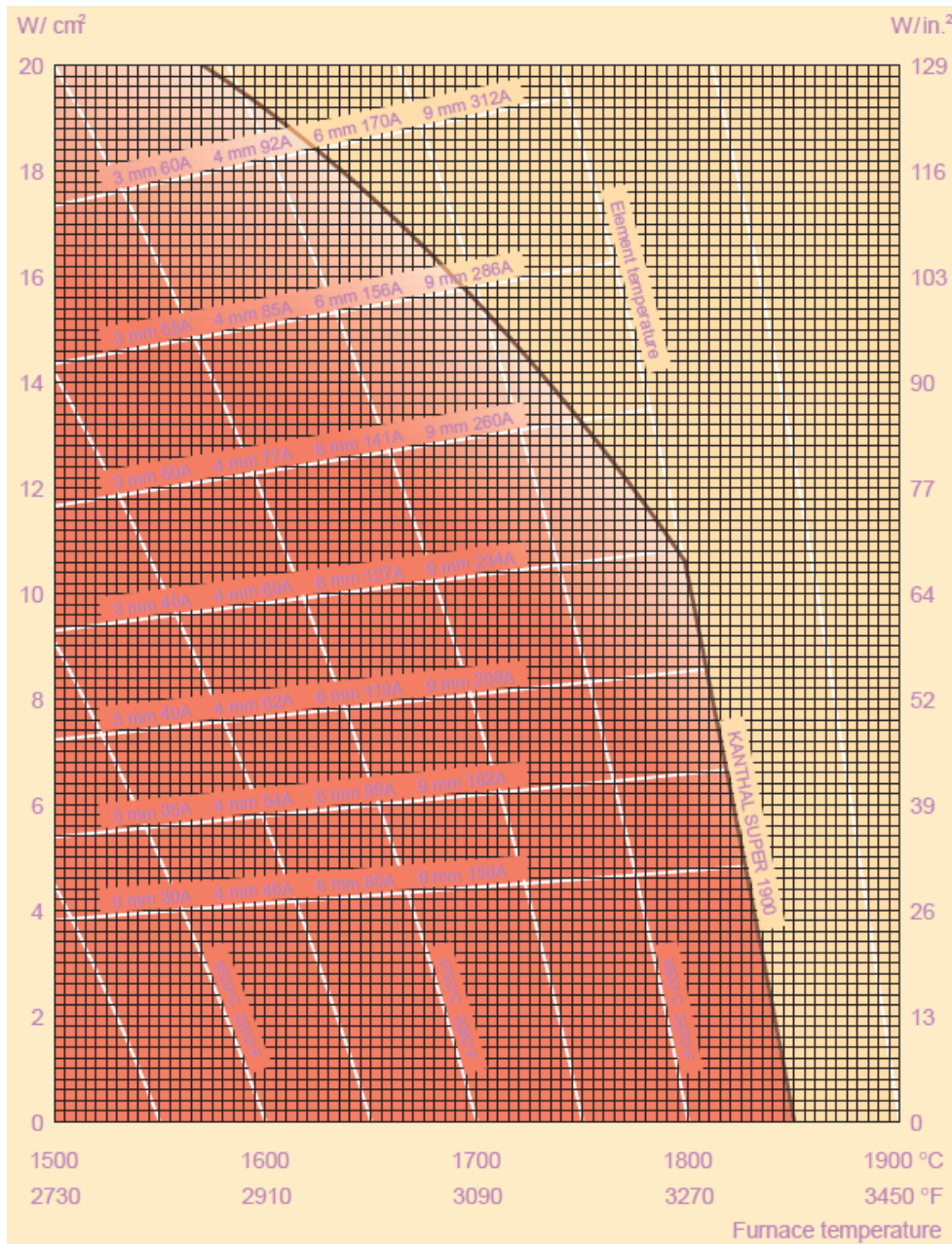
και αντίστοιχα η τάση, το ρεύμα και η ισχύς προκύπτουν τελικά

$$U_e = \sqrt{P_e R_t} = 13.2 \text{ V}$$

$$I = \frac{U_e}{R_t} = 69 \text{ A} \tag{2.10}$$

$$P_e = R_t I^2 = 916 \text{ W}$$

Επομένως, επαληθεύεται η ορθότητα των υπολογισμών.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας – θερμικού φορτίου

Να σημειωθεί ακόμα ότι η επιλογή των μεγεθών και του αριθμού των αντιστάσεων ελέγχθηκε, ώστε να είναι η βέλτιστη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μικρότερη διάμετρος αντιστάσεων θα απαιτούσε περισσότερες αντιστάσεις, ενώ μεγαλύτερη διάμετρος δεν θα μπορούσε να καλύψει την ενεργειακή ανάγκη, αφού γεωμετρικά δεν θα χωρούσαν πάνω από δύο αντιστάσεις σε κάθε πλευρά.

Οι αποστάσεις από τον τοίχο είναι

$$e = 15 \text{ mm} \quad \text{for } L_e < 300 \text{ mm}$$

$$E = e + \frac{A-a}{2} = 22.5 \text{ mm} \quad (2.11)$$

όπου  $A/a=1.6$

Η απόσταση της αντίστασης από το κάτω μέρος του φούρνου είναι  $h_{\min} = 10 \text{ mm}$ .

Η απόσταση των αντιστάσεων μεταξύ τους είναι  $b = 40 \text{ mm}$ .

#### 2.1.4. Ηλεκτρονικός εξοπλισμός

Οι αντιστάσεις μπορούν να συνδεθούν σε σειρά σε μία φάση, αφού πρόκειται για έναν σχετικά μικρό φούρνο.

Η τάση του μετασχηματιστή στο δευτερεύον τύλιγμα θα είναι:

$$U_{tot} = U_e n = 13.2 \cdot 12 = 158.4 \text{ V} \quad (2.12)$$

Αφού η ηλεκτρική αντίσταση των θερμαντικών στοιχείων σε χαμηλή θερμοκρασία είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στην υψηλή θερμοκρασία, η τάση πρέπει να ελεγχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το ρεύμα που θα διαπερνά τα στοιχεία να μην υπερβαίνει τα 115 A.

Επομένως, η μέγιστη πιθανή ισχύς του φούρνου σε λειτουργία είναι:

$$P_{\max} = U_{tot} I_{\max} = 158.4 \text{ V} \cdot 115 \text{ A} = 18.2 \text{ kW} \quad (2.13)$$

Η τροφοδοσία του φούρνου αποτελείται από δύο γραμμές των 400 V ενός τριφασικού συστήματος.

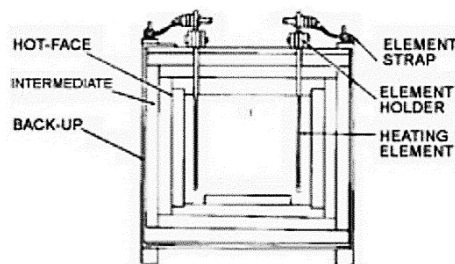
Άρα η μέγιστη ενεργή ένταση ρεύματος θα είναι :

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{U_{\text{supply}}} = 45.5 \text{ A} \quad (2.14)$$

Για τον έλεγχο ισχύος, η πρωτεύουσα πλευρά μιας μονάδας μονοφασικού θυρίστορ χρειάζεται να συνδεθεί με μέγιστη ενεργή ένταση ρεύματος 45.5 A (R.M.S.), ώστε να εξασφαλισθεί ομαλό ξεκίνημα του φούρνου.

#### 2.2. Μόνωση

Η μόνωση απαιτείται αφενός να αντέχει τις επιθυμητές θερμοκρασίες, αφετέρου να εξασφαλίζει στο εξωτερικό της στρώμα θερμοκρασία περίπου ίση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Οι αντίστοιχοι κλίβανοι του εμπορίου χρησιμοποιούν την αλουμίνα για μόνωση. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται τρεις με τέσσερις στρώσεις (ανάλογα με τις διαστάσεις) αλούμινα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5



### Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της μόνωσης

Η μόνωση μελετήθηκε για αλουμίνα Type AL-28/1800 στο υπολογιστικό πακέτο *Comsol Multiphysics* και διαπιστώθηκε ότι χρειάζονται τέσσερις στρώσεις αλουμίνα πάχους 50 mm για επιθυμητή εξωτερική θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αναπτύχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο στο περιβάλλον σχεδίασης *Solidworks* (Σχήμα 2.6) προκειμένου να συνεχιστεί η σχεδίαση.



### Σχήμα 2.6 Σχεδιασμός κλιβάνου με τέσσερις στρώσεις αλουμίνας

Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι κάθε στρώση αλουμίνας με πάχος 50 mm κοστίζει περίπου 1.600 ευρώ. Με δεδομένο ότι χρειάζονται 24 στρώσεις αλουμίνας, η μόνωση θα κοστίσει 38.400 ευρώ.

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει προσπάθεια αναζήτησης και μελέτης εναλλακτικών προτάσεων μόνωσης, όπως για παράδειγμα η χρήση κάποιου αερίου στη θέση της αλουμίνας.

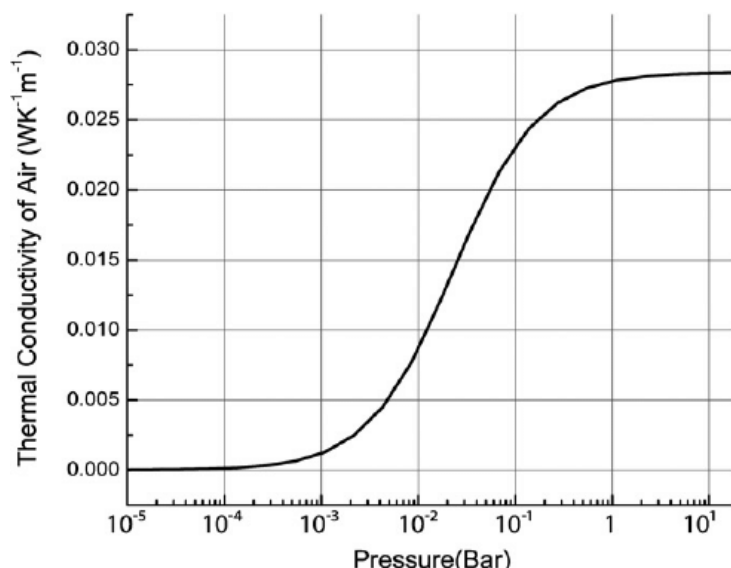
### 3. Μοντελοποίηση και Σχεδιασμός Κλιβάνου

Ο σκελετός του κλιβάνου σχεδιάζεται γύρω από το δοκίμιο και κύρια αποστολή έχει την διασφάλιση της επιτυχούς διεξαγωγής των θερμικών κατεργασιών που απαιτούνται κάθε φορά, ανάλογα με την εφαρμογή. Για να το πετύχει αυτό, θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε ο εσωτερικός του θάλαμος που φιλοξενεί το δοκίμιο να είναι σε θέση να φτάσει και να διατηρήσει τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασιών που ορίζονται από την κάθε κατεργασία, χωρίς ταυτόχρονα να είναι αναγκαία η δαπάνη μεγάλων ποσών ενέργειας ώστε αυτό να επιτευχθεί. Θα πρέπει λοιπόν να είναι σε θέση να προσφέρει θερμική μόνωση στον εσωτερικό θάλαμο, η οποία θα πρέπει να ελαχιστοποιεί κατά το δυνατόν τις απώλειες ενέργειας.

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, η σχεδιαστική λύση που προκρίθηκε για αναλυτικότερη μελέτη περιλαμβάνει την παρεμβολή κάποιου αερίου ή κενού μεταξύ των τοιχωμάτων για την θερμική μόνωση του κλιβάνου, με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του να μένει να προσδιοριστούν μέσα από τη διαδικασία της ανάλυσης που θα γίνει στο παρόν Κεφάλαιο. Η ανάλυση αυτή ξεκινάει με την μαθηματική μοντελοποίηση των θερμικών κατεργασιών που θα πρέπει να επιτελεί ο κλιβάνος, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας, λαμβάνοντας όμως υπόψιν τα τρισδιάστατα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κλιβάνου που σχεδιάζεται. Η μοντελοποίηση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση διάφορων σχεδιαστικών λύσεων με μικρό υπολογιστικό κόστος. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων γίνεται με την κατασκευή των αντίστοιχων μοντέλων σε ένα περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων, και συγκεκριμένα στο περιβάλλον που προσφέρει το υπολογιστικό πακέτο *COMSOL Multiphysics*.

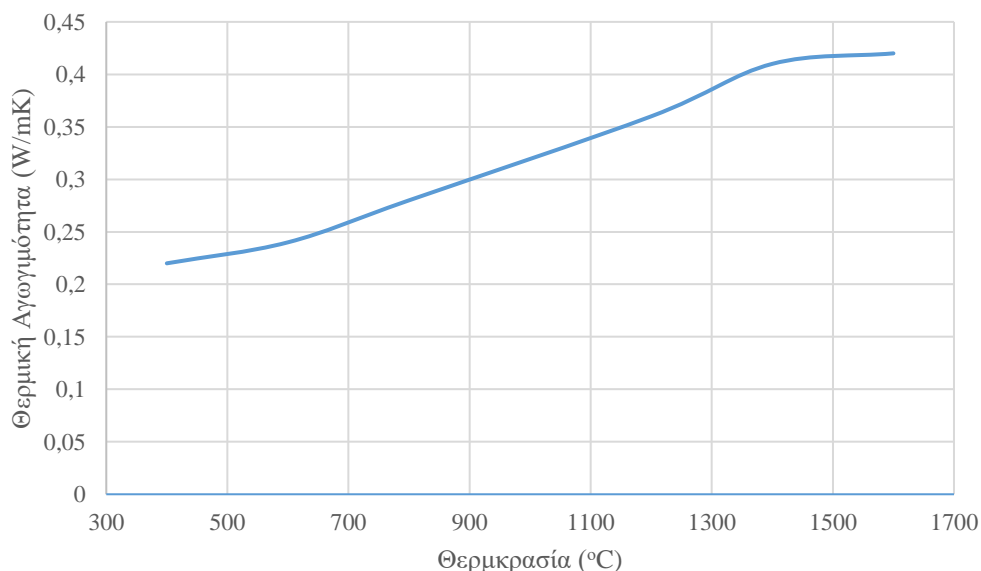
#### 3.1. Μοντελοποίηση συστήματος και φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας

Το βασικό πρόβλημα στη χρήση συμπαγών τοιχωμάτων για τη μόνωση κλιβάνων που φτάνουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες είναι η ανάγκη χρήσης εξειδικευμένων υλικών που διατηρούν τις ιδιότητές τους στις θερμοκρασίες αυτές, με αποτέλεσμα το κόστους τους να είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Μίας και η παράμετρος του κόστους είναι σημαντική για την παρούσα μελέτη, ως εναλλακτική λύση στην χρήση αποκλειστικά συμπαγών τοιχωμάτων είναι η ενδιάμεση παρεμβολή κάποιου αερίου με χαμηλή αγωγιμότητα, όπως είναι ο αέρας, ιδιαίτερα σε χαμηλότερες πιέσεις. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του αέρα για διάφορες τιμές της πίεσής του.



**Σχήμα 3.1 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα συναρτήσει της πίεσης [1]**

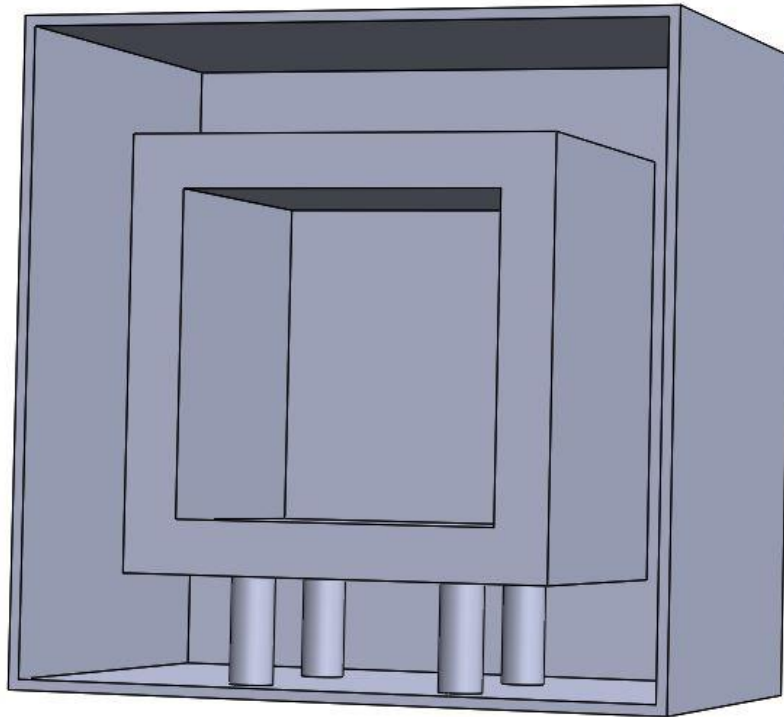
Από το Σχήμα 3.1 γίνεται φανερό πώς ο συντελεστής αγωγιμότητας του αέρα είναι σχετικά χαμηλός ήδη από την ατμοσφαιρική πίεση, ενώ πέφτει ραγδαία με την μείωση της πίεσης. Μπορεί λοιπόν να αντικαταστήσει έναν αριθμό στρώσεων συμπαγούς μόνωσης που χρησιμοποιείται στους συμβατικούς κλιβάνους. Δεν μπορεί όμως να τις υποκαταστήσει εντελώς, καθώς στον εσωτερικό θάλαμο του κλιβάνου, όπου θα βρίσκεται τα δοκίμια και θα αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες, πρέπει να υπάρχει μία στέρεη μόνωση που να είναι λειτουργική σε αυτές τις συνθήκες. Έτσι, για το πρώτο εσωτερικό στρώμα μόνωσης του κλιβάνου χρησιμοποιείται το κεραμικό υλικό AL-28/1800, που έχει ως βάση την αλούμινα και είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1800 °C. Οι φυσικές ιδιότητες του υλικού δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β, ενώ στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητάς του συναρτήσει της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 3.2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας**

Στο σημείο αυτό αρχίζουν να καταστρώνονται τα πρώτα σχέδια για την κατασκευή του κλιβάνου. Τα σχέδια αυτά επιλέγεται να είναι περισσότερο αφαιρετικά και με λιγότερες λεπτομέρειες, έτσι ώστε να διαμορφωθεί μια γρήγορη εικόνα για την πορεία του σχεδιασμού. Έτσι, ως ένας πρώτος σχεδιασμός,

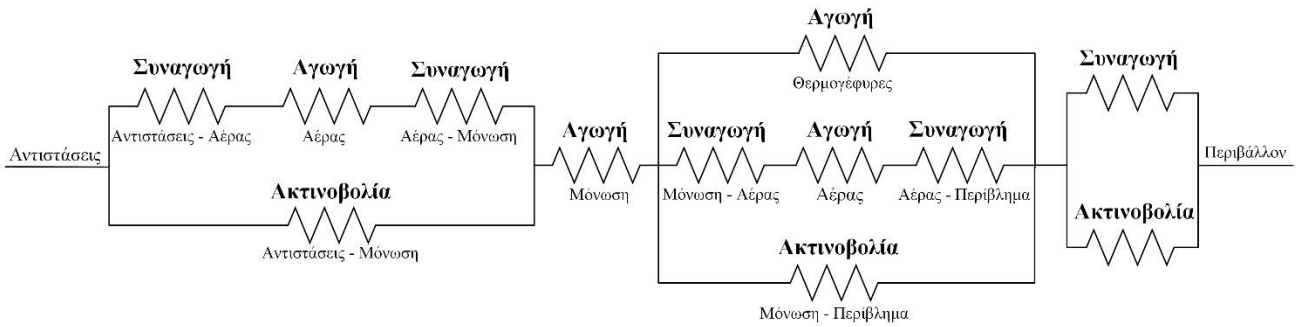
προτείνεται η μόνωση εσωτερικά του κλιβάνου με ένα περίβλημα αλούμινας, το οποίο ακολουθείται από ένα στρώμα αέρα σε υποπίεση και ολοκληρώνεται με ένα εξωτερικό περίβλημα από χάλυβα για την στερέωση του σκελετού του κλιβάνου. Η σύνδεση του εσωτερικού και του εξωτερικού στρώματος μόνωσης γίνεται με χρήση θερμογεφυρών. Σκοπός του σχεδιασμού αυτού είναι η κατάστρωση ενός πρώτου αναλυτικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας που θα διαπιστώσει το μέγεθος ορισμένων μεταβλητών του σχεδιασμού, όπως οι θερμικές απώλειες και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα διάφορα σημεία του κλιβάνου. Η γενική ιδέα του πρώτου αυτού σχεδιασμού αποτυπώνεται και γραφικά στο Σχήμα 3.3.



**Σχήμα 3.3** Πρώτος σχεδιασμός κλιβάνου

Ο κλιβανός του Σχήματος 3.3 μοντελοποιείται ως ένα θερμικό κύκλωμα, του οποίου η πηγή είναι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που με το φαινόμενο Joule εξασφαλίζουν την απαραίτητη θερμική ισχύ του συστήματος και αντιστάσεις είναι όλα τα επιμέρους τμήματά του. Το ηλεκτρικό ανάλογο του θερμικού συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Όπως γίνεται φανερό εκεί, η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον μέσω του σκελετού του κλιβάνου γίνεται με τρεις τρόπους: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Αν και το μοντέλο του Σχήματος 3.4 είναι μονοδιάστατο, εντούτοις στους μηχανισμούς της μεταφοράς θερμότητας λαμβάνονται υπόψιν οι τρισδιάστατες γεωμετρίες των επιμέρους στοιχείων, έτσι ώστε αυτό να αντικατοπτρίζει καλύτερα τα πραγματικά φαινόμενα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν και οι παραδοχές που έγιναν για κάθε μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας και συμπεριλήφθηκαν στο θερμικό μοντέλο.





**Σχήμα 3.4 Θερμικό κύκλωμα πρώτου σχεδιασμού κλιβάνου**

### 3.1.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

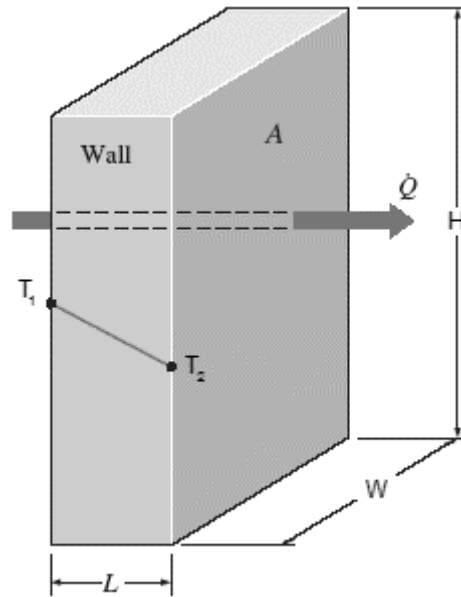
Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής λαμβάνει χώρα όταν προκύπτει θερμοκρασιακή διαφορά μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο. Είναι αποτέλεσμα της κινητικότητας των μορίων του και επηρεάζεται από το είδος του υλικού και τη γεωμετρία του. Αν η θερμοκρασία είναι συνάρτηση μίας διάστασης του χώρου τα φαινόμενα θερμότητας χαρακτηρίζονται ως μονοδιάστατα, αν είναι συνάρτηση δύο διαστάσεων ως δισδιάστατα και τριών ως τρισδιάστατα. Η εξίσωση του Fourier περιγράφει την θερμορροή που περνά ανά μονάδα χρόνου από τη στοιχειώδη επιφάνεια ισότροπου σώματος, σε στερεό επίπεδο σώμα στο οποίο λαμβάνει χώρα μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας παράλληλα προς τον άξονα  $x$  στη μονάδα του χρόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, και η οποία στη μονοδιάστατη περίπτωση εκφράζεται ως:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.15)$$

όπου  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Η πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q_x$  είναι κάθετη στην επιφάνεια που λαμβάνει χώρα η μετάδοση της θερμότητας. Το αρνητικό πρόσημο υποδεικνύει την αντίστροφη μεταβολή των δύο μεγεθών της θερμοκρασίας  $T$  και του μήκους  $x$ . Στην περίπτωση που η κατανομή της θερμοκρασίας στο επίπεδο σώμα είναι γραμμική, η εξίσωση (3.1) γράφεται ως εξής:

$$q_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.16)$$

όπου 1 και 2 οι ακραίες θέσεις του επίπεδου σώματος και  $L$  το πάχος αυτού.



**Σχήμα 3.5 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας**

Η μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, αν και τα αποτελέσματα που προσφέρει μπορεί να είναι πολύ χρήσιμα σε αρκετές περιπτώσεις, έχουν κάποιους προφανείς περιορισμούς, καθώς στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η διάδοση της θερμότητας γίνεται πολυδιάστατα. Στην περίπτωση που τα τοιχώματα του κλιβάνου ήταν λεπτά σχετικά με τις συνολικές διαστάσεις του, η παραδοχή της μονοδιάστατης ροής θερμότητας θα ήταν αρκετά κατάλληλη. Ωστόσο, μιας και για να επιτευχθεί ικανοποιητική μόνωση τα τοιχώματα του κλιβάνου έχουν σημαντικό πάχος, η ροή θερμότητας στις πλευρές του γίνεται δισδιάστατα, ενώ στις γωνίες που σχηματίζονται γίνονται τρισδιάστατα, με αποτέλεσμα η πραγματική ροή θερμότητας να αποκλίνει σημαντικά από εκείνη που προβλέπει το μονοδιάστατο μοντέλο μετάδοσής της.

Τα πολυδιάστατα προβλήματα σταθερής μετάδοσης θερμότητας, που δεν περιέχουν εσωτερικές πηγές ή καταβόθρες θερμότητας, περιγράφονται αναλυτικά από την εξίσωση του Laplace:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.17)$$

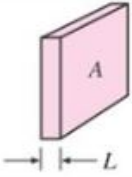
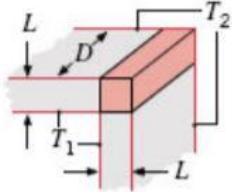
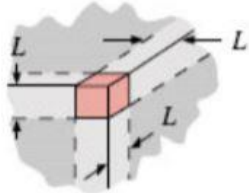
Στην περίπτωση όμως που θεωρηθεί πως κατά την διάδοση της θερμότητας μεταξύ δύο επιφανειών, η θερμοκρασία τους κατανέμεται ομοιόμορφα, το πολυδιάστατο πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε ένα αντίστοιχο μονοδιάστατο με την εισαγωγή ενός συντελεστή σχήματος (shape factor)  $S$  ως εξής [2]:

$$\dot{Q} = kS\Delta T \quad (2.18)$$

όπου  $k$  η θερμική αγωγιμότητα και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας των επιφανειών, κατά το πρότυπο της σχέσης (3.2). Όπως γίνεται φανερό, ο συντελεστής σχήματος  $S$  έχει διαστάσει μήκους. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με το μοντέλο της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας μπορεί να εκφραστούν χρησιμοποιώντας και την έννοια του συντελεστή σχήματος. Για παράδειγμα, για μία απλή πλάκα διατομής  $A$  πάχους  $L$ , ο συντελεστής σχήματος γίνεται  $S=A/L$  και αντικαθιστώντας στη σχέση (3.4) προκύπτει κανονικά η εξίσωση του Fourier (3.2), της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας. Οι συντελεστές σχήματος προκύπτουν αναλυτικά ή πειραματικά και σε ένα θερμικό σύστημα όταν η τρισδιάστατη γεωμετρία του είναι πολύπλοκη, οι διάφοροι συντελεστές σχήματος προστίθενται μεταξύ τους κατά την φορά της διάδοσης της θερμότητας ως εξής:

$$S = \sum_i S_i \quad (2.19)$$

Οι συντελεστές σχήματος που συμμετέχουν στο εξεταζόμενο σύστημα δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Περίπτωση	Σχήμα	Περιορισμοί	Συντελεστής Σχήματος
Κατακόρυφη πλάκα		-	$\frac{A}{L}$
Πλευρά μεταξύ γειτονικών τοιχωμάτων		$D > 5L$	$0.54D$
Γωνία μεταξύ γειτονικών τοιχωμάτων		$L \ll D$	$0.15L$

**Πίνακας 3.1** Συντελεστές Σχήματος κατά την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής

Ο συντελεστής σχήματος που αφορά την κατακόρυφη πλάκα στον Πίνακα 3.1 προκύπτει από το νόμο του Fourier, όπως αποδείχθηκε παραπάνω, ενώ οι άλλοι δύο συντελεστές που αφορούν τη μετάδοση θερμότητας σε σημεία γειννίαςσης τοιχωμάτων έχουν αναπτυχθεί από τον φυσικό I. Langmuir και συναδέλφους του το 1913, ειδικά για τον υπολογισμό απωλειών θερμότητας σε κλιβάνους [2].

### 3.1.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής παρατηρείται στις περιπτώσεις που έρχονται σε επαφή ένα στερεό σώμα με ένα ρευστό (υγρό ή αέριο), που κινείται σε σχέση με το στερεό, και έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω των τυχαίων κινήσεων των μορίων, τη διάχυση αλλά και τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία κινείται μαζικά μεγάλος αριθμός μορίων. Λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του ρευστού στην επιφάνεια του στερεού δημιουργείται υδροδυναμικό και θερμικό οριακό στρώμα, η μορφή των οποίων επηρεάζει τον τρόπο που συναλλάσσεται θερμότητα.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων όπου η ταχύτητα του ρευστού δεν είναι μηδενική, ενώ στα σημεία που μηδενίζεται η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με αγωγή. Όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε εξωτερικά αίτια, π.χ. έναν ανεμιστήρα, η συναγωγή χαρακτηρίζεται ως εξαναγκασμένη ενώ, όταν οφείλεται σε διαφορές πυκνοτήτων του ρευστού λόγω θερμοκρασιακών διαφορών, π.χ. ο αέρας ενός χώρου παρουσία θερμαντικών σωμάτων, χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη (ή φυσική).

Η σχέση που περιγράφει τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής ονομάζεται σχέση

του Newton και εκφράζεται ως:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2.20)$$

όπου  $q$  η πυκνότητα παροχής θερμότητας,  $T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού σώματος και  $T_\infty$  η θερμοκρασία του ρευστού σώματος σε σημείο που δεν επηρεάζεται πλέον από τη θερμοκρασία του στερεού.

Ο συντελεστής  $h$  ονομάζεται ειδική συναγωγιμότητα και εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, το είδος του ρευστού και της ροής του. Η ειδική συναγωγιμότητα είναι συνάρτηση της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας, του δυναμικού ιξώδους, της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση του ρευστού καθώς και των γεωμετρικών συνθηκών. Ο προσδιορισμός της ειδικής συναγωγιμότητας στις διάφορες περιπτώσεις και εφαρμογές αποτελεί αντικείμενο έντονης έρευνας τόσο σε αναλυτικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι ο υπολογισμός της είναι αρκετά περίπλοκος και διαφέρει σημαντικά από περίπτωση σε περίπτωση, ενώ ακόμα και για παρεμφερείς εφαρμογές, έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες προσδιορισμού που διαφέρουν μεταξύ τους.

Όπως φαίνεται στο θερμικό κύκλωμα του Σχήματος 3.4 που αφορά τον σχεδιασμό του εξεταζόμενου κλιβάνου, ένας από τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που εμπλέκεται είναι και η συναγωγή, και μάλιστα η ελεύθερη συναγωγή, μιας και τα ρευστά που βρίσκονται στο σύστημα –στον εσωτερικό θάλαμο, έξω από την μόνωση και στον περιβάλλοντα χώρο- δεν βρίσκονται υπό κάποια εξαναγκασμένη ροή. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην ελεύθερη συναγωγή η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις διαφορές πυκνότητας που δημιουργούνται από τις θερμοκρασιακές διαφορές, με αποτέλεσμα οι ταχύτητες να είναι μικρότερες από την εξαναγκασμένη συναγωγή και τα μεταφερόμενα ρεύματα θερμότητας να είναι ασθενέστερα. Στον προσδιορισμό της ειδικής συναγωγιμότητας στην περίπτωση της ελεύθερης συναγωγής υπεισέρχονται οι ακόλουθοι αδιάστατοι αριθμοί:

Ισόθλιπτη διαστολικότητα:

$$\alpha = \frac{(\rho_\infty/\rho) - 1}{T - T_\infty} = \frac{1}{T_\infty} \quad (2.21)$$

Αριθμός Grashof:

$$Gr = \frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty)}{\nu^2} \quad (2.22)$$

Αριθμός Rayleigh:

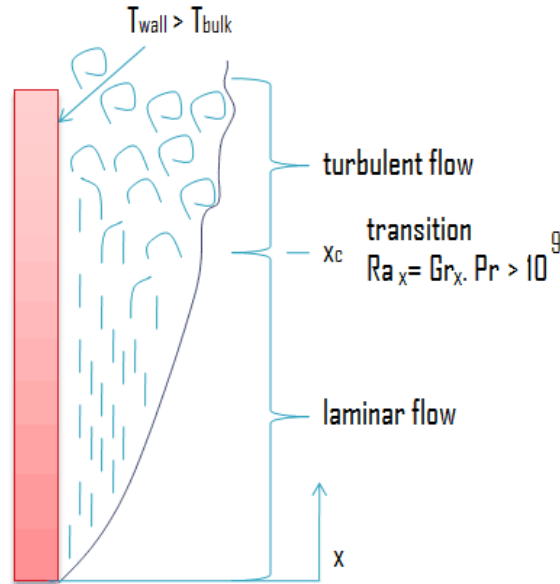
$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty)}{\nu a} \quad (2.23)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού στη θερμοκρασία  $T$ ,  $\rho_\infty$  η πυκνότητα του ρευστού στη θερμοκρασία  $T_\infty$ ,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $L$  το μήκος που λαμβάνει χώρα η ελεύθερη συναγωγή,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και  $a = k/\rho c_p$  η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του ρευστού.

Η ειδική συναγωγιμότητα εξαρτάται, πέρα από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς, από τις γεωμετρικές παραμέτρους, τις ιδιότητες της ροής (στρωτή/τυρβώδης), αλλά και από τις οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή σε επίπεδο κατακόρυφο σώμα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας όταν οι θερμοκρασίες στερεού και ρευστού είναι

διαφορετικές μεταξύ τους. Όταν η θερμοκρασία του στερεού είναι μεγαλύτερη από εκείνη του ρευστού, το τελευταίο κινείται προς τα πάνω (Σχήμα 3.6), ενώ στην αντίθετη περίπτωση κινείται προς τα κάτω. Η αλλαγή της μορφής της ροής από το στρωτό στο τυρβώδες θερμικό οριακό στρώμα εμφανίζεται όταν

$$10^8 < Ra_x < 10^9$$



**Σχήμα 3.6 Μεταφορά θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή σε επίπεδο κατακόρυφο σώμα**

Ο τοπικός αριθμός Nusselt στη θέση  $x$  και σε σταθερή  $T_s$  υπολογίζεται ως εξής:

$$Nu_x = 0.508 Ra_x^{1/4} \left[ \frac{Pr}{0.952 + Pr} \right]^{1/4} \quad (2.24)$$

Οι ιδιότητες υπολογίζονται στη θερμοκρασία αναφοράς:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.25)$$

Οι τοπικοί αριθμοί Grashof και Rayleigh ορίζονται κατ' αντιστοιχία:

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (2.26)$$

$$Ra_x = Gr_x Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu\alpha} \quad (2.27)$$

Για τη μέση ειδική συναγωγιμότητα ισχύει:

$$h_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L h_x dx \quad (2.28)$$

Μετά από πράξεις και αντικατάσταση στη σχέση (3.10) προκύπτει:

$$h_m = \frac{4}{3} [h_x]_{x=L} \quad (2.29)$$

$$Nu_m = \frac{Lh_m}{k} = \frac{L}{k} \frac{4}{3} [h_x]_{x=L} = \frac{4}{3} \left[ \frac{xh_x}{k} \right]_{x=L} \quad (2.30)$$

$$Nu_m = \frac{4}{3} [Nu_x]_{x=L} \quad (2.31)$$

Για τον υπολογισμό του όρου  $[Nu_x]_{x=L}$  και κατ' επέκταση του μέσου αριθμού Nusselt έχουν προταθεί πολλοί, κυρίως εμπειρικοί τύποι που εξαρτώνται από το είδος της ροής και τις οριακές συνθήκες που ορίζουν κάθε φορά το πρόβλημα [3]. Για σταθερή θερμοκρασία  $T_s$  στην επιφάνεια της κατακόρυφης πλάκας οι πιο συνήθεις σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι η σχέση McAdams και οι σχέσεις των Churchill και Chu. Η σχέση McAdams προβλέπει ότι:

$$Nu_m = C [Gr_L Pr]^n = CRa_L^n \quad (2.32)$$

όπου  $L$  είναι το ύψος του σώματος, ενώ οι συντελεστές  $C$  και  $n$  υπολογίζονται από τον Πίνακα 3.2. Οι ιδιότητες υπολογίζονται στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_f$  (3.11).

Ροή	$Ra_L$	$C$	$n$
Στρωτή	$10^4 \div 10^9$	0,59	1/4
Τυρβώδης	$10^9 \div 10^{13}$	0,10	1/3

**Πίνακας 3.2 Τιμές συντελεστών της σχέσης McAdams ανάλογα με το είδος της ροής για επίπεδη κατακόρυφη πλάκα**

Οι Churchill και Chu πρότειναν δύο διαφορετικές σχέσεις για τις ίδιες συνθήκες με προηγουμένως, μία για στρωτή ροή ειδικά και μία γενικότερη και για τις δύο περιπτώσεις ροής. Για τη στρωτή ροή η σχέση που πρότειναν είναι:

$$Nu_m = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[ 1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}}, \quad 10^{-1} < Ra_L < 10^9 \quad (2.33)$$

ενώ η γενικότερη σχέση τους έχει τη μορφή:

$$Nu_m = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2, \quad 10^{-1} < Ra_L < 10^{12} \quad (2.34)$$

Όλες οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη θερμοκρασία αναφοράς  $T_f$ .

Σε περίπτωση που η θερμοκρασία στην επιφάνεια της πλάκας δεν είναι σταθερή, αλλά είναι σταθερή η πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q$  οι πιο κοινές σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι εκείνες των Sparrow, Cregg, Vliet και Lin. Για στρωτή ροή, ο τοπικός αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$Nu_x = 0.60 [Gr_x^* Pr]^{1/5}, \quad 10^5 < Gr_x^* Pr < 10^{11} \quad (2.35)$$

ενώ για τυρβώδη ροή υπολογίζεται ως:

$$Nu_x = 0.568 [Gr_x^* Pr]^{0.22}, \quad 2 \times 10^{13} < Gr_x^* Pr < 10^{16} \quad (2.36)$$

Για τις παραπάνω σχέσεις ισχύει ότι

$$Gr_x^* = Gr_x Nu_x = \frac{g \beta q x^4}{k \nu^2} \quad (2.37)$$

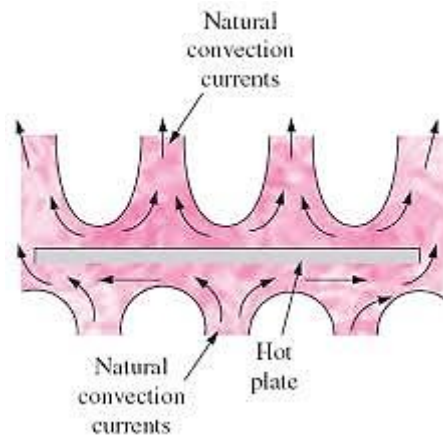
$$Nu_x = \frac{h_x x}{k}$$

$$Nu_m = 1.25 [Nu_x]_{x=L}, \quad 10^5 < Gr_x^* Pr < 10^{11} \quad (2.38)$$

$$Nu_m = 1.136 [Nu_x]_{x=L}, \quad 2 \times 10^{13} < Gr_x^* Pr < 10^{16}$$

Δεδομένου ότι σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού το σύστημα μελετάται στη μόνιμή του κατάσταση, οποιαδήποτε από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με το είδος της ροής που αναπτύσσεται. Στην εργασία αυτή επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις των Churchill και Cho, κυρίως γιατί απαντώνται περισσότερο στην σχετική βιβλιογραφία.

Παρεμφερές φαινόμενο με την ελεύθερη συναγωγή που λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός ρευστού και μιας επίπεδης κατακόρυφης πλάκας, είναι και η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός ρευστού και μιας επίπεδης οριζόντιας πλάκας. Στην περίπτωση αυτή η ελεύθερη συναγωγή πραγματοποιείται διαφορετικά και σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



**Σχήμα 3.7 Μεταφορά θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή σε επίπεδο οριζόντιο σώμα**

Για τον υπολογισμό της ειδικής συναγωγιμότητας χρησιμοποιείται και πάλι η σχέση του McAdams (3.18), με συντελεστές που αυτή τη φορά καθορίζονται από τον Πίνακα 3.3.

Θέση επιφάνειας επίπεδου σώματος	Ροή	$Ra_L$	$C$	$n$
Θερμή επιφάνεια προς τα κάτω ή ψυχρή επιφάνεια προς τα επάνω	Στρωτή	$3 \times 10^5 \div 3 \times 10^{10}$	0,27	1/4
Θερμή επιφάνεια προς τα επάνω ή	Στρωτή	$10^5 \div 2 \times 10^7$	0,54	1/4

ψυχρή επιφάνεια προς τα κάτω	Τυρβώδης	$2 \times 10^7 \div 3 \times 10^{10}$	0,14	1/3
------------------------------	----------	---------------------------------------	------	-----

**Πίνακας 3.3 Τιμές συντελεστών της σχέσης McAdams ανάλογα με το είδος της ροής για επίπεδη οριζόντια πλάκα**

Υπάρχουν κι άλλες σχέσεις που υπολογίζουν την ειδική συναγωγιμότητα για άλλους γεωμετρικούς σχηματισμούς, όπως σε επίπεδη κεκλιμένη πλάκα, γύρω από κυλινδρικό ή σφαιρικό σώμα κ.α. Οι σχέσεις αυτές δεν παρατίθενται εδώ μιας και δεν αφορούν τον εξεταζόμενο σχεδιασμό.

Οι τιμές της ειδικής συναγωγιμότητας που προκύπτουν εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις κυμαίνονται μεταξύ των 2-8 W/m<sup>2</sup>K. Η ειδική συναγωγιμότητα εξαρτάται κάθε φορά από τη γεωμετρία (κατακόρυφη ή οριζόντια πλάκα), αλλά και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος και ρευστού.

### 3.1.3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται μέσω της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Βασίζεται στην ικανότητα αρκετών σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν. Σε αντίθεση με τη μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής ή συναγωγής, στην μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για να πραγματοποιηθεί. Η πυκνότητα παροχής θερμότητας που ακτινοβολείται από ένα σώμα δίνεται από τη σχέση:

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.39)$$

όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής του σώματος που κυμαίνεται από 0 έως 1,  $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>] η σταθερά Stefan-Boltzmann και  $T_s$  η θερμοκρασία του σώματος.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν το ρεύμα θερμότητας που υπολογίζεται στη σχέση (3.25) εκπέμπονται από τα μόρια του σώματος που ακτινοβολεί. Στα περισσότερα στερεά και υγρά σώματα, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μόριο απορροφάται από τα γειτονικά του μόρια. Επομένως η εκπομπή και η απορρόφηση της ακτινοβολίας από αυτά τα σώματα γίνεται μέσω ενός στρώματος μορίων που βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνειά τους. Η επιφάνεια αυτή για τα μεταλλικά υλικά είναι πάχους μερικών μορίων, ενώ για τα μη μεταλλικά υλικά είναι πάχους μερικών μικρομέτρων. Για τα υλικά αυτά η εκπομπή και η απορρόφηση ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθούν ως επιφανειακά φαινόμενα. Αντίθετα, σε αέρια μείγματα που περιέχουν συνιστώσες όπως υγρασία και διοξείδιο του άνθρακα ή σε ημιδιάφανα στερεά υλικά, η απορρόφηση είναι χαμηλή και η ακτινοβολία που φεύγει από το σώμα μπορεί να πηγάζει από οποιαδήποτε σημείο του. Σε αυτή την περίπτωση η εκπομπή και η απορρόφηση ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται ως ογκομετρικά φαινόμενα [2]. Τα αέρια που απασχολούν το εξεταζόμενο πρόβλημα (αέρας σε διάφορες πιέσεις) δεν επιδρούν σημαντικά στην διαδιδόμενη ακτινοβολία (*nonparticipating medium*), για αυτό και η μετάδοση της ακτινοβολίας μελετάται μόνο μεταξύ επιφανειών.

Το μέλαν σώμα (black body ή black surface) είναι ένα ιδανικό σώμα που θεωρείται ότι απορροφά όλη την ακτινοβολία που πέφτει σε αυτό, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος και της γωνίας πρόσπτωσης, χωρίς να αντανακλάται στον περιβάλλοντα χώρο. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό το μέλανος σώματος προκύπτει και ότι όλη η ακτινοβολία που φεύγει από το σώμα εκπέμπεται από αυτό. Επίσης, δεν μπορεί να υπάρξει άλλο σώμα που να εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία σε μια ορισμένη θερμοκρασία και μήκος κύματος. Ως εκ τούτου, το μέλαν σώμα έχει συντελεστή εκπομπής ίσο με 1.

Αν και υπάρχουν σώματα ή επιφάνειες που μπορούν να προσομοιωθούν από το μοντέλο του μέλανος



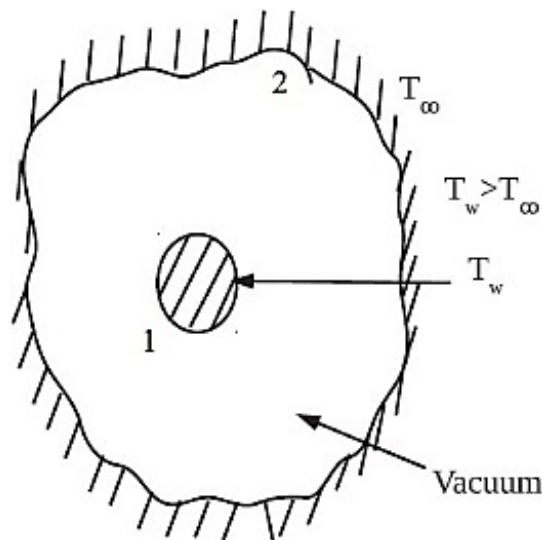
σώματος, τα περισσότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές δεν μπορούν να απορροφήσουν το σύνολο της ακτινοβολίας στην οποία εκτίθενται. Οι πραγματικές αυτές επιφάνειες απορροφούν ένα μέρος από την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτές, ενώ η υπόλοιπη αντανακλάται στο περιβάλλον. Το τι ποσοστό απορροφάται ή αντανακλάται κάθε φορά εξαρτάται από την απορροφητικότητα  $\alpha$  και την ανακλαστικότητα  $\rho$  της επιφάνειας οι οποίες σχετίζονται ως εξής (για αδιάφανα σώματα):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.40)$$

Μια μοντελοποίηση που προσομοιώνει καλύτερα την συμπεριφορά των πραγματικών επιφανειών στην εκπομπή και την απορρόφηση ακτινοβολίας είναι η θεώρηση του φαιού σώματος ή επιφάνειας (*gray surface*) για την οποία η τιμές του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  και της απορροφητικότητας  $\alpha$  μένουν σταθερές με την αλλαγή της θερμοκρασίας και ίσες. Η θεώρηση αυτή είναι η πλέον κοινή στη μοντελοποίηση συστημάτων και θα γίνει και για τα σώματα και τις επιφάνειες που εμπλέκονται σε μετάδοση ακτινοβολίας στην παρούσα μελέτη.

Στην περίπτωση όπου δύο σώματα 1 και 2 διαφορετικής θερμοκρασίας βρεθούν στον ίδιο χώρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, τότε θα ανταλλάξουν μεταξύ τους θερμότητα μέσω ακτινοβολίας. Το καθαρό ρεύμα θερμότητας που μεταφέρεται από το ένα σώμα στο άλλο δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.41)$$



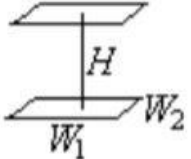
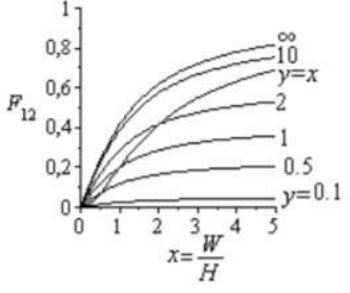
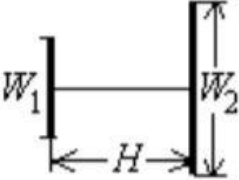
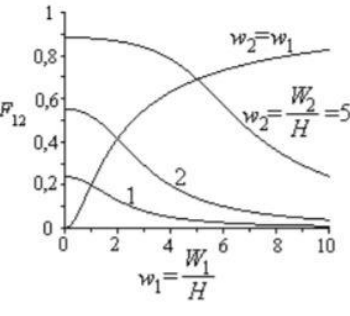
**Σχήμα 3.8 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία**

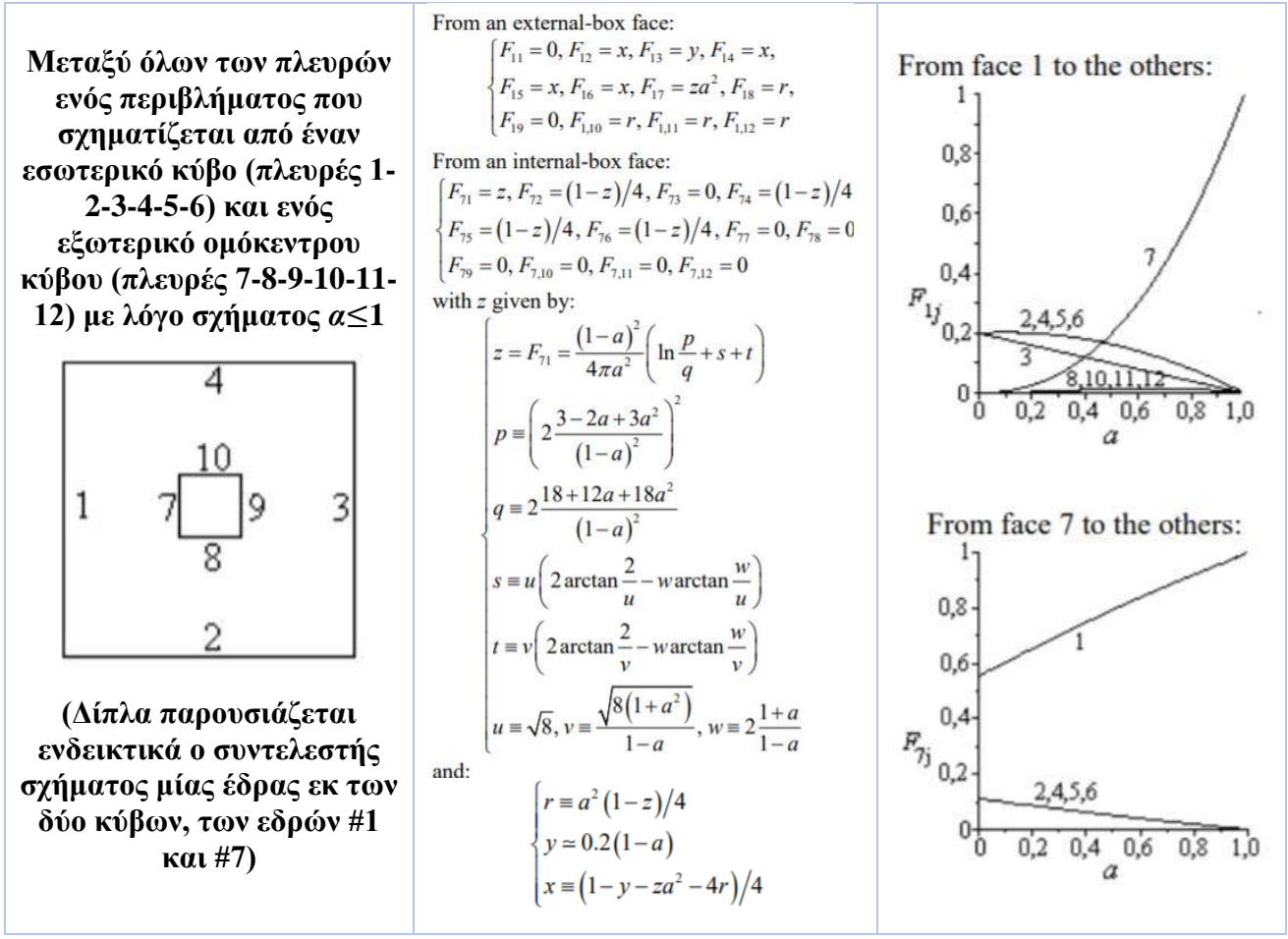
Σε περιπτώσεις όπου τα σώματα δεν έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3.8, τότε ορίζονται και πάλι συντελεστές σχήματος (*shape factor* ή *view factor*) όπως είχε γίνει και στην περίπτωση της αγωγής. Οι συντελεστές σχήματος που αφορούν τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία έχουν να κάνουν με το γεγονός πως λόγω της γεωμετρίας των σωμάτων, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το ένα σώμα δεν προσπίπτει στο δεύτερο για να απορροφηθεί ή να ανακλαστεί. Ως, αποτέλεσμα, το συνολικό ρεύμα θερμότητας που συναλλάσσεται είναι μικρότερο από εκείνο που προβλέπεται από τη σχέση (3.27). Με την εισαγωγή της έννοιας του συντελεστή σχήματος  $F$  το νέο ρεύμα θερμότητας προκύπτει από τη σχέση:

$$Q = \epsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.42)$$

όπου  $F_{12}$  ο συντελεστής σχήματος για το σώμα 1 σε σχέση με το σώμα 2.

Οι συντελεστές σχήματος που θα εμπλακούν στους υπολογισμούς για τον εξεταζόμενο σχεδιασμό δίνονται στον Πίνακα 3.4.

Περίπτωση	Συντελεστής Σχήματος	Διάγραμμα
<p>Μεταξύ παράλληλων ίσων ορθογώνιων πλακών πλευρών <math>W_1</math> και <math>W_2</math> σε απόσταση <math>H</math>, με <math>x = W_1/H</math> και <math>y = W_2/H</math></p> 	$F_{12} = \frac{1}{\pi xy} \left[ \ln \frac{x_1^2 y_1^2}{x_1^2 + y_1^2 - 1} + 2x \left( y_1 \arctan \frac{x}{y_1} - \arctan x \right) + 2y \left( x_1 \arctan \frac{y}{x_1} - \arctan y \right) \right]$ <p>with <math>x_1 \equiv \sqrt{1+x^2}</math> and <math>y_1 \equiv \sqrt{1+y^2}</math></p>	
<p>Μεταξύ μιας τετραγωνικής πλάκας πλευράς <math>W_1</math> σε μια ομοαξονική τετραγωνική πλάκα πλευράς <math>W_2</math> σε απόσταση <math>H</math>, με <math>w_1 = W_1/H</math> και <math>w_2 = W_2/H</math></p> 	$F_{12} = \frac{1}{\pi w_1^2} \left( \ln \frac{p}{q} + s - t \right), \text{ with}$ $\begin{cases} p \equiv (w_1^2 + w_2^2 + 2)^2 \\ q \equiv (x^2 + 2)(y^2 + 2) \\ x \equiv w_2 - w_1, \quad y \equiv w_2 + w_1 \\ s \equiv u \left( x \arctan \frac{x}{u} - y \arctan \frac{y}{u} \right) \\ t \equiv v \left( x \arctan \frac{x}{v} - y \arctan \frac{y}{v} \right) \\ u \equiv \sqrt{x^2 + 4}, \quad v \equiv \sqrt{y^2 + 4} \end{cases}$	

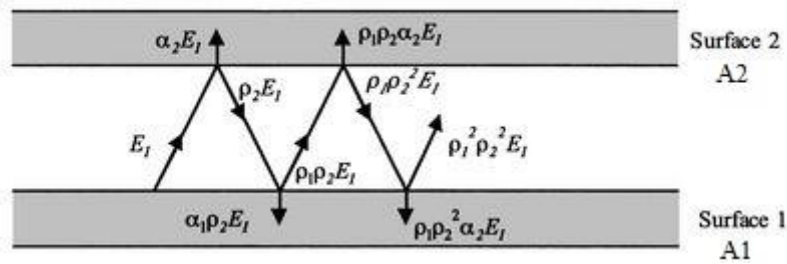


**Πίνακας 3.4 Συντελεστές σχήματος για μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία [4]**

Από τους συντελεστές σχήματος που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4, εκείνος που αφορά τους δύο ομόκεντρους κύβους μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιος για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας για τον εξεταζόμενο σχεδιασμό του κλιβάνου, έτσι όπως αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Στο σύστημα αυτό, επειδή ο εσωτερικός κύβος περικλείεται ο ολοκληρωτικά από τον εξωτερικό, όλη η ακτινοβολία που εκπέμπει θα απορροφηθεί τελικά από τον εξωτερικό κύβο. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που φτάνει σε κάθε έδρα του εξωτερικού κύβου από μία συγκεκριμένη έδρα του εσωτερικού εξαρτάται από το συντελεστή σχήματος του συστήματος. Ο λόγος σχήματος για τον σχεδιασμό αυτόν είναι σταθερά μεγαλύτερος του 0.6. Έτσι, όπως προκύπτει από την εξέταση του αντίστοιχου διαγράμματος του Πίνακα 3.4, πάνω από το 90% της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία έδρα του εσωτερικού κύβου απορροφάται από εκείνη την έδρα του εξωτερικού κύβου που βρίσκεται ακριβώς απέναντί της. Έτσι, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με καλή προσέγγιση οι δύο πρώτοι συντελεστές σχήματος του Πίνακα 3.4, για την απλοποίηση των υπολογισμών.

Πέρα όμως από τις επιδράσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, σημαντική επίδραση έχει το γεγονός πως η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια δεν απορροφάται εξ ολοκλήρου από αυτό, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του μέλανος σώματος, αλλά ένα ποσοστό της αντανακλάται πίσω. Στην περίπτωση όπου συμβαίνει μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο παράλληλων επίπεδων πλακών, η ακτινοβολία μπορεί να αντανακλάται μεταξύ αυτών πολλές φορές, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τον τρόπο που μεταδίδεται η θερμότητα. Έστω οι πλευρές που φαίνονται στο Σχήμα 3.9, οι οποίες θεωρείται ότι έχουν την ίδια εγκάρσια επιφάνεια, όπως συμβαίνει και στην εξεταζόμενη εφαρμογή. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής  $a$  εκφράζει την απορροφητικότητα της επιφάνειας, ενώ

ο συντελεστής  $\rho=1-\alpha$  {σχέση (3.26)} την ανακλαστικότητα της επιφάνειας.



**Σχήμα 3.9 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο παράλληλων επίπεδων (φαιών) επιφανειών**

Οι σειρά με την οποία εκπέμπεται, απορροφάται και αντανακλάται η ακτινοβολία μεταξύ των δύο παράλληλων επιφανειών έχει ως εξής:

- Η επιφάνεια 1 εκπέμπει ποσό ενέργειας  $A_1 \varepsilon_1 E_1$
- Η επιφάνεια 2 απορροφά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 \alpha_2$
- Η επιφάνεια 2 αντανακλά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 \rho_2 = A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2)$
- Η επιφάνεια 1 απορροφά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) \alpha_1$
- Η επιφάνεια 1 αντανακλά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) (1 - \alpha_1)$
- Η επιφάνεια 2 απορροφά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) (1 - \alpha_1) \alpha_2$
- Η επιφάνεια 2 αντανακλά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 \rho_2 = A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2)$
- Η επιφάνεια 1 απορροφά  $A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) \alpha_1$

και ούτω καθεξής. Ως  $E_1$  ορίζεται η ποσότητα:

$$E_1 = \sigma T_1^4 \quad (2.43)$$

Θεωρώντας την ποσότητα:

$$\gamma = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \quad (2.44)$$

η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια 1 και απορροφάται ξανά από αυτήν είναι

$$Q_{1a} = A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 + \gamma + \gamma^2 + \dots)(1 - \alpha_2) \alpha_1 = \frac{A_1 \varepsilon_1 E_1 (1 - \alpha_2) \alpha_1}{1 - \gamma} \quad (2.45)$$

Ομοίως, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια 2 και απορροφάται από την επιφάνεια 1 υπολογίζεται ως:

$$Q_{1b} = A_2 \varepsilon_2 E_2 (1 + \gamma + \gamma^2 + \dots) \alpha_1 = \frac{A_2 \varepsilon_2 E_2 \alpha_1}{1 - \gamma} \quad (2.46)$$

Έτσι, η καθαρή ακτινοβολία που φεύγει από την επιφάνεια 1 είναι:

$$Q_1 = A_1 \varepsilon_1 E_1 - Q_{1a} - Q_{1b} \quad (2.47)$$

Θεωρώντας  $\varepsilon = a$  και εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει ότι:

$$Q_1 = \frac{A_1 E_1 - A_2 E_2}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (2.48)$$

Ο παράγοντας  $\frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$  ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς και πρέπει να χρησιμοποιείται αντί του συντελεστή εκπομπής στην περίπτωση μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μέσω παράλληλων επίπεδων πλακών, επιπλέον του συντελεστή σχήματος που επιβάλει ο κάθε γεωμετρικός σχηματισμός. Με αυτόν τον τρόπο, ολοκληρώνεται και η ανάλυση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία.

## 3.2. Σχεδιασμός θερμικής μόνωσης και μόνιμη απόκριση συστήματος

### 3.2.1. Μόνωση με προσθήκη βαθμίδας κενού

Η μοντελοποίηση του κλιβάνου ως ένα θερμικό σύστημα περιγράφηκε παραπάνω και απεικονίστηκε διαγραμματικά στο Σχήμα 3.4. Η μαθηματική μοντελοποίηση του θερμικού κυκλώματος αυτού για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών και των ρευμάτων θερμότητας στις διάφορες θέσεις του συστήματος, οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων που αποτελείται από 15 εξισώσεις και 15 αγνώστους. Οι 15 άγνωστοι σχηματίζονται από τις θερμοκρασίες εκατέρωθεν κάθε αντίστασης και τα ρεύματα θερμότητας που τα διαπερνούν και οι 15 εξισώσεις προκύπτουν από τις εξισώσεις στοιχείου των 12 θερμικών αντιστάσεων και την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff στους κόμβους όπου συναντώνται ρεύματα θερμότητας από παράλληλους κλάδους. Οι εξισώσεις αυτές είναι μη γραμμικές, για αυτό το λόγο η επίλυσή τους γίνεται με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Εναλλακτικά, μπορεί να απεικονιστεί το σύστημα/κύκλωμα στο υπολογιστικό περιβάλλον *Matlab/Simulink*, και η επίλυσή του να γίνει αυτόματα.

Για την αξιολόγηση του κάθε σχεδιασμού, επιλέγεται η εξέταση ορισμένων μεγεθών τα οποία άμεσα ή έμμεσα εξαρτώνται με μεγέθη που έχουν τεθεί ως προδιαγραφές για τη λειτουργία του κλιβάνου. Στην φάση της εξέτασης της μόνιμης κατάστασης του συστήματος τέτοια μεγέθη μπορεί να είναι το συνολικό ρεύμα θερμότητας που διακινείται μέσω της μόνωσης και αποδίδεται στο περιβάλλον, η εξωτερική θερμοκρασία της εσωτερικής μόνωσης και η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβλήματος. Οι τιμές των μεγεθών αυτών αλλά και κάποιων άλλων που είναι ενδεικτικά της απόκρισης του κλιβάνου και θα σχολιαστούν παρακάτω παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Προηγουμένως, στον Πίνακα 3.5 δίνονται οι βασικές διαστάσεις που χρησιμοποιούνται για τον εξεταζόμενο σχεδιασμό.

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος πλευράς εσωτερικά της μόνωσης (mm)	300
Πάχος εσωτερικής μόνωσης (mm)	50
Απόσταση εσωτερικής μόνωσης-περιβλήματος (mm)	100
Πάχος περιβλήματος (mm)	5
Συνολική εγκάρσια επιφάνεια θερμογεφυρών (mm <sup>2</sup> )	3200

**Πίνακας 3.5 Βασικές διαστάσεις εξεταζόμενου μοντέλου**

Μέγεθος	Τιμή
Θερμοκρασία αντιστάσεων (°C) (είσοδος)	1870
Θερμοκρασία εσωτερικά μόνωσης (°C)	1850
<b>Θερμοκρασία εξωτερικά μόνωσης (°C)</b>	<b>785</b>
<b>Θερμοκρασία εξωτερικά περιβλήματος (°C)</b>	<b>335</b>
<b>Συνολικό ρεύμα θερμότητας (kW)</b>	<b>5.45</b>
Ρεύμα θερμότητας από μόνωση σε περίβλημα μέσω αέρα (συναγωγή-αγωγή-συναγωγή) (kW)	0.08
Ρεύμα θερμότητας από μόνωση σε περίβλημα μέσω ακτινοβολίας (kW)	5.15
Ρεύμα θερμότητας από μόνωση σε περίβλημα μέσω θερμογεφυρών (kW)	0.22
Ρεύμα θερμότητας από περίβλημα σε περιβάλλον μέσω συναγωγής (kW)	4.48
Ρεύμα θερμότητας από περίβλημα σε περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας (kW)	0.67

**Πίνακας 3.6 Αποτελέσματα μοντέλου πρώτου σχεδιασμού**

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6 μπορούν να εξαχθούν πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα. Το συνολικό ρεύμα θερμότητας που προκύπτει ως απώλειες στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κλιβάνου και αγγίζει τα 5.5 kW, μπορεί να είναι όπως αναμενόταν μεγαλύτερο από εκείνο που παρατηρείται σε αντίστοιχους κλιβάνους συμβατικής μόνωσης που κυκλοφορούν στην αγορά, εντούτοις εμπίπτει εντός των επιτρεπόμενων ορίων που έχουν οριστεί στις προδιαγραφές και αποτελούν το κριτήριο για την αξιολόγηση του σχεδιασμού. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, αν και η θερμοκρασία στη μόνωση είναι αναμενόμενη και αποδεκτή, η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβλήματος του κλιβάνου, η εξωτερική θερμοκρασία όλης της διάταξης, είναι εξαιρετικά υψηλή (335 °C). Για το λόγο αυτό απαιτούνται αλλαγές στο σχεδιασμό, έτσι ώστε η εξωτερική θερμοκρασία να φτάσει εντός των επιτρεπτών ορίων (50~60 °C).

Πριν παρουσιαστούν και αναλυθούν οι εναλλακτικές προτάσεις για τον σχεδιασμό του κλιβάνου, είναι σκόπιμο να σχολιασθούν και τα δευτερεύοντα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Αρχικά, είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται εσωτερικά της μόνωσης είναι πολύ κοντά σε εκείνη που αναπτύσσεται στις αντιστάσεις και είναι είσοδος στο σύστημα. Κατά συνέπεια, αφού στη μόνιμη κατάσταση οι θερμοκρασίες αντιστάσεων και μόνωσης δεν διαφέρουν σημαντικά, στο θερμικό μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορεί να αμεληθεί το πρώτο τμήμα που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας από τις αντιστάσεις προς τη μόνωση, έτσι ώστε να απλοποιείται η διαδικασία υπολογισμού. Ομοίως, μπορεί να αμεληθούν οι απώλειες που προκύπτουν λόγω της παρουσίας θερμογεφυρών, καθώς αποτελούν μόλις το 4% των συνολικών απωλειών.

Όσον αφορά τον αέρα που υπάρχει μεταξύ της μόνωσης και του περιβλήματος, η συμμετοχή του μέσω συναγωγής στη μετάδοση της θερμότητας μπορεί να γίνει περισσότερο περίπλοκη από αυτή

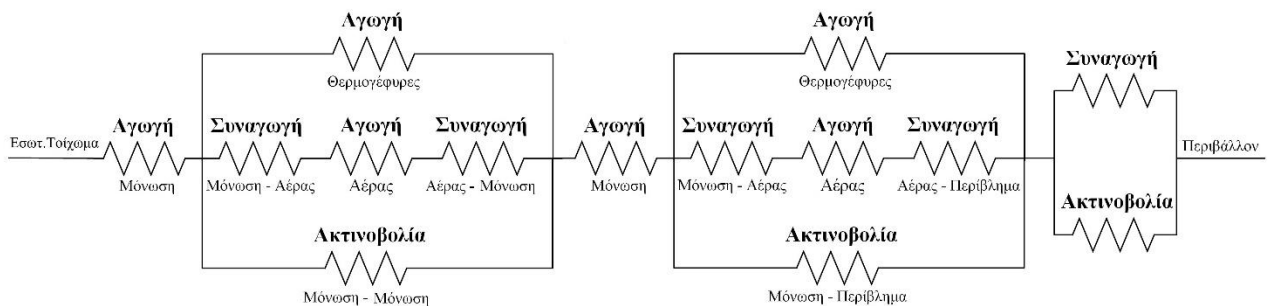


που περιγράφηκε στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο με αποτέλεσμα να έχει αρκετά μεγαλύτερη συμμετοχή στις απώλειες θερμότητας από εκείνη που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.6. Ο αέρας που βρίσκεται σε επαφή με τα ζεστά κατακόρυφα τοιχώματα της μόνωσης, καθώς θερμαίνεται αποκτά μια ταχύτητα σε σχέση με τα τοιχώματα η οποία έχει φορά προς τα επάνω. Καθώς ο ζεστός αέρας από κάθε τοίχωμα φτάνει στο ανώτερο σημείο του κλιβάνου και συμβάλει με εκείνον που θερμαίνεται από το άνω οριζόντιο τοίχωμα, μπορεί να παρουσιάσει τοπικές περιδινήσεις, οι οποίες αυξάνουν το συντελεστή συναγωγής και κατά συνέπεια τις απώλειες θερμότητας. Για την αποφυγή της εμφάνισης τέτοιων φαινομένων, επιλέγεται να εφαρμοστεί στη θέση του αέρα περιβάλλον κενού, με υποπίεση που φτάνει τα 10mbar.

Μια άλλη παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.6 έχει να κάνει με τη συμβολή της ακτινοβολίας στις απώλειες θερμότητας. Είναι εμφανές πως η ακτινοβολία είναι αυτή που ευθύνεται σχεδόν αποκλειστικά για τη μεγάλη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον. Αυτή η ροή είναι που οδηγεί αναγκαστικά τον εξεταζόμενο σχεδιασμό σε μεγάλες εξωτερικές θερμοκρασίες. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο κατά την επανεξέταση του σχεδιασμού η λήψη μέτρων για τη μείωση των απωλειών θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας.

### 3.2.2. Μόνωση με προσθήκη δύο βαθμίδων κενού

Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω για τη μοντελοποίηση και τον σχεδιασμό του κλιβάνου, αποφασίστηκε η επέκταση του παραπάνω σχεδιασμού με την προσθήκη μιας επιπλέον βαθμίδας κενού, ευελπιστώντας στη μείωση της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, έπειτα από την πρώτη στρώση κενού, δεν θα ακολουθεί το περίβλημα του κλιβάνου, όπως συνέβαινε στον πρώτο σχεδιασμό, αλλά πλέον θα βρίσκεται ένα επιπλέον στρώμα μόνωσης, όμοιο με το εσωτερικό, το οποίο θα ακολουθείται από μία επιπλέον βαθμίδα κενού και, τέλος, το εξωτερικό περίβλημα. Ο νέος αυτός σχεδιασμός που παρουσιάζεται και διαγραμματικά στο Σχήμα 3.10, έχει ως στόχο μέσω της αύξησης των βαθμίδων της θερμικής μόνωσης να περιορίσει τις απώλειες θερμότητας και τις εξωτερικές θερμοκρασίες του κλιβάνου.



**Σχήμα 3.10** Θερμικό κύκλωμα κλιβάνου δύο βαθμίδων κενού

Οι διαστάσεις του νέου αυτού σχεδιασμού επιλέγεται να είναι αντίστοιχες με εκείνες του πρώτου. Το νέο μοντέλο κατασκευάζεται σε περιβάλλον *Matlab/Simulink* και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

Μέγεθος	Τιμή
Θερμοκρασία εσωτερικά μόνωσης (°C) (είσοδος)	1850
Θερμοκρασία εξωτερικά πρώτης μόνωσης (°C)	685

<b>Θερμοκρασία εξωτερικά δευτέρης μόνωσης (°C)</b>	<b>315</b>
<b>Θερμοκρασία εξωτερικά περιβλήματος (°C)</b>	<b>260</b>
<b>Συνολικό ρεύμα θερμότητας (kW)</b>	<b>6.07</b>
Ρεύμα θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (1 <sup>η</sup> βαθμίδα) (kW)	6.05
Ρεύμα θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (2 <sup>η</sup> βαθμίδα) (kW)	6.04

**Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα μοντέλου δύο βαθμίδων κενού**

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.7 δείχνουν ένα σύστημα με μεγαλύτερες απώλειες και μικρότερη εξωτερική θερμοκρασία. Οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες στα διάφορα τοιχώματα του κλιβάνου είναι επίσης χαμηλότερες. Συμπερασματικά, λοιπόν, ο νέος σχεδιασμός οδηγεί σε ένα σύστημα το οποίο ισορροπεί σε μία μεγαλύτερη ροή θερμότητας από ότι το αντίστοιχο σύστημα μίας βαθμίδας κενού, και συνεπάγεται μικρότερες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβλήματος, οι οποίες όμως εξακολουθούν να βρίσκονται πολύ μακριά από τις επιθυμητές.

Το κομμάτι των αποτελεσμάτων που χρήζει περαιτέρω σχολιασμού αφορά τη συμμετοχή της ακτινοβολίας στη συνολική μετάδοση θερμότητας προς το περιβάλλον. Από τα νούμερα του Πίνακα 3.7 γίνεται φανερό ότι το σύνολο σχεδόν της θερμορροής οφείλεται αποκλειστικά στην ακτινοβολία των τοιχωμάτων του κλιβάνου. Η μη γραμμική φύση του τρόπου αυτού μετάδοσης θερμότητας οδηγεί το σύστημα σε σημείο ισορροπίας που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας, και ο περιορισμός της επίδρασής της κρίνεται απαραίτητος για τη συνέχεια του σχεδιασμού.

### 3.2.3. Μόνωση με προσθήκη Multi-layer insulation (MLI)

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι τεχνητοί δορυφόροι κατά την περιστροφή τους γύρω από τη Γη, είναι η μόνωσή τους απέναντι στην θερμική ακτινοβολία με την οποία βομβαρδίζονται από τον ήλιο. Η θερμική αυτή μόνωση επιτυγχάνεται με την κάλυψή τους από μία σειρά στρώσεων λεπτών φύλλων υλικού με χαμηλό συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας. Η πολύστρωτη αυτή μόνωση (Multi-layer insulation-MLI) προσφέρει ικανοποιητική μόνωση από τη θερμική ακτινοβολία, αλλά στη βασική της μορφή δεν προσφέρει ικανοποιητική μόνωση για άλλου τύπου θερμικές απώλειες, όπως η αγωγή και η συναγωγή. Για αυτό το λόγο και η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στους δορυφόρους και σε άλλες εφαρμογές που πραγματοποιούνται σε περιβάλλον κενού, όπου η επίδραση της αγωγής και της συναγωγής είναι μικρή, ενώ η ακτινοβολία κυριαρχεί.

Η αρχή λειτουργίας της MLI βασίζεται στην ισορροπία των ρευμάτων ακτινοβολίας. Εάν κάθε στρώση είναι από το ίδιο υλικό και επομένως έχει τον ίδιο συντελεστή εκπομπής, το ρεύμα θερμότητας που θα περνάει από κάθε στρώση στην επόμενη θα είναι ένα ποσοστό μόνο αυτού που κάθε φορά προσπίπτει σε αυτό, καθώς ένα μέρος της ακτινοβολίας αυτής αντανακλάται ή επανεκπέμπεται πίσω στην προηγούμενη στρώση. Κατά συνέπεια, όσες περισσότερες στρώσεις συμπεριληφθούν στην MLI, τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι και η μόνωση που προσφέρει.

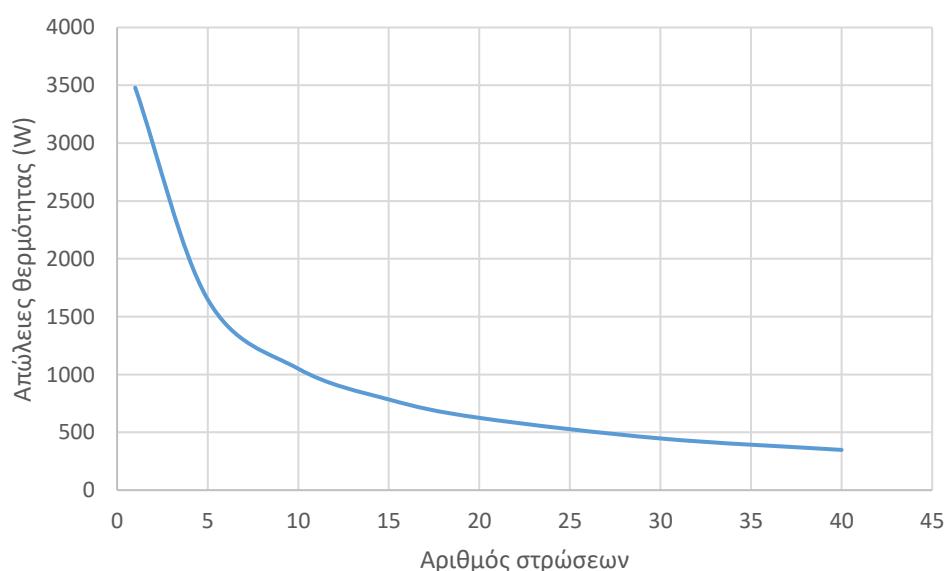
Οι στρώσεις του MLI είναι συνήθως κατασκευασμένες από άργυρο ή αλουμίνιο και τοποθετούνται όσο πιο κοντά γίνεται η μία στην άλλη, εξασφαλίζοντας ότι δεν θα βρίσκονται σε θερμική επαφή. Η απόσταση μεταξύ των στρώσεων εξασφαλίζεται μέσω ενός υφασμάτινο πλέγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Μια τυπική διάταξη MLI περιέχει 40 ή περισσότερες στρώσεις.



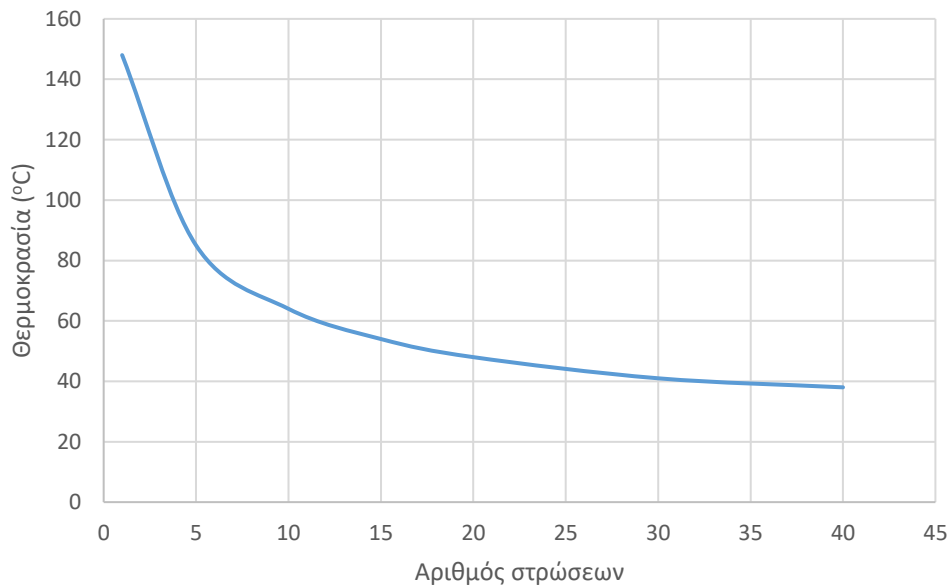


**Σχήμα 3.11 Multi-layer insulation**

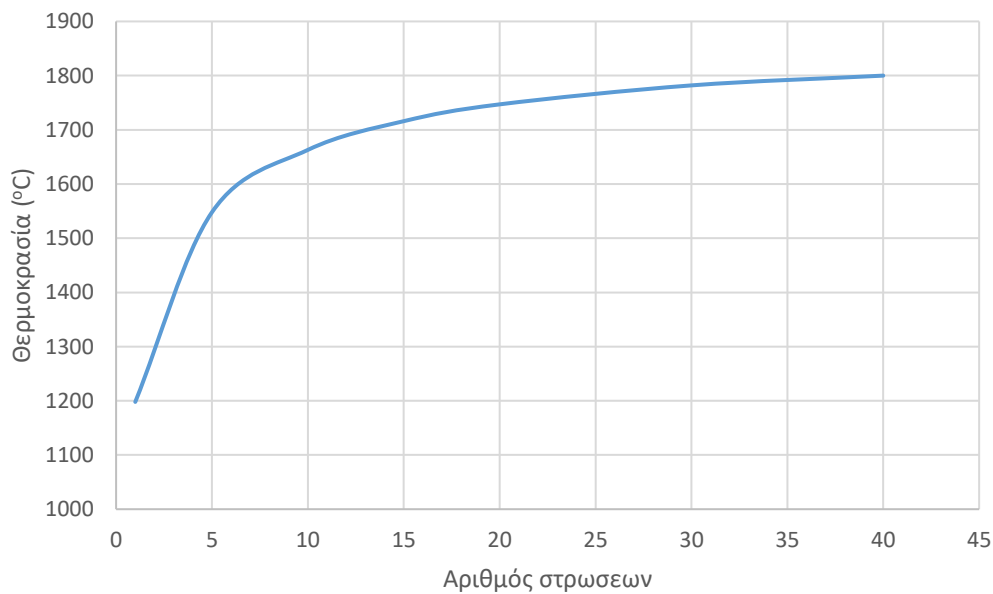
Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν παραπάνω η μόνωση με προσθήκη MLI μπορεί να ενσωματωθεί στην παρούσα εφαρμογή, μιας και σε συνδυασμό με τη χρήση βαθμίδων κενού μπορεί δυνητικά να περιοριστούν ταυτόχρονα όλοι οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας που προκαλούν τις απώλειες. Οι στρώσεις της MLI μπορούν να αντικαταστήσουν ή να προστεθούν επιπλέον στα ήδη υπάρχοντα τοιχώματα μόνωσης, οπότε το θερμικό κύκλωμα του Σχήματος 3.4 δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά. Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση μιας βαθμίδας κενού. Τα αποτελέσματα του νέου αυτού σχεδιασμού παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.12-3.14, όπου παρουσιάζονται συναρτήσεσι του αριθμού των στρώσεων της MLI οι απώλειες θερμότητας, η θερμοκρασία της τελευταίας και της πρώτης στρώσης αντίστοιχα. Οι ελάχιστες στρώσεις που μπορεί να τοποθετηθούν είναι 2. Μία στρώση ανάγει το πρόβλημα σε εκείνο της μίας βαθμίδας κενού που αναλύθηκε παραπάνω.



**Σχήμα 3.12 Απώλειες θερμότητας συναρτήσεσι του αριθμού στρώσεων της MLI για μία βαθμίδα κενού**



**Σχήμα 3.13 Θερμοκρασία τελευταίας στρώσης της MLI συναρτήσει του αριθμού στρώσεων της MLI για μία βαθμίδα κενού**



**Σχήμα 3.14 Θερμοκρασία πρώτης στρώσης της MLI συναρτήσει του αριθμού στρώσεων της MLI για μία βαθμίδα κενού**

Από τα Σχήματα 3.12 και 3.13 γίνεται φανερό πως με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων τόσο η απώλειες θερμότητας, όσο και η θερμοκρασία του τελευταίου στρώματος, η εξωτερική θερμοκρασία του κλιβάνου, μειώνονται με μειούμενο ρυθμό. Τα αποτελέσματα ιδιαίτερα για 15 στρώσεις και πάνω είναι εξαιρετικά, καλύτερα ακόμα και από εκείνα που προκύπτουν με χρήση συμβατικής μόνωσης. Το πρόβλημα που προκύπτει, όμως, και καθιστά την υλοποίηση του απαγορευτική είναι η θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πρώτη στρώση της MLI. Η θερμοκρασία αυτή ξεπερνά τους 1200 °C, ενώ η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου με το οποίο κατασκευάζονται οι στρώσεις της μόνωσης ανέρχεται μόλις στους 660 °C, και τείνει στη θερμοκρασία του τοιχώματος εσωτερικά του πρώτου στρώματος μόνωσης (1850 °C). Το σύστημα δηλαδή

ισορροπεί σε μια νέα κατάσταση κατά την οποία οι θερμορροή περιορίζεται σημαντικά, ανεβάζοντας ωστόσο τις θερμοκρασίες στους ενδιάμεσους κόμβους του συστήματος. Εάν ο κλιβανός λειτουργούσε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο σχεδιασμός αυτός θα μπορούσε να εφαρμοστεί και με καλά αποτελέσματα, στην προκειμένη όμως περίπτωση η χρήση του κρίνεται απαγορευτική.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η ενσωμάτωση της μόνωσης μέσω MLI σε κλιβανό με δύο βαθμίδες κενού. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τρεις περιπτώσεις εφαρμογής, η πρώτη με την ενσωμάτωση MLI στο ενδιάμεσο τοίχωμα ανάμεσα των δύο στρώσεων κενού, η δεύτερη με ενσωμάτωση στο εξωτερικό τοίχωμα και η τρίτη με ενσωμάτωση σε αμφότερα τα τοιχώματα. Και στις τρεις όμως περιπτώσεις τόσο οι απώλειες θερμότητας, όσο και η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερες από τον προηγούμενο μονοβάθμιο σχεδιασμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8. Οι MLI που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν από 8 στρώσεις.

Περίπτωση	Απώλειες θερμότητας (kW)	Εξωτερική θερμοκρασία (°C)
<b>MLI στο πρώτο τοίχωμα</b>	4.1	120
<b>MLI στο δεύτερο τοίχωμα</b>	2.8	90
<b>MLI σε αμφότερα τα τοιχώματα</b>	2.7	87

**Πίνακας 3.8 Αποτελέσματα μοντέλου δύο βαθμίδων κενού με χρήση MLI**

#### 3.2.4. Μόνωση με προσθήκη σωλήνων ψύξης

Στους προτεινόμενους σχεδιασμούς που παρουσιάστηκαν παραπάνω η προσοχή επικεντρώθηκε στην αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας του κλιβάνου με παρεμβολή περισσότερων βαθμίδων μόνωσης διάφορων τύπων, όπως επιπλέον βαθμίδας κενού, στρώσεις MLI κ.α. Οι προσπάθειες αυτές απέτυχαν τον σκοπό τους, κυρίως λόγω των απαιτήσεων υψηλής θερμοκρασίας έψησης του κλιβάνου. Οι θερμοκρασίες αυτές που αγγίζουν τους 1800 °C υποχρεώνουν το σύστημα να αναπτύξει αντίστοιχες θερμοκρασίες στις ενδιάμεσες συνιστώσες του όταν προσπαθεί να περιοριστεί το ρεύμα θερμότητας που βγαίνει προς το περιβάλλον. Αντί λοιπόν να επιζητείται ο περιορισμός της θερμορροής αυτής, προτείνεται η απαγωγή της μέσω ενός εξωτερικού μέσου ψύξης, το οποίο απορροφώντας το μεγαλύτερο ποσοστό της θα εξασφαλίζει χαμηλές θερμοκρασίες, κυρίως στο εξωτερικό περιβλήμα του κλιβάνου όπου εντοπίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα. Προς την κατεύθυνση αυτή, τοποθετούνται σωλήνες εξωτερικά των τοιχωμάτων των περιβλήματος, οι οποίοι θα βρίσκονται συγκολλημένοι πάνω στα τοιχώματα μέσω ενός αγωγίμου συγκολλητικού μέσου. Πρέπει λοιπόν να μελετηθεί η μεταφορά θερμότητας με αυτές τις συνθήκες και να διαστασιοποιηθεί η κατασκευή, έτσι ώστε να εξασφαλίζει θερμοκρασίες τοιχωμάτων που θα εμπίπτουν εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων.

Το ψυκτικό μέσο που θα κυκλοφορεί στους σωλήνες που περιγράφηκαν παραπάνω επιλέγεται να είναι νερό από το δίκτυο ύδρευσης που είναι εγκατεστημένο στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, για το οποίο, άλλωστε, προορίζεται και ο σχεδιαζόμενος κλιβανός. Το νερό το οποίο θα ρέει στους σωλήνες θεωρείται πως θα παρουσιάζει πλήρως ανεπτυγμένη ροή, η οποία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης.

Για πλήρως υδροδυναμικά ανεπτυγμένη στρωτή ροή, όπου το προφίλ της ταχύτητας έχει το χαρακτηριστικό παραβολοειδές σχήμα της ροής Poiseuille, υπάρχουν διαθέσιμα απλά, αναλυτικά αποτελέσματα [2]. Ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός και ίσος με:

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (2.49)$$

$$\text{Re}_D = \frac{GD}{\mu} \quad (2.50)$$

όπου,  $D$  είναι η διάμετρος του σωλήνα,  $G$  είναι η ταχύτητα του ρευστού ( $G = \dot{m}/A_c$ ) και  $\mu$  το δυναμικό του ιξώδους. Ο δείκτης  $D$  χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ότι το χαρακτηριστικό μήκος για τον αριθμό Reynolds είναι η διάμετρος του σωλήνα. Αν η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του σωλήνα θεωρείται σταθερή με την πάροδο του χρόνου, τότε ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$\text{Nu}_D = 3.66 \quad (2.51)$$

Αντίθετα, αν θεωρηθεί σταθερό το ρεύμα παροχής θερμότητας, τότε ο παραπάνω αδιάστατος αριθμός είναι:

$$\text{Nu}_D = \frac{48}{11} = 4.364 \quad (2.52)$$

Η μεταβολή από στρωτή σε τυρβώδη ροή γίνεται όταν  $\text{Re}_D \approx 2300$ , αν και αποκλειστικά τυρβώδης ροή αναπτύσσεται για  $\text{Re}_D > 10,000$ . Για πλήρως υδροδυναμικά ανεπτυγμένη ροή, ο συντελεστής τριβής μπορεί να προσδιοριστεί από το διάγραμμα Moody, ή από την σχέση του Petukhov:

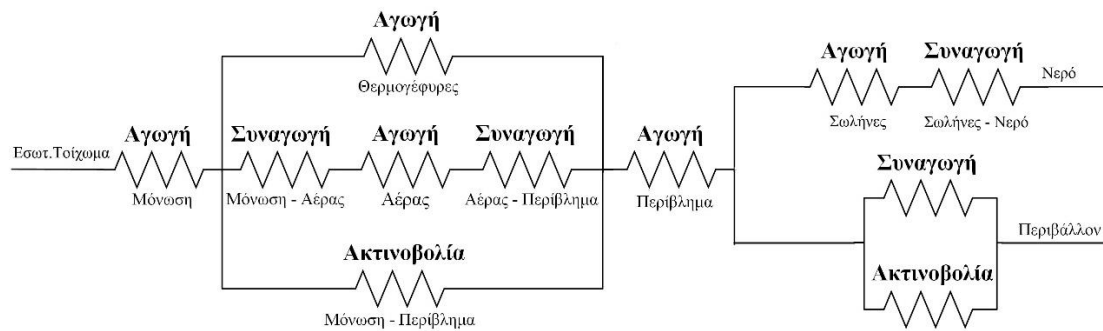
$$f = (0.790 \ln \text{Re}_D - 1.64)^{-2}, \quad 10^4 < \text{Re}_D < 5 \times 10^6 \quad (2.53)$$

Σε αντίθεση με την στρωτή ροή, η συνοριακή συνθήκη που επικρατεί ανάμεσα στο ρευστό και το τοίχωμα (σταθερή θερμοροή ή θερμοκρασία) δεν έχει σημασία για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt στην τυρβώδη ροή, με εξαίρεση τα υγρά μέταλλα που έχουν χαμηλούς αριθμούς Prandtl. Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση του Gnielinski ως:

$$\text{Nu}_D = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)}, \quad 3000 < \text{Re}_D < 10^6 \quad (2.54)$$

όπου ο συντελεστής τριβής  $f$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.39).

Οι σωλήνες προστίθενται επιπλέον στον βασικό σχεδιασμό του κλιβάνου που περιλαμβάνει μία βαθμίδα κενού. Το εξωτερικό περίβλημα επιλέγεται να κατασκευαστεί από αλουμίνιο, αντί του χάλυβα, μιας και έχει χαμηλότερη συντελεστή εκπομπής και, κατά συνέπεια, μεγαλύτερο συντελεστή ανακλαστικότητας, με στόχο τον κατά το δυνατό περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Όπως φαίνεται στο θερμικό κύκλωμα του Σχήματος 3.15, η προσθήκη των σωλήνων προσφέρει πλέον μία νέα, ξεχωριστή κατεύθυνση για τη θερμοροή, παρακάμπτοντας ουσιαστικά την πορεία της θερμότητας που οδηγεί απευθείας στο περιβάλλον.



**Σχήμα 3.15** Θερμικό κύκλωμα κλιβάνου με χρήση σωλήνων ψύξης

Το κύκλωμα του Σχήματος 3.15 υλοποιείται σε περιβάλλον *Matlab/Simulink* και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10. Οι διαστάσεις των επιμέρους συνιστωσών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9. Η θερμοκρασία του ψυκτικού νερού κατά την έξοδό του από το θερμικό κύκλωμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{total} = \dot{m}c_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (2.55)$$

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος πλευράς εσωτερικά της μόνωσης (mm)	300
Πάχος εσωτερικής μόνωσης (mm)	50
Απόσταση εσωτερικής μόνωσης-περιβλήματος (mm)	100
Πάχος περιβλήματος (mm)	5
Αριθμός σωλήνων ανά πλευρά	4
Υλικό σωλήνων	Χαλκός
Διάμετρος Σωλήνων (inches)	1/2
Παροχή όγκου (lt/min)	5
Πίεση εξόδου (bar)	3
Θερμική αγωγιμότητα σωλήνων (W/mK)	400
Θερμοκρασία εισόδου νερού (°C)	20

**Πίνακας 3.9** Βασικές διαστάσεις μοντέλου σωλήνων

Μέγεθος	Τιμή
Θερμοκρασία εσωτερικά μόνωσης (°C)	1850
<b>Θερμοκρασία εξωτερικά μόνωσης (°C)</b>	<b>723</b>
<b>Θερμοκρασία εξωτερικά περιβλήματος (°C)</b>	<b>37</b>
Θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού νερού (°C)	20
Θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού νερού (°C)	36

<b>Συνολικό ρεύμα θερμότητας (kW)</b>	<b>5.75</b>
Ρεύμα θερμότητας από μόνωση σε περίβλημα μέσω ακτινοβολίας (kW)	5.22
Ρεύμα θερμότητας από περίβλημα σε περιβάλλον μέσω συναγωγής (kW)	0.19
Ρεύμα θερμότητας από περίβλημα σε περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας (kW)	0.07
Ρεύμα θερμότητας από περίβλημα σε ψυκτικό νερό μέσω σωλήνων (kW)	5.57

**Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα μοντέλου σωλήνων**

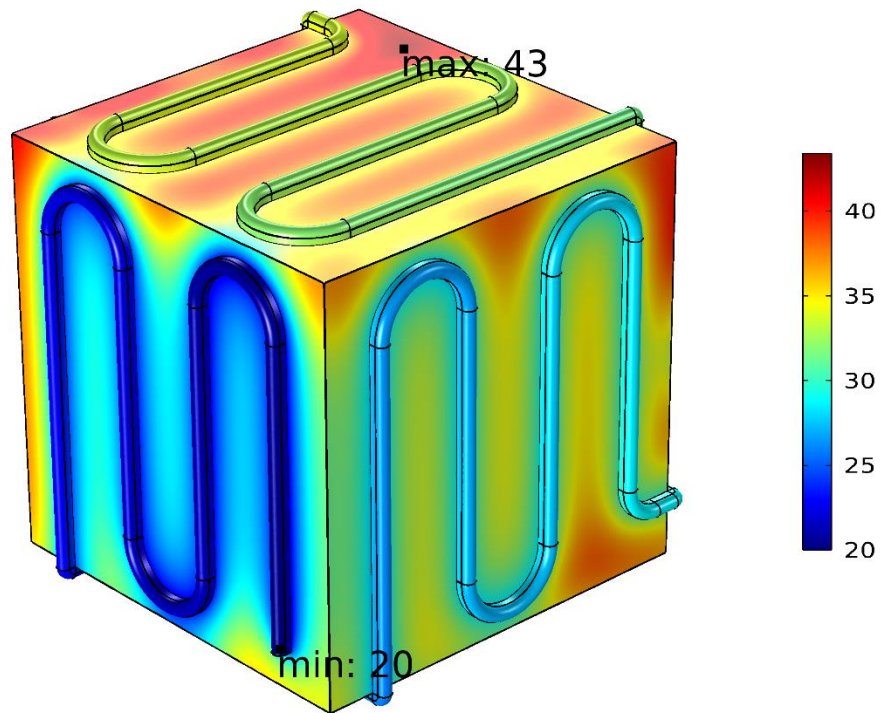
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.10 γίνεται εμφανές ότι με τον προτεινόμενο σχεδιασμό, ενώ οι απώλειες θερμότητας και γενικά τα χαρακτηριστικά του θερμικού συστήματος παρέμειναν στα ίδια επίπεδα με προηγουμένως, εντούτοις η μέση θερμοκρασία του περιβλήματος του κλιβάνου μειώθηκε στους μόλις 37 °C. Η θερμοκρασία αυτή ασφαλώς δεν θα είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στις 6 έδρες του εξωτερικού περιβλήματος του κλιβάνου, αφού καθώς το ψυκτικό νερό πηγαίνει από την μία έδρα στην άλλη, η θερμοκρασία του αυξάνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητά του να απάγει θερμότητα. Σε καμία περίπτωση όμως δεν ξεπερνά τους 50 °C, όπως προβλέπουν και οι προδιαγραφές του κλιβάνου. Οι διαστάσεις του Πίνακα 3.9 διαμορφώθηκαν έπειτα από σειρά δοκιμών και με κριτήριο την κάλυψη των προδιαγραφών και το περιορισμό του κόστους κατασκευής του κλιβάνου.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.10 δείχνουν ότι ο εξεταζόμενος σχεδιασμός, που χρησιμοποιεί για τη μόνωση του κλιβάνου περιβάλλον κενού και για την απαγωγή της θερμότητας σωλήνες ψύξης οδηγεί σε μία κατασκευή που εμπίπτει εντός των προδιαγραφών, όσον αυτές αφορούν τη λειτουργία του κατά τη μόνιμη κατάσταση. Ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο η παραπάνω αναλυτική προσέγγιση του σχεδιασμού να επιβεβαιωθεί και μέσω περιβάλλοντος πεπερασμένων στοιχείων. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μοντέλων με τα αντίστοιχα των πεπερασμένων στοιχείων είναι προαπαιτούμενο για την έγκριση του σχεδιασμού και τη συνέχισή του.

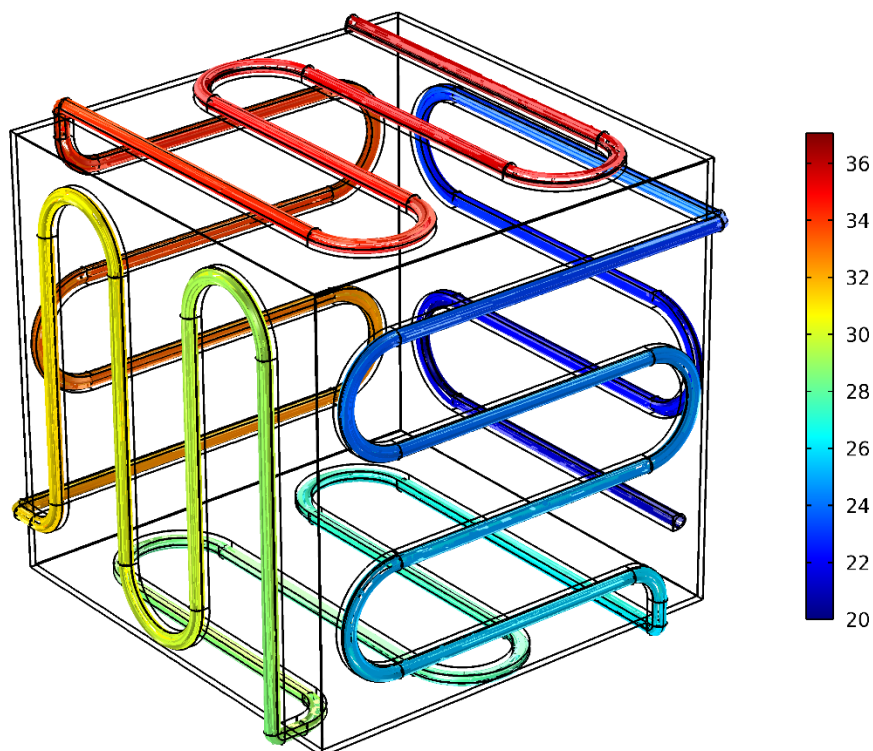
Το περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων που επιλέγεται για την επιβεβαίωση των μοντέλων είναι το *Comsol Multiphysics*, κυρίως για τη μεγάλη γκάμα επιλογών που προσφέρει για την ανάλυση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας. Στο περιβάλλον αυτό επιδιώκεται η κατασκευή γεωμετρικών μοντέλων για την τρισδιάστατη ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του κλιβάνου και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μοντέλων. Για αυτό το λόγο και συμπεριλαμβάνονται κανονικά όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που εμφανίζονται σε κάθε βαθμίδα του κλιβάνου και παρουσιάζονται αναλυτικά παραπάνω.

Το πρώτο αποτέλεσμα που χρειάζεται επιβεβαίωση και αφορά τον τελευταίο σχεδιασμό, είναι το αν και κατά πόσον η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβλήματος παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων παρουσία σωλήνων ψύξης. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού, κατασκευάζεται αρχικά ένα γεωμετρικό τρισδιάστατο μοντέλο του κλιβάνου στο περιβάλλον σχεδίασης *Solidworks* με προσθήκη σωλήνων ψύξης στο εξωτερικό, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι βασικές διαστάσεις που ορίστηκαν στον Πίνακα 3.9. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό εισάγεται στο περιβάλλον *Comsol Multiphysics* και εκτελείται ταυτόχρονα μία CFD και μία Thermal ανάλυση όπου υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της ροής του νερού εσωτερικά των σωλήνων και η μετάδοση της θερμότητας που συνεπάγεται από αυτή, αλλά και από τη λειτουργία όλου του κλιβάνου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.16 και 3.17.





**Σχήμα 3.16 Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία περιβλήματος παρουσία σωλήνων ψύξης**

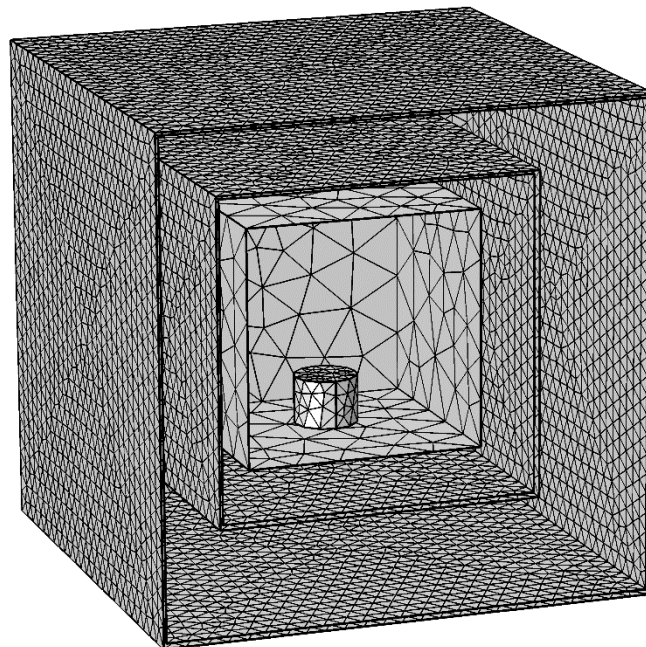


**Σχήμα 3.17 Θερμοκρασία νερού εντός σωλήνων ψύξης**

Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 3.16 και 3.17 είναι θετικά για την επιτυχία του σχεδιασμού και επιβεβαιώνουν την αναλυτική προσέγγιση που προηγήθηκε. Όπως προβλέφθηκε, η μέγιστη

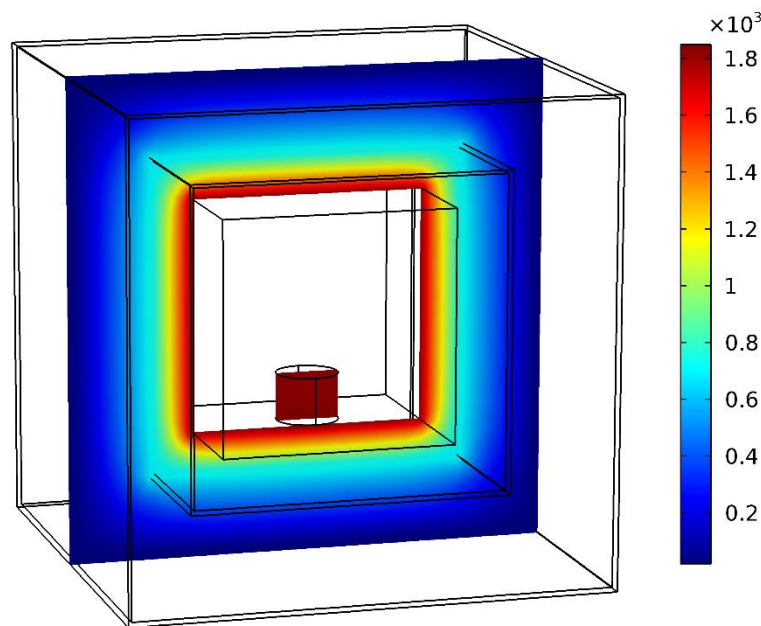
θερμοκρασία του περιβλήματος δεν ξεπερνά τους  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (είναι μόλις  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), και αυτή παρατηρείται σε περιοχή του περιβλήματος κοντά στην έξοδο του σωλήνα ψύξης, όπου το νερό έχει τη μεγαλύτερη θερμοκρασία του, και σε ένα σημείο το οποίο δεν περνά κοντά του κάποιο τμήμα του σωλήνα. Επίσης η θερμοκρασία εξόδου του νερού από των σωλήνα είναι περίπου  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , όπως ακριβώς προβλέφθηκε και από το αναλυτικό μοντέλο και παρουσιάστηκε στον Πίνακα 3.10.

Το δεύτερο στοιχείο που απαιτεί επαλήθευση είναι το συνολικό ρεύμα θερμότητας που απελευθερώνεται από τον κλίβανο στο περιβάλλον σε μορφή απωλειών στη μόνιμη κατάσταση. Καταστρώνεται, λοιπόν, και πάλι αντίστοιχο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας για τον υπολογισμό του ρεύματος θερμότητας αυτού. Στο Σχήμα 3.18 φαίνεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάστηκε. Από την εκτέλεση του μοντέλου αυτού προέκυψε πως το εκτιμώμενο ρεύμα θερμότητας στη μόνιμη κατάσταση είναι  $5.65\text{ kW}$ . Συγκρινόμενο το αποτέλεσμα αυτό με την πρόβλεψη του αναλυτικού μοντέλου με το οποίο υπολογίστηκαν απώλειες ύψους  $5.75\text{ kW}$ , προκύπτει μια απόκλιση της τάξης των  $1,7\%$ . Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα ακριβές και επαληθεύει για ακόμα μία φορά την αξιοπιστία του αναλυτικού μοντέλου. Τέλος, για την πληρότητα των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 3.19 δίνεται η κατανομή των θερμοκρασιών στον κλίβανο από το δοκίμιο έως και το εξωτερικό περίβλημα.



**Σχήμα 3.18 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για προσδιορισμό απωλειών θερμότητας στη μόνιμη κατάσταση**





**Σχήμα 3.19 Κατανομή των θερμοκρασιών σε °C στον κλίβανο από το δοκίμιο έως και το εξωτερικό περίβλημα**

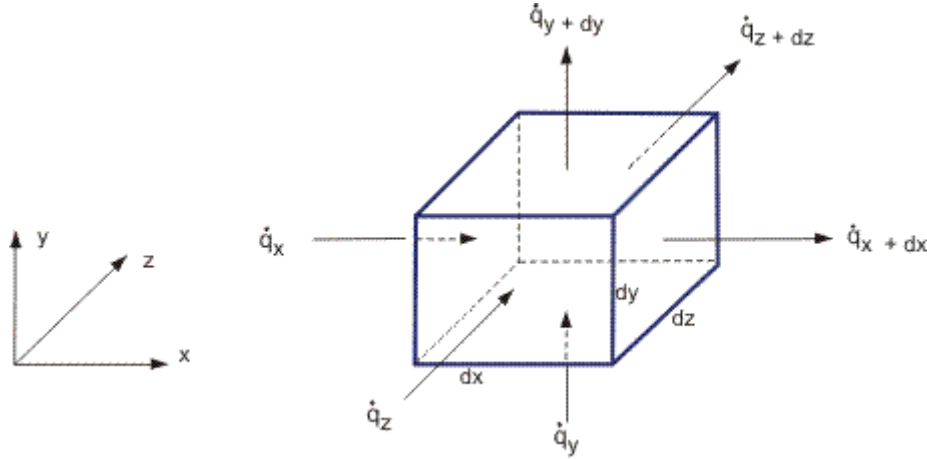
### 3.3. Μεταβατική απόκριση συστήματος, Θέρμανση-Ψύξη

Στον μέχρι τώρα σχεδιασμό του κλιβάνου λήφθηκαν υπόψιν προδιαγραφές και χαρακτηριστικά που αφορούν τη λειτουργία του κατά τη μόνιμη κατάσταση, κατά την οποία επιδιώκεται στο εσωτερικό του να επιτυγχάνεται και να διατηρείται μία σταθερή θερμοκρασία έψησης. Ωστόσο, όπως αναπτύχθηκε στα πρώτα Κεφάλαια της παρούσας εργασίας, τα δοκίμια που θα εισάγονται στον κλίβανο για θερμική κατεργασία, θα πρέπει να υποβληθούν σε έναν θερμικό κύκλο θέρμανσης-ψύξης, έτσι ώστε να διαμορφώσουν τις απαραίτητες κάθε φορά φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Ο απαιτούμενος ρυθμός θέρμανσης και ψύξης ποικίλει κάθε φορά ανάλογα με την εφαρμογή και ορίζεται από τις προδιαγραφές του κλιβάνου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναλυθεί η συμπεριφορά του κλιβάνου στα μεταβατικά φαινόμενα της θέρμανσης και της ψύξης και να ελεγχθεί εάν ο σχεδιασμός που διαμορφώθηκε στο Κεφάλαιο 3.2 είναι επαρκής ή χρειάζεται νέες διορθώσεις.

#### 3.3.1. Μοντελοποίηση φαινομένων μη μόνιμης μετάδοσης θερμότητας

Στην περίπτωση της τρισδιάστατης μεταφορά θερμότητας με αγωγή, για τον στοιχειώδη όγκο του του Σχήματος 3.20 ισχύει ότι το άθροισμα του ρυθμού της εισερχόμενης αγωγής θερμότητας και του ρυθμού παραγωγής ενέργειας μέσα στον όγκο ισούται με το άθροισμα της εξερχόμενης αγωγής θερμότητας και του ρυθμού αποθήκευσης ενέργειας μέσα στον όγκο. Αν υφίσταται παραγωγή ενέργειας μέσα στον όγκο, αυτή προέρχεται είτε από χημικές αντιδράσεις, είτε από ηλεκτρικά ρεύματα που διαπερνούν το υλικό, είτε από πυρηνικές αντιδράσεις. Ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στον όγκο εκφράζεται με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας. Στην περίπτωση αύξησης της εσωτερικής ενέργειας του όγκου αυτή γίνεται αντιληπτή με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Ορίζοντας το σύμβολο  $\Phi$  [W/m<sup>3</sup>] ως το ρυθμό παραγωγής θερμότητας μέσα στον όγκο και γράφοντας με μαθηματικά σύμβολα το ενεργειακό ισοζύγιο που περιγράφηκε παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$q_x + q_y + q_z + \Phi dx dy dz = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) + \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.56)$$



**Σχήμα 3.20** Τρισδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε καρτεσιανές συντεταγμένες για στοιχειώδη όγκο ελέγχου

Από το νόμο Fourier για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή προς κάθε κατεύθυνση ισχύει:

$$q_x = -k_x A \frac{\partial T}{\partial x} = -k_x (dy dz) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.57)$$

$$q_y = -k_y A \frac{\partial T}{\partial y} = -k_y (dx dz) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.58)$$

$$q_z = -k_z A \frac{\partial T}{\partial z} = -k_z (dx dy) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.59)$$

Ο όρος  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$  εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στοιχειώδους όγκου. Εάν η ειδική θερμική αγωγιμότητα θεωρηθεί σταθερή και ίση με  $k$ , η σχέση (3.42) γίνεται:

$$k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \Phi = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.60)$$

Η εξίσωση (3.46) είναι η γενική τρισδιάστατη εξίσωση μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Οι τρεις πρώτοι όροι αριστερά εκφράζουν το ανά μονάδα όγκου καθαρό ποσό θερμότητας το οποίο μεταφέρεται με αγωγή στον όγκο ελέγχου. Η εξίσωση (3.46) γράφεται συνήθως και υπό την μορφή:

$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\Phi}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad a = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.61)$$

Εάν δεν υπάρχουν πηγές προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, που είναι γνωστή ως εξίσωση Fourier:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.62)$$

Στην εξεταζόμενη περίπτωση σχεδιασμού, το θερμικό κύκλωμα που χαρακτηρίζει το σύστημα δίνεται στο Σχήμα 3.10. Στο κύκλωμα αυτό πρέπει να προστεθεί επιπλέον το κομμάτι της μεταφοράς θερμότητας από τις αντιστάσεις προς το εσωτερικό της μόνωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, μιας και στο μεταβατικό φαινόμενο δεν μπορεί να αμεληθεί η επίδραση του ρεύματος θερμότητας κάθε στιγμή που εκπέμπεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις καθώς καθορίζει ουσιαστικά την απόκριση όλου του θερμικού συστήματος που εξετάζεται. Κάθε στοιχείο του κυκλώματος δεν αντιπροσωπεύεται πλέον απλώς από μία εξίσωση στοιχείου, αλλά από μία διαφορική εξίσωση η οποία είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου, όσο και της γεωμετρίας. Τελικά, λοιπόν, η απόκριση του συστήματος προκύπτει από την επίλυση ενός μη γραμμικού συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η αναλυτική επίλυση του παραπάνω συστήματος αποδεικνύεται ιδιαίτερα σύνθετη και ξεπερνάει τους στόχους της εργασίας αυτής. Εναλλακτικά, τέτοια συστήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Αρχικά, αναλύεται το σύστημα σε επίπεδο πεπερασμένων διαφορών, προκύπτουν τα πρώτα αποτελέσματα και αφού επαληθευτούν από τα αντίστοιχα πιο ακριβή, αλλά και πιο χρονοβόρα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται ως το βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της σχεδίασης του κλιβάνου.

Για την αντιμετώπιση του μεταβατικού φαινομένου, κάθε συνιστώσα του κλιβάνου με ικανό πάχος χωρίζεται σε επιμέρους στοιχεία, τα οποία θεωρείται ότι διατηρούν ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο τους τον όγκο. Επίσης, θεωρείται ότι η θερμότητα διαδίδεται προς μία μόνο κατεύθυνση, κατά την έννοια του πάχους. Από τις συνιστώσες του κλιβάνου σε πεπερασμένα στοιχεία χωρίζεται μόνο η εσωτερική μόνωση που έχει ως βάση την αλούμινα και πάχος περί τα 50mm. Αντίθετα, το εξωτερικό τοίχωμα του αλουμινίου, που έχει σημαντικά μικρότερο πάχος (<5mm) και πολύ μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αντιμετωπίζεται ως ενιαίο σύστημα συγκεντρωμένων ιδιοτήτων.

Ο παραπάνω ισχυρισμός αποδεικνύεται και από τη χρήση του αριθμού Biot. Ο αριθμός Biot ορίζεται ως:

$$Bi = \frac{L_c h}{k} \quad (2.63)$$

όπου  $h$  ο συντελεστής συναγωγιμότητας της επιφάνειας με το εξωτερικό περιβάλλον,  $L_c$  το χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας, όπου στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί με το πάχος του κάθε τοιχώματος και  $k$  ο συντελεστής αγωγιμότητας του σώματος. Εάν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος του 0.1, τότε η αγωγή της θερμότητας συμβαίνει τόσο γρήγορα στο εσωτερικό του και τα διαφορικά της θερμοκρασίας αμελούνται, με συνέπεια να αντιμετωπίζεται ως συγκεντρωμένο σύστημα (*lumped system*). Στην περίπτωση της εσωτερικής μόνωσης ο συντελεστής Biot παίρνει την τιμή 0.25, ενώ στην περίπτωση του αλουμινένιου εξωτερικού περιβλήματος η τιμή του ανέρχεται μόλις στο  $10^{-4}$ . Ως αποτέλεσμα, σε επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία χωρίζεται μόνο η εσωτερική μόνωση. Επίσης, επειδή όπως φάνηκε από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 3.2 ο αέρας που υπάρχει στο σύστημα, είτε σε υποπίεση είτε όχι, έχει μικρή επίδραση στη συνολική μεταφορά θερμότητας, λαμβάνεται ως συγκεντρωμένο σύστημα και δεν αναλύεται σε επιμέρους στοιχεία.

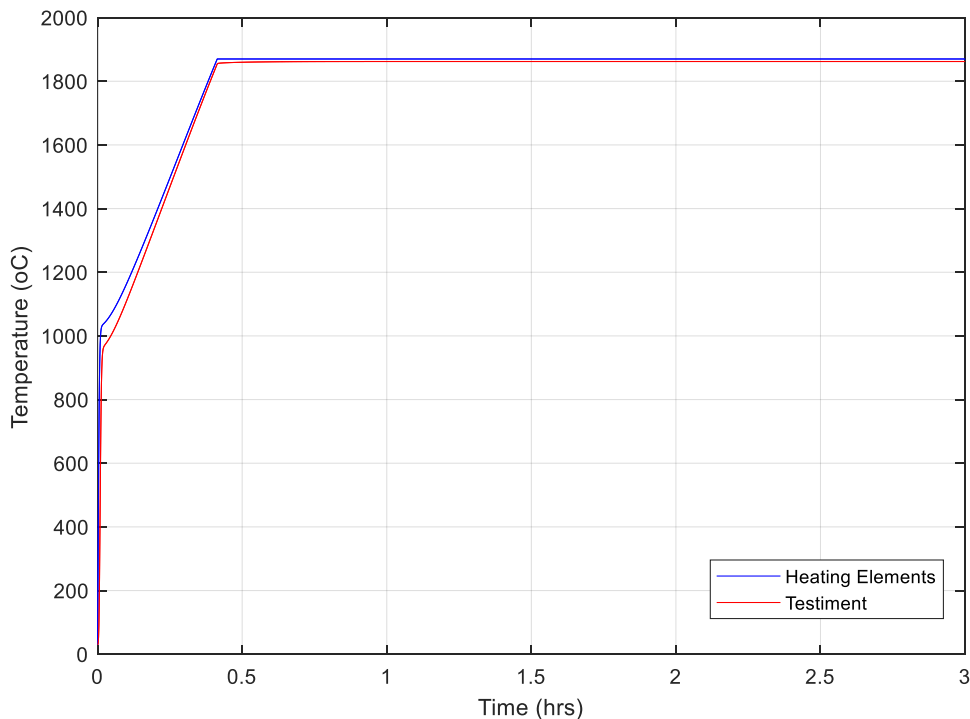
Κατά την ανάλυση της μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας μέσα στον κλίβανο, σε κάθε στοιχείο του λαμβάνεται για κάθε χρονικό βήμα ο ισολογισμός ενέργειας ως ακολούθως:

$$mc_p \frac{\Delta T}{dt} = \sum q_{in} - \sum q_{out} \quad (2.64)$$

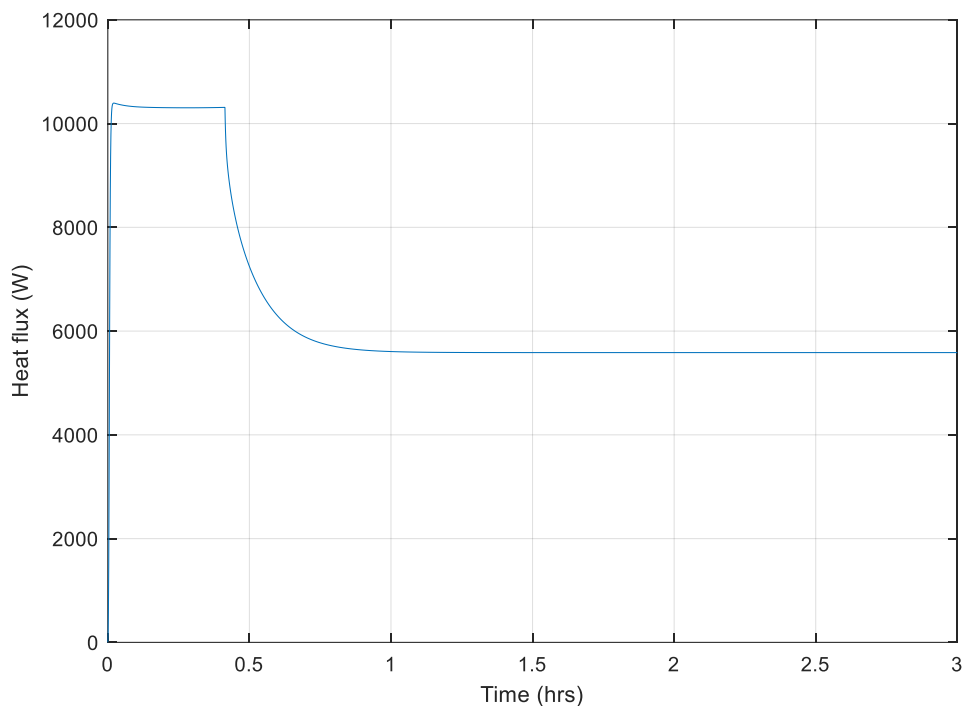
Τα ρεύματα θερμότητας που μπαίνουν ή βγαίνουν από το σώμα εξαρτώνται από τη θέση του σώματος στο σύστημα και αφορούν τις τρεις περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας που αναλύθηκαν παραπάνω. Η είσοδος στο σύστημα, είναι ουσιαστικά το ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά τις ηλεκτρικές αντιστάσεις και προκαλεί ένα ρεύμα θερμότητας μέσω του φαινομένου Joule. Το φαινόμενο Joule περιγράφεται από τη σχέση:

$$Q = I^2 R \quad (2.65)$$

όπου  $I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και  $R$  η ωμική αντίσταση των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Το ρεύμα θερμότητας αυτό αποτελεί την είσοδο στο σύστημα το οποίο για κάθε χρονικό βήμα επιλύει τους ισολογισμούς ενέργειας σύμφωνα με τη σχέση (3.50) σε κάθε στοιχείο, σύμφωνα με το κύκλωμα του Σχήματος 3.10. Διατηρώντας τις διαστάσεις που προέκυψαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και επιλέγοντας ένταση ρεύματος στις ηλεκτρικές αντιστάσεις της τάξης των 66 A, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο αντίστοιχο Κεφάλαιο, λαμβάνονται τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.21-3.22.



**Σχήμα 3.21** Θερμοκρασία ηλεκτρικών αντιστάσεων (μπλε) και δοκιμίου (κόκκινο) συναρτήσει του χρόνου



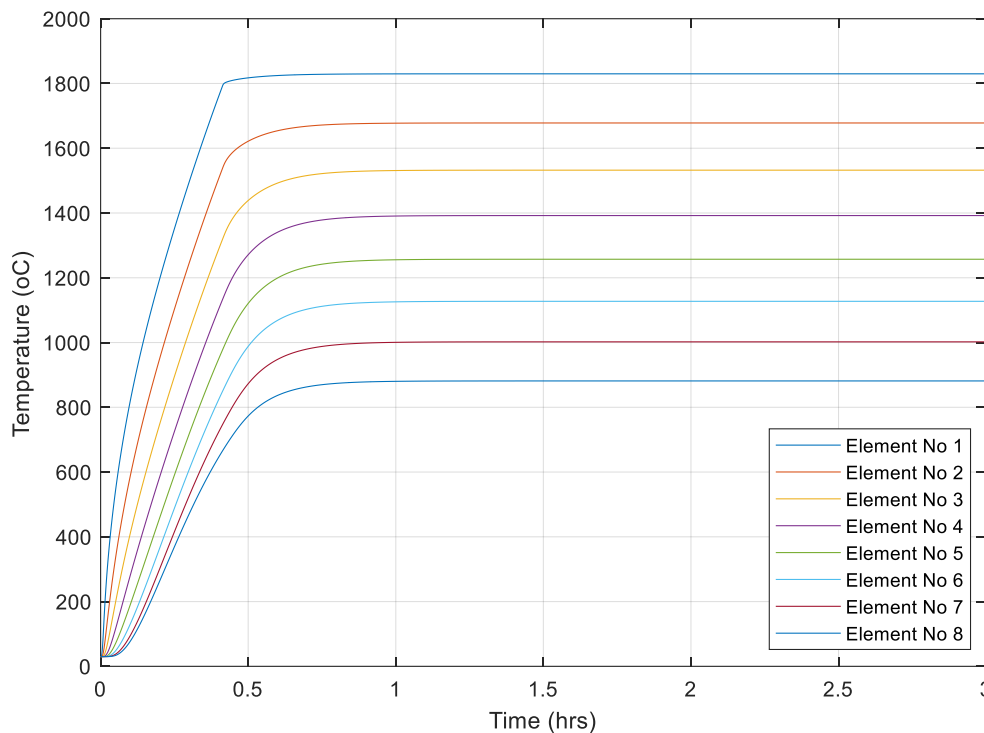
**Σχήμα 3.22 Ρεύμα θερμότητας που απελευθερώνεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις συναρτήσει του χρόνου**

Στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η απόκριση των ηλεκτρικών αντιστάσεων και του δοκιμίου στην περίπτωση σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος 66 A. Η καμπύλη του δοκιμίου ακολουθεί αρκετά πιστά εκείνη των θερμαντικών στοιχείων, παρατήρηση που ενισχύει την άποψη ότι ο έως τώρα σχεδιασμός της μόνωσης του κλιβάνου είναι ικανοποιητικός και επαρκής. Τα θερμαντικά στοιχεία φαίνεται να διέρχονται τριών φάσεων κατά τη διαδικασία θέρμανσης του δοκιμίου. Αρχικά, η θερμοκρασία τους αυξάνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό, καθώς λόγω του χαμηλού διαφορικού των θερμοκρασιών και της θερμικής αδράνειας των τοιχωμάτων της μόνωσης δεν έχει αρχίσει να γίνεται σημαντική η απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα και το περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει στη δεύτερη φάση της διαδικασίας θέρμανσης, οπότε η θερμοκρασία των ηλεκτρικών αντιστάσεων φαίνεται να αυξάνεται με αρκετά μειωμένο ρυθμό από ότι προηγουμένως. Τέλος, στην τρίτη φάση η θερμοκρασία των στοιχείων διατηρείται σταθερή, μειώνοντας φυσικά του ηλεκτρικό ρεύμα που τα διαπερνά κατάλληλα. Η διαφορά των θερμοκρασιών μεταξύ θερμαντικών στοιχείων και δοκιμίου στη μόνιμη κατάσταση είναι αναμενόμενη και πρόκειται να αντιμετωπιστεί με τον σχεδιασμό ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Ο ρυθμός, ωστόσο, της αύξησης της θερμοκρασίας του δοκιμίου είναι ικανοποιητικός και καλύπτει όλες τις περιπτώσεις που εμφανίζονται στους θερμικούς κύκλους που παρουσιάστηκαν στα αντίστοιχα Κεφάλαια.

Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται το ρεύμα θερμότητας που φεύγει από τα θερμαντικά στοιχεία. Όπως είχε υπολογιστεί και στο αντίστοιχο Κεφάλαιο, κατά τη φάση της θέρμανσης η θερμική ισχύς των αντιστάσεων πλησιάζει τα 11 kW, ενώ όταν το σύστημα φτάσει στη μόνιμη κατάσταση, η ισχύς αυτή αντισταθμίζει τις θερμικές απώλειες του κλιβάνου οι οποίες ανέρχονται, όπως υπολογίστηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο στα 5.6 kW.

Για την υλοποίηση των παραπάνω μοντέλων με γνώμονα την επίτευξη ενός ικανοποιητικού επιπέδου ακρίβειας σε συνδυασμό με ένα λογικό υπολογιστικό κόστος, δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί χρονικού βήματος και αριθμού πεπερασμένων στοιχείων στην εσωτερική μόνωση του κλιβάνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των δύο παραμέτρων δεν μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, διότι έτσι

επηρεάζεται σημαντικά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και είναι αρκετά πιθανό το σύστημα να οδηγηθεί ακόμα και στην αστάθεια. Η εισαγωγή ενός μεγάλου σχετικά αριθμού πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με ένα, και πάλι σχετικά, μεγάλο χρονικό βήμα, εισάγει μία εικονική θερμική αδράνεια στο σύστημα, αλλοιώνοντας τα πραγματικά χαρακτηριστικά του. Η όποια αύξηση των πεπερασμένων στοιχείων της μόνωσης του κλιβάνου θα πρέπει να συνοδεύεται και από μία αντίστοιχη μείωση του χρονικού βήματος του μοντέλου έτσι ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση του παραπάνω φαινομένου. Στην παρούσα μελέτη, ο συνδυασμός των δύο παραμέτρων που εξασφάλιζε ευρωστία, ακρίβεια και χαμηλό υπολογιστικό κόστος είναι χρονικό βήμα 10 msec σε συνδυασμό με 8 πεπερασμένα στοιχεία. Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται η θερμοκρασιακή απόκριση κάθε πεπερασμένου στοιχείου της εσωτερικής μόνωσης.



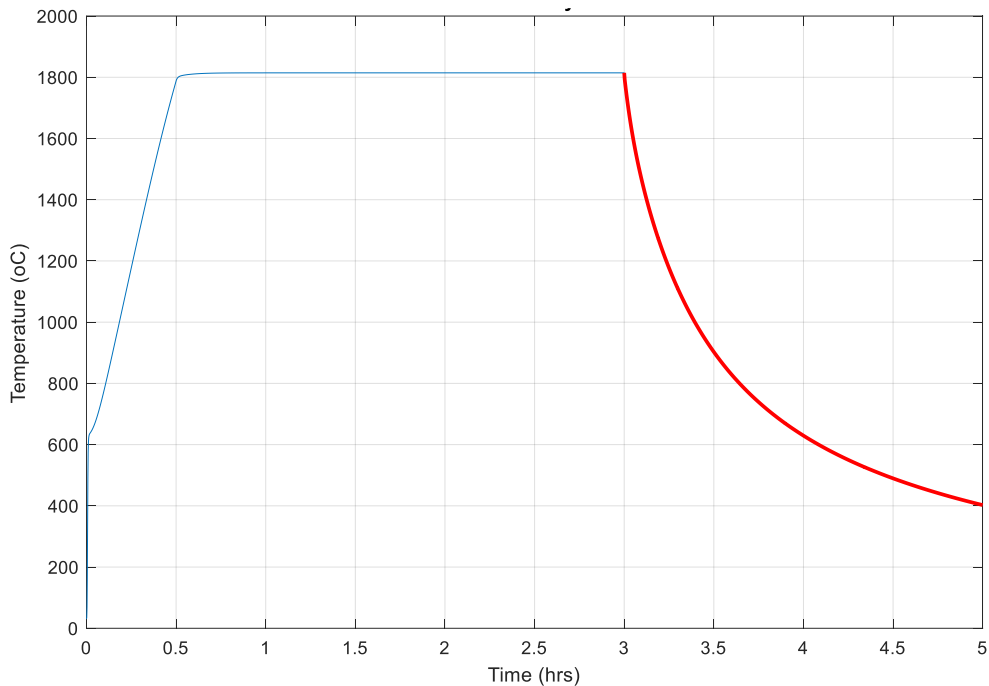
**Σχήμα 3.23 Θερμοκρασιακή απόκριση πεπερασμένων στοιχείων εσωτερικής μόνωσης κλιβάνου**

### 3.3.2. Ανάλυση ψύξης κλιβάνου

Πέρα από την ανάλυση της διαδικασίας θέρμανσης του δοκιμίου και κατ' επέκταση του κλιβάνου, ένα ακόμα φαινόμενο μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας που είναι παρών στους θερμικούς κύκλους των δοκιμίων που πρόκειται να κατεργαστούν θερμικά στο εσωτερικό του κλιβάνου είναι η διαδικασία ψύξης του δοκιμίου από την θερμοκρασία έψησης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διαδικασία ψύξης είναι ιδιαίτερα σημαντική στην θερμική κατεργασία ενός δοκιμίου και επηρεάζει σε κρίσιμο βαθμό τις τελικές του ιδιότητες. Το σύστημα ψύξης του κλιβάνου θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι θα μπορούν να επιτυγχάνονται οι απαραίτητοι ρυθμοί ψύξης που απαιτούνται από τους θερμικούς κύκλους, για κάθε είδος δοκιμίου που μπορεί να κατεργαστεί στον κλίβανο.

Για να εξεταστούν οι μέγιστοι ρυθμοί ψύξης που μπορεί να επιτύχει ο κλίβανος, θεωρείται ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά τα θερμαντικά στοιχεία μηδενίζεται αμέσως μόλις ξεκινήσει η

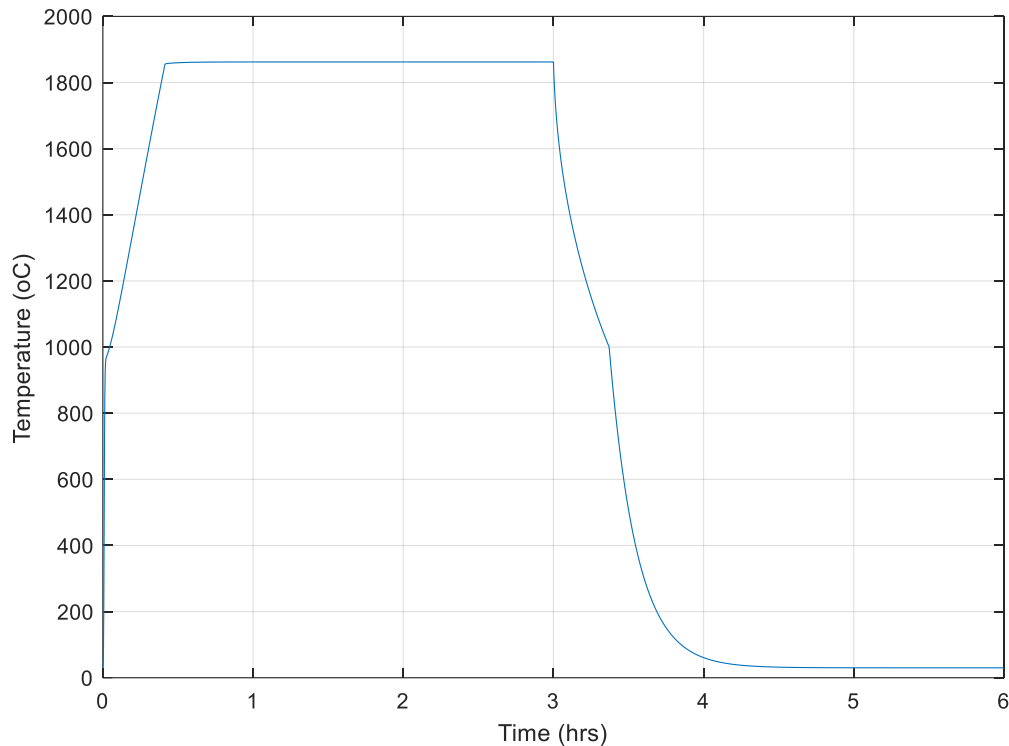
διαδικασία ψύξης του δοκιμίου. Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου, αν μετά τις 3 ώρες τα θερμαντικά στοιχεία πάψουν να διαρρέονται από ρεύμα, όποτε και αποκαλύπτεται και η απόκριση του συστήματος σε μη μηδενικές αρχικές συνθήκες και μηδενική είσοδο.



**Σχήμα 3.24 Θερμικός κύκλος κατεργασίας δοκιμίου με έμφαση στη διαδικασία ψύξης**

Στο Σχήμα 3.24 φαίνεται η διαδικασία ψύξης του δοκιμίου (κόκκινο χρώμα) σταματώντας την τροφοδοσία των θερμαντικών στοιχείων με ηλεκτρικό ρεύμα. Αν και αρχικά ο ρυθμός ψύξης του δοκιμίου είναι πολύ ικανοποιητικός, σταδιακά με την πάροδο του χρόνου γίνεται ολοένα και μικρότερος, σε βαθμό που να μην καταφέρνει να επιτύχει θερμοκρασία δοκιμίου κοντά τουλάχιστον στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η παρατήρηση αυτή ερμηνεύεται από το μηχανισμό της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Όταν οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι υψηλές, τότε η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι αρκετά ισχυρή και οδηγεί σε μεγάλα ρεύματα θερμότητας. Καθώς όμως οι διαφορές μειώνονται, τα ρεύματα αυτά θερμότητας εξασθενούν σημαντικά, και αφού η συναγωγή μέσω του αέρα είναι πολύ περιορισμένη λόγω της υποπίεσης, μετά τους 1000 °C περίπου ο ρυθμός ψύξης μειώνεται πέραν του αποδεκτού.

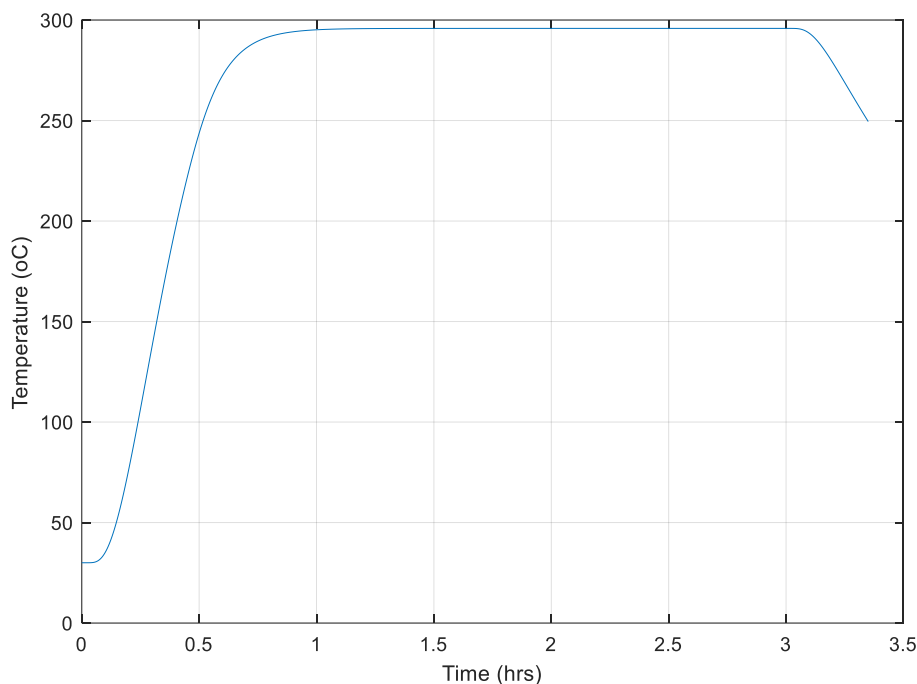
Συμπερασματικά, αν και όπως φαίνεται από την παραπάνω ανάλυση κατά το πρώτο στάδιο της ψύξης είναι επαρκές το «σβήσιμο» των θερμαντικών στοιχείων, μετά από κάποιο σημείο πρέπει να προταθεί ένας επιπλέον μηχανισμός ψύξης του δοκιμίου για την επίτευξη των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του κλιβάνου. Μια πρώτη λύση του προβλήματος είναι η έκθεση του δοκιμίου στον ατμοσφαιρικό αέρα εξωτερικά του κλιβάνου έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα από όταν έχει σταματήσει η τροφοδοσία των αντιστάσεων με ηλεκτρικό ρεύμα. Το δοκίμιο θα αποψυχθεί μέσω φυσικής συναγωγής με τον αέρα του περιβάλλοντος, σύμφωνα με αυτά που αναλύθηκαν στο αντίστοιχο Κεφάλαιο. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, επιλέγεται το δοκίμιο να απομακρυνθεί από τον κλίβανο όταν η θερμοκρασία του έχει φτάσει τους 1000 °C. Το διάγραμμα της θερμοκρασίας του συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25.



**Σχήμα 3.25** Θερμικός κύκλος δοκιμίου με ψύξη μέσω έκθεσης του δοκιμίου σε ατμοσφαιρικό αέρα

Τα αποτελέσματα του τρόπου αυτού ψύξης, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.25, παρουσιάζουν ένα ικανοποιητικότερο ρυθμό απόψυξης που είναι πλήρως επαρκής για κάθε εφαρμογή θερμικής κατεργασίας που πρόκειται να εκτελέσει ο κλίβανος. Το δοκίμιο μπορεί πολύ γρήγορα να φτάσει στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και να είναι έτοιμο για περαιτέρω επεξεργασία. Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει η μέθοδος είναι πως θα πρέπει να έρθει ο χειριστής του κλιβάνου σε επαφή με το δοκίμιο ενώ αυτό βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία. Επιπροσθέτως, ο κλίβανος θα πρέπει να ανοιχθεί ενώ μερικές συνιστώσες του ακτινοβολούν όντας σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ και ο αέρας που βρίσκεται μέσα στον κλίβανο και θα έρθει αναγκαστικά σε επαφή με τον χειριστή θα είναι εξαιρετικά ζεστός. Ενδεικτικά, ο αέρας που βρίσκεται σε υποπίεση ανάμεσα στη μόνωση και το εξωτερικό περίβλημα όταν ανοιχθεί ο κλίβανος θα έχει θερμοκρασία της τάξης των 250 °C, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.26.



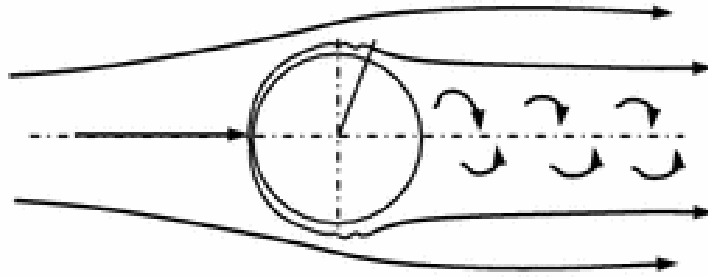


**Σχήμα 3.26 Θερμοκρασία αέρα σε υποπίεση που βρίσκεται ανάμεσα σε μόνωση και εξωτερικό περίβλημα μέχρι να ανοίξει ο κλίβανος**

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται παραπάνω υπαγορεύουν την ανάπτυξη ενός νέου μηχανισμού ψύξης του δοκιμίου που να μην απαιτεί την μεσολάβηση του χειριστή του κλιβάνου και την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες. Θα πρέπει κατά συνέπεια να αναπτυχθεί ένα εσωτερικό σύστημα ψύξης με την προσθήκη αυτοματισμών, έτσι ώστε ο κάθε θερμικός κύκλος να μπορεί να εκτελείται αυτόματα από τον κλίβανο.

Το κύριο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί είναι ο τρόπος με τον οποίο θα ψύχεται το δοκίμιο μέσα στον θάλαμο έψησης όταν τα θερμοκρασιακά στοιχεία έχουν «σβήσει». Εφόσον η ακτινοβολία όπως αποδείχθηκε εφαρμόζεται ικανοποιητικά μέχρι ένα σημείο και κάθε εφαρμογή με χρήση της αγωγής θα είναι αρκετά περίπλοκη στην κατασκευή της για να πραγματοποιηθεί, η αναζήτηση επικεντρώνεται στην εύρεση και υλοποίηση μεθόδων που θα εκμεταλλεύονται τον μηχανισμό της συναγωγής για την απαγωγή της θερμότητας από το δοκίμιο. Μια πρώτη προσπάθεια εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου είναι η εισαγωγή ενός ρεύματος αέρα μέσα στον θάλαμο της έψησης και την ψύξη του δοκιμίου μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής. Το ρεύμα αέρα θα εισέρχεται στο θάλαμο μέσω σωλήνα και θα εξέρχεται από αυτόν με όμοιο τρόπο με ταχύτητα που θα ορίζεται από κάποια αντλία/φουσητήρα.

Η ροή ρευστού κάθετα προς κυλινδρικό σώμα, όπως θεωρείται ότι είναι το δοκίμιο, απαιτεί ξεχωριστά τον υπολογισμό της ειδικής συναγωγιμότητας που προκύπτει από αυτόν τον εξαναγκασμένο τρόπο μετάδοσης θερμότητας. Κατά τη ροή του ρευστού γύρω από το σώμα παρατηρούνται φαινόμενα αποκόλλησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.27, που επηρεάζουν αναμενόμενα την μετάδοση της θερμότητας.



**Σχήμα 3.27 Ροή αέρα κάθετα προς κυλινδρικό σώμα**

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή συναγωγιμότητας έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο Whitaker προτείνει:

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} = \left[ 0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3} \right] Pr^{0.4} \left( \frac{\mu_\infty}{\mu_s} \right)^{0.25} \quad (2.66)$$

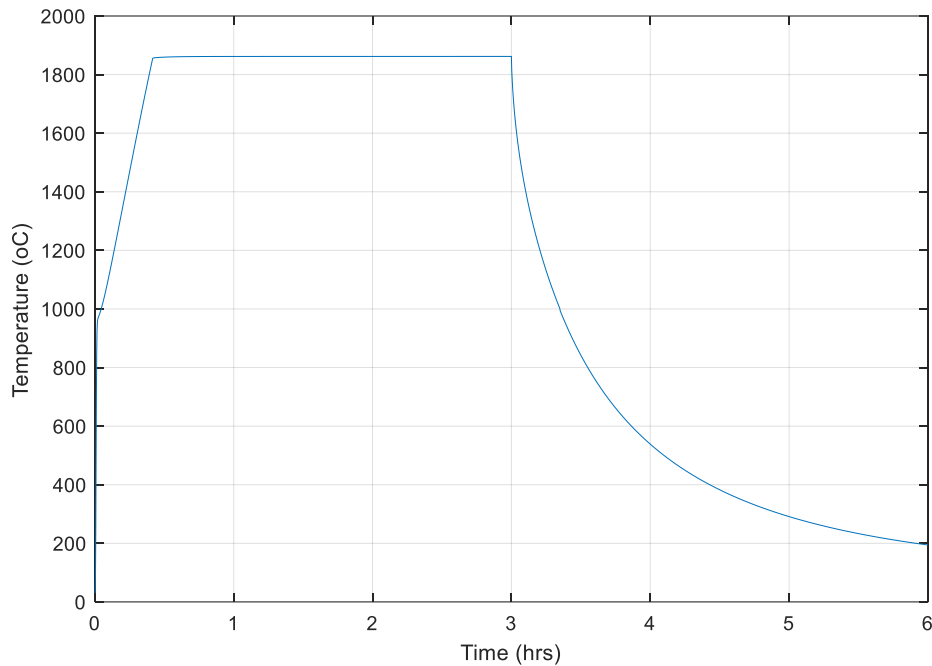
$$\text{όπου} \begin{cases} 40 < Re < 10^5 \\ 0.67 < Pr < 300 \\ 0.25 < (\mu_\infty / \mu_s) < 5.2 \\ \theta.α.: T_\infty \\ \mu_s \sigma \epsilon T_s \end{cases}$$

Μια άλλη έκφραση από του Churchill και Bernstein είναι η:

$$Nu_m = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[ 1 + (0.4 / Pr)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{2/8} \right]^{4/5} \quad (2.67)$$

$$\text{όπου} \begin{cases} 10^2 < Re < 10^7 \\ 0.2 < Pe = Re Pr \\ \theta.α.: T_f \end{cases}$$

Οι σχέσεις (3.52) και (3.53) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για τον συντελεστή συναγωγιμότητας, όποτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις δύο. Τα αποτελέσματα από την κατασκευή και την εκτέλεση του αντίστοιχου μοντέλου φαίνονται στο Σχήμα 3.28.



**Σχήμα 3.28** Θερμικός κύκλος δοκιμίου με ψύξη μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής μεταξύ δοκιμίου και ρεύματος αέρα

Από το Σχήμα 3.28 γίνεται εμφανές ότι τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου ψύξης δεν είναι τα αναμενόμενα. Το διάγραμμα προσομοιάζει αρκετά με εκείνο του Σχήματος 3.24, όπου δεν υπήρχε κάποια μέθοδος ή σύστημα ψύξης εγκατεστημένο. Παρά την εξαναγκασμένη συναγωγή, η θερμοκρασία του δοκιμίου δεν πέφτει στα επιθυμητά επίπεδα μετά τον χρόνο που πρέπει. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός πως, αν και το δοκίμιο ψύχεται από το ρεύμα θερμότητας που προσπίπτει στην εξωτερική του επιφάνεια, εντούτοις συνεχίζει να θερμαίνεται από τα τοιχώματα της εσωτερικής μόνωσης του κλιβάνου μέσω ακτινοβολίας, καθώς εκείνα δεν ψύχονται άμεσα από κάποιο τρίτο μέσο και διατηρούν υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επομένως, το ρεύμα θερμότητας που μεταφέρεται από το δοκίμιο στον αέρα αναπληρώνεται σε μεγάλο βαθμό από τα τοιχώματα του κλιβάνου, με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται ικανοποιητική ψύξη του δοκιμίου.

Από την παραπάνω ανάλυση έγινε εμφανές πως το σύστημα ψύξης δεν πρέπει να αποβλέπει μόνο στην απαγωγή θερμότητας μόνο από το δοκίμιο, αλλά και από τα τοιχώματα που το περιβάλλουν με σκοπό την αποφυγή επαναθέρμανσης του δοκιμίου μέσω αυτών. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εισαγωγή ρεύματος αέρα για την επίτευξη εξαναγκασμένης συναγωγής, όχι όμως με το δοκίμιο αυτή τη φορά, αλλά με το εξωτερικό τμήμα της μόνωσης του κλιβάνου, μέσα στην οποία φιλοξενείται το δοκίμιο. Το ρεύμα θερμότητας θα διακινείται με τον ίδιο τρόπο με προηγουμένως και θα πρέπει να έρχεται σε επαφή και με τις 6 έδρες της μόνωσης για να επιτυγχάνει την ψύξη τους.

Η ψύξη των τοιχωμάτων της μόνωσης μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής, εξαρτάται από τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του ρεύματος θερμότητας που έρχεται σε επαφή με αυτά. Για ροή παράλληλα σε επίπεδο σώμα υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, ανάλογα με το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης.

Σε περίπτωση στρωτής ροής, ο τοπικός αριθμός Nusselt ορίζεται ως

$$Nu_x = 0.332 Pr^{1/3} Re_x^{1/2},$$

$$Re_x < 5 \times 10^5, 0.6 < Pr < 10, \theta.a.: T_f = (T_s + T_\infty) / 2 \quad (2.68)$$

Η μέση ειδική συναγωγιμότητα ορίζεται:

$$h_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L h(x) dx \quad (2.69)$$

Οπότε:

$$h_m = 2h(x)|_{x=L} \quad (2.70)$$

Οπότε και ο μέσος αριθμός Nusselt από τη σχέση (3.54) γίνεται:

$$Nu_m = 0.664 Pr^{1/3} Re_L^{1/2} \quad (2.71)$$

όπου

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} \quad (2.72)$$

$$Re_L = \frac{u_\infty L}{\nu} \quad (2.73)$$

Σε περίπτωση τυρβώδους ροής, ο τοπικός αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad (2.74)$$

με  $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$  και  $\theta.a.: T_f = (T_s + T_\infty) / 2$ .

Η μέση τιμή της ειδικής συναγωγιμότητας στην τυρβώδη ροή υπολογίζεται αφού ληφθεί υπόψη και η στρωτή ροή στο πρώτο κρίσιμο μήκος  $x_c$  της ροής. Έτσι προκύπτει:

$$h_m = \frac{1}{L} \left( \int_0^{x_c} h dx + \int_{x_c}^L h dx \right) \quad (2.75)$$

Ο Whitaker πρότεινε τη σχέση:

$$Nu_m = 0.036 Pr^{0.43} \left[ Re_L^{0.8} - 9200 \right] \left( \frac{\mu_\infty}{\mu_s} \right)^{0.25} \quad (2.76)$$

για νερό, αέρα, έλαια όταν:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 \times 10^5 < \text{Re} < 5.5 \times 10^6 \\ 0.70 < \text{Pr} < 380 \\ 0.26 < (\mu_\infty / \mu_s) < 3.5 \\ \theta.α.: T_\infty \\ \mu_s \sigma \varepsilon T_s \end{array} \right.$$

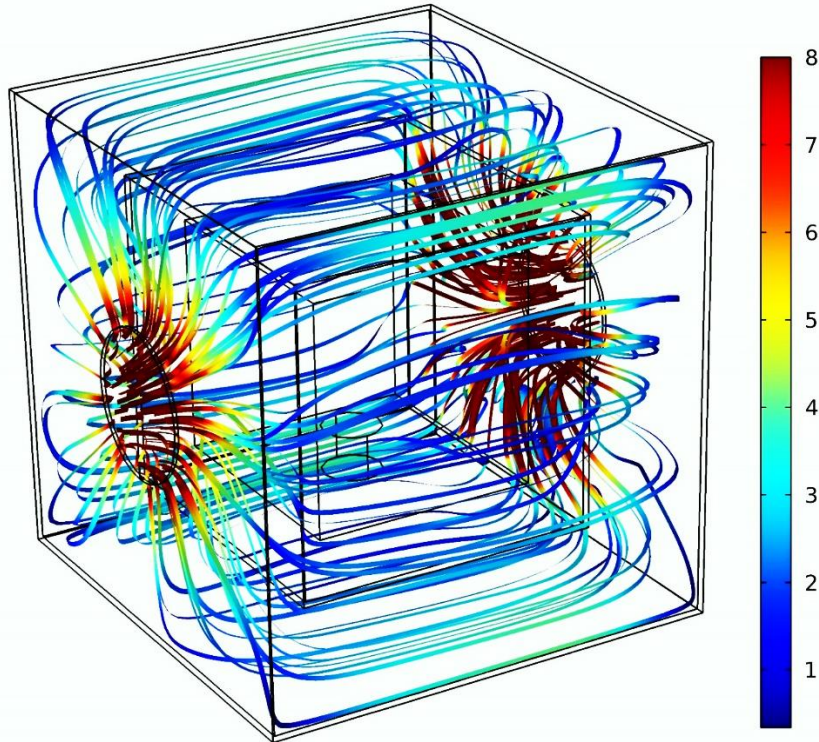
Στα αέρια η επίδραση του λόγου των συνεκτικότητων μπορεί να αμεληθεί και να θεωρηθεί ίσως με τη μονάδα, οπότε και η θερμοκρασία αναφοράς πλέον λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών της επιφάνειας των τοιχωμάτων και του αέρα, κατά τα γνωστά.

Επίσης, για την εξαναγκασμένη συναγωγή μέσω ρεύματος αέρα μπορεί να εφαρμοστεί η παρακάτω εμπειρική σχέση, που λαμβάνει άμεσα υπόψιν την ταχύτητα της ροής στον συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας ως εξής:

$$h_m = 10.45 - \nu + 10\nu^{1/2} \quad (2.77)$$

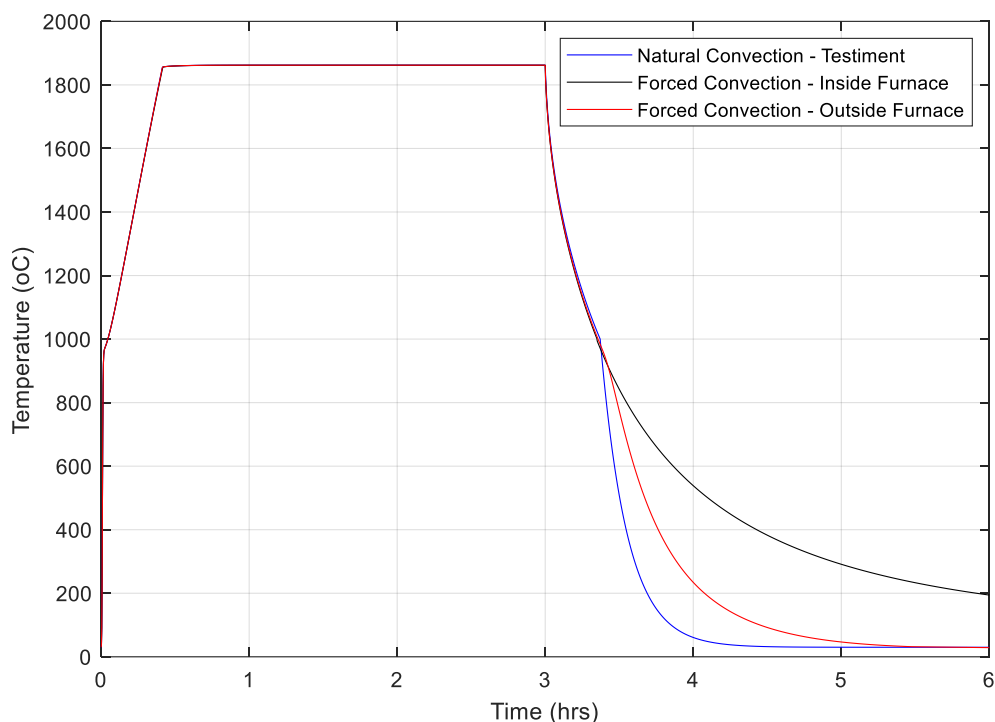
όπου ( $\nu$ ) η ταχύτητα της ροής. Όπως γίνεται πλέον φανερό, η ταχύτητα της ροής επηρεάζει είτε άμεσα, είτε έμμεσα, μέσω του αριθμού Reynolds, τον συντελεστή συναγωγιμότητας της εξαναγκασμένης συναγωγής που λαμβάνει χώρα μεταξύ τοιχωμάτων και αέρα. Σε αντίθεση με την περίπτωση της ροής αέρα γύρω από έναν κύλινδρο, όπως μελετήθηκε παραπάνω, ο προσδιορισμός της ταχύτητας της ροής δεν είναι τόσο απλός στην περίπτωση της ροής γύρω από έναν κύβο. Όπως περιγράφηκε στην αντίστοιχη παράγραφο, η είσοδος του αέρα θα γίνεται μέσω κάποιου σωλήνα μέσα στο περίβλημα του κλιβάνου και θα απομακρύνεται από έναν όμοιο του που θα βρίσκεται σε αντιδιαμετρική θέση. Από τις αναλύσεις που έγιναν και βασίστηκαν στην ενσωμάτωση των παραπάνω εξισώσεων στο θερμικό μοντέλο του κλιβάνου με τις κατάλληλες τροποποιήσεις προέκυψε ότι ικανοποιητική συναγωγή θερμότητας υπάρχει όταν η ταχύτητα του ρεύματος αέρα στα όρια των τοιχωμάτων είναι μεγαλύτερη των 1-2 m/s. Εφόσον η ροή γύρω από τον κύβο της μόνωσης με τον τρόπο που περιγράφηκε είναι αρκετά σύνθετη για αναλυτικό υπολογισμό, για τον καθορισμό των απαιτούμενων διαμέτρων σωληνών και την ταχύτητα της ροής στο εσωτερικό τους, για να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα του αέρα σε όλη την επιφάνεια των 6 τοιχωμάτων της μόνωσης, αναπτύσσεται ένα μοντέλο CFD στο υπολογιστικό πακέτο *Comsol Multiphysics* στο οποίο μετά από δοκιμές προσδιορίζονται οι απαιτούμενες διαστάσεις. Στο μοντέλο αυτό ορίζεται κάθε φορά η διάμετρος των σωληνών και η ταχύτητα εξόδου του ρεύματος αέρα από το περίβλημα του κλιβάνου, ενώ θεωρείται μια πίεση ίση με την ατμοσφαιρική στην είσοδο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.29.

Streamline: Velocity field Streamline Color: Velocity magnitude (m/s)



**Σχήμα 3.29 Ταχύτητα ροής αέρα γύρω από το εσωτερικό περίβλημα της μόνωσης**

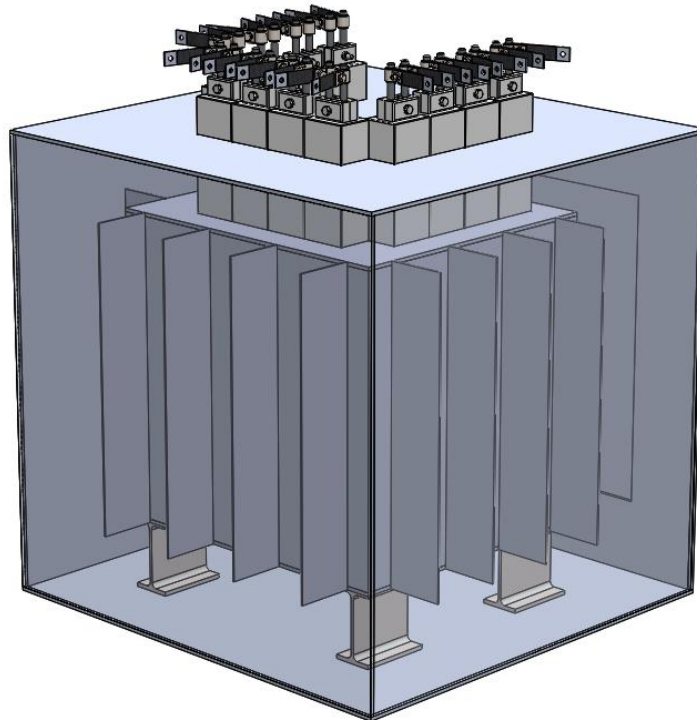
Στο Σχήμα 3.29 παρουσιάζεται το μοντέλο για το οποίο οριακά ικανοποιούνται οι συνθήκες ταχύτητας που ορίστηκαν παραπάνω. Οι σωλήνες έχουν διάμετρο 200mm και η ταχύτητα στην έξοδο 15 m/s. Αύξηση των μεγεθών αυτών συνεπάγεται και αύξηση του επιπέδου των ταχυτήτων σε όλες τις θέσεις. Η τελική διαστασιολόγηση θα γίνει με βάση και τις παραμέτρους της τελικής αντλίας που θα επιλεγεί. Αφού, όμως, αποδείχθηκε πως οι ζητούμενες ταχύτητες είναι δυνατόν να επιτευχθούν, το εξεταζόμενο σύστημα ψύξης μπορεί να υλοποιηθεί και τα αποτελέσματα από την προσομοίωσή του φαίνονται στο Σχήμα 3.30.



**Σχήμα 3.30 Μεταβολή θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά την ψύξη του με διάφορες μεθόδους**

Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις τελευταίας μεθόδου ψύξης σε σύγκριση με τις προηγούμενες. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η απόκριση για ψύξη μέσω της απομάκρυνσης του δοκιμίου από τον κλίβανο και την έκθεση του στον ατμοσφαιρικό αέρα, με μαύρο χρώμα η ψύξη μέσω εισαγωγής ρεύματος αέρα στο εσωτερικό της μόνωσης του κλιβάνου, ενώ με κόκκινο η ψύξη με εισαγωγή ρεύματος θερμότητας εξωτερικά της μόνωσης. Στην τελευταία περίπτωση, όπως άλλωστε και στις προηγούμενες, το ρεύμα αέρα μπαίνει για πρώτη φορά εντός του περιβλήματος μόνο όταν η θερμοκρασία του δοκιμίου φτάσει τους 1000 °C. Όπως αναμενόταν, μέχρι εκείνη τη θερμοκρασία η θερμοκρασία του δοκιμίου παραμένει ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις. Μετά από εκείνη τη θερμοκρασία είναι που διαφοροποιούνται οι αποκρίσεις λόγω των διαφορετικών συστημάτων ψύξης. Η νέα μέθοδος ψύξης αποδεικνύεται ότι αποτελεί σημαντική βελτίωση της μεθόδου ψύξης του δοκιμίου με ρεύμα αέρα εσωτερικά του κλιβάνου, ενώ μπορεί να φέρει το δοκίμιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ ακόμα αυτό βρίσκεται στο εσωτερικό του κλιβάνου. ο ρυθμός ψύξης είναι ικανοποιητικός αλλά όχι τόσο μεγάλος όσο αυτός που εξασφαλίζεται με την έκθεση του δοκιμίου στο περιβάλλον.

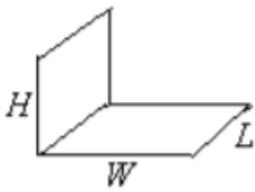
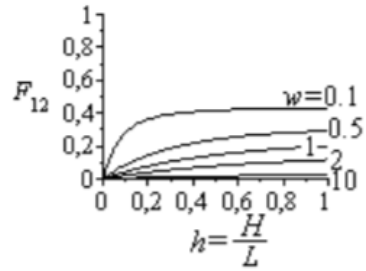
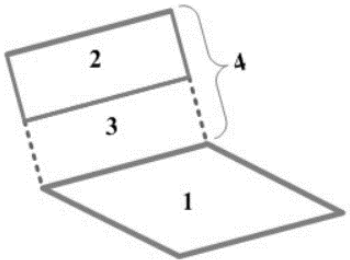
Με γνώμονα την κατά τον δυνατόν περαιτέρω βελτίωση του ρυθμού απόψυξης του δοκιμίου και την προσέγγιση της περίπτωσης απομάκρυνσης του δοκιμίου από τον κλίβανο, προτείνεται μια σχεδιαστική αλλαγή στο σύστημα του κλιβάνου, με γνώμονα την αύξηση του φαινομένου της εξαναγκασμένης συναγωγής μέσω του ρεύματος αέρα που διακινείται εσωτερικά του εξωτερικού περιβλήματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.31, τοποθετούνται πτερύγια στην εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης με απώτερο σκοπό την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής μεταξύ των τοιχωμάτων και του ρεύματος αέρα αυξάνοντας και ως συνέπεια το ρυθμό απαγωγής θερμότητας.



**Σχήμα 3.31 Σχεδιασμός κλιβάνου με προσθήκη πτερυγίων στην εσωτερική μόνωση**

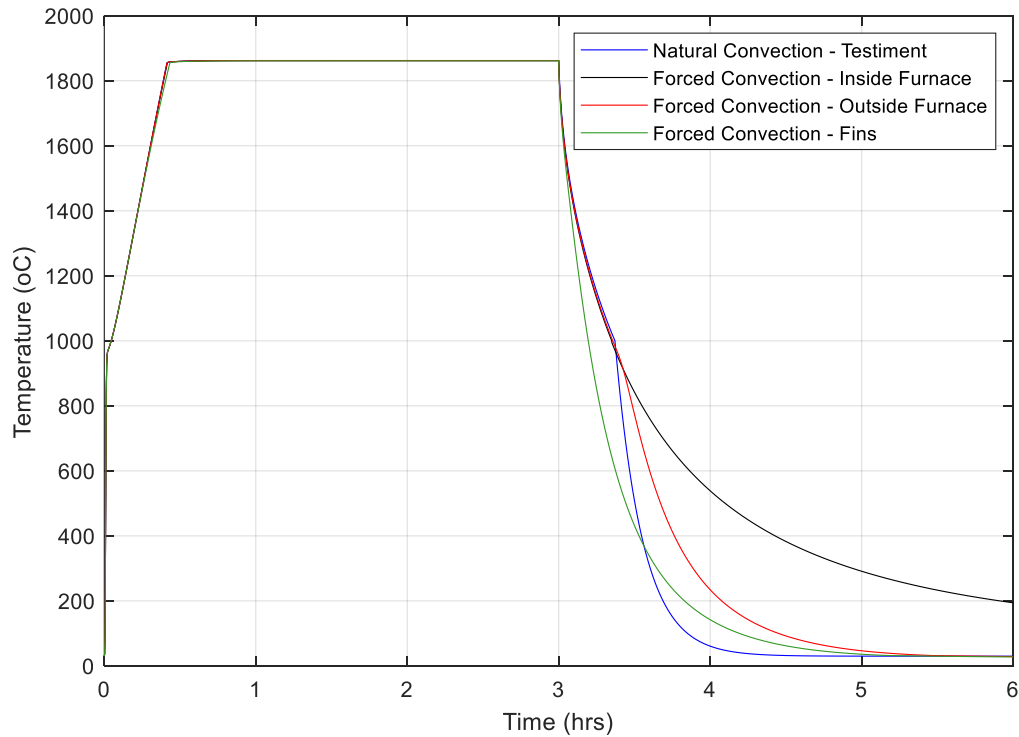
Για την αναλυτική μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας των πτερυγίων δεν αρκεί η απλή αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής μεταξύ του ρεύματος αέρα και της μόνωσης του κλιβάνου. η ύπαρξη των πτερυγίων οδηγεί το θερμικό σύστημα του κλιβάνου σε μία νέα θέση ισορροπίας, καθώς αυτά επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα προς το περιβάλλον. Επιπλέον των δρόμων που έως τώρα μπορούσε να ακολουθήσει το ρεύμα θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία στο περιβάλλον, τώρα προστίθενται ένας ακόμα. Το εξωτερικό τμήμα της μόνωσης, εκτός από την ακτινοβολία που άμεσα εκπέμπεται στο περίβλημα του κλιβάνου, εκπέμπει ακτινοβολία που απορροφάται από τα πτερύγια και συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Ταυτόχρονα, τα πτερύγια θερμαίνονται και μέσω αγωγής εξαιτίας της άμεσης επαφής τους με τη μόνωση, ενώ με τη σειρά τους ακτινοβολούν και εκείνα θερμότητα προς το εξωτερικό περίβλημα. Όπως είναι αναμενόμενο, η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που περιγράφηκε προηγουμένως επηρεάζεται από κάποιους συντελεστές σχήματος που είναι απόρροια της γεωμετρίας των ακτινοβολούντων επιφανειών και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Επιπλέον, κάποιοι νέοι συντελεστές σχήματος πρέπει να ληφθούν υπόψιν και δίνονται στον Πίνακα 3.11.



Περίπτωση	Συντελεστής Σχήματος	Διάγραμμα
<p>Μεταξύ κάθετων ορθογωνίων πλευρών <math>W, L</math> και <math>H, L</math>, με <math>h = H/L</math> και <math>w = W/L</math></p> 	$F_{12} = \frac{1}{\pi w} \left[ h \arctan\left(\frac{1}{h}\right) + w \arctan\left(\frac{1}{w}\right) - \sqrt{h^2 + w^2} \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{h^2 + w^2}}\right) + \frac{1}{4} \ln(ab^{w^2} c^{h^2}) \right]$ <p>with <math>a = \frac{(1+h^2)(1+w^2)}{1+h^2+w^2}</math>,  <math>b = \frac{w^2(1+h^2+w^2)}{(1+w^2)(h^2+w^2)}</math>, <math>c = \frac{h^2(1+h^2+w^2)}{(1+h^2)(h^2+w^2)}</math></p>	
<p>Μεταξύ κάθετων ορθογωνίων που δεν βρίσκονται σε επαφή</p> 	$A_1 F_{1-4} = A_1 F_{1-3} + A_1 F_{1-2}$ $\Rightarrow F_{1-2} = F_{1-4} - F_{1-3}$	-

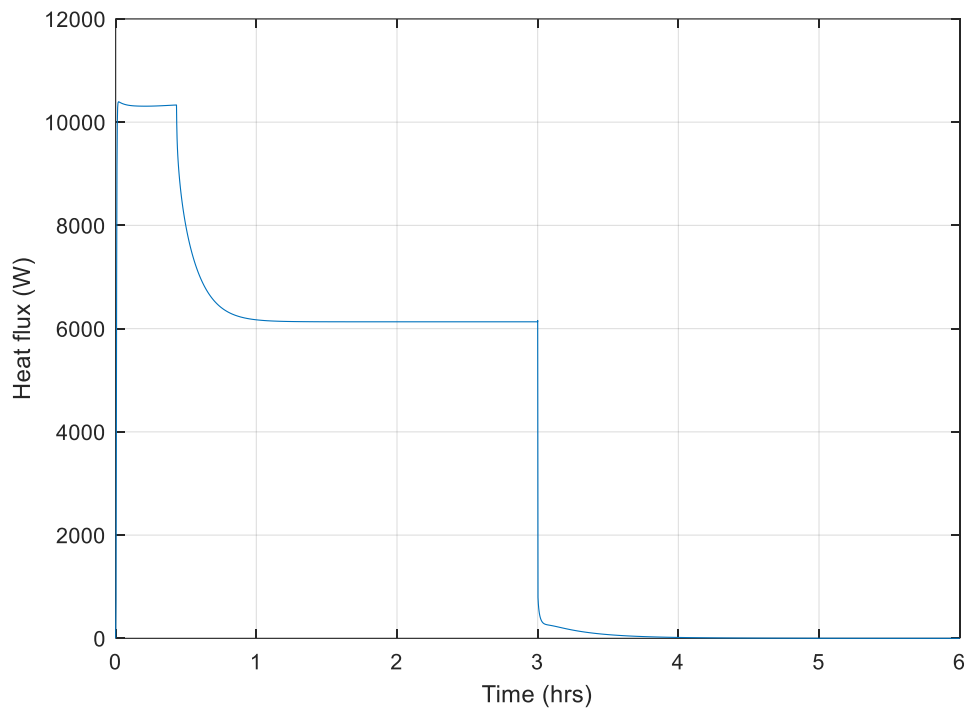
**Πίνακας 3.11 Συντελεστές σχήματος για μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολίας παρουσία πτερυγίων**

Ενσωματώνοντας όλα τα παραπάνω στο μοντέλο του κλιβάνου λαμβάνεται η νέα θερμοκρασιακή απόκριση του δοκιμίου, η οποία και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32.

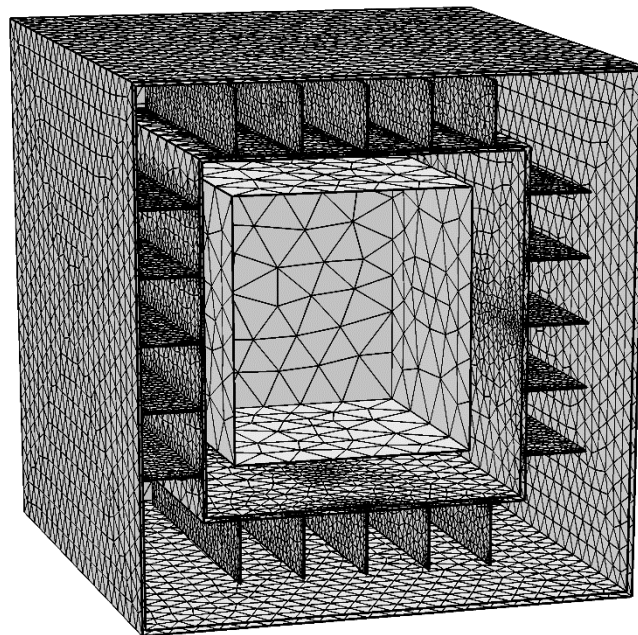


**Σχήμα 3.32 Τελική σύγκριση των μεθόδων ψύξης του κλιβάνου (θερμοκρασία δοκιμίου).**

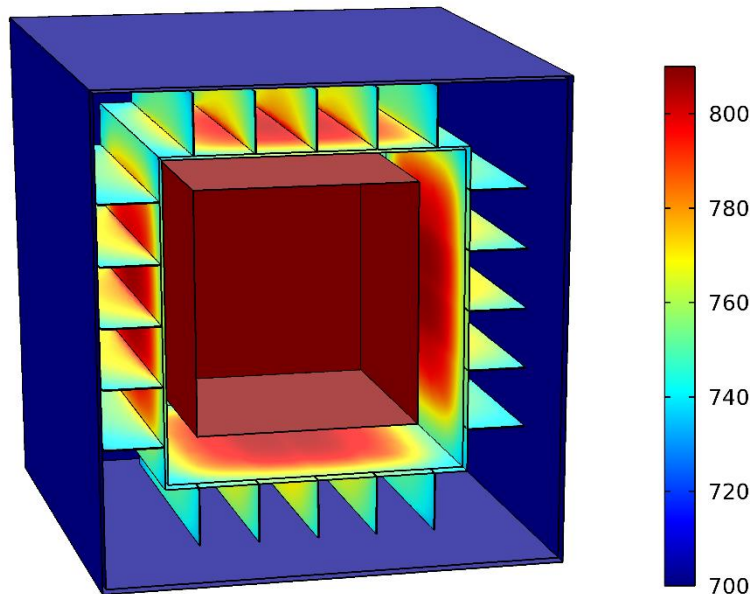
Ο χρωματικός κώδικας του Σχήματος 3.32 διατηρείται από το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 3.30 με την προσθήκη της ψύξης με προσθήκη πτερυγίων που παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα. Όπως γίνεται φανερό, η προσθήκη πτερυγίων μπορεί να αποδώσει καλύτερο ρυθμό ψύξης από την αρχή της διαδικασίας απόψυξης του δοκιμίου. Η παρατήρηση αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός πως πλέον η μετάδοση ακτινοβολίας διευκολύνεται μέσω των πτερυγίων και γίνεται ισχυρότερη η επίδρασή της στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, άλλωστε και οι απώλειες θερμότητας στη μόνιμη κατάσταση ανέρχονται από τα 5.6 kW στα 6.15 kW, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Το μέγεθος αυτό επαληθεύεται μετά και από κατασκευή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων παρουσία πτερυγίων και αξιολόγησή του μέσω του υπολογιστικού πακέτου *Comsol Multiphysics*. Μέσο του πακέτου αυτού υπολογίζεται η απώλεια θερμότητας στη μόνιμη κατάσταση ως 6.14 kW, που συμφωνεί σχεδόν απόλυτα με τα αποτελέσματα του αναλυτικού υπολογισμού. Στο Σχήμα 3.34 παρουσιάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, ενώ στο Σχήμα 3.35 η κατανομή των θερμοκρασιών στην επιφάνεια των πτερυγίων κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.



**Σχήμα 3.33 Ρεύμα θερμότητας που απελευθερώνεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις συναρτήσει του χρόνου**



**Σχήμα 3.34 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη μετάδοση θερμότητας παρουσία πτερυγίων**



**Σχήμα 3.35 Κατανομή θερμοκρασιών πτερυγίων που αναπτύσσονται στη μόνιμη κατάσταση**

Καθώς η διαδικασία της ψύξης προχωράει, ο ρυθμός της ψύξης όλο και μειώνεται, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να γίνεται κι αυτός μικρότερος από τον αντίστοιχο της περίπτωσης της έκθεσης του δοκιμίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά ποτέ μικρότερος από την περίπτωση ρεύματος αέρα εξωτερικά της μόνωσης. Η πτώση του ρυθμού ψύξης ερμηνεύεται από το γεγονός πως τα πτερύγια αν και αρχικά βοηθούν αρκετά με την απαγωγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και εξαναγκασμένης συναγωγής, ψύχονται σχετικά γρήγορα με αποτέλεσμα από ένα σημείο και μετά η διαδικασία ψύξης να ταυτίζεται με εκείνη που γίνεται χωρίς παρουσία πτερυγίων.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγεται τελικά η διαδικασία ψύξης μέσω ρεύματος αέρα εξωτερικά της μόνωσης του κλιβάνου παρουσία πτερυγίων. Ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας από το δοκίμιο παρουσιάζεται αυξημένος σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν πτερύγια, ενώ η αύξηση των απωλειών δεν κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Σε κάθε περίπτωση, για επίτευξη μεγαλύτερου ρυθμού ψύξης σε κάποιο χρονικό σημείο αργότερα από την εκκίνηση της διαδικασίας ψύξης, οπότε και οι θερμοκρασίες του κλιβάνου δεν είναι απαγορευτικές, μπορεί να ανοίξει ο κλιβανός και το δοκίμιο να εκτεθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα.

### 3.4. Σχεδιασμός συστήματος αυτομάτου ελέγχου

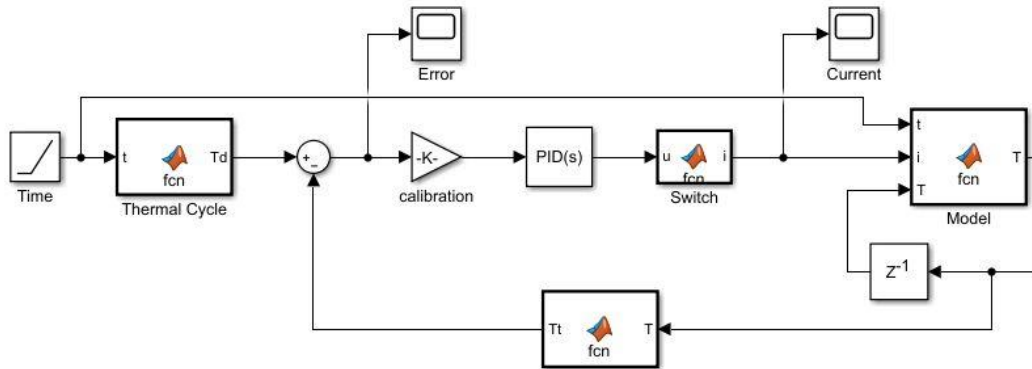
#### 3.4.1. Παρακολούθηση θερμικών κύκλων

Στην έως τώρα ανάλυση του θερμικού συστήματος που αποτελεί ο σχεδιαζόμενος κλιβανός, αναλύθηκε η συμπεριφορά του σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, όπως και η απόκρισή του κατά τα μεταβατικά φαινόμενα της θέρμανσης και της ψύξης του. Ο βασικός στόχος όλων των αναλύσεων, ωστόσο, είναι να μπορεί το δοκίμιο να ακολουθήσει έναν θερμικό κύκλο θέρμανσης-ψύξης, έτσι ώστε να αποκτήσει τις επιθυμητές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Η εξασφάλιση του προηγούμενου στόχου επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό ενός κατάλληλου συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

Παρότι υπάρχουν πολλά συστήματα αυτομάτου ελέγχου από τα οποία μπορεί να διαλέξει κανείς για

να εφαρμόσει σε μία κατασκευή, αυτός που έχει ευρέως επικρατήσει στη βιομηχανική πρακτική και χρησιμοποιείται και σε αντίστοιχους κλιβάνους με αυτόν που σχεδιάζεται χρησιμοποιεί ελεγκτή τύπου PID. Οι ελεγκτές PID είναι σε θέση να επιτελούν αξιόπιστο έλεγχο σε σύνθετα συστήματα, εφόσον έχει γίνει σωστά η επιλογή των κερδών του. Οι επιλογή αυτών των κερδών θα είναι το κύριο αντικείμενο του Κεφαλαίου αυτού.

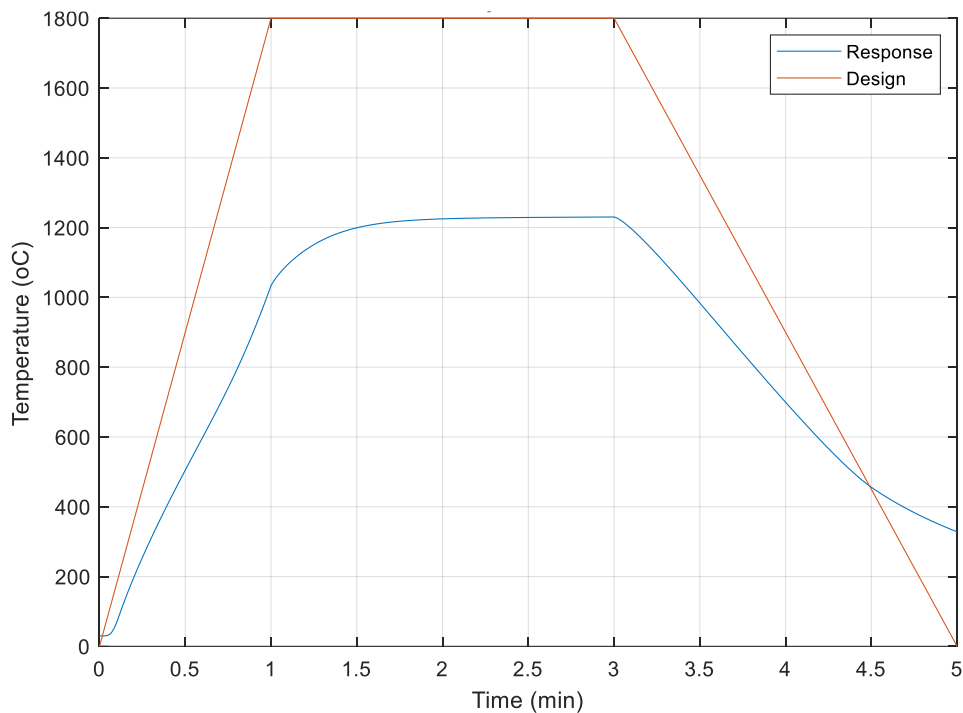
Αρχικά, παρουσιάζεται το σύστημα κλειστού βρόχου του συστήματος που σχεδιάζεται στο Σχήμα 3.36, όπως κατασκευάστηκε σε περιβάλλον *Matlab/Simulink*.



**Σχήμα 3.36 Σύστημα κλειστού βρόχου κλιβάνου**

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.36, η είσοδος στο σύστημα είναι ο θερμικός κύκλος που ο κάθε φορά χρειάζεται να εκτελέσει το δοκίμιο. Στην ανάδραση είναι η ένδειξη του θερμοστοιχείου που έχει τοποθετηθεί κατάλληλα στο σύστημα για να καταγράφει τη θερμοκρασία του αέρα εσωτερικά του θαλάμου έψησης και μία συνάρτηση η οποία την μετατρέπει στην εκτιμώμενη θερμοκρασία του δοκιμίου σύμφωνα με τους νόμους της μετάδοσης θερμότητας που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η διαφορά μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τιμής της θερμοκρασίας, δηλαδή το σφάλμα, δίνεται σαν είσοδος στον PID. Η έξοδος του PID, που είναι με τη σειρά της η είσοδος στο μοντέλο του θερμικού συστήματος του κλιβάνου, αποτελεί την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τις ηλεκτρικές αντιστάσεις και εξασφαλίζει το απαραίτητο ρεύμα θερμότητας μέσω του φαινομένου Joule για τη λειτουργία του κλιβάνου. Μιας και το εύρος του σφάλματος των θερμοκρασιών είναι εν γένει διαφορετικό από εκείνο του ρεύματος, προτού το σήμα του σφάλματος εισέλθει στον PID μετασχηματίζεται γραμμικά έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο εύρος των επιτρεπόμενων τιμών της έντασης του ρεύματος. Επίσης, την έξοδο του PID ακολουθεί ένας ελεγκτής, ο οποίος λειτουργεί σαν φίλτρο και ελέγχει εάν η τιμή του ρεύματος που ζητάει ο PID είναι αρνητική ή μεγαλύτερη της μέγιστης επιτρεπόμενης, οπότε ορίζει μηδενική ή μέγιστη τιμή ρεύματος αντίστοιχα.

Οι επιλογή των κερδών του PID πρέπει να γίνει προσεκτικά, έτσι ώστε η θερμοκρασία του δοκιμίου να ακολουθεί πιστά εκείνη του θερμικού κύκλου στον οποίο επιβάλλεται. Μια απρόσεκτη επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε υπερακοντίσεις και ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.37. Ειδικά σε περιπτώσεις θερμικών συστημάτων, ταλαντώσεις ή/και υπερακοντίσεις μπορεί να έχουν πολύ αρνητικές συνέπειες στις ιδιότητες των δοκιμίων που κατεργάζονται.



**Σχήμα 3.37 Απόκριση κλειστού βρόχου για έλεγχο τύπου P με μοναδιαίο κέρδος**

Ο έλεγχος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.37 είναι τύπου P με μοναδιαίο κέρδος. Είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του δοκιμίου είναι πολύ πιο μακριά από την επιθυμητή. Η χρήση ελέγχου τύπου P δεν ενδείκνυται σε αυτή την περίπτωση, όπου ζητείται μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η προσθήκη και ολοκληρωτικού όρου. Αντίθετα, η χρήση διαφορικού όρου αποφεύγεται, καθώς αν και επιταχύνει την απόκριση εισάγει μικρο-ταλαντώσεις στο σύστημα, οι οποίες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δεν είναι επιθυμητές. Δεδομένου ότι τα φαινόμενα που ελέγχονται εξελίσσονται σχετικά αργά, αναμένεται ο έλεγχος τύπου PI να είναι επαρκής για το σχεδιαζόμενο σύστημα ελέγχου.

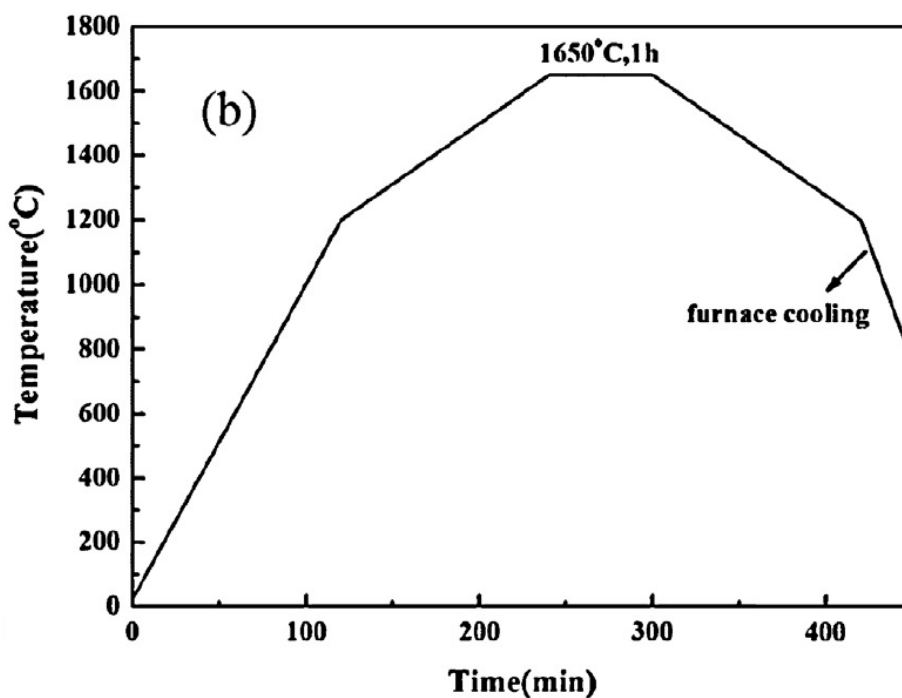
Το σύστημα ελέγχου και ο ελεγκτής PID ενσωματώνονται σε ένα μοντέλο κατασκευασμένο στο υπολογιστικό περιβάλλον *Matlab/Simulink*. Δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι ελέγχου και τιμές παραμέτρων, με σκοπό την καλύτερη παρακολούθηση του εκάστοτε θερμικού κύκλου από το δοκίμιο. Τελικά, τα κέρδη του PID που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

Κέρδος	Τιμή
<b>P</b>	30
<b>I</b>	0.1
<b>D</b>	-

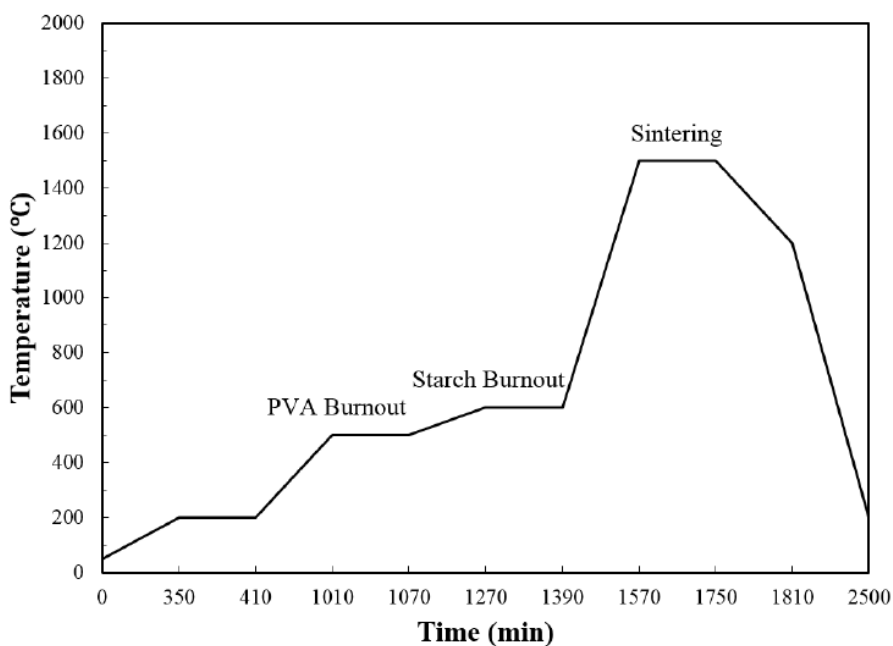
**Πίνακας 3.12 Τιμές κερδών ελεγκτή PID**

Για την επίδειξη της λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος αυτομάτου ελέγχου του κλιβάνου, επιλέγονται από την βιβλιογραφία δύο ενδεικτικοί θερμικοί κύκλοι κατεργασίας κεραμικών υλικών, οι οποίοι δίνονται σαν είσοδος στο μοντέλο του ελέγχου και αξιολογείται η θερμοκρασιακή απόκριση του δοκιμίου. Στα Σχήματα 3.38 και 3.39 παρουσιάζονται οι θερμικοί κύκλοι που θα εισαχθούν στο σύστημα. Ο πρώτος κύκλος περιλαμβάνει τις τρεις βασικές φάσεις της θέρμανσης, της έψησης και της ψύξης, ενώ ο δεύτερος είναι συνθετότερος περιλαμβάνοντας περισσότερες φάσεις θερμικής κατεργασίας. Με αυτό τον τρόπο γίνεται καλύτερα η αξιολόγηση του

συστήματος ελέγχου.

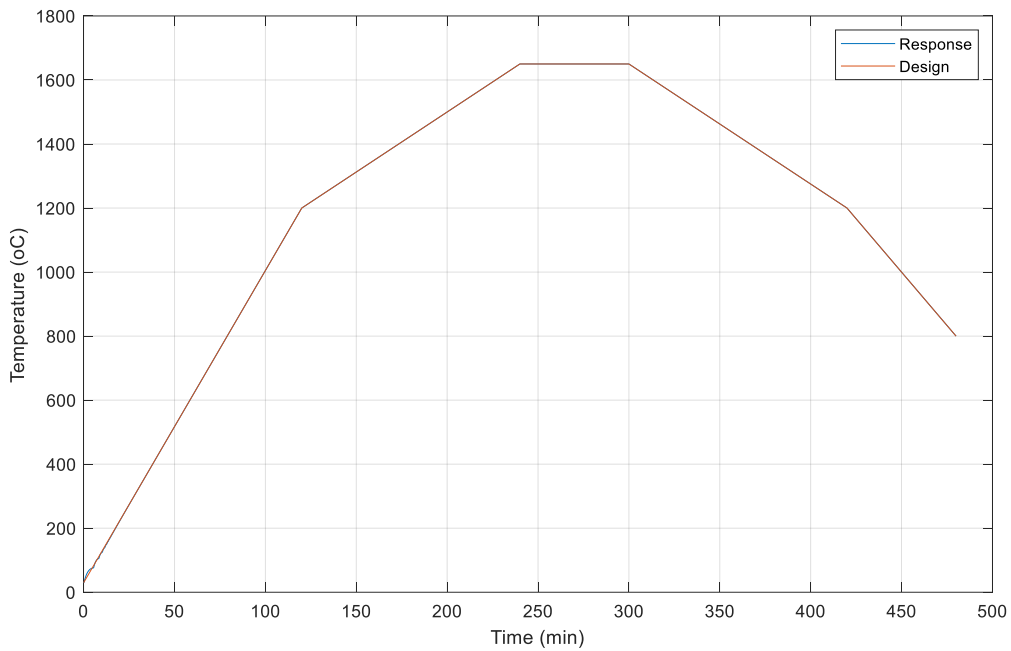


Σχήμα 3.38 Πρώτος θερμικός κύκλος κατεργασίας αλούμινας [5]

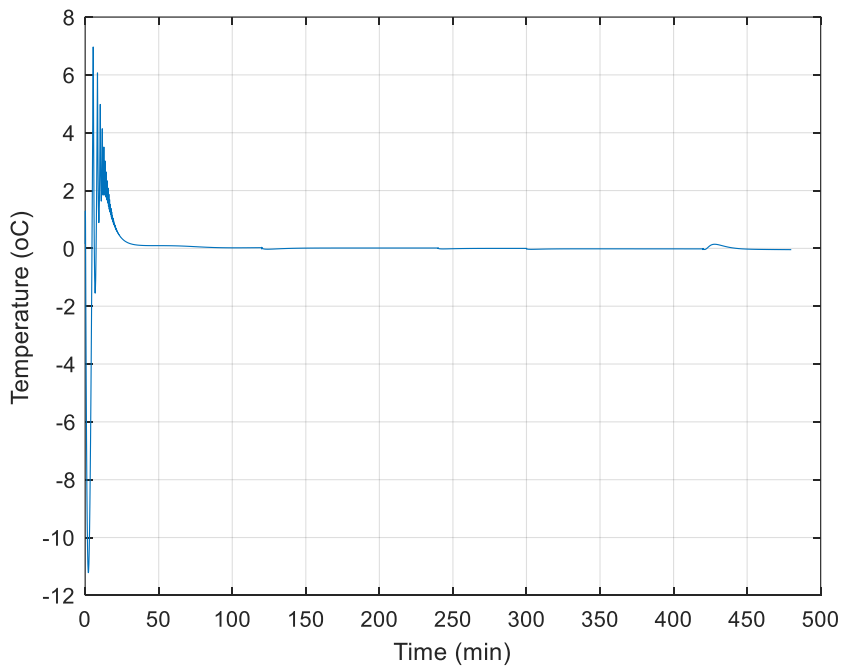


Σχήμα 3.39 Δεύτερος θερμικός κύκλος κατεργασίας αλούμινας [5]

Στο Σχήμα 3.40 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του δοκιμίου κατά την πάροδο του χρόνου σε σύγκριση με την επιθυμητή που ορίζεται από τον πρώτο θερμικό κύκλο του Σχήματος 3.38. Επειδή οι διαφορές είναι μικρές και δεν διακρίνονται εύκολα, στο Σχήμα 3.41 δίνεται αποκλειστικά το διάγραμμα σφάλματος της θερμοκρασίας του δοκιμίου. Όπως γίνεται εκεί φανερό, το μεταβατικό φαινόμενο που παρουσιάζεται στην αρχή αποσβένεται σύντομα και το σφάλμα της θερμοκρασίας είναι κάτω από  $\pm 0.2$  °C.



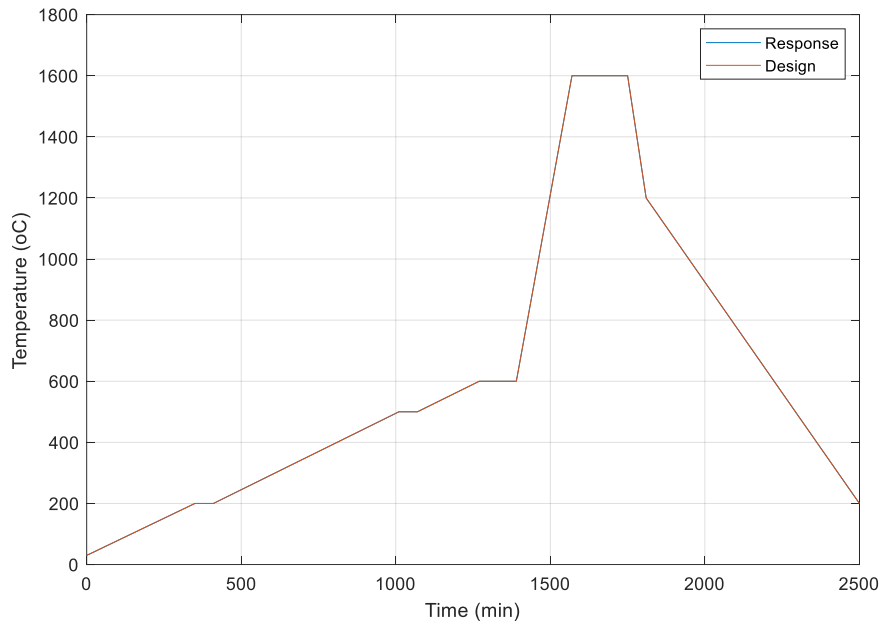
**Σχήμα 3.40** Θερμοκρασιακή απόκριση δοκιμίου για τον πρώτο θερμικό κύκλο



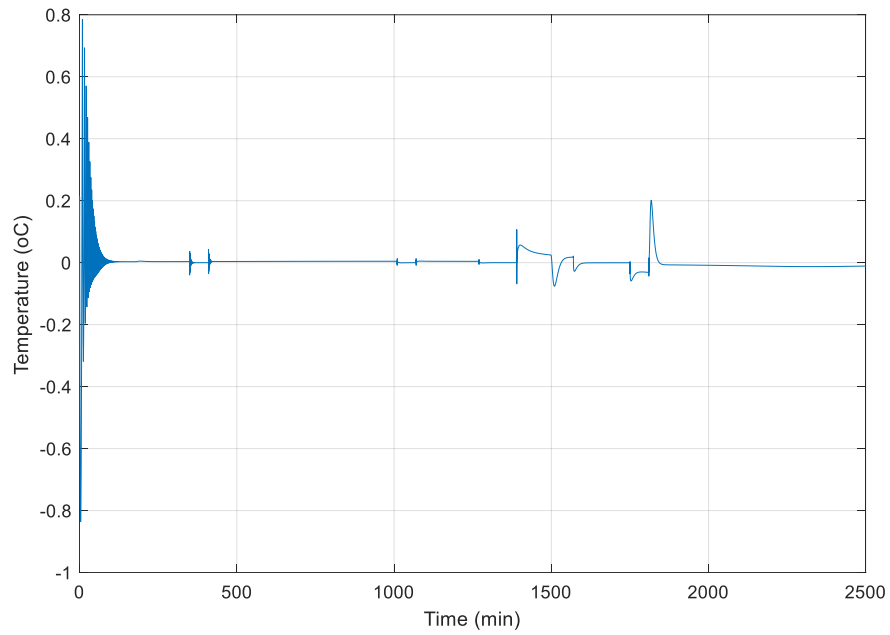
**Σχήμα 3.41** Σφάλμα παρακολούθησης πρώτου θερμικού κύκλου

Ομοίως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.42 και 3.43 η απόκριση του δοκιμίου για τον δεύτερο θερμικό κύκλο. Αν και ο κύκλος είναι συνθετότερος, το δοκίμιο παρακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια της διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αποδεικνύοντας ότι ο έλεγχος που έχει σχεδιαστεί είναι πλήρως επαρκής για τις εφαρμογές του κλιβάνου. Τέλος, στο Σχήμα 3.44 παρατίθεται και η καμπύλη του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τις ηλεκτρικές αντιστάσεις κάθε στιγμή.

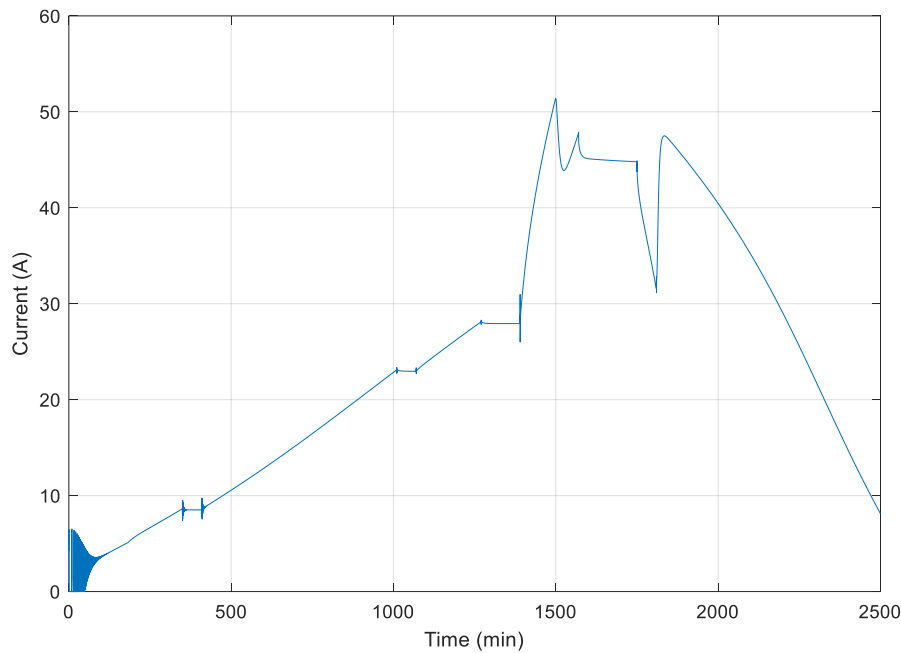




**Σχήμα 3.42** Θερμοκρασιακή απόκριση δοκιμίου για τον δεύτερο θερμικό κύκλο



**Σχήμα 3.43** Σφάλμα παρακολούθησης δεύτερου θερμικού κύκλου



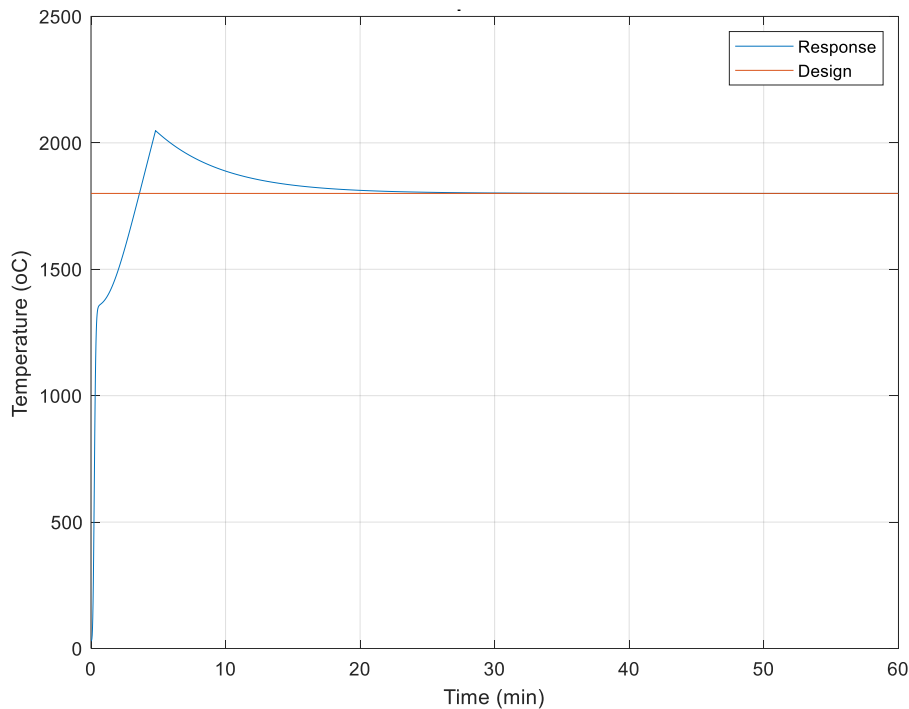
**Σχήμα 3.44 Απόκριση ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τα θερμαντικά στοιχεία**

Φυσικά, στο σύστημα ελέγχου μπορεί να εισαχθεί και το σύστημα ψύξης μέσω ρεύματος αέρα που υπάρχει στον κλίβανο για να προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς ψύξης όταν αυτοί είναι απαραίτητοι. Το σύστημα αυτό θα ενεργοποιείται όταν πλέον το ηλεκτρικό ρεύμα των αντιστάσεων θα έχει μηδενιστεί, και πλέον θα καθορίζει εκείνο τον ρυθμό ψύξης του κλιβάνου και κατά συνέπεια και του δοκιμίου.

#### 3.4.2. Απόκριση σε είσοδο βαθμίδας

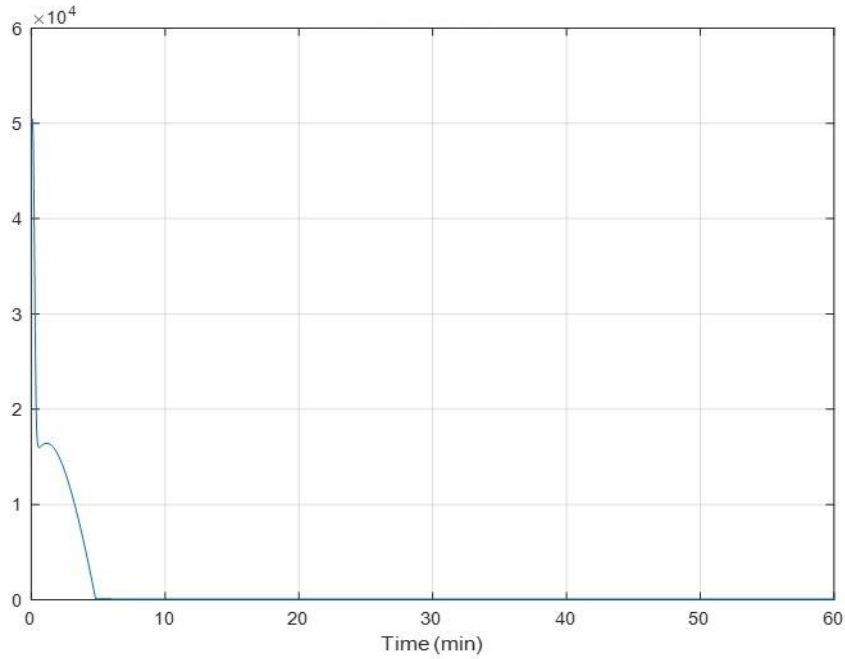
Αν και ο κύριος στόχος του συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι να εξασφαλίζει την πιστή παρακολούθηση ενός θερμικού κύκλου από το δοκίμιο που κατεργάζεται, εντούτοις επιλέγεται η αξιολόγηση του συστήματος ελέγχου σε είσοδο βαθμίδας έτσι ώστε να αποκτηθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του και να αναδειχθούν ίσως προβλήματα που δεν ήταν δυνατόν να φανούν ως τώρα με τις ομαλές σχετικά εισόδους που παρέχονταν στο σύστημα.

Στο Σχήμα 3.45 παρουσιάζεται η απόκριση του δοκιμίου για μία είσοδο βαθμίδας 1800 °C. Η μορφή αυτής της απόκρισης όχι μόνο δεν είναι επιθυμητή, αλλά δεν είναι και αναμενόμενη. Δεν είναι επιθυμητή καθώς η υπερακόντιση της θερμοκρασίας έχει πολύ μεγάλο εύρος, με αποτέλεσμα να επιδρά καθοριστικά στις ιδιότητες που θα αποκτήσει το δοκίμιο μετά τη θερμική κατεργασία. Ταυτόχρονα, δεν είναι αναμενόμενη, καθώς η καμπύλη δεν είναι λεία, μιας και στο σημείο μέγιστης υπερακόντισης η απόκριση παρουσιάζει μία «γωνία».

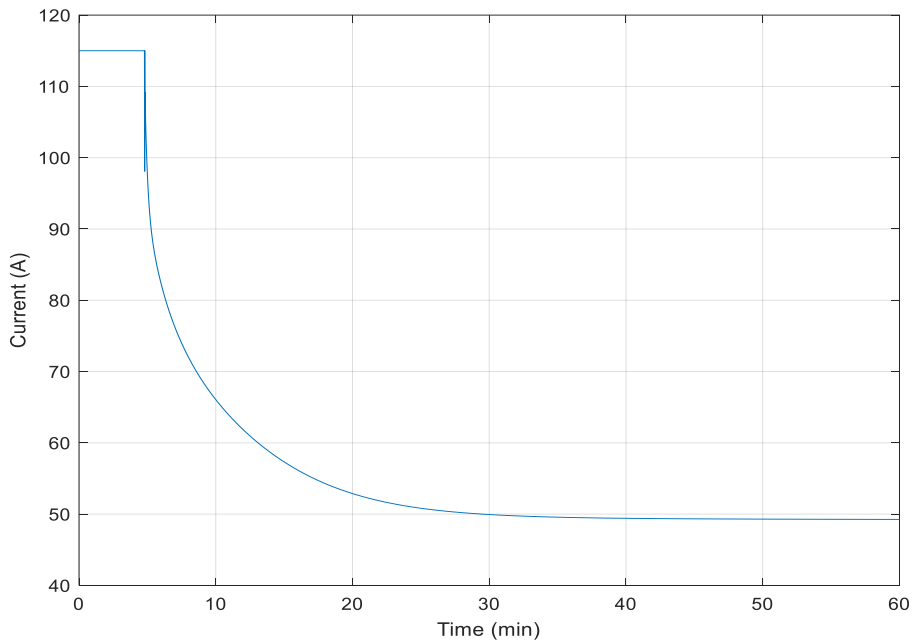


**Σχήμα 3.45 Απόκριση συστήματος σε είσοδο βαθμίδας**

Ο λόγος για αυτήν την «ανώμαλη» απόκριση του συστήματος κρύβεται στην παρουσία και τον τρόπο λειτουργίας του φίλτρου, του ελεγκτή που ακολουθεί την έξοδο του PID και ελέγχει εάν το σήμα που δίνει ο PID είναι εντός των ορίων επιτρεπόμενης έντασης ρεύματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.46, επειδή το σφάλμα στην αρχή του χρόνου είναι πολύ μεγάλο, ο PID ζητάει πολύ μεγάλες τιμές ρεύματος που δεν είναι δυνατόν να αποδοθούν από το ηλεκτρολογικό δίκτυο. Επομένως, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.47, στην αρχή παρατηρείται κορεσμός του ρεύματος στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή έντασης ρεύματος που έχει οριστεί. Εντωμεταξύ, με την πάροδο του χρόνου, η θερμοκρασία πλησιάζει την επιθυμητή, το σφάλμα μειώνεται και επομένως και οι απαιτήσεις το ρεύματος μειώνονται. Κατά συνέπεια, το σήμα στην έξοδο του PID τελικά αποκτά μία φθίνουσα πορεία. Καθώς η θερμοκρασία υπερβαίνει την επιθυμητή και το σφάλμα γίνεται αρνητικό, ο ρυθμός μείωσης της τιμής του σήματος εξόδου του PID ολοένα και αυξάνεται. Καθώς όμως οι τιμές είναι πολύ μεγάλες, μεγαλύτερες από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος, από το φίλτρο συνεχίζει να περνάει απλώς η μέγιστη αυτή τιμή, χωρίς το σύστημα να αντιλαμβάνεται ότι το ρεύμα πρέπει να μειωθεί, για να κατέβει η θερμοκρασία του δοκιμίου. Το σύστημα το καταλαβαίνει όταν η έξοδος του PID κατέβει κάτω από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, οπότε και σχηματίζεται η «γωνία» στην απόκριση, μιας και ο ρυθμό πτώσης είναι πολύ μεγάλος.



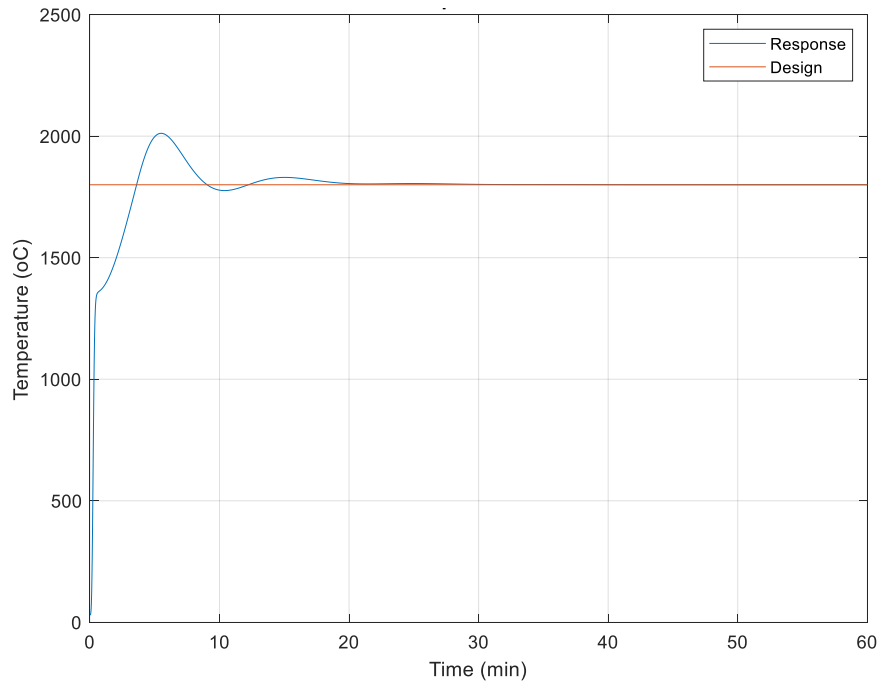
**Σχήμα 3.46 Σήμα εξόδου PID για είσοδο συνάρτησης βαθμίδας**



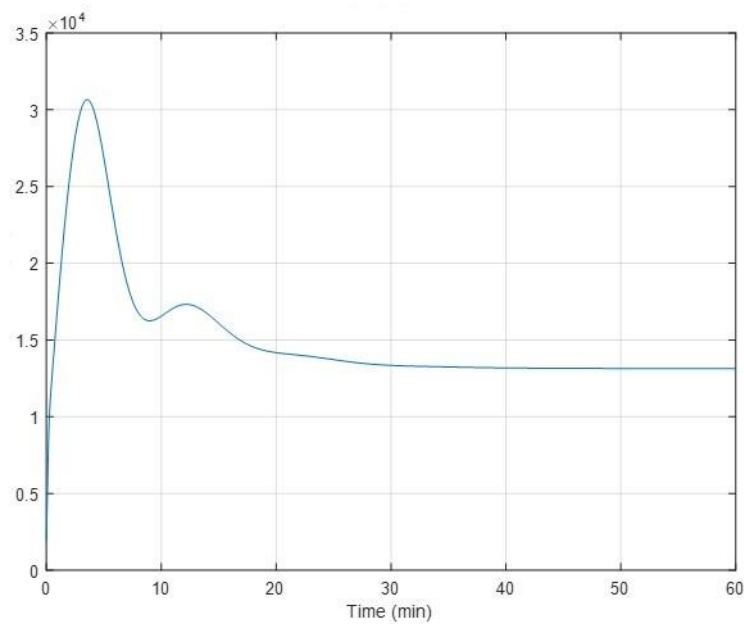
**Σχήμα 3.47 Ηλεκτρικό ρεύμα θερμαντικών στοιχείων για είσοδο συνάρτησης βαθμίδας**

Η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει ότι ο σχεδιασμός του φίλτρου δεν είναι εύρωστος, και πρέπει να επαναπροσδιοριστεί, έτσι ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων. Για το λόγο αυτό, σχεδιάζεται το παρακάτω σύστημα. Αρχικά, ορίζεται το πεδίο τιμών της έντασης του ρεύματος που μπορεί να επιτευχθεί στο σύστημα ως  $[0, I_{max}]$ . Υπό φυσιολογικές συνθήκες, η έξοδος  $u(t)$  από τον PID που αποτελεί την είσοδο στο σχεδιαζόμενο φίλτρο θα εμπίπτει εντός αυτού του διαστήματος. Σε μια τέτοια περίπτωση το φίλτρο δεν θα κάνει καμία επιπλέον λειτουργία πέραν της μεταφοράς του σήματος αυτούσιο στο επόμενο τμήμα του συστήματος. Αν όμως για κάποια χρονική στιγμή  $t_1$  προκύψει ότι  $u(t_1) > I_{max}$ , τότε ορίζεται ως  $I'_{max} = u(t_1)$ , και από εκεί και ύστερα το φίλτρο μετασχηματίζει γραμμικά την είσοδο που ανήκει πλέον σε ένα πεδίο τιμών  $[0, I'_{max}]$  στο αρχικό πεδίο

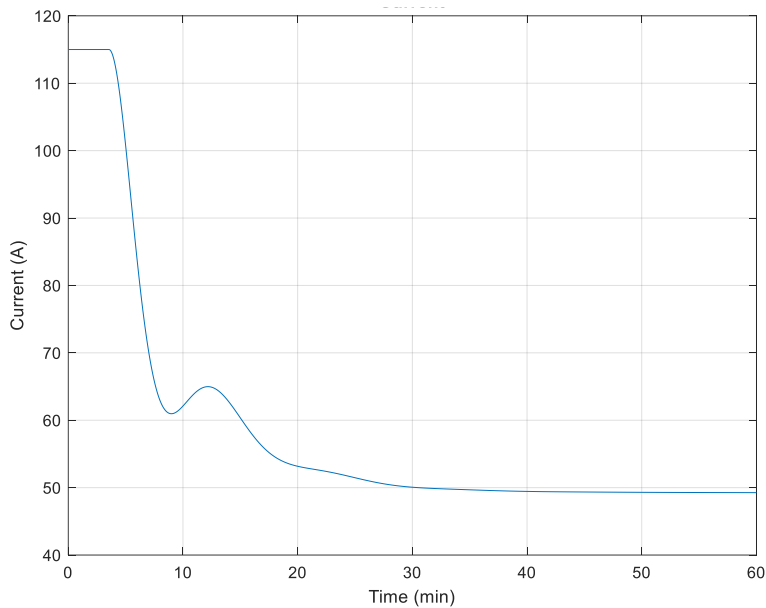
τιμών  $[0, I_{max}]$ . Αν για έναν άλλο χρόνο  $t_2$  προκύψει και πάλι  $u(t_1) > I'_{max}$ , τότε με την ίδιο τρόπο το ορίζεται  $I''_{max} = u(t_2)$ , και πλέον το νέο πεδίο τιμών  $[0, I''_{max}]$  αντιστοιχίζεται στο  $[0, I_{max}]$ . Με αυτόν τον τρόπο, κάθε φορά που υπάρχει φθίνουσα πορεία του σήματος που δίνει ο PID, θα το αντιλαμβάνεται το σύστημα αμέσως και θα δρα ανάλογα για να περιορίσει τα σφάλματα. Ταυτόχρονα, το σύστημα δεν ξεπερνάει ποτέ τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος. Η απόκριση του συστήματος με την ενσωμάτωση του νέου φίλτρου φαίνεται στα Σχήματα 3.48-3.50. Όπως γίνεται φανερό, η απόκριση πλέον γίνεται με ομαλό τρόπο, έτσι όπως αναμένεται από ένα σύστημα ελέγχου που παρουσιάζει υπερακόντιση. Επίσης, στο Σχήμα 3.50, φαίνεται πως το νέο φίλτρο επιδρά στο σύστημα, αλλάζοντας σημαντικά την απόκριση του PID και την έξοδο του που καταλήγει στο ελεγχόμενο σύστημα.



**Σχήμα 3.48 Απόκριση συστήματος σε είσοδο βαθμίδας με νέα σχεδίαση φίλτρου**

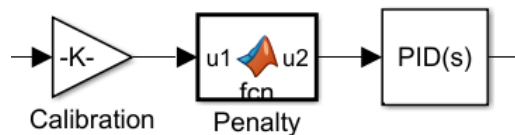


**Σχήμα 3.49** Σήμα εξόδου PID για είσοδο συνάρτησης βαθμίδας για νέα σχεδίαση φίλτρου

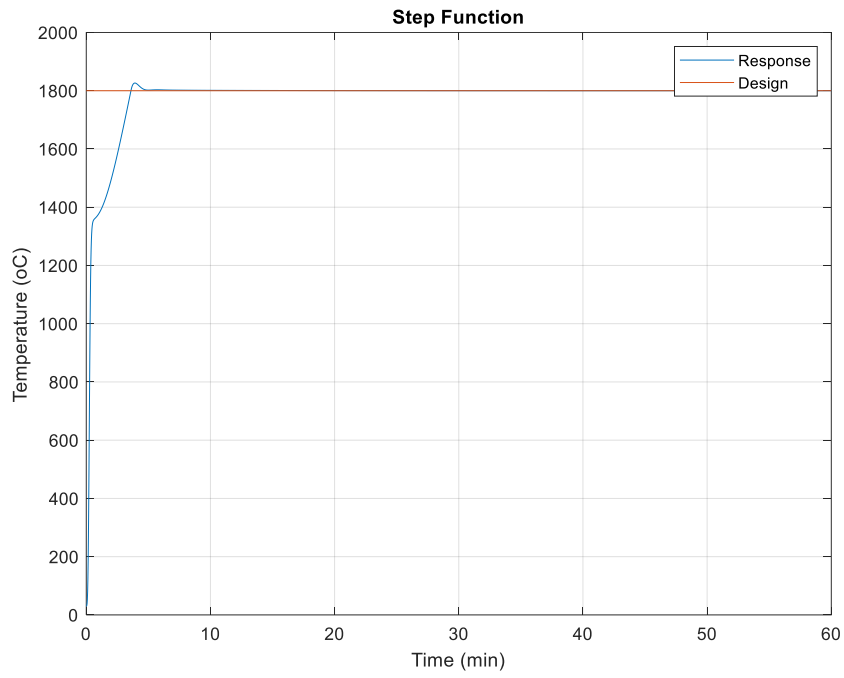


**Σχήμα 3.50** Ηλεκτρικό ρεύμα θερμαντικών στοιχείων για είσοδο συνάρτησης βαθμίδας για νέα σχεδίαση φίλτρου

Τέλος, για να εξαλειφθεί η μεγάλη υπερακόντιση που παρατηρείται έτσι κι αλλιώς και με το νέο φίλτρο και που όπως έχει αναλυθεί έχει αρνητικές συνέπειες για την θερμική κατεργασία του δοκιμίου εφαρμόζεται η εξής μέθοδος. Πριν την είσοδο στον PID, εισάγεται ένας ελεγκτής ο οποίος διαβάζει το καλιμπραρισμένο σφάλμα των θερμοκρασιών και εάν είναι αρνητικό, το πολλαπλασιάζει με έναν συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας. Με αυτόν τον τρόπο η αντίδραση του ελέγχου είναι πιο άμεση και η υπερακόντιση περιορίζεται. Στο Σχήμα 3.46 φαίνεται η θέση του ελεγκτή αυτού στο σύστημα και στο Σχήμα 3.47 η τελική απόκριση του δοκιμίου για είσοδο βαθμίδας.



**Σχήμα 3.51** Ελεγκτής για επιβολή ποινής σε περίπτωση αρνητικού σφάλματος



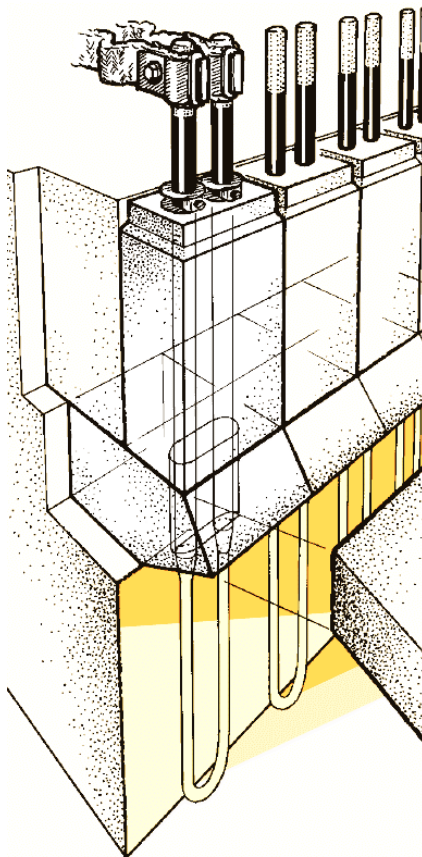
**Σχήμα 3.52 Τελική θερμοκρασιακή απόκριση δοκιμίου για είσοδο βαθμίδα**

## 4. Τελικός σχεδιασμός κλιβάνου

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ο σχεδιασμός καταλήγει στο εξής αποτέλεσμα. Ο κλιβανός θα αποτελείται από 12 αντιστάσεις KANTHAL SUPER 1900 4/9 με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.1.

KANTHAL SUPER 1900 4/9	
<i>Lu</i>	315 mm
<i>Le</i>	280 mm
<i>a</i>	25 mm
<i>e</i>	15 mm
<i>Pe</i>	917 W
<i>Ue</i>	13.2 V
<i>I</i>	69 A
<i>Rt</i>	0.192 Ω
<i>Te</i>	1850 °C

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά θερμαντικών στοιχείων

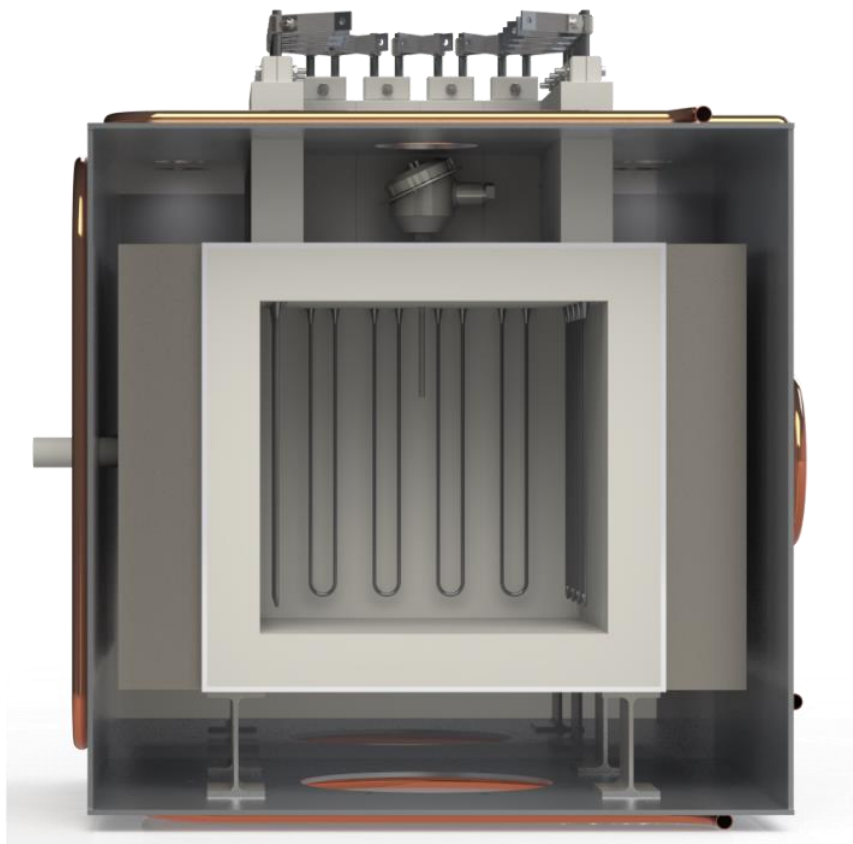


Σχήμα 4.1 Η διάταξη των θερμαντικών στοιχείων

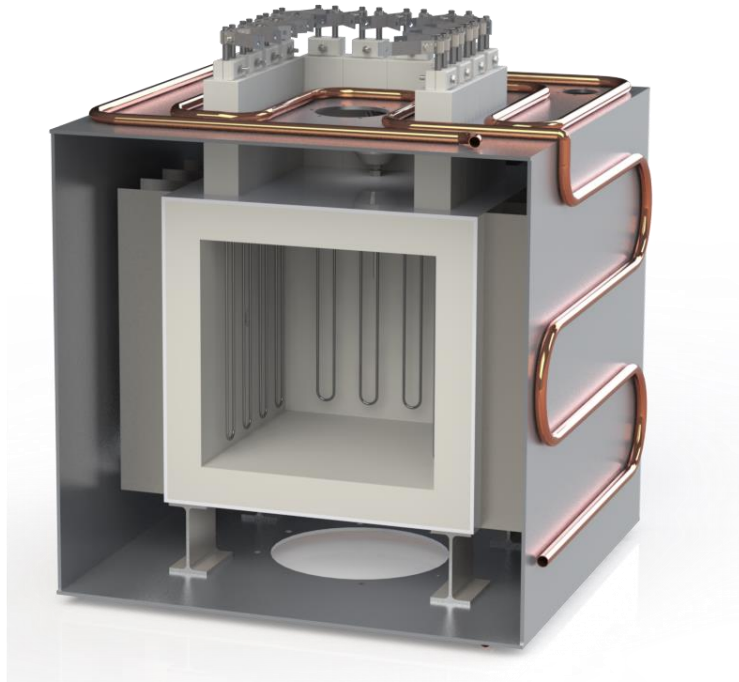
Η μόνωση θα αποτελείται από τέσσερα στρώματα, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.2 και 4.3:



- Την αλουμίνα, η οποία θα εξασφαλίζει σημαντική μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κλιβάνου, ώστε τα υπόλοιπα στρώματα να αντέχουν στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Να τονιστεί ότι το πάχος της στρώσης της αλούμινας επιλέγεται στα 50 mm και το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο παράρτημα Β.
- Τον χάλυβα, ο οποίος εξασφαλίζει την στιβαρότητα του κλιβάνου, με δεδομένο ότι το εσωτερικό στρώμα της αλούμινας είναι μειωμένης αντοχής. Το πάχος του στρώματος του χάλυβα ορίζεται στα 5 mm.
- Το κενό, το οποίο εξασφαλίζει μεγάλη θερμική αντίσταση στον φούρνο κατά την θέρμανση και χαμηλή θερμική αδράνεια κατά την ψύξη.
- Το περίβλημα του αλουμινίου, το οποίο έχει χαμηλό συντελεστή εκπομπής, ισχυροποιώντας την θερμική αντίσταση του κενού. Να σημειωθεί ότι οι λαμαρίνες του αλουμινίου χρειάζεται να συγκολληθούν σε όλη την διαδρομή των ακμών τους προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα αεροστεγές περίβλημα.



**Σχήμα 4.2 Η διάταξη σε μπροστινή όψη. Στο επάνω μέρος φαίνεται και η θέση του θερμοστοιχείου**



**Σχήμα 4.3 Η διάταξη με τις τέσσερις στρώσεις μόνωσης**

Στην εξωτερική πλευρά του αλουμινίου συγκολλούνται χάλκινοι σωλήνες 1/2'', οι οποίοι θα συνδεθούν με το δίκτυο ύδρευσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιθυμητή θερμοκρασία. Η διαδρομή που ακολουθεί ο σωλήνας, υποδεικνύεται στα μηχανολογικά σχέδια, ενώ από πλευρά σε πλευρά του αλουμινίου, οι σωλήνες ενώνονται με γωνίες Nibco 607 90<sup>0</sup>. Σημειώνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία στο περίβλημα του αλουμινίου θα είναι 43 °C, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Επιπλέον, για να υπάρχει αποδοτικότερη μετάδοση θερμότητας από το περίβλημα του αλουμινίου στους χάλκινους σωλήνες, γεμίζονται τα διάκενα που υπάρχουν μεταξύ τους με ειδική πάστα HTCP υψηλής αγωγιμότητας.

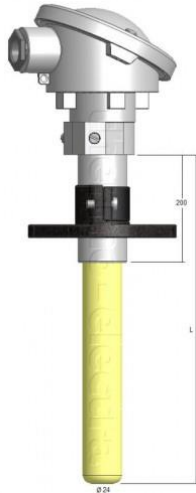
Για την ένωση του σωλήνα της πόρτας με τους υπόλοιπους σωλήνες απαιτείται εύκαμπτος σωλήνας PVC, προκειμένου να δίνεται ελευθερία κίνησης στην πόρτα. Επιπλέον, οι σφιγκτήρες ASF2012020 (Σχήμα 4.4) θα εξασφαλίσουν την σφιχτή συναρμογή του PVC σωλήνα με τα στηρίγματα Ftg x C – Wrot των αντίστοιχων χάλκινων. Το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο παράρτημα Β.



**Σχήμα 4.4 Σφιγκτήρες (hose clamps)**

Οι σωλήνες θα συνδεθούν με σφαιρικές βάνες SKU P029 1/2'', προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα ο κλίβανος να συνδεθεί ή να αποσυνδεθεί από το δίκτυο ύδρευσης με ευκολία.

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κλιβάνου επιλέχθηκε από την εταιρεία Thermo-Electra το θερμοστοιχείο HT 4060 - B - 250 - 0.5 - 710 (Σχήμα 4.5). Το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο παράρτημα Β.



**Σχήμα 4.5 Θερμοστοιχείο**

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την λειτουργία της θέρμανσης θα χρειαστεί μία αντλία κενού. Επιλέγεται η N880.3 AN.22 E αντλία κενού, λόγω της δυνατότητάς της να εξασφαλίσει στον συγκεκριμένο όγκο 0,01 bar. Ο χρόνος αποσυμπίεσης υπολογίζεται περί τα 25 min. Το τεχνικό φυλλάδιο της αντλίας επισυνάπτεται στο Παράρτημα Β.

Η αντλία κενού συνδέεται με το εσωτερικό του αλουμινίου με εύκαμπτους ανοξειδωτους αγωγούς KF-D8.

Επιπλέον, κατά την λειτουργία της ψύξης, χρειάζεται μία αντλία – φουσητήρας, η οποία θα εξασφαλίζει την απαιτούμενη ροή αέρα, προκειμένου να δημιουργηθεί εξαναγκασμένη συναγωγή, όπως μελετήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την συγκεκριμένη λειτουργία επιλέγεται ο φουσητήρας AXCBF 250 της εταιρείας Systemair, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6, η οποία έχει την επιθυμητή θερμική αντοχή και εξασφαλίζει την απαιτούμενη παροχή όγκου. Το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο Παράρτημα Β.

Να σημειωθεί ότι η είσοδος της παροχής αέρα είναι από το επάνω μέρος του κλιβάνου, ενώ η έξοδος από το κάτω μέρος. Ωστόσο, επειδή στο επάνω μέρος υπάρχουν οι αντιστάσεις και δεν θα έχουμε την επιθυμητή ροή αέρα στις πλευρές του κλιβάνου, η είσοδος γίνεται από τρεις οπές, ώστε να εξομαλυνθεί η κατανομή της ταχύτητας του αέρα.

Επίσης, η είσοδος από τις τρεις οπές και η έξοδος από τον φουσητήρα είναι αναγκαίο να κλείνουν αεροστεγώς, ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί το κενό. Επιλέγονται οι βαλβίδες DPA 250 για την έξοδο και D6250NL για την είσοδο.

Ακόμα, έχει προβλεφθεί η δυνατότητα εισαγωγής κάποιου αερίου κατά την έψηση και έχει εισαχθεί ένας σωλήνας από αλούμινα.

Κατά την λειτουργία του κλιβάνου χρειάζεται να εξασφαλιστεί η στεγανότητα των στρωμάτων που έρχονται σε επαφή με τον αέρα που βρίσκεται σε υποπίεση. Αυτό επιτυγχάνεται με συγκολλητικό μέσο χυτεύσιμης αλουμίνιας SALI Moldable, του οποίου το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο Παράρτημα Β.



**Σχήμα 4.6 Σύστημα ψύξης κλιβάνου**

Η πόρτα του κλιβάνου τίθεται ως προδιαγραφή να ανοίγει με τέτοιο τρόπο, ώστε το εσωτερικό του (θερμό) μέρος να μην έρχεται σε επαφή με τον χρήστη, αλλά ούτε και να ακτινοβολεί προς εκείνον. Υπήρξαν διάφορες ιδέες, όπως το να ανοίγει προς τα πάνω και παράλληλα προς τον χρήστη, αλλά, τελικά, επιλέγεται να ανοίγει προς τα δεξιά και παράλληλα προς τον χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



**Σχήμα 4.7 Η διάταξη του κλιβάνου με ανοικτή την πόρτα**

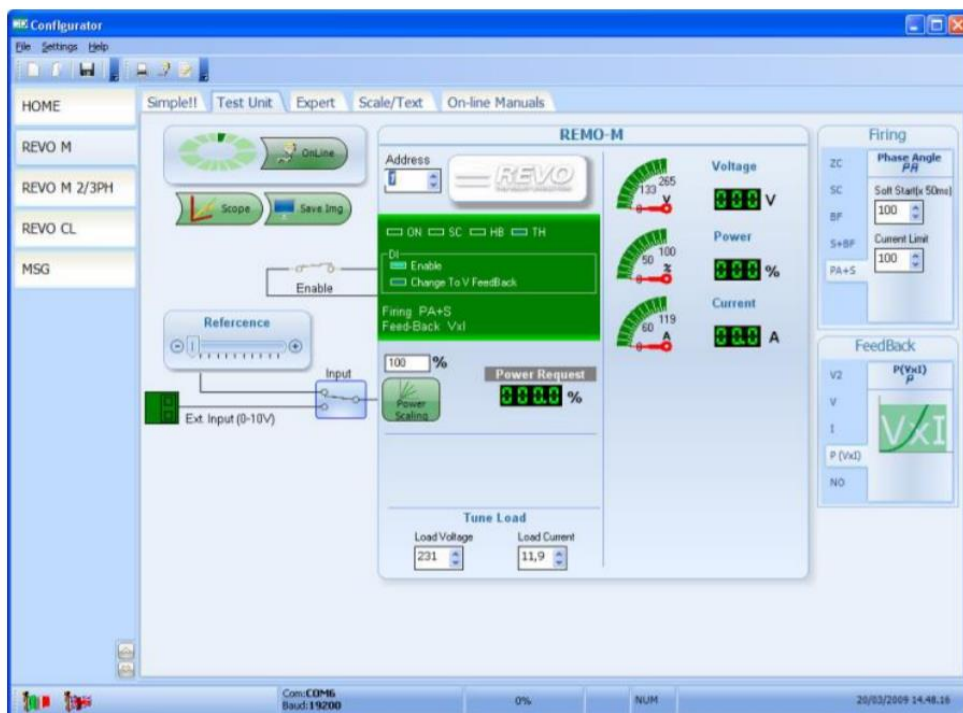
Επίσης, η πόρτα του κλιβάνου θα κλειδώνει αυτόματα κατά την έναρξη της λειτουργίας και θα ξεκλειδώνει μετά το πέρας αυτής, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του. Επιλέγεται το ηλεκτρονικό περιστρεφόμενο μάνδαλο R4-EM, του οποίου το τεχνικό φυλλάδιο επισυνάπτεται στο Παράρτημα Β.

Ακόμα, στο σχεδιασμό εισάγονται δύο πόρτες, οι οποίες θα δίνουν γρήγορη πρόσβαση στις αντλίες και στις ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις συντηρήσεις και τις επισκευές (Σχήμα 4.7) και οι οποίες θα κλειδώνουν με κλειδαριά MS220U, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.8.



**Σχήμα 4.8 Κλειδαριά για τις πόρτες πρόσβασης στις αντλίες και τις αντιστάσεις**

Στην διάταξη προστίθεται ένας υπολογιστής, ο οποίος θα λαμβάνει τα δεδομένα από το θερμοστοιχείο και θα ελέγχει τις αντιστάσεις, τις αντλίες και το κλείδωμα της πόρτας. Υπάρχουν έτοιμα λογισμικά του εμπορίου, τα οποία παρέχονται μαζί με τις αντιστάσεις και μπορούν να συντονίσουν τις παραπάνω λειτουργίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



**Σχήμα 4.9 Λογισμικό ελέγχου αντιστάσεων**

Θα υπάρχουν όμως και ένας πίνακας ελέγχου για τις βασικές λειτουργίες. Αυτές είναι η εκκίνηση του κλιβάνου και το σβήσιμο, η άμεση αποκοπή του κλιβάνου από το ηλεκτρολογικό δίκτυο (emergency button), οι λυχνίες ένδειξης κλειδώματος πόρτας και μία ένδειξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φούρνου (με μία LCD οθόνη). Η διάταξη του πίνακα ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



**Σχήμα 4.10 Πίνακας ελέγχου**

Τέλος, παρουσιάζεται η κοστολόγηση του σχεδιαζόμενου φούρνου στον Πίνακα 4.2. Όπως γίνεται φανερό εκεί, το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους του κλιβάνου (σχεδόν το 50%) οφείλεται στην τιμή της εσωτερικής μόνωσης από αλουμίνα. Έτσι, καταδεικνύεται και εδώ το πόσο ακριβή θα ήταν η κατασκευή ενός κλιβάνου με χρήση συμβατικής μόνωσης. Ο σχεδιαζόμενος κλιβανος καταφέρνει να κάνει εξοικονόμηση χρημάτων άνω του 50%, αφού οι κλιβανοι που υπάρχουν στην αγορά και έχουν τις ίδιες προδιαγραφές αγγίζουν τα 46,000 €.

Περιγραφή	Τιμή Μονάδας	Ποσότητα	Συνολικό κόστος
Εσωτερική μόνωση αλουμίνας	1,600.00 €	6	9,600.00 €
Σύστημα θερμοαντιστατικού στοιχείου (αντίστασης)	482.10 €	12	5,785.20 €
Εσωτερικές λαμαρίνες χάλυβα	2.98 €	6	17.85 €
Λαμαρίνες αλουμινίου περιβλήματος	10.00 €	6	60.00 €
Εξωτερικές λαμαρίνες χάλυβα	10.20 €	4	40.80 €
Δοκοί στήριξης	110.40 €	1	110.40 €
Σωλήνας ψύξης	35.00 €	1	35.00 €
Αντλία διαφράγματος κενού	1,917.00 €	1	1,917.00 €
Αντλία μέσης πίεσης	730.00 €	1	730.00 €
Butterfly valve είσοδος	439.00 €	1	439.00 €
Butterfly valve έξοδος	529.00 €	1	529.00 €
Σωλήνες ψύξης	40.00 €	1	40.00 €
Αναλώσιμα συστήματος ψύξης	35.00 €	1	35.00 €
Αυτόματο κλείδωμα πόρτας	31.00 €	2	62.00 €
Σύστημα διάδρασης και εισόδου δεδομένων	500.00 €	1	500.00 €
Λοιπά εκτιμώμενα έξοδα (π.χ. βίδες, αποστατικά κλπ.)	100.00 €	1	100.00 €
Διαμορφώσεις λαμαρινών			100.00 €
Συγκόλληση τεμαχίων			300.00 €
Συναρμολόγηση υποσυστημάτων			50.00 €
<b>Συνολικό κόστος</b>			<b>20,451.25 €</b>

**Πίνακας 4.2 Κοστολόγηση σχεδιαζόμενου κλιβάνου**



## 5. Συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν ο πλήρης σχεδιασμός ενός κλιβάνου υψηλών θερμοκρασιών για τη θερμική κατεργασία κυρίως κεραμικών υλικών, για τις ανάγκες του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών ΕΜΠ. Πέρα από τις βασικές λειτουργικές προδιαγραφές, βασικός στόχος του σχεδιασμού ήταν ο περιορισμός του κόστους μιας τέτοιας κατασκευής, το οποίο για κλιβάνους με τις απαιτούμενες προδιαγραφές είναι πολύ μεγάλο. Για το λόγο αυτό προτείνονται διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι θερμικής μόνωσης του κλιβάνου με γνώμονα τον προσδιορισμό ενός αποδεκτού συμβιβασμού μεταξύ απόδοσης και κόστους. Όλες οι μέθοδοι μελετώνται αναλυτικά ως προς τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας που συνεπάγεται η χρήση τους, τόσο για τη μόνιμη κατάσταση του κλιβάνου, όσο και για τις μη μόνιμες περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας κατά την θέρμανση και την ψύξη του δοκιμίου.

Αφού οι συμβατικοί τρόποι μόνωσης με τη χρήση συμπαγών τοιχωμάτων αλουμίνας αποδείχθηκαν εξαιρετικά κοστοβόροι, σχεδιάστηκε μια θερμική μόνωση που έχει ως κεντρικό σημείο τη χρήση περιβάλλοντος κενού εξωτερικά του εσωτερικού θαλάμου του κλιβάνου, έτσι ώστε να δυσχεραίνεται σημαντικά η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής. Για την αντιμετώπιση της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που συνεπάγεται μεγάλες θερμοκρασίες στο εξωτερικό του κλιβάνου, εγκαταστάθηκε ένα σύστημα ψύξης μέσω σωλήνων που διαρρέονται από νερό. Με αυτόν τον τρόπο, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του κλιβάνου και αποτελούν τα θερμαντικά στοιχεία του συστήματος μπορούν να αποδώσουν την απαραίτητη θερμότητα για την έψηση του δοκιμίου, χωρίς ταυτόχρονα να καταναλώνουν μεγάλη ισχύ για την κάλυψη των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Ταυτόχρονα, μελετήθηκαν τα μεταβατικά φαινόμενα της θέρμανσης και της ψύξης του κλιβάνου. Για το σύστημα ψύξης προτάθηκαν διάφορες λύσεις, με τη χρήση ρεύματος αέρα εξωτερικά της εσωτερικής μόνωσης με προσθήκη πτερυγίων στα τοιχώματά της να επικρατεί έναντι των υπολοίπων.

Τα αναλυτικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την διαστασιολόγηση του κλιβάνου συγκρίθηκαν και με αντίστοιχα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν στο υπολογιστικό πακέτο *Comsol Multiphysics* με τα αποτελέσματά τους να συμφωνούν ικανοποιητικά. Έτσι, έχοντας τον βασικό σχεδιασμό του κλιβάνου η κατασκευή ολοκληρώνεται με τον σχεδιασμό του συστήματος αυτομάτου ελέγχου, με την τελική χωροθέτηση των βασικών συστημάτων και την επιλογή των απαραίτητων περιφερειακών για τη λειτουργία τους.

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή παρουσιάζει όλη την πορεία σχεδιασμού ενός κλιβάνου υψηλών θερμοκρασιών. Ξεκινάει ορίζοντας τις λειτουργικές προδιαγραφές και μελετώντας τα βασικά φαινόμενα που αναμένεται να εμφανισθούν, προτείνει εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις και προχωράει στον αναλυτικό έλεγχό τους, επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα μέσω συνθετότερων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και τελικά καταλήγει σε μία ολοκληρωμένη κατασκευή, λαμβάνοντας υπόψιν επιπλέον συστήματα που χρειάζεται για τη λειτουργία της (π.χ. διάδραση με τον χειριστή). Στη πορεία αυτή του σχεδιασμού, σε κάποια σημεία δόθηκε περισσότερο έμφαση από ότι σε ορισμένα άλλα. Περισσότερη έμφαση δόθηκε στην μοντελοποίηση και την ανάλυση των φαινομένων θερμότητας που λαμβάνουν χώρα στον κλιβάνο και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργικότητά του, στον υπολογισμό των αντιστάσεων και του συστήματος ψύξης, που υλοποιούν τις βασικές λειτουργίες του και στον σχεδιασμό κάποιων βασικών υποσυστημάτων του, όπως η πόρτα του κλιβάνου, η βάση του και η χωροθέτηση των σωλήνων ψύξης. Σε μελλοντική επανεξέταση του θέματος θα μπορούσαν να μελετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος το σύστημα διάδρασης του κλιβάνου με το χειριστή του, το ηλεκτρονικό του κύκλωμα, η γεωμετρία των χρησιμοποιούμενων πτερυγίων και ορισμένες συνιστώσες του συστήματος ψύξης, όπως η διασφάλιση του πλήρους σφραγίσματος των βαλβίδων.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Wu, H. et al, Characterization of thermal cross-talk in a MEMS-based thermopile detector array, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19. 074022. 10.1088/0960-1317/19/7/074022.
- [2] A. F. Mills, *Heat and Mass Transfer*, IRWIN, USA, 1995
- [3] Στέγγου-Σαγιά Α., Σαγιά Ζ., *Μετάδοση Θερμότητας*, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2016
- [4] Isidoro Martinez, *Radiative View Factors*, Available in:  
<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/tc3/Radiation%20View%20factors.pdf>
- [5] ARIAS-MAYA, LUZ STELLA. *FREE AND CONSTRAINED SINTERING OF 3-MOL % YTTRIA STABILISED ZIRCONIA*. *Dyna rev.fac.nac.minas*, 2014, vol.81, no.183, pp.158-167.
- [6] Khan, Sabah. (2015). Evaluation of the Effective Thermal Properties and Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced by Ceramic Particles. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 5. 2884 - 2897.
- [7] Παντελής Δ., *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, 2<sup>η</sup> έκδοση, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008
- [8] Surendranathan, A. O. (2014). *An introduction to ceramics and refractories*. CRC Press.
- [9] Atkinson A.: Diffusion in ceramics, pp. 295-337 in Swain M. (vol. ed.): *Structure and Properties of Ceramics* = *Materials Science and Technology – Volume 11* (Cahn R.W., Haasen P., Kramer E.J., series eds.). Wiley-VCH, Weinheim 2005.
- [10] De Jonghe L. C. and Rahaman M. N.: Sintering of ceramics, pp. 187-264 in Somiya S., Aldinger F., Claussen N., Spriggs R. M., Uchino K., Koumoto K. and Kaneno K. (eds.): *Handbook of Advanced Ceramics Volume I: Materials Science*. Elsevier Academic Press, Amsterdam 2003.
- [11] German R. M., Messing G. L. and Cornwall R. G. (eds.): *Sintering Technology*. Marcel Dekker, New York 1996.
- [12] Rahaman M. N.: *Ceramic Processing and Sintering* (second edition). Marcel Dekker, New York 2003.
- [13] Bengisu M.: *Engineering Ceramics*. Springer, Berlin 2001
- [14] Ondik H. M. and McMurdie H. F. (eds.): *Phase Diagrams for Zirconium and Zirconia Systems*. The American Ceramic Society, Westerville 1998.

## Παράρτημα Α

Κώδικας υπολογισμού θερμικού κύκλου θέρμανσης-ψύξης με ρεύμα αέρα

```
clearvars -except T1 T2 Tn
%% Parameters

s=5.67e-8;      % Stefan-Boltzman constant
Ar=85390e-6;   % Heating Elements Total Area
Vr=8.538e-5;   % Heating Elements Volume
densr=6500;    % Heating Element Density
cpr=420;       % Heating Element Capacity (cp)
er=0.75;       % Heating Element Emissivity (ε)
W=300e-3;      % Inside cubic chamber edge
Aii=W^2;       % Inner Chamber Cross Section Area

%% Natural Convection Coefficients

hra=2;         % Heating element to air (natural)
hai=2;         % Air to Alumina Insulation (natural)
hiv=3;         % Alumina Insulation to Vaccum (natural)
hvw=3.5;       % Vaccum to Aluminium (natural)
hwa=6.7;       % Aluminium to Air (natural)
hout=6;        % Outside Wall (generally) to Air (natural)

%% Alumina insulation

Li=0.05;       % Thickness
ki=0.4;        % Thermal conductivity
ei=0.4;        % Emissivity
densi=440;     % Density
cpi=900;       % Thermal capacity

Aio=(W+2*Li)^2; % Outer Surface Area (Single face)
Fi=SF_cond(Aii,Li); % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
Acond_i=Fi*Li;  % Equivalent Area for 1D modelling of the 3D
conduction problem

%% Steel insulation

Ls=0.005;
ks=15;
es=0.8;

%% Vaccum insulation

kv=0.015;      % Thermal Conductivity
Lv=0.1;        % Thickness

Avi=Aio;       % Inner Surface Area (Single face)
Avo=(sqrt(Avi)+2*Lv)^2; % Outer Surface Area (Single face)
Aconv_iv=6*Avi; % Total Area for Convection between Alumina and
Vaccum
```

```

Fv=SF_cond(Avi,Lv);      % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
Acond_v=Fv*Lv;          % Equivalent Area for 1D modelling of the 3D
conduction problem

Aconv_vw=6*Avo;         % Total Area for Convection between Vaccum and
outside wall

%% Outside wall

ew=0.04;      % Emissivity
kw=200;       % Thermal Conductivity
Lw=0.005;     % Thickness
densw=2700;  % Density
cpw=910;     % Thermal Capacity

% ew=0.075;   % Emissivity
% kw=15;      % Thermal Conductivity
% Lw=0.001;   % Thickness

Awi=Avo;      % Inner Surface Area (Single face)
Awo=(sqrt(Awi)+2*Lw)^2; % Outer Surface Area (Single face)

Frad=SF_rad2(Avi,Avo); % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
% Different expressions for emissivity
erad=[1/(1/ew+1/es-1) (es+ew)/2 0 (es+ew)/2 (es+ew)/2 (es+ew)/2 0 0 0 0 0
0];
% erad=[1/(1/ew+1/ei-1) 1/(1/ew+1/ei-1) 0 1/(1/ew+1/ei-1) 1/(1/ew+1/ei-1)
1/(1/ew+1/ei-1) 0 0 0 0 0 0];
% erad=ei;
% eiw=sum(s.*Frad.*erad);
% eiw=s*es;
eiw=s*1/(1/ew+1/es-1); % Radiation coefficient for Simulink model
% Different Definitions of Radiation Area
Arad_iw=6*Avi;
Arad_iwi=6*Avi;
Arad_iwo=6*Awi;

%% Finite Elements

dt=0.01;      % Time step
ndx=8;        % Number of Alumina Insulation divisions
dx=Li/ndx;    % Size of each division

%% Air properties

uoo=3;        % Air velocity
Too=25+273;  % Initial Temperature

%% Testiment

Dt=0.08;     % Diameter
Lt=0.06;     % Length

%% Simulation

```

```

Ttot=6*3600; % Total time of Simulation
Tcold=3*3600; % Time that Cooling starts
Tr=1870+273; % Maximum Temperature of Heating Elements
Tw=30+273; % Constant Temperature of Outside Wall
T=zeros(Ttot/dt+1,ndx+4)+30+273;% Initialisation of Temperatures' matrix
T(:,ndx+3)=Tw; % Temperatures of Outside Wall
q=zeros(Ttot/dt+1,ndx+3); % Initialisation of Heat flux matrix

V=13.2; % Heating Elements Voltage
R=0.2; % Heating Elements Resistance
Qr=V^2/R; % Heat flux caused by Joule's phenomenon at each Heating
Element

% Definition of Conduction Area of each Alumina finite element
Ai=zeros(ndx-1,1);
Fi=zeros(ndx-1,1);
Ai(1)=(sqrt(Aii)+dx)^2;
Fi(1)=SF_cond(Ai(1),dx);
Acond_i(1)=Fi(1)*dx;
for j=2:ndx-1
    Ai(j)=(sqrt(Ai(j-1))+dx)^2;
    Fi(j)=SF_cond(Ai(j),dx);
    Acond_i(j)=Fi(j)*dx;
end

ti=2; % Counter

for t=dt:dt:Ttot
    q(ti,1)=er*Ar*s*(T(ti-1,1)^4-T(ti-1,2)^4); % Radiation from Heating
Elements to Inner Wall (Insulation)
    qm=12*Qr-q(ti,1); % Heat flux balance at Heating Elements
    T(ti,1)=T(ti-1,1)+qm/(densr*Vr*cpr)*dt; % New Temperature - Heating
Elements
    % Heating Elements' Temperature becomes constant when maximum
    if T(ti,1)>Tr && t<Tcold
        T(ti,1)=Tr;
    end
    % While cooling the Heating Elements are Swithed off
    if t>=Tcold
        Qr=0;
    % T(ti-1,ndx+2)=5;
    end
    % Conduction inside Alumina Insulation
    for j=1:ndx-1
        q(ti,j+1)=ki*Acond_i(j)/dx*(T(ti-1,j+1)-T(ti-1,j+2)); %
Conduction between Elements
        qm=q(ti,j)-q(ti,j+1); % Heat flux balance at each element
        T(ti,j+1)=T(ti-1,j+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(j)*dx*cpi); % New
Temperature - Alumina Elements
    end

    if t<Tcold || T(ti-1,ndx+4)>1000+273
        %% Heating

```

```

        q(ti,ndx+1)=eiw*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4); %
Radiation heat flux Insulation to Inner outside wall
        q(ti,ndx+2)=hiv*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)-T(ti-1,ndx+2)); % Convection
Heat flux from insulation to vaccum
        q(ti,ndx+3)=hvw*6*Av0*(T(ti-1,ndx+2)-T(ti-1,ndx+3)); % Convection
Heat flux from vaccum to outside wall
        qm=q(ti,ndx+2)-q(ti,ndx+3); % Heat flux balance at vaccum
        T(ti,ndx+2)=T(ti-1,ndx+2)+qm*dt/(10*(Awi^(3/2)-Aio^(3/2))*1000);
% New Temperature - Vaccum
        qm=q(ti,ndx)-q(ti,ndx+1)-q(ti,ndx+2); % Heat flux balance at
outer insulation element
        T(ti,ndx+1)=T(ti-1,ndx+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(end)*dx*cpi); % New
Temperature - Outer insulation element
    else
        %% Cooling
        Tf=(T(ti-1,ndx+1)+Too)/2;
        visca = (9.71e-09.*Tf.^3 - 2.71e-05.*Tf.^2 + 4.80e-02.*Tf +
1.71e+01)*1e-6;
        va = (-1.72E-08.*Tf.^3 + 8.78E-05.*Tf.^2 + 8.89E-02.*Tf +
1.33E+01)*1e-6;
        densa = -6.93E-15.*Tf.^5 + 2.14E-11.*Tf.^4 - 2.50E-08.*Tf.^3 +
1.44E-05.*Tf.^2 - 4.84E-03.*Tf + 1.30E+00;
        cpa = (-3.67E-08.*Tf.^2 + 2.14E-04.*Tf + 9.96E-01)*1000;
        ka = (-1.63E-05.*Tf.^2 + 7.30E-02.*Tf + 2.41E+01)/1000;

        L=sqrt(Aio);
        ReL=uoo*L/va;
        Pr=visca*cpa/ka;

        Num = 0.664*Pr^(1/3)*ReL^(1/2);

        viscoo=(9.71e-09.*Too.^3 - 2.71e-05.*Too.^2 + 4.80e-02.*Too +
1.71e+01)*1e-6;
        viscs=(9.71e-09.*T(ti-1,ndx+1).^3 - 2.71e-05.*T(ti-1,ndx+1).^2 +
4.80e-02.*T(ti-1,ndx+1) + 1.71e+01)*1e-6;
        cpoo=(-3.67E-08.*Too.^2 + 2.14E-04.*Too + 9.96E-01)*1000;
        koo = -1.63E-05.*Too.^2 + 7.30E-02.*Too + 2.41E+01;
        Proo=viscoo*cpoo/koo;

        hm(ti)=Num*ka/L;

        hm(ti)=10.45-uoo+10*uoo^(1/2);

        q(ti,ndx+1)=eiw*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4); %
Radiation heat flux Insulation to Inner outside wall
        q(ti,ndx+2)=hm(ti)*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)-Too); % Forced Convection
Heat flux from insulation to air
        qm=q(ti,ndx)-q(ti,ndx+1)-q(ti,ndx+2); % Heat flux balance at
outer insulation element
        T(ti,ndx+1)=T(ti-1,ndx+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(end)*dx*cpi); % New
Temperature - Outer insulation element
    end

    if T(ti,1)>T(ti,end)

```

```

        qsp1(ti)=er*Ar/2*s*(T(ti,1)^4-T(ti-1,ndx+4)^4); % Radiation Heat
flux from Heating Elements to Testiment
    else
        qsp1(ti)=0;
    end
    % Radiation Heat flux from inner insulation wall to Testiment or
    % reversely
    if T(ti,2)>T(ti-1,ndx+4)
        qsp2(ti)=ei*6*Aii*s*(T(ti,2)^4-T(ti-1,ndx+4)^4);
        test(ti)=0;
    else
        qsp2(ti)=ei*(pi*Dt*Lt+pi*Dt^2/4)*s*(T(ti,2)^4-T(ti-1,ndx+4)^4);
        test(ti)=1;
    end
    qm=qsp1(ti)+qsp2(ti); % Heat flux balance at testiment
    T(ti,ndx+4)=T(ti-1,ndx+4)+qm*dt/(densi*pi*Dt^2/4*Lt*cpi); % New
Temperature - Testiment
    time(ti)=t; % Time matrix
    ti=ti+1;
end
figure(1)
plot(time/3600,T1(:,end)-273,'b')
hold on
plot(time/3600,Tn(:,end)-273,'k')
plot(time/3600,T(:,end)-273,'r')
% title('Thermal Cycle')
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Temperature (oC)')
legend('Natural Convection - Testiment','Forced Convection - Inside
Furnace', 'Forced Convection - Outside Furnace')
grid on
hold off
% hold on
% plot(time/3600,T(:,3)-273)
% plot(time/3600,T(:,4)-273)
% hold off
figure(2)
% plot(time/3600,hm)
% title('Thermal convection coefficient')
% figure(3)
% plot(time/3600,test)
% title('Re*Pr')
plot(time/3600,q(:,1))
% title('Heat flux losses')
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Heat flux (W)')
grid on

figure(3)
plot(time/3600,T(:,1)-273,'b')
hold on
plot(time/3600,T(:,end)-273,'r')
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Temperature (oC)')
legend('Heating Elements', 'Testiment')
grid on

```

```

figure(4)
plot(time/3600,T(:,2)-273)
hold on
for i=2:ndx
    plot(time/3600,T(:,i+1)-273)
end
hold off
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Temperature (oC)')
legend('Element No 1','Element No 2','Element No 3','Element No
4','Element No 5','Element No 6','Element No 7','Element No 8')
grid on

```

```
T2=T;
```

Κώδικας υπολογισμού θερμικού κύκλου θέρμανσης-ψύξης με ρεύμα αέρα παρουσία πτερυγίων

```

clearvars -except T1 T2 Tn
%% Parameters

s=5.67e-8;      % Stefan-Boltzman constant
Ar=85390e-6;   % Heating Elements Total Area
Vr=8.538e-5;   % Heating Elements Volume
densr=6500;    % Heating Element Density
cpr=420;       % Heating Element Capacity (cp)
er=0.75;       % Heating Element Emissivity (ε)
W=300e-3;      % Inside cubic chamber edge
Aii=W^2;       % Inner Chamber Cross Section Area

%% Natural Convection Coefficients

hra=2;         % Heating element to air (natural)
hai=2;         % Air to Alumina Insulation (natural)
hiv=3;         % Alumina Insulation to Vaccum (natural)
hvw=3.5;       % Vaccum to Aluminium (natural)
hwa=6.7;       % Aluminium to Air (natural)
hout=6;        % Outside Wall (generally) to Air (natural)

%% Alumina insulation

Li=0.05;       % Thickness
ki=0.4;        % Thermal conductivity
ei=0.4;        % Emissivity
densi=440;     % Density
cpi=900;       % Thermal capacity

Aio=(W+2*Li)^2; % Outer Surface Area (Single face)
Fi=SF_cond(Aii,Li); % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
Acond_i=Fi*Li;  % Equivalent Area for 1D modelling of the 3D
conduction problem

```



```

%% Steel insulation
Ls=0.005;
ks=15;
es=0.8;
denss=7800;
cps=510;

%% Vaccum insulation

kv=0.015;    % Thermal Conductivity
Lv=0.1;      % Thickness

Avi=Aio;          % Inner Surface Area (Single face)
Avo=(sqrt(Avi)+2*Lv)^2; % Outer Surface Area (Single face)
Aconv_iv=6*Avi;   % Total Area for Convection between Alumina and
Vaccum

Fv=SF_cond(Avi,Lv); % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
Acond_v=Fv*Lv;     % Equivalent Area for 1D modelling of the 3D
conduction problem

Aconv_vw=6*Avo;   % Total Area for Convection between Vaccum and
outside wall

%% Outside wall

ew=0.04;    % Emissivity
kw=200;     % Thermal Conductivity
Lw=0.005;   % Thickness
densw=2700; % Density
cpw=910;    % Thermal Capacity

% ew=0.075;    % Emissivity
% kw=15;       % Thermal Conductivity
% Lw=0.001;    % Thickness

Awi=Avo;          % Inner Surface Area (Single face)
Awo=(sqrt(Awi)+2*Lw)^2; % Outer Surface Area (Single face)

Frad=SF_rad2(Avi,Avo); % Factor compensating 3D structures (edges etc.)
% Different expressions for emissivity
erad=[1/(1/ew+1/es-1) (es+ew)/2 0 (es+ew)/2 (es+ew)/2 (es+ew)/2 0 0 0 0 0
0];
% erad=[1/(1/ew+1/ei-1) 1/(1/ew+1/ei-1) 0 1/(1/ew+1/ei-1) 1/(1/ew+1/ei-1)
1/(1/ew+1/ei-1) 0 0 0 0 0 0];
% erad=ei;
% eiw=sum(s.*Frad.*erad);
% eiw=s*es;
eiw=s*1/(1/ew+1/es-1); % Radiation coefficient for Simulink model
% Different Definitions of Radiation Area
Arad_iw=6*Avi;
Arad_iwi=6*Avi;
Arad_iwo=6*Awi;

```

```

%% Finite Elements

dt=0.01;      % Time step
ndx=8;        % Number of Alumina Insulation divisions
dx=Li/ndx;    % Size of each division

%% Air properties

uoo=3;        % Air velocity
Too=25+273;   % Initial Temperature

%% Fins
nofA=5;
nof=4*nofA;
Lfin=W+2*Li;
zfin=0.02;
hfin=Lv-zfin;
tfin=0.001;

Pfin=2*Lfin+2*tfin;
Afin=Lfin*tfin;

kfin=ks;
efin=es*s;
densfin=denss;
cpfin=cps;

Wrad=sqrt(Aio);
Lrad=Wrad/(nofA-1)-tfin;

H=Lv;
W1=Wrad;
W2=Lrad;

x=W1/H;
y=W2/H;
x1=sqrt(1+x^2);
y1=sqrt(1+y^2);
F12iw=1/(pi*x*y)*(log(x1^2*y1^2/(x1^2+y1^2-1))+2*x*(y1*atan(x/y1)-
atan(x))+2*y*(x1*(atan(y/x1))-atan(y)));

H=hfin;
W=Lrad;
L=Wrad;

h=H/L;
w=W/L;

a=(1+h^2)*(1+w^2)/(1+h^2+w^2);
b=w^2*(1+h^2+w^2)/(1+w^2)/(h^2+w^2);
c=h^2*(1+h^2+w^2)/(1+h^2)/(h^2+w^2);
F12if=1/(pi*w)*(h*atan(1/h)+w*atan(1/w)-
(h^2+w^2)^(1/2)*atan(1/(h^2+w^2)^(1/2))+1/4*log(a*b^(w^2)*c^(h^2)));

% x(1)=zfin;

```

```

% ksi(1)=0;
% x(2)=Lv;
% ksi(2)=Lrad;
% y(1)=0;
% h(1)=0;
% y(2)=Lfin;
% h(2)=Lfin;
% A1=(x(2)-x(1))*(y(2)-y(1));
% sum=0;
% for l=1:2
%     for k=1:2
%         for j=1:2
%             for i=1:2
%                 C=sqrt(x(i)^2+ksi(1)^2);
%                 D=(y(j)-h(k))/C^2;
%                 B=(y(j)-h(k))*C*atan(D)-C^2/4*(1-D^2)*log(C^2*(1+D^2));
%                 sum=sum+(-1)^(i+j+k+1)*B;
%             end
%         end
%     end
% end
% F12fw=1/2/pi/A1*sum;
% F12fw=F12if*0.9;

```

```

H=Lrad;
W=Lv;
L=Wrad;

```

```

h=H/L;
w=W/L;

```

```

a=(1+h^2)*(1+w^2)/(1+h^2+w^2);
b=w^2*(1+h^2+w^2)/(1+w^2)/(h^2+w^2);
c=h^2*(1+h^2+w^2)/(1+h^2)/(h^2+w^2);
F12a=1/(pi*w)*(h*atan(1/h)+w*atan(1/w)-
(h^2+w^2)^(1/2)*atan(1/(h^2+w^2)^(1/2))+1/4*log(a*b^(w^2)*c^(h^2)));

```

```

H=zfin;
W=Lv;
L=Wrad;

```

```

h=H/L;
w=W/L;

```

```

a=(1+h^2)*(1+w^2)/(1+h^2+w^2);
b=w^2*(1+h^2+w^2)/(1+w^2)/(h^2+w^2);
c=h^2*(1+h^2+w^2)/(1+h^2)/(h^2+w^2);
F12b=1/(pi*w)*(h*atan(1/h)+w*atan(1/w)-
(h^2+w^2)^(1/2)*atan(1/(h^2+w^2)^(1/2))+1/4*log(a*b^(w^2)*c^(h^2)));

```

```

F12fw=(F12a-F12b)/5;

```

```

%% Testiment

```

```

Dt=0.08;    % Diameter

```

```

Lt=0.06;      % Length

%% Simulation

Ttot=6*3600;      % Total time of Simulation
Tcold=3*3600;    % Time that Cooling starts
Tr=1870+273;    % Maximum Temperature of Heating Elements
Tw=30+273;      % Constant Temperature of Outside Wall
T=zeros(Ttot/dt+1,ndx+5)+30+273;% Initialisation of Temperatures' matrix
T(:,ndx+3)=Tw;   % Temperatures of Outside Wall
q=zeros(Ttot/dt+1,ndx+5); % Initialisation of Heat flux matrix
qrad2=zeros(Ttot/dt+1,1); % Initialisation of Heat flux matrix
qrad2test=zeros(Ttot/dt+1,1);
qrad3=zeros(Ttot/dt+1,1);
qrad4=zeros(Ttot/dt+1,1);

V=13.2; % Heating Elements Voltage
R=0.2; % Heating Elements Resistance
Qr=V^2/R; % Heat flux caused by Joule's phenomenon at each Heating
Element

% Definition of Conduction Area of each Alumina finite element
Ai=zeros(ndx-1,1);
Fi=zeros(ndx-1,1);
Ai(1)=(sqrt(Aii)+dx)^2;
Fi(1)=SF_cond(Ai(1),dx);
Acond_i(1)=Fi(1)*dx;
for j=2:ndx-1
    Ai(j)=(sqrt(Ai(j-1))+dx)^2;
    Fi(j)=SF_cond(Ai(j),dx);
    Acond_i(j)=Fi(j)*dx;
end

ti=2; % Counter

for t=dt:dt:Ttot
    q(ti,1)=er*Ar*s*(T(ti-1,1)^4-T(ti-1,2)^4); % Radiation from Heating
Elements to Inner Wall (Insulation)
    qm=12*Qr-q(ti,1); % Heat flux balance at Heating Elements
    T(ti,1)=T(ti-1,1)+qm/(densr*Vr*cpr)*dt; % New Temperature - Heating
Elements
    % Heating Elements' Temperature becomes constant when maximum
    if T(ti,1)>Tr && t<Tcold
        T(ti,1)=Tr;
    end
    % While cooling the Heating Elements are Swithed off
    if t>=Tcold
        Qr=0;
    %
        T(ti-1,ndx+2)=5;
    end
    % Conduction inside Alumina Insulation
    for j=1:ndx-1
        q(ti,j+1)=ki*Acond_i(j)/dx*(T(ti-1,j+1)-T(ti-1,j+2)); %
Conduction between Elements
        qm=q(ti,j)-q(ti,j+1); % Heat flux balance at each element
    end
end

```

```

        T(ti,j+1)=T(ti-1,j+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(j)*dx*cpi); % New
Temperature - Alumina Elements
    end

    if t<Tcold %|| T(ti-1,end)>1000+273
        %% Heating
        grad1(ti)=eiw*2*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4); %
Radiation heat flux Insulation to Inner outside wall
%
        grad2test(ti)=eiw*4*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4);
        grad2(ti)=eiw*4*(nofA-1)*Lrad*Wrad*F12iw*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-
1,ndx+3)^4);
        grad3(ti)=2*4*(nofA-1)*s*es*Lrad*Wrad*F12if*(T(ti-1,ndx+1)^4-
T(ti-1,ndx+4)^4);
        q(ti,ndx+1)=grad1(ti)+grad2(ti)+grad3(ti);
        q(ti,ndx+2)=hiv*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)-T(ti-1,ndx+2)); % Convection
Heat flux from insulation to vaccum
        q(ti,ndx+3)=nof*kfin*Afin/hfin*(T(ti-1,ndx+1)-T(ti-1,ndx+4));
        qm=q(ti,ndx)-q(ti,ndx+1)-q(ti,ndx+2)-q(ti,ndx+3); % Heat flux
balance at outer insulation element
        T(ti,ndx+1)=T(ti-1,ndx+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(end)*dx*cpi); % New
Temperature - Outer insulation element

        qfinconv(ti)=hiv*nof*2*hfin*Lfin*(T(ti-1,ndx+4)-T(ti-1,ndx+2));
        grad4(ti)=2*nof*efin*Lfin*hfin*F12fw*(T(ti-1,ndx+4)^4-T(ti-
1,ndx+3)^4);
        qm=q(ti,ndx+3)+grad3(ti)-qfinconv(ti)-grad4(ti);
        T(ti,ndx+4)=T(ti-
1,ndx+4)+qm*dt/(nof*densfin*Lfin*tfin*hfin*cpfin);

        q(ti,ndx+4)=hvw*6*Av0*(T(ti-1,ndx+2)-T(ti-1,ndx+3)); % Convection
Heat flux from vaccum to outside wall
        qm=q(ti,ndx+2)+qfinconv(ti)-q(ti,ndx+4); % Heat flux balance at
vaccum
        T(ti,ndx+2)=T(ti-1,ndx+2)+qm*dt/(10*(Awi^(3/2)-Aio^(3/2))*1000);
% New Temperature - Vaccum

    else
        %% Cooling
        Tf=(T(ti-1,ndx+1)+Too)/2;
        visca = (9.71e-09.*Tf.^3 - 2.71e-05.*Tf.^2 + 4.80e-02.*Tf +
1.71e+01)*1e-6;
        va =( -1.72E-08.*Tf.^3 + 8.78E-05.*Tf.^2 + 8.89E-02.*Tf +
1.33E+01)*1e-6;
        densa = -6.93E-15.*Tf.^5 + 2.14E-11.*Tf.^4 - 2.50E-08.*Tf.^3 +
1.44E-05.*Tf.^2 - 4.84E-03.*Tf + 1.30E+00;
        cpa = (-3.67E-08.*Tf.^2 + 2.14E-04.*Tf + 9.96E-01)*1000;
        ka = (-1.63E-05.*Tf.^2 + 7.30E-02.*Tf + 2.41E+01)/1000;

        L=sqrt(Aio);
        ReL=uoo*L/va;
        Pr=visca*cpa/ka;

        Num = 0.664*Pr^(1/3)*ReL^(1/2);

```

```

        viscoo=(9.71e-09.*Too.^3 - 2.71e-05.*Too.^2 + 4.80e-02.*Too +
1.71e+01)*1e-6;
        viscs=(9.71e-09.*T(ti-1,ndx+1).^3 - 2.71e-05.*T(ti-1,ndx+1).^2 +
4.80e-02.*T(ti-1,ndx+1) + 1.71e+01)*1e-6;
        cpoo=(-3.67E-08.*Too.^2 + 2.14E-04.*Too + 9.96E-01)*1000;
        koo = -1.63E-05.*Too.^2 + 7.30E-02.*Too + 2.41E+01;
        Proo=viscoo*cpoo/koo;

        hm(ti)=Num*ka/L;

        hm(ti)=10.45-uoo+10*uoo^(1/2);

        grad1(ti)=eiw*2*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4); %
Radiation heat flux Insulation to Inner outside wall
        %
        grad2test(ti)=eiw*4*Aio*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-1,ndx+3)^4);
        grad2(ti)=eiw*4*(nofA-1)*Lrad*Wrad*F12iw*(T(ti-1,ndx+1)^4-T(ti-
1,ndx+3)^4);
        grad3(ti)=2*4*(nofA-1)*s*es*Lrad*Wrad*F12if*(T(ti-1,ndx+1)^4-
T(ti-1,ndx+4)^4);
        q(ti,ndx+1)=grad1(ti)+grad2(ti)+grad3(ti);
        q(ti,ndx+2)=hm(ti)*6*Aio*(T(ti-1,ndx+1)-Too); % Convection Heat
flux from insulation to vaccum
        q(ti,ndx+3)=nof*kfin*Afin/hfin*(T(ti-1,ndx+1)-T(ti-1,ndx+4));
        qm=q(ti,ndx)-q(ti,ndx+1)-q(ti,ndx+2)-q(ti,ndx+3); % Heat flux
balance at outer insulation element
        T(ti,ndx+1)=T(ti-1,ndx+1)+qm*dt/(densi*6*Ai(end)*dx*cpi); % New
Temperature - Outer insulation element

        qfinconv(ti)=hm(ti)*nof*2*hfin*Lfin*(T(ti-1,ndx+4)-Too);
        grad4(ti)=2*nof*efin*Lfin*hfin*F12fw*(T(ti-1,ndx+4)^4-T(ti-
1,ndx+3)^4);
        qm=q(ti,ndx+3)+grad3(ti)-qfinconv(ti)-grad4(ti);
        T(ti,ndx+4)=T(ti-
1,ndx+4)+qm*dt/(nof*densfin*Lfin*tfin*hfin*cpfin);
        end

        if T(ti,1)>T(ti,end)
            qsp1=er*Ar/2*s*(T(ti,1)^4-T(ti-1,end)^4); % Radiation Heat flux
from Heating Elements to Testiment
        else
            qsp1=0;
        end
        % Radiation Heat flux from inner insulation wall to Testiment or
% reversely
        if T(ti,2)>T(ti-1,end)
            qsp2=ei*6*Aii*s*(T(ti,2)^4-T(ti-1,end)^4);
            test(ti)=0;
        else
            qsp2=ei*(pi*Dt*Lt+pi*Dt^2/4)*s*(T(ti,2)^4-T(ti-1,end)^4);
            test(ti)=1;
        end
        qm=qsp1+qsp2; % Heat flux balance at testiment
        T(ti,end)=T(ti-1,end)+qm*dt/(densi*3e-4*cpi); % New Temperature -
Testiment
        time(ti)=t; % Time matrix

```

```

    ti=ti+1;
end
figure(1)
plot(time/3600,T1(:,end)-273,'b')
hold on
plot(time/3600,Tn(:,end)-273,'k')
plot(time/3600,T2(:,end)-273,'r')
plot(time/3600,T(:,end)-273,'Color','[0.2 0.6 0.14]')
% title('Thermal Cycle')
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Temperature (oC)')
legend('Natural Convection - Testiment', 'Forced Convection - Inside
Furnace', 'Forced Convection - Outside Furnace', 'Forced Convection -
Fins')
grid on
hold off
% hold on
% plot(time/3600,T(:,3)-273)
% plot(time/3600,T(:,4)-273)
% hold off
figure(2)
% plot(time/3600,hm)
% title('Thermal convection coefficient')
% figure(3)
% plot(time/3600,test)
% title('Re*Pr')
plot(time/3600,q(:,1))
title('Heat flux losses')
xlabel('Time (hrs)')
ylabel('Heat flux (W)')
grid on

% figure(3)
% plot(time/3600,qrad2(:),'r')
% hold on
% plot(time/3600,qrad2test(:),'b')
% plot(time/3600,qrad3(:),'k')
% hold off
%
% figure(4)
% plot(time/3600,T(:,ndx+4)-273)

```

## Παράρτημα Β